

Band 17

2018

SWISS TUNNEL CONGRESS

Fachtagung
für Untertagbau

Kolloquium

13. Juni 2018
in Luzern

Kongress

14. Juni 2018
in Luzern

SWISS TUNNEL CONGRESS 2018



FGU Fachgruppe für Untertagbau
GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains
GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo
STS Swiss Tunnelling Society

Organizing Committee

Stefan Maurhofer, Dipl. Ing.	President Swiss Tunnelling Society
Martin Bosshard, Dipl. Ing.	Past President Swiss Tunnelling Society
Stefan Moser, Dr. sc. techn., Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Congress
Adrian Müller, Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Congress
Matthias Neuenschwander, Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Congress
Richard Kocherhans, Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Kolloquium
Eric Carrera, Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Kolloquium, STSym
Ornella Ebel	Secretariat
Viktor Gjorgjiev	Secretariat

Advisory Board

Martin Bosshard	Chairman, STS
Gérard Seingre	STS
Miguel Fernández-Bollo Martínez	AETOS
Robert Galler, Prof. Dr.	ITA Austria
Roland Leucker, Dr.	STUVA/DAUB
Giuseppe Lunardi	SIG
Jean Philippe	AFTES

SWISS TUNNEL CONGRESS 2018

Fachtagung für Untertagbau

13. + 14. Juni 2018

© 2018 FGU Fachgruppe für Untertagbau



FGU Fachgruppe für Untertagbau
GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains
GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo
STS Swiss Tunnelling Society

Herstellung/Konzeption: Marvin Klostermeier, Rebekka Bude, Karla Knitter, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh/DE

Fachlektorat: Martin Rauer

Druckvorstufe: Mohn Media Mohndruck GmbH, Gütersloh/DE

Druck: Bösmann Medien und Druck GmbH & Co. KG, Detmold/DE

Auflage: 850 Exemplare

ISBN 978-3-033-06643-4

Swiss Tunnel Congress 2018 – Fachtagung für Untertagbau

Umschlagfoto: Basler & Hofmann AG, Noë Flum, mit Genehmigung Implen AG

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie, CD-ROM usw.), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das Übersetzen, sind vorbehalten.



FGU Fachgruppe für Untertagbau
GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains
GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo
STS Swiss Tunnelling Society

Kongress

6	Maurhofer, Stefan	Vorwort • Preface
10	Röthlisberger, Jürg	Dichtestress im Tunnelbau – Herausforderungen für die Zukunft <i>High Density of Underground Constructions – Challenges for the Future</i>
20	Massignani, Sergio	A2-Sanierungstunnel Belchen Konzept und Erfahrung bei gleichzeitigem TBM-Vortrieb und Innenausbau <i>A2 Belchen Refurbishment Tunnel Concept and Experience in Simultaneous TBM Drive and Interior Construction</i>
36	Biaggio, Guido Kumpusch, Valentina	2. Röhre Gotthardtunnel – Projektübersicht und ausgewählte Themen <i>The Second Gotthard Tunnel Tube – Project Overview and Selected Topics</i>
48	Herdina, Johann	Projekt Gemeinschaftskraftwerk Inn Grenzüberschreitende technische und vertragliche Herausforderungen <i>The GKI Hydroelectric Power Plant Project on the River Inn Technical and Contractual Challenges across an International Border</i>
58	Irgartinger, Stefan Pixley, Daniel Aeschbach, Markus	Lötschberg-Basistunnel Herausforderungen beim Ausbau eines der längsten Eisenbahntunnel der Welt <i>The Lötschberg Base Tunnel The Challenges When Further Completing One of the Longest Railway Tunnels in the World</i>
70	Rengshausen, Rainer	Erfahrungen beim Bau der Metro Doha Green Line mit dem Vertragsmodell «Design-Build plus Provisional Sums» <i>Experience Gained in the Construction of the Metro Doha Green Line with the “Design-Build Plus Provisional Sums” Contract Model</i>
86	Witschi, Tobias Ferrari, Alessandro	Tunnel de Champel – Erfahrungen aus 1,6 km Lockergesteinsvortrieb unter der Stadt Genf <i>Tunnel de Champel – Experience from 1.6 km Tunnelling in Soil beneath the City of Geneva</i>
98	Deschamps, Nicolas	Le Grand Paris Express – Essais d’étanchement et étude de la géothermie <i>The Grand Paris Express – Soil Permeability Reduction Techniques and Study of Geothermal Energy</i>
112	Aeberli, Martin	Erkenntnisse aus dem Vortrieb des Eppenbergtunnels Einblicke in den Vortrieb mit einer Mixschildtunnelbohrmaschine <i>Findings from the Eppenbergtunnel TBM Drive Insights into Tunnelling with a Mixshield Tunnel Boring Machine</i>
124	Spring, Daniel	Ausbau RBS-Bahnhof Bern Projektentwicklung bis heute und Herausforderungen aus Sicht des Bauherrn <i>RBS Bern Station Expansion Project Development To Date and Challenges from the Client’s Perspective</i>
138	Erzinger, Oliver	Neuer Doppelspurtunnel Bözberg – Erfahrungen aus dem Lockergesteins- und Felsvortrieb <i>The New Bözberg Twin-Track Tunnel – Experiences of Tunnelling Through Loose Rock and Bedrock</i>
150	Di Paola, Fabrizio Paolo Romani, Eliano	Underground Line C in Rome: The Downtown Section

162	Parisi, Maria Elena Brino, Lorenzo Chabert, Alain	Il Tunnel di Base del Moncenisio: bilancio del test di scavo con fresa nel Cunicolo Esplorativo de La Maddalena di Chiomonte L’opera preliminare <i>The Moncenisio Base Tunnel: Results of the Excavation Test Using a Tunnel Boring Machine (TBM) in the Maddalena di Chiomonte Exploratory Tunnel The Preliminary Work</i>
176	Ganzmann, Jürgen Holstein, Uwe	Neubau Albulatunnel II Erneuerung des Herzstückes der Albulalinie <i>Construction of New Albula Tunnel II Renewing the Heart of the Albula Line</i>
188	Zurlo, Raffaele Fuoco, Stefano Marini, David	Open and Shielded TBM Excavation for BBT First Experiences in Using TBM in Different Rock Mass Conditions Along the Brenner Base Tunnel

Kolloquium

Abdichtung und Entwässerung im Untertagbau
Sealing and Drainage in Underground Construction

200	Fonyo, Balazs	Dichtigkeit von Tunnelbauwerken – Theorie und Praxis <i>Impermeability of Tunnels – Theory and Practice</i>
214	Keller, Martin Haase, Oliver	Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau – Theorie und Praxiserfahrung <i>Use of Plastic Sealing Materials in Tunnel Construction – Theory and Practical Experience</i>
224	Winter, Angela Malva, Oscar	Abdichtungssysteme des Weinbergtunnels – SBB-Durchmesserlinie Zürich <i>Sealing Systems in the Weinberg Tunnel – The Zurich Cross Rail</i>
236	Insam, Romed Carrera, Eric Crapp, Remo	Das Entwässerungssystem des Brenner-Basistunnels Randbedingungen für die Ausbildung des Entwässerungssystems am Brenner-Basistunnel auf der österreichischen Projektseite <i>The Brenner Base Tunnel Drainage System Brenner Base Tunnel Drainage System Design Boundary Conditions on the Austrian Side of the Project</i>
250	Wegmüller, Marcel Christian	Vom Umgang mit Versinterungen in Entwässerungssystemen <i>Dealing with Scaling in Draining Systems</i>
262	Gruber, Thomas	Rohrmaterial für Tunnelentwässerungen Kunststoffrohre – die flexible Lösung <i>Pipe Material for Tunnel Draining Systems Plastic Pipes – the Flexible Solution</i>
274	Hufschmied, Peter	Nutzung von Tunnelabwasser im Tropenhaus Frutigen <i>Utilisation of Tunnel Groundwater in Tropenhaus Frutigen</i>





Vorwort • Preface

Stefan Maurhofer

Präsident der Fachgruppe
für Untertagbau

President of the Swiss
Tunnelling Society

Der Swiss Tunnel Congress (STC) 2018 wird vom 13. bis 15. Juni zum 17. Mal durchgeführt, dieses Jahr wiederum im eindrücklichen Konzertsaal des Kultur- und Kongresszentrums Luzern. Mit Stolz blicken wir auf die erfolgreichen Kongresse der letzten Jahre zurück, welche auf nationaler wie auch internationaler Ebene grosse Anerkennung gefunden haben. So wird auch dieses Jahr der STC in seiner bewährten Form mit Kolloquium, Kongress, Ausstellung, Abendveranstaltungen und Exkursionen stattfinden. Der STC ist eine bedeutende Plattform für Bauherren, Planer, Ingenieure, Unternehmer und die Industrie, um Neuigkeiten über ausgewählte Tunnelprojekte aus dem In- und Ausland aus erster Hand zu erfahren. Am STC treffen wir zudem Freunde und Bekannte oder bauen neue Netzwerke auf – ein Pflichttermin für alle Tunnelbauer!

In der Schweiz werden aktuell viele grosse Tunnelbauwerke, wie zum Beispiel der Eppenbergr-, Bözbergr-, Albula-, Gubrist- und Belchentunnel sowie die CEVA in Genf, realisiert, und sie sind teilweise bereits durchschlänglich. Eine Vielzahl von Projekten steht in der Planungsphase und ist auf dem Weg, die politischen und juristischen Hürden anzugehen. Da die Entscheidungswege immer komplexer werden, ist eine Abschätzung des gesicherten künftigen Bauvolumens schwierig. Allerdings ist die Schweizer Untertagbau-Branche mit ihrem umfangreichen Know-how, ihrer Erfahrung und ihrer Flexibilität für diese unruhigen Zeiten sehr gut gerüstet.

Der Titel des diesjährigen Swiss Tunnel Kolloquiums am Mittwochnachmittag lautet «Abdichtung und Entwässerung im Untertagbau». Wasser war und ist das entscheidende Element beim Bau und Betrieb von Tunneln. Tunnelbauwerke werden für eine Lebensdauer von über 100 Jahren erstellt. Massgebend für die Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke sind die Einflüsse des Bergwassers. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die eingebauten Abdichtungs- und Entwässerungssysteme. Rückblickend wird über die Erfahrungen

The 17th edition of the Swiss Tunnel Congress (STC) will be held from 13 to 15 June 2018 in the spectacular concert hall at the Lucerne Culture and Convention Centre. We look back with pride on the successful Congresses of the past few years, which have enjoyed national and international recognition. The STC will take place with this tried-and-tested format again this year, with the Colloquium, Congress, exhibition, evening events and excursions. The STC is an important platform for clients, designers, engineers, contractors and the industry to learn first-hand of new developments in selected tunnel projects both domestically and abroad, and is celebrated far beyond the borders of this country. At the STC we also meet friends and acquaintances and make new connections – it's a must for all tunnellers!

In Switzerland, work on a number of large tunnel structures is under way, such as the Eppenbergr, Bözbergr, Albula, Gubrist and Belchen tunnels and the CEVA in Geneva, and some are already cut through. Many projects are still in the design phase and on track to tackle political and legal obstacles. As the decision-making paths are increasingly complex, estimating guaranteed future construction volumes is difficult. However, the Swiss underground construction industry is excellently equipped for these uncertain times thanks to its extensive expertise, its experience and its flexibility.

The title of this year's Swiss Tunnel Colloquium on Wednesday afternoon is 'Waterproofing and Drainage in Underground Construction'. Water is still the crucial element in tunnel construction and operation. Tunnel structures are built for a lifespan of over 100 years. The impact of groundwater is key to the serviceability of structures. As such, the demands on installed waterproofing and drainage systems are high. There will be a look back at experiences with waterproofing systems in the Zurich SBB Durchmesserlinie project. Drainage through the exploratory tunnel

mit den Abdichtungssystemen an der SBB-Durchmesserlinie Zürich berichtet. Anhand des aktuell in der Realisierung befindlichen Brenner-Basistunnels wird über die Drainage über dem Erkundungsstollen informiert. Bergwasser schädigt und muss ferngehalten oder gefasst werden. Es kann aber auch genutzt werden: Das Tropenhaus Frutigen nutzt das Bergwasser des Lötschberg-Basistunnels auf mannigfaltige Weise. Lassen wir uns in die Tropen entführen!

Neu wurde das Kolloquium zusammen mit den STS young members (STSym) unter der Vorgabe organisiert, dass ein Teil der Referenten unter 35 Jahre alt ist. Das diesjährige Kolloquium steht also ganz im Zeichen der Förderung ambitionierter junger Tunnelbauerinnen und -bauer. Die 2016 gegründete Organisation der STSym wächst stetig, und ihre Aktivitäten finden grossen Anklang bei den jungen Mitgliedern. Als Präsident freue ich diese Entwicklung ausserordentlich, und ich bin überzeugt, dass die Zukunft des Schweizer Untertagbaus damit auf dem richtigen Weg ist.

Wieder ist es uns in Zusammenarbeit mit dem STC Advisory Board gelungen, für den Kongressstag ein interessantes Programm zusammenzustellen. Eine ausgewogene Palette an Schweizer Tunnelbauprojekten und internationalen Tunnelbauprojekten, mehrheitlich mit Beteiligung von Schweizer Know-how, garantiert einen spannenden fachtechnischen Erfahrungsaustausch. Im Zentrum stehen dieses Jahr Projekte, welche sich in der Bauausführung befinden. Seit einigen Jahren verfolgen wir beim STC gezielt die Entwicklung einiger Schweizer Grossprojekte und berichten abwechselnd aus Sicht der Bauherrschaft, der Planer und der Unternehmer. Wir sind daher gespannt, von den jüngsten Fortschritten der Tunnel Eppenbergr, Bözbergr, Albula II und Champel sowie des Sanierungstunnels Belchen zu hören. Die Planung der Projekte «Zweite Röhre Gotthard-Strassentunnel», «Ausbau Lötschberg-Basistunnel» und «Ausbau Bahnhof Bern RBS» sind für den Schweizer Untertagbaumarkt von grossem Interesse. Europäische Jahrhundertprojekte wie der Brenner-Basistunnel, der Tunnel Euralpin Lyon Turin und Grand Paris bilden weitere Highlights des Kongresses. Mit der Metro Doha und der Metro Roma Linea C3 erleben wir zudem zwei Beiträge mit ganz speziellen technischen Herausforderungen.

Der Direktor des Bundesamts für Strassen (ASTRA), Jürg Röthlisberger, wird das Einführungsreferat zum Thema «Dichtstress im Tunnelbau» halten. Wir freuen uns auf seine Ausführungen.

Ein einleitendes Wort zum STC wäre jedoch niemals vollständig, ohne den Dank an die Organisatoren, die Referenten und die Aussteller zu richten. Ein besonderer Dank gebührt unseren treuen Sponsoren, ohne die es keinen STC gäbe.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und angeregte Diskussionen sowie spannende Begegnungen beim Kongress.

Stefan Maurhofer, Präsident

will be examined in light of the Brenner base tunnel project, which is currently under way. Groundwater is harmful and must be captured or kept at bay. A use can be found for it, however: the Tropenhaus Frutigen uses groundwater from the Lötschberg Base Tunnel in all kinds of ways. Let's take a trip to the tropics!

This year, the Colloquium collaborated with the STS young members (STSym), with the aim of ensuring some of those presenting were under 35 years old. Supporting ambitious young tunnellers is therefore at the heart of this year's Colloquium. The STSym organisation, founded in 2016, is growing constantly, and its activities are truly striking a chord with young members. As President, I am absolutely delighted with this development, and I am convinced that this puts the future of Swiss underground construction on the right path.

Once again we have managed to put together a fascinating programme for the Congress day, in collaboration with the STC Advisory Board. A balanced blend of Swiss and international tunnelling projects, mostly involving Swiss expertise, is sure to make for a fascinating exchange of technical experiences. This year the focus is on projects which are in construction. For several years, we have been following the development of several major Swiss projects at the STC and report back from the alternating perspectives of the client, designer and contractor. We are therefore looking forward to hearing about the latest developments in the Eppenbergr, Bözbergr, Albula II and Champel tunnels and the Belchen refurbishment tunnel. The design of the 'Gotthard road tunnel second tunnel', 'Lötschberg base tunnel expansion' and 'RBS Berne railway station expansion' projects is of major interest to the Swiss underground construction industry. European projects of the century such as the Brenner base tunnel, the Euralpin Lyon Turin tunnel and Grand Paris are additional highlights of the Congress. With contributions on the Doha Metro and Rome Metro Line C, we will hear about two projects posing very specific technical challenges.

The Director of the Swiss Federal Roads Office (FEDRO), Jürg Röthlisberger, will give the introductory presentation, 'Tunnel vision: are we building too many?'. We look forward to hearing from him.

An introduction to the STC, however, would not be complete without thanking to the organisers, the presenters and the exhibitors. We would like to extend a very special thank you to our loyal sponsors, without whom there would be no STC.

I hope you will enjoy stimulating discussions and exciting meetings at the Congress. Happy reading!

Stefan Maurhofer, President

Hauptsponsoren • Main Sponsors

 AF TOSCANO AF TOSCANO AG, Zürich	 Emch+Berger Emch+Berger AG, Bern
 AMBERG GROUP Amberg Engineering AG Amberg Loglay AG Amberg Technologies AG VersuchsStollen Hagerbach AG	 Frutiger Frutiger AG, Thun
 Arma Spez Schweiz Armaspez Schweiz AG, Balsthal	 GÄHLER PARTNER INTEGRIERTE BAUPLANUNG Gähler und Partner AG, Ennetbaden
 avesco TEC SANDVIK Avesco AG, Langenthal	 Gasser Gasser Felstechnik AG, Lungern
 B+S INGENIEURE UND PLANER B+S AG, Bern	 gruner stucky a Gruner company Gruner AG, Basel Stucky AG, Renens
 BASF We create chemistry BASF Schweiz AG, Holderbank	 HEITKAMP Construction Swiss GmbH Heitkamp Construction Swiss GmbH, Dierikon
 Basler & Hofmann Basler & Hofmann AG, Zürich	 HERRENKNECHT Tunnelling Systems Herrenknecht AG, Schwanau (DE)
 belloli rowa TUNNELLING LOGISTICS Belloli SA, Grono Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ	 Holcim Holcim (Schweiz) AG, Zürich
 BG BG Ingénieurs Conseils SA BG Ingenieure und Berater AG, Lausanne	 ILF CONSULTING ENGINEERS ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich
 CSC IMPRESA COSTRUZIONI SA BAUUNTERNEHMUNG AG ENTREPRISE DE CONSTRUCTIONS SA CSC Impresa Costruzioni SA, Lugano	 Implenia Implenia Schweiz AG, Wallisellen

 INFRA TUNNEL Infra Tunnel SA, Marin	 PINI SWISS Pini Swiss Engineers, Zürich - Lugano
 IM Engineering IUB Engineering IM Maggia Engineering AG, Locarno IUB Engineering AG, Bern	 DORR PORR Suisse AG, Altdorf
 jura cement Jura-Cement-Fabriken AG, Wildeggen	 Rothpletz Lienhard Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Aarau
 Lombardi Lombardi AG, Minusio, Luzern, Fribourg	 SABAG Stahlcenter/Centre acier SABAG Biel/Bienne Stahlcenter
 Marti Technik AG SIMATEC Marti Technik AG, Moosseedorf Simatec Maschinenbau AG, Horw	 SFS SFS unimarket AG, Heerbrugg
 Marti Tunnel Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf	 Sika BUILDING TRUST Sika Schweiz AG, Zürich
 MÜHLHAUSER your partner under ground Mühlhäuser GmbH, Freienbach	 WALO Walo Bertschinger Walo Bertschinger AG, Dietikon 1

Co-Sponsoren • Co-Sponsors

A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG, Basel	FiReP International AG, Rapperswil	Promat AG, Rickenbach Sulz
ACO Passavant AG, Netstal	Gerbas GmbH, Ibach	Rascor International AG, Steinmaur
Agir Aggregat AG, Affoltern am Albis	GIPO AG, Seedorf	Robert Aebi AG, Regensdorf
Allianz Suisse, Wallisellen	Häny AG, Jona	Saint-Gobain Weber AG, Baden-Dättwil
Bekaert Maccaferri Underground Solutions, Aalst (BE)	HECO-Schrauben GmbH & Co. KG, Schramberg (DE)	Société Suisse des Explosifs (SSE), Brig
Doka Schweiz AG, Niederhasli	JAUSLIN STEBLER AG, Muttenz	Sterobit AG, Birmensdorf
Dörken AG, Arlesheim	Liebherr-Baumaschinen AG, Reiden	Technoform srl. c/ G Murer Consult AG, Luzern
EBP Schweiz AG, Zurich	Locher Ingenieure AG, Zurich	T-Mix, Saint Quentin Fallavier (FR)
Elkuch Bator AG, Herzogenbuchsee	MAPEI SUISSE SA, Sorens	WEBAC-Chemie GmbH, Barsbüttel (DE)
Epiroc MEYCO AG, Studen BE	MEVA Schalungs-Systeme AG, Seon	Wibatec AG, Malters

Jürg Röthlisberger, Dipl. Ing. ETH, Direktor Bundesamt für Strassen, Ittigen/CH

Dichtestress im Tunnelbau

Herausforderungen für die Zukunft

Verkehrsinfrastrukturen sind nicht alles. Aber ohne verfügbare, sichere, verträgliche und bezahlbare Verkehrsinfrastrukturen ist alles nichts. Das ist die Kurzformel der Bedeutung der Verkehrsinfrastrukturen für Wirtschaft und Gesellschaft, für Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit eines Landes. Die Schweiz steht hier traditionell recht gut da, kommt aber nicht darum herum, jetzt die nötigen Impulse zu setzen, um die künftigen Entwicklungen aufzunehmen und abzubilden. Der Verkehrswegebau bewegt sich bereits heute an der Grenze des noch Realisierbaren, und Politik, Wirtschaft, Forschung und Verwaltung sind gefordert.

High Density of Underground Constructions

Challenges for the Future

Transport infrastructures are not the be all and end all, but without available, reliable, accessible and affordable traffic infrastructures we cannot live either. This is a basic summary of what traffic infrastructures mean for the economy and society, as well as for national prosperity and international competitiveness. Traditionally, Switzerland is in a fairly good position in this regard. However, we cannot avoid the fact that now is the time to set the wheels in motion, embracing and plotting out the course for future developments. Road construction is already at the edge of its feasible limits and politicians, economists, researchers and the authorities now need to play their part.

Die Schweiz ist nicht nur die wettbewerbsfähigste [1], sondern auch die innovativste [2] Nation der Welt – und beides unangefochten schon seit mehreren Jahren. Diese beiden Eigenschaften sind zwar äusserst erfreulich, sie sind aber gleichzeitig unabdingbar, wenn es darum geht, die Herausforderungen der Zukunft zu meistern. Aus diesem Grund werden wir weiterhin gefordert sein, sowohl unsere Wettbewerbsfähigkeit als auch unsere Innovationskraft zu stärken und zu fördern.

Neben Kriterien wie dem Zugang zu Bildung, Arbeitsmarktregulierung oder finanzierbarem Kapital haben wir mit unseren leistungsfähigen Verkehrsinfrastrukturen ein weiteres wichtiges tragendes Fundament der Wettbewerbsfähigkeit. Denn auch hier ist unser Land gut aufgestellt: Heute verfügt die Schweiz über rund 72 000 Kilometer Strassen und gut 5 000 Kilometer Schiene. Entsprechend der Topographie und der Zahlungsbereitschaft gilt die Schweiz zudem als Tunnelland. Alleine das Nationalstrassennetz hat rund 270 Tunnelbauwerke mit rund 450 einzelnen Röhren.

Der motorisierte Individualverkehr ist ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor und ein zuverlässiger Indikator für Wohlstand und Prosperität eines Landes. Er bietet Zehntausende von Lehrstellen und Arbeitsplätzen. Zudem leistet er drei Viertel aller Personenkilometer. Knapp ein Fünftel erfolgt mit

Switzerland is not only the most competitive nation in the world [1], it is also the most innovative [2] – facts that have remained unchallenged for several years. And while it is true that both qualities are extremely encouraging, they are at the same time indispensable when it comes to mastering the challenges of the future. For this reason, we will continue to remain vigilant in promoting and strengthening both our competitiveness and our innovative ability.

Alongside criteria such as access to training, labour market regulation and financially-affordable capital, our efficient transport infrastructures are an additional, important element of our competitive ability. Our country is in a pretty good position here, too: In Switzerland today there are more than around 72,000 kilometres of roads and a good 5,000 kilometres of railways. Fittingly for its topography and payment reserves, Switzerland is also a land of tunnels. The national road network includes over 270 tunnel facilities with around 450 individual tubes.

Motorised private transport is an essential economic factor and a reliable indicator of a country's wealth and prosperity. It offers tens of thousands of apprenticeships and jobs and also accounts for three quarters of all passenger kilometres. Just shy of one fifth are accounted for by public transport (16% on the railways, 3% on the roads) and the remain-

Densité élevée d'ouvrages souterrains

Défis à venir dans le secteur de la construction de tunnels

Selon toutes les prévisions, la densité de population déjà élevée en Suisse continuera de s'accroître fortement dans les années à venir; le nombre de résidents, plus de 8 millions actuellement, dépassera les 10 millions en 2045. Cette croissance se manifesterá en premier lieu là où la densité est déjà la plus importante aujourd'hui, à savoir dans les villes et les agglomérations. En conséquence, le secteur des transports va continuer de se développer, avec une croissance d'environ 50% dans les transports publics, de près de 30% pour la mobilité douce et d'approximativement 20% pour le trafic individuel motorisé. Cette évolution nécessite d'une part le développement ciblé des moyens de transport routier et ferroviaire. D'autre part, il sera impératif de résoudre la question d'une utilisation plus efficace des infrastructures et des solutions existantes. En effet, la densité des infrastructures des différents modes de transport – avec un nombre de tunnels particulièrement important en Suisse – est aujourd'hui déjà très élevée dans les secteurs qui seront concernés par cette croissance, alors que l'espace y est limité pour créer des infrastructures et des solutions supplémentaires. De plus, les coûts d'investissement, ainsi que les coûts de maintenance et d'exploitation associés, déjà très importants, continueront d'augmenter, car seules des constructions (souterraines) extrêmement coûteuses seront encore réalisables dans les espaces restreints. Les responsables sont ainsi tenus d'exploiter à court terme tous les atouts potentiels qu'offrent l'économie numérique et l'électrification des systèmes de propulsion; les constructeurs d'infrastructures, quant à eux, devront réduire les coûts de réalisation et d'exploitation pour tous les types d'innovations pour que dans l'avenir, les transports publics et individuels restent accessibles à la majorité de la population. Par ailleurs, de nouveaux modèles de financement devront être mis en œuvre à moyen terme pour les moyens de transport terrestre, puisque le financement actuel par les taxes sur les carburants est voué à disparaître.

dem öffentlichen Verkehr (16% auf der Schiene, 3% auf der Strasse), und die restlichen 6% sind Langsamverkehr. Die Bedeutung der Nationalstrassen für den motorisierten Individualverkehr ist enorm. Obwohl das Nationalstrassennetz mit einer Gesamtlänge von knapp 2000 Kilometern nur 2,5% des gesamten Strassennetzes beträgt, werden darauf 43% des gesamten Individualverkehrs abgewickelt.

Entsprechend der Nachfrage bzw. dem Verkehrsverhalten seiner Nutzerinnen und Nutzer zeigen die 440 Anschlussbauwerke den Charakter und den hauptsächlichlichen Zweck

Alta densità nella costruzione di gallerie

Le sfide del futuro

Stando alle previsioni la densità demografica in Svizzera continuerà ad aumentare notevolmente nei prossimi anni, con una crescita della popolazione residente dagli attuali 8 a oltre 10 milioni nel 2045. Da considerare, inoltre, che tale espansione si concentrerà nelle città e negli agglomerati, dove già oggi si registrano le punte massime, e a sua volta determinerà un ulteriore incremento della circolazione, stimato attorno al 50% per il trasporto pubblico, al 30% per la mobilità lenta e al 20% nel traffico motorizzato privato. Questo scenario da un lato implica un potenziamento mirato dei sistemi di trasporto su gomma e rotaia mentre dall'altro rende inevitabile un utilizzo più efficiente delle infrastrutture e dei servizi esistenti. Infatti la presenza di strutture trasportistiche, e in particolare di gallerie in Svizzera, già oggi si concentra notevolmente proprio nelle zone più interessate dalla crescita pronosticata, mentre gli spazi a disposizione per nuovi progetti sono limitati. Aumenteranno ulteriormente anche i costi di investimento e, di conseguenza, quelli di esercizio e manutenzione, che già oggi viaggiano su livelli elevati, poiché di fronte a spazi limitati non vi è altra scelta che intervenire con opere (sotterranee) molto complesse.

Per ridisegnare la mobilità di domani gli addetti ai lavori dovranno quindi sfruttare rapidamente le potenzialità legate alla digitalizzazione e alla trazione elettrica. Per quanto riguarda la costruzione di infrastrutture, occorrerà puntare su innovazioni di ogni tipo in modo da poter ridurre i costi di realizzazione e manutenzione, se si vuole continuare a garantire l'efficienza del sistema di trasporto pubblico e privato e la sua finanziabilità a prezzi accessibili per ampie fasce della popolazione. Infine, a medio termine per i trasporti terrestri si dovranno studiare nuovi modelli di finanziamento in grado di compensare la perdita delle entrate da accise sui carburanti.

ing 6% are non-motorised. The importance of the national roads for motorised private transport is huge. Although the national road network with its total length of almost 2,000 kilometres only amounts to 2.5% of the entire road network, it carries 43% of the total private transport.

In keeping with demand and reflecting the transport behaviours of its users, the 440 connecting structures demonstrate the character and primary purpose of the national road network: they are the drainage systems for the cities and agglomerations; in fact, they are one "cohesive bypass".

des Nationalstrassennetzes: Sie sind das Drainagesystem der Städte und Agglomerationen, eigentlich eine «zusammenhängende Ortsumfahrung». In allen Regionen ist der Anteil des Durchgangsverkehrs – gerade in den Verkehrsspitzen an Werktagen – von untergeordneter Bedeutung. Mit rund 80% ist der Anteil an Ziel-/Quell- und Binnenverkehr überragend. Das heisst, dass sich leistungsfähige Autobahnen und ebensolche Strasseninfrastrukturen in den Agglomerationen gegenseitig bedingen. Die verschiedenen Strassenhierarchien sind für den geordneten und effizienten Ablauf des Verkehrs aufeinander angewiesen; die eine kann ohne die andere Hierarchie nicht funktionieren. Wenn beispielsweise Städte und Agglomerationen in den Morgenspitzen den Verkehr der Hochleistungsstrassen nicht abnehmen können oder zunehmend nicht mehr abnehmen wollen, bauen wir mit den Programmen zur Engpassbeseitigung lediglich zusätzliche Stauspuren. Verstopfen aber die Hochleistungsstrassen, versagt ihre Drainagewirkung, und es verstopfen als Folge davon auch die Strassen der zweiten und dritten Hierarchie. Das kann unter keinen Umständen sinnvoll sein. Hier sind alle Staatsebenen gefordert, verträgliche und allseits akzeptierte Lösungen zu formulieren.

Der raumplanerische Ansatz der «Siedlungsentwicklung nach innen» [3], also ohne wesentlichen Mehrverbrauch an Land, wird dazu führen, dass ein Quadratmeter Bauland zwar dichter besiedelt werden kann. Aber die Erschließungsfragen für Personen und Güter akzentuieren sich dadurch zusätzlich. Eine der wesentlichen Ursachen dieser im Raumplanungsgesetz festgehaltenen Strategie liefert uns ein Blick auf die erwartete demografische Entwicklung: Die Weltbevölkerung nimmt seit Jahren ständig zu, wobei die Entwicklungs- und Schwellenländer höhere Raten aufweisen als die OECD-Länder. So soll die Weltbevölkerung bis 2045 von heute gut 8 Milliarden auf gut 10 Milliarden Menschen steigen. Praktisch derselbe Wachstumsgradient wird der Schweiz vorausgesagt, wenn auch in absoluten Zahlen um den Faktor tausend tiefer, nämlich von 8,3 Millionen auf 10,2 Millionen Einwohner.

Neben der Zunahme der ständigen Wohnbevölkerung in der Schweiz wird auch eine Altersumschichtung stattfinden: Das Referenzszenario des Bundesamts für Statistik für das Jahr 2045 [4] sieht für die Schweiz eine stabile bis moderat zunehmende Alterskategorie der Kinder und Jugendlichen vor und ebenso für die Kategorie der Erwerbstätigen. Hingegen wird eine massive Zunahme der über 65-Jährigen prognostiziert (siehe Bilder 1 und 2).

Diese ist darauf zurückzuführen, dass im Jahr 2045 die geburtenstarken Jahrgänge aus den 50er- und 60er-Jahren das Pensionsalter erreicht haben werden und zudem die Lebenserwartung weiter zunehmen wird. Ein aussagekräftiger Indikator zur Veranschaulichung der Alterung der Bevölkerung ist der Altersquotient. Er ist definiert als Verhältnis der über 65-Jährigen pro 100 Erwerbstätige. Im

In all regions, the proportion of transit traffic is of minor importance – especially during peak periods on work days. With a figure of around 80%, the proportion of origin/destination and domestic traffic predominates. This means that effective motorways and equally effective road infrastructures in the agglomerations are mutually dependent on one another. The various road hierarchies are dependent on one another for an orderly and efficient flow of traffic: one cannot work without the other. If, for example, cities and agglomerations cannot accommodate the traffic from the high-capacity roads during the peak morning rush hour, or increasingly no longer want to accommodate it, then the bottleneck removal programme will just lead to additional lanes in order to absorb traffic congestion. If, however, the high-capacity roads become congested, their drainage effect fails and, consequently, the roads at the second and third levels of the hierarchy also become congested. There are no circumstances under which this can prove beneficial. This is why all levels of government are called upon to formulate amicable and mutually acceptable solutions.

The spatial planning approach of “inward urban development” [3], i.e., development without the need to take up significantly more land, means that a square meter plot can become more densely populated. However, the land development issues for people and goods will be further accentuated as a result. One of the main causes for this strategy, which has been laid down in spatial planning law, provides us with an insight into the expected demographic development: the world’s population has been increasing steadily for years, with developing and emerging economies showing much higher rates of growth than the OECD countries. Based on this growth, the world population is due to increase from the at least 8 billion people we have today to around a good 10 billion by 2045. Switzerland is predicted practically the same level of growth, albeit with figures that are lower by a factor of one thousand; namely 8.3 million to 10.2 residents.

In addition to this increase in the number of permanent residents in Switzerland, a shift in the age demographic is also taking place. The reference scenario for 2045 developed by the Federal Statistical Office [4] predicts a stable to moderate increase in the category of children and young people in Switzerland, as well as for the working population category. In contrast, a massive increase is forecasted for the over 65 s (see Figures 1 and 2).

This is attributable to the fact that the baby boom generations from the 50 s and 60 s will have reached pensionable age by 2045 and, besides that, life expectancy will continue to increase. A meaningful indicator to illustrate the ageing of the population is the old age dependency ratio. It is defined as the number of people over 65 per 100 persons in employment. In 2015, the old age dependency ratio was still 29.1 people per 100 persons in employment. In 2045 the figure

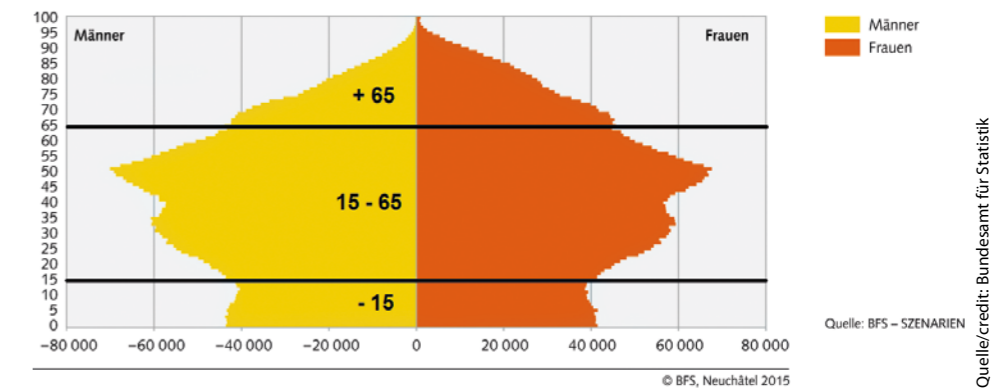
Jahr 2015 betrug dieser Altersquotient noch 29,1 Personen pro 100 Erwerbstätige, im Jahr 2045 wird er bei 48,1 liegen. Dies bedeutet, dass jeder Person im Pensionsalter nur noch ungefähr zwei Personen im erwerbsfähigen Alter gegenüberstehen werden. Die Finanzierung dieser Alterspyramide wird für die Erwerbstätigen eine grosse Belastung darstellen. Man denke zunächst an die Altersvorsorge (AHV, Pensionskassen) und die Gesundheitskosten.

Die Rentnerinnen und Rentner werden im Personenverkehr also eine wesentlich grössere Kundengruppe darstellen als heute [5]. Entsprechend müssen wir uns den Herausforderungen stellen und gleichzeitig die möglichen Chancen erkennen:

1. Die Bevölkerung und die Nachfrage nach Mobilität werden zunehmen und damit auch der Verkehr auf Strasse und Schiene. Die ressourcenschonende «Siedlungsentwicklung nach innen» wird die Nachfrage nach Mobilität (Personen und Güter) in den Zentren zusätzlich erhöhen und damit auch den verkehrlichen Problemdruck.
2. Die Ansprüche an «intakte», sprich möglichst naturbelassene, Landschaften und «lebenswerte», sprich möglichst verkehrs- und lärmarme, Stadträume werden weiter steigen.
3. Der Raum für zusätzliche Infrastruktur-Angebote auf Strasse und Schiene ist damit endlich, und die Kosten drohen zu explodieren.
4. Damit die steigende Nachfrage nach Mobilität befriedigt werden kann, müssen einerseits gezielte Ausbauten der Infrastrukturnetze von Strasse und Schiene erfolgen. Andererseits muss es gelingen, auf Strasse und Schiene wesentlich effizienter zu nutzen, was bereits vorhanden ist. Es braucht beide Ansätze, einer allein kann den Herausforderungen nicht genügen.
5. Die Verkehrswegebauer und -betreiber sowie Forschung und Lehre sind stark gefordert, innovative und neue Lösungsansätze zu entwickeln, sollen die immer komplexer werdenden Infrastrukturen auch künftig noch finanzierbar sein.

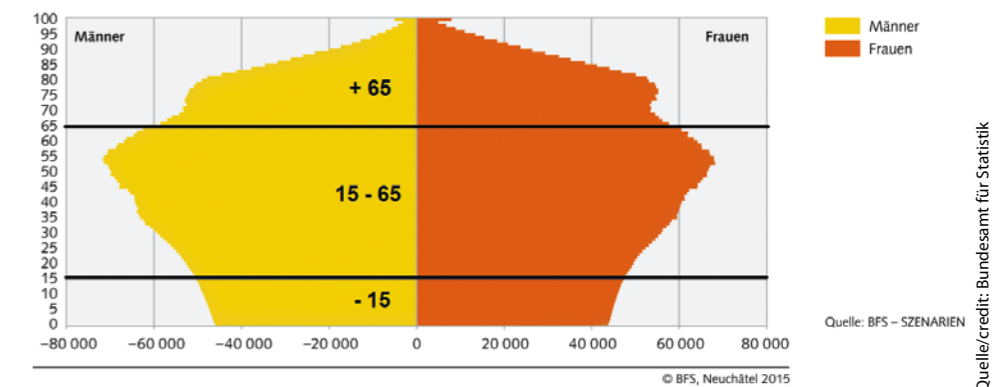
Alterspyramide 2015, Referenzszenario A-00-2015

G 6

1 Alterspyramide 2015
2015 age pyramid

Alterspyramide 2045, Referenzszenario A-00-2015

G 8

2 Alterspyramide 2045, Referenzszenario
2045 age pyramid, reference scenario

will be 48.1. This means that for every person of pensionable age there will only be approximately two people of working age. Financing this age pyramid will be a heavy burden for those still in employment. First thing people think of is retirement provision (state and private pension funds) and healthcare costs.

However, pensioners will also represent a much larger customer segment in passenger transport than they do today [5]. Correspondingly, we must address the challenges and, at the same time, recognise where potential opportunities may be found:

1. The population and the need for mobility are increasing and with it the amount of traffic on the roads and railways. The resource-saving “inward urban development” will additionally increase the demand for mobility (people and goods) in central urban areas and this will, in turn, increase the traffic-related pressures.
2. The aspiration for “untouched” asks for landscapes that are as unspoiled as possible, and “liveable” means traffic reduction measures and low noise urban areas will continue to increase.

6. Kommende Gesellschaften mit den prognostizierten Alterspyramiden und den dadurch entstehenden Finanzierungsfragen sind schlicht darauf angewiesen, dass wir bereits heute die bestehenden Ineffizienzen im öffentlichen und im motorisierten Individualverkehr sowie im Verkehrswegebau angehen.
7. Die Digitalisierung bietet grosse Potenziale zur effizienteren Nutzung bestehender Strassen und Angebote des öffentlichen Verkehrs. Diese gilt es zügig zu erschliessen, und dabei sind u. a. auch die Infrastrukturbauer gefordert. Aber auch die zunehmende Alterung der Nachfrager nach Mobilität beinhaltet grosse Chancen zur effizienteren Nutzung. So sind ältere Menschen beispielsweise weniger an einen strikten Tagesplan gebunden, womit ihre Nachfrage flexibler ist und sie sich beispielsweise eher ausserhalb der Verkehrsspitzen bewegen können.
8. Die Digitalisierung wird zudem neue, effizientere Angebote ermöglichen, bis hin zu «Mobility as a Service» (MaaS). Sie wird in weiten Teilen zur Verschmelzung des klassischen Individualverkehrs mit dem klassischen öffentlichen Verkehr führen, was seinerseits positive Potenziale birgt.

Wir benötigen zur Befriedigung der gesamten künftigen Verkehrsnachfrage demnach sowohl Strasse als auch Schiene, sind auf den motorisierten Individualverkehr ebenso angewiesen wie auf den öffentlichen Verkehr. Das Akzeptieren der Gleichwertigkeit der beiden Landverkehrsträger ist deshalb wichtig und richtig. Der Strassenverkehr hat in den letzten 20 Jahren sehr grosse Fortschritte bei seinen traditionellen Schwächen Sicherheit und Umweltverträglichkeit gemacht. Die positiven Entwicklungen sind enorm, und er wird sich dank Digitalisierung und Elektrifizierung auf diesen Gebieten weiter verbessern. Hingegen ist es bisher nicht gelungen, eine seiner grössten Schwächen zu beseitigen: den schlechten Fahrzeugbelegungsgrad in den Verkehrsspitzen.

Der Einsatz der Verkehrsmittel nach ihrer jeweiligen Stärke – vollkommen losgelöst von irgendwelchen Ideologien – ist also eine der wesentlichen Lösungen für die Zukunft. Während die Strasse und der Individualverkehr im Personentransport ihre Stärke in erster Linie auf den kleinen bis mittleren Distanzen haben, ist die Stärke der Schiene im Personentransport die grosse Distanz, beispielsweise von Stadtzentrum zu Stadtzentrum. Die Schiene wird heute noch zu oft entweder aus ideologischen oder aus geschichtlichen Gründen ineffizient eingesetzt, beispielsweise in der Fläche, wo ein öffentlicher Bus – in absehbarer Zeit auch autonom gefahren und «on demand» betrieben – wesentlich effizienter wäre.

Die Abkehr vom gegenseitigen Ausspielen von Schiene und Strasse ist unabdingbar, um die kommenden Herausforderungen zu meistern. Die jeweiligen Infrastrukturen stellen ein Volksvermögen von mehreren hundert Milliarden Franken dar. Sie müssen systematisch betrieben und unterhalten werden. Das Angebot von Strasse und Schiene muss

3. The scope for additional infrastructure in terms of roads and railways is thus finite and the costs are threatening to explode.
4. In order to satisfy the increasing need for mobility, on the one hand targeted expansion of the road and rail infrastructure network is required. On the other, we need to succeed in using the existing roads and railways with significantly greater efficiency. It will take both approaches, as either one on its own will not be sufficient to take on the challenges ahead.
5. Those involved in transport route construction and operation, as well as researchers and educators face the major challenge of developing new and innovative solutions and approaches that will ensure increasingly complex infrastructures are also affordable in the future.
6. The next generations, faced with the forecast age pyramids and the resulting financial issues, are looking to us to start addressing the existing inefficiencies in public and motorised private transport and transport-related construction now.
7. There is great potential to be found in digitalisation when it comes to using our existing roads more efficiently and with regards to what we can offer in terms of public transport. This potential should be harnessed quickly and, resultantly, the input of infrastructure constructors – among other things – is required. The increasing age of those seeking mobility also offers great potential when it comes to efficient usage. Older people are, for example, limited to a lesser extent by strict daily schedules and are thus more flexible: they could, for example, travel more frequently outside of peak times.
8. Digitalisation will, moreover, allow for more efficient proposals, all the way through to “Mobility as a Service” (MaaS). It will lead to a great extent to the merging of classic private transport with classic public transport, which will itself bring considerable potential.

Therefore, in order to satisfy the entirety of the future demand for transport, we need both the roads and railways, and we are equally as dependent on motorised private transport as we are on public transport. It is important and right to accept the equivalence of both transport modes. Road transport has, in the last 20 years, made considerable progress in tackling its traditional weaknesses of safety and environmental compatibility. The positive developments are enormous and will continue to improve further thanks to digitalisation and electrification in these areas. In contrast, it has not yet been possible to overcome one of its greatest challenges: poor vehicle occupancy rates during traffic peaks.

The use of transportation means based on their respective strengths, entirely free from any ideology, is therefore one of the key solutions for the future. While the strength of roads and private transport can be found predominantly in transporting people for short to middle distances, the strength of the railways is transporting people over long distances, for

gleichzeitig gezielt wachsen, um die heutigen Engpässe zu beseitigen und der künftigen Nachfrage zu entsprechen. Dazu setzen wir auf den Autobahnen das vom Parlament beschlossene Programm zur Engpassbeseitigung um. Auf der A4 im Kanton Zug zwischen Blegi und Rütihof sowie auf der A1 in den Kantonen Solothurn und Aargau zwischen Härkingen und Wiggertal konnten wir bereits bedeutende Engpässe beseitigen. Zurzeit realisieren wir den Ausbau der Nordumfahrung Zürich mit der dritten Tunnelröhre am Gubrist und treiben weitere rund 20 Engpassprojekte in allen Landesteilen voran.

Dass sowohl Ausbau- und Sanierungsprojekte wie auch Neubauprojekte der Netzvollendung zunehmend als Tunnelösungen unter den Boden gedrängt werden, ist einerseits die Folge der zunehmend beschränkten Platzverhältnisse an der Erdoberfläche und andererseits der priorisierten Nutzung der benötigten Landflächen als lärmempfindliche Siedlungsgebiete, Fruchtfolgefleichen oder als Naturschutzgebiete. Potenzielle Konflikte zwischen Strasse und Schiene müssen dabei schon frühzeitig erkannt und eliminiert werden. So wurde zum Beispiel das Trasse der Neuen Axenstrasse demjenigen der Bahn mit dem geplanten Alptransit-Axentunnel [6] angepasst, der aber erst in ein bis zwei Generationen gebaut werden soll. Dabei gilt: je höher die geplante Ausbaugeschwindigkeit, desto kleiner der Handlungsspielraum bezüglich einer Anpassung der Linienführung.

Ausbauprogramme auf Strasse und Schiene kosten viel Geld und benötigen deshalb stabile und verlässliche Finanzquellen. Mit dem «Bahnhofinfrastrukturfonds (BIF)» und dem «Nationalstrassen- und Agglomerationsverkehrs-Fonds (NAF)» hat das Volk die passenden Antworten gegeben. Der NAF war in erster Linie eine notwendige Strukturreform der bis Ende 2017 geltenden Strassenfinanzierung. Er nahm die erwähnte Verknüpfung von Autobahn- und Agglomerationsverkehr konsequent auf und schafft Gleichstand zum BIF. Ob der NAF bzw. sein Nachfolgekonstrukt aber auch noch im Jahr 2045 genügend alimentiert sein wird, ist bereits heute eine berechtigte Frage, zeichnet sich doch eine Finanzierungslücke von gut einer Milliarde Franken im Jahr 2030 ab.

Mobilität wird weiterhin ihren Preis haben sollen, und die Finanzierung von Strasse und Schiene wird weitgehend selbsttragend sein müssen. Wenn auch künftige Generationen genügende Zahlungsfähigkeit und -bereitschaft für die terrestrische Mobilität haben sollen, müssen u. a. auch die Kosten der Infrastrukturen sinken – und dies trotz der zu erwartenden Steigerung ihrer Komplexität. Um die Kosten für die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt der Verkehrsinfrastrukturen zu senken, ist Innovationskraft auf allen Ebenen gefragt. Neben den grundsätzlichen, oben erwähnten Effizienzsteigerungen im Verkehrswesen (beispielsweise durch die Digitalisierung bzw. Automatisierung) können, bezogen auf das Infrastrukturwesen, folgende Ansätze einen Beitrag zur Kostenreduktion leisten:

example, from city-centre to city-centre. At present, either for ideological or historical reasons, the railways are still used inefficiently, for example, in areas where a public bus – in the foreseeable future potentially driven autonomously and “on demand” – would be considerably more efficient.

Turning away from playing road and rail against each other is imperative if we are to master the coming challenges. The respective infrastructures represent a national wealth of several hundred billion Swiss francs. They must be run systematically and maintained. Road and rail must grow together strategically in order to overcome the bottlenecks we are currently experiencing and meet future demand. That is why we are implementing the programme adopted by parliament to remove bottlenecks on our motorways. On the A4 in the Canton of Zug, between Blegi and Rütihof, as well as on the A1 in the Cantons of Solothurn and Aargau, between Härkingen and Wiggertal, we have already been able to eliminate considerable bottlenecks. We are currently working on upgrading the Zurich north bypass with a third tunnel at the Gubrist and are continuing to press ahead with an additional about 20 bottleneck removal projects throughout the country.

That fact that both upgrade and renovation projects, as well as new building projects to complete the network, are increasingly being pushed underground as a tunnel solution is, on the one hand, the result of the increasingly limited amount of space available on the surface and, on the other, due to the prioritisation of the necessary land for noise-sensitive urban areas, crop rotation areas or conservation areas. Potential conflicts between the roads and railways must therefore be recognised and eliminated at an early stage. This is why, for example, the planned route of the new Axenstrasse was adjusted to accommodate the planned route of the AlpTransit Axentunnel [6], which is not due to be built for one or two generations. The rule in this context is, the higher the planned speed, the smaller the scope for adapting the line routing.

Road and rail expansion programmes cost a lot of money and, therefore, require stable and reliable sources of funding. The nation has found the right answer with the Swiss Rail Infrastructure Fund (BIF) and National Road and Agglomeration Transport Fund (NAF). The NAF was initially a necessary structural reform for the financing of applicable roads up to the end of 2017. It participated consistently in the linking of motorway and urban traffic and managed to achieve equal status to the BIF. Whether the NAF and/or its successor will still be sufficiently financed in 2045 is already a legitimate question, as a funding shortfall of at least a billion Swiss francs is due to emerge by 2030.

Mobility will continue to have its price and the financing of the road and rail network will need to continue to be self-supporting. If the future generations are also to continue to have sufficient solvency and willingness to pay for terrestrial



Quelle/credit: EMPA, Gramazio Kohler Architects

3 NEST, darin temporär untergebracht das DFAB House
NEST, temporarily accommodating the DFAB house

- die Prüfung und Förderung von neuartigen Bauverfahren bzw. neuen Materialien
- die Entkoppelung oder im Gegenteil Kumulierung der transportierten Medien (Tunnel mit Bahn, Strasse, Gas, Wasser und Strom)
- dadurch Zusammenlegung der Genehmigungsverfahren
- politische Diskussion über Güterabwägungen, z.B. bezüglich Gewichtung von Einzelinteressen gegenüber dem öffentlichen Interesse
- Erschließung der Potenziale der Digitalisierung für die Planungs- und Bauprozesse
- sichere, aber maximal vereinfachte Standards, Richtlinien und Normen (hier wird sich das ASTRA ernsthaft Gedanken machen müssen, wie weit unsere hohen Standards vereinfacht werden können)
- Entkoppelung der Neubaunormen von den Unterhaltsnormen bzw. Prüfung der Kostenwirksamkeit der Anwendung von Neubaunormen beim Unterhalt

Zahlreiche Instrumente auf dem Weg in die Zukunft stehen uns bereits heute mit steigendem Einsatzpotenzial zur Verfügung: Künstliche Intelligenz, BIM, Augmented Reality, Robotik, 3D-Drucker ... um nur einige zu nennen. Bereits jetzt befindet sich in Dübendorf bei Zürich ein dreigeschossiges Haus in der Entstehung, das fast ausschliesslich durch Robo-

mobility, the costs of infrastructure, among other things, will have to be reduced: despite the expected increase in their complexity. Reducing the costs of establishing, running and maintaining the transport infrastructure will require innovation at all levels. In addition to the fundamental increases in efficiency in the transport sector mentioned above (for example, through digitalisation and/or automation), the following approaches could, depending on the infrastructure, play a part in reducing costs:

- reviewing and supporting new construction processes and/or materials;
- the decoupling or, conversely, accumulation of transport media (tunnels with rail, road, gas, water and electricity);
- thereby consolidating the approval processes;
- political discussion about striking a balance, for example, weighing up individual interests against public interests;
- harnessing the potential of digitalisation for design and construction processes;
- safe standards, guidelines and norms that are also simplified to the greatest extent possible (ASTRA will have to give serious consideration here as to the extent that our high standards can be simplified); and
- the decoupling of new construction standards from maintenance standards and/or the cost-effectiveness of using new construction standards for maintenance.

ter und 3D-Drucker erstellt wird (siehe Bilder 3 und 4). Der Bezugstermin ist für Sommer 2018 vorgesehen. Strassenprojekte als Linienbaustellen scheinen geradezu prädestiniert für den Einsatz automatisierter Systeme. Tunneltaugliche LEDs gab es vor zehn Jahren noch nicht; heute werden sie standardmässig eingebaut und erlauben in Kombination mit hellen Belägen und weissen Tunnelwänden Energieeinsparungen von über 50% (siehe Bild 5). Die längere Nutzungsdauer der Systeme (LED, helle Beläge) wirkt sich zudem kostenreduzierend auf der Investitionsseite aus. Ein nächster Schritt könnte die verkehrsabhängige Steuerung der Beleuchtung sein, dank welcher die Energie in den verkehrsschwachen Nachtzeiten zusätzlich reduziert werden könnte. Ob dereinst unbemannte Drohntaxis die terrestrische Mobilität entlasten werden können, sei hier offengelassen. Immerhin absolvierte bereits letztes Jahr der sogenannte Volo-copter erfolgreich seinen Jungfernflug über der Stadt Dubai. Die Stadt La Paz in Bolivien setzt ebenfalls auf den Luftraum zur Unterstützung des städtischen Binnenverkehrs, und zwar mittels der weltweit längsten Seilbahn – lautlos, sicher, staufrei und platzsparend (siehe Bild 6). Wenn auch städtebaulich eine Herausforderung, so besticht diese Lösung nicht zuletzt durch die gegenüber U-Bahnen geringeren Kosten und auch durch ihre offensichtliche touristische Attraktion. Auch London hat seit 2012 eine Seilbahn, welche die Stadtteile Greenwich und Docklands verbindet und dazwischen die Themse überquert. Weltweit machen sich zahlreiche Städte daran, dieses Nahverkehrsmittel zur Lösung der innerstädtischen Stauproblematik heranzuziehen.

Entscheidend für die erfolgreiche Lösung der Nachfrage nach Mobilität wird sein, wie gut die verschiedenen Systeme miteinander verbunden und vernetzt sein werden. Und die «dritte Dimension nach oben» wird – ob als Seilbahnen oder als fliegende Verkehrsmittel – zunehmend zur Ergänzung oder gar Alternative zur «dritten Dimension nach unten», dem Tunnelbau. Die Kosten werden dabei zunehmend eine entscheidende Rolle spielen, und in diesem Sinne ist der Tunnelbau künftig in einem grösseren Konkurrenzumfeld zu sehen. Eine Antwort kann die generelle Senkung der Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten der Tunnelbauwerke sein.

Die Nutzer des privaten motorisierten Strassenverkehrs decken heute ihre Kosten zu rund 90%. Der Kostendeckungsgrad der Nutzer des öffentlichen Verkehrs beträgt knapp 50%. Deshalb müssen wir die Verkehrsträger künftig noch konsequenter nach ihrer jeweiligen Stärke und Effizienz einsetzen und gleichzeitig ihre jeweiligen Schwächen vorbehaltlos angehen. Dies bedingt ein Umdenken und auch einen teilweisen Bruch mit Traditionen und der Vergangenheit. Mit der Realisierung zusätzlicher Verkehrsfläche müssen unbedingt auch die bestehenden Infrastrukturen effizienter genutzt werden. Die Nationalstrassen sind heute zu fehleranfällig – man denke beispielsweise an Staus wegen Unfällen im Morgenverkehr. Sie werden zudem ineffizient genutzt, da der Besetzungsgrad in den Spitzenstunden durchschnittlich

We already have access to a multitude of instruments with increasing potential that can help us on our way to the future: artificial intelligence, BIM, Augmented Reality, robotics, 3-D printers, etc., to name but a few. In Dübendorf near Zurich, there is already a three-storey house that is being developed almost exclusively by robots and 3-D printers (see Figures 3 and 4). The deadline for completion is expected to be summer 2018. Road projects with linear construction seem almost predestined for the use of automated systems. Ten years ago, we did not have tunnel-friendly LEDs: today they are fitted as standard and, in combination with light pavement and white tunnel walls, permit energy savings of more than 50% (see Figure 5). The longer service life of the systems (LEDs, light pavement) have a cost-reducing effect on the investment front. The next step could be automated controlling of the lighting based on the traffic levels, which could considerably further reduce the energy consumed during low-traffic night periods. Whether unmanned drone taxis could one day ease terrestrial mobility remains open here. In any case, the so-called Volo-copter successfully completed its inaugural flight over the city of Dubai last year. The city of La Paz in Bolivia has also turned to the sky to help support its urban domestic traffic, with the world's longest cableway: silent, safe, congestion free and space saving (see Figure 6). Even if challenging in terms of urban development, this solution convinces nonetheless with its comparatively low costs compared to underground railways and also with its obvious attraction for tourists. London, too has a cableway that has connected Greenwich and Docklands since 2012, crossing the Thames. Across the globe, numerous cities are turning to this means of local transport as a solution to the problem of inner-city congestion.



Quelle/credit: NCCR Digital Fabrication

4 Bauen mit Robotern
Building with robots

Decisive in the hunt for a successful solution to the demand for mobility will be how well the various systems can be connected together and networked. Be it a cableway or a flying means of transport, the "third dimension above" is increasingly supplementing, or even being used as an alternative, to the "third dimension below", namely tunnel construction.

gerade einmal 1,2 Personen pro Auto beträgt. Hier müssen wir besser werden.

Unterstützen wird uns die intelligente Mobilität. Sie eröffnet bisher ungeahnte Möglichkeiten hinsichtlich der Effizienzsteigerung. Weniger Unfälle, weniger Staus, weniger Umweltbelastung, mehr Komfort: Das Potenzial, welches die intelligente Mobilität ermöglicht, ist vielfältig und gross. Dass Autos dereinst autonom fahren werden, gilt als sicher. Auch wir stellen uns mit grossem Engagement dieser neuen Herausforderung und versuchen, die Potenziale zu erschliessen und u. a. die Rechtsetzung anzupassen.

Die Informationsgesellschaft und die steigende Intelligenz der Fahrzeuge werden auch unter dem Eindruck der Kosteneffizienz zu einer teilweisen Verschmelzung von öffentlichem und motorisiertem Individualverkehr führen. Die Grenzen zwischen diesen beiden Formen des Personentransports werden fließend. Als Beispiele seien hier ein autonom und auf Bestellung fahrender Kleinbus erwähnt oder der «öffentliche Taxidienst» Uber. Das wird den traditionellen – heute von der Politik bestellten – öffentlichen Verkehr in der Fläche unter Druck setzen, weil hier der ÖV in massiver Weise ineffizient bzw. nicht kostendeckend ist. Positiv gesprochen tun sich grosse Effizienzpotenziale auch im ÖV auf, und in der Fläche wird es wohl zu einer Verlagerung des ÖV von der Schiene zum ÖV auf der Strasse kommen.



5 Tunnel Lungern mit LED, hellem Belag und weissen Wänden
Lungern tunnel with LEDs, light pavement and white walls

Quelle/credit: Hoch- und Tiefbauamt Obwalden

Diese Entwicklungen verlangen von allen Beteiligten ein Überdenken und Anpassen ihrer Rolle. Die Aufgabe des ASTRA ist es zunächst, die zentralen Fragestellungen rasch, vorausschauend und verkehrsträgerübergreifend anzugehen. Das heisst, die rechtlichen und technischen Voraussetzungen zu schaffen, dass sich die erwarteten Potenziale entfalten können. Die Rolle von Industrie und Forschung ist es, auf allen denkbaren Ebenen Innovationen zu präsentieren, um letztlich die Kosten für Bau, Betrieb und Unterhalt der Verkehrsinfrastrukturen und insbesondere der Tunnelbauten zu senken. Wie vorstehend ausgeführt, werden künftige Generationen schlicht darauf angewiesen sein, dass wir die

Costs will play an increasingly decisive role here and, in this sense, tunnel construction will in future find itself in an even larger competitive environment. One solution to this is a general reduction in the investment, running and maintenance costs of tunnel structures.

The users of private motorised road transport today cover around 90% of their costs. The cost-recovery ratio for users of public transport amounts to just shy of 50%. That is why we must use transport modes according to their respective strengths and efficiencies in future and, at the same time, tackle their weaknesses without reservation. This requires a rethink and also a partial break with tradition and the past. Along with the realisation of additional transport infrastructures, it is essential that the existing infrastructures are used more efficiently. The national roads are currently too error-prone; think, for example, about the traffic congestion that arise following an accident in the morning traffic. Moreover, they are used inefficiently, as the average number of people per car during peak hours is currently 1.2. This is where we must do better.

We will be supported in this regard by intelligent mobility. It will open up unprecedented opportunities in terms of increases in efficiency. Fewer accidents, less congestion, less damage to the environment and greater levels of comfort: the potential opened up by intelligent mobility is diverse and considerable. It is assumed that cars will one day drive autonomously. We, too are taking on this new challenge with great commitment, trying to harness its potential and, among other things, adapting the legislation.

The information society and increasing intelligence of vehicles will also lead to a partial merging of public and motorised private transport under the pressures of cost efficiency. The boundaries between these two types of transport services are becoming fluid. Examples mentioned here are an autonomous, to-order minibus or the “public taxi service” Uber. This will place the traditional, publicly-appointed public transport service under pressure, as they are severely inefficient and/or unprofitable. Put positively, there is also great potential for efficiency to be found in public transport, too, and the public transport offered on the railways will probably be extended to the roads across the country.

These developments demand a rethink and an adaptation of roles from everyone involved. The task of FEDRO is initially to deal with the fundamental issues quickly, proactively and across all transport modes. This means putting the legal and technical prerequisites in place that will allow for these expected potentials to emerge. The role of industry and the researchers is to present innovations at every level imaginable, in order to ultimately reduce the costs for construction, running and maintenance of the traffic infrastructures and, in particular, the costs of tunnel construction. As outlined above, future generations will be looking



6 Seilbahn in La Paz (Bolivien)
Cableway in La Paz (Bolivia)

Quelle/credit: Brightcove, Inc.

Weichen dazu jetzt stellen. Das ASTRA ist gewillt, seinen Beitrag dazu zu leisten, und wir sind auf die enge Abstimmung mit den Partnern aus Politik, Verbänden, Industrie, Lehre und Forschung angewiesen.

Literatur/References

- [1] The Global Competitiveness Report 2017–2018, World Economic Forum, 2017
- [2] The Global Innovation Index 2017, Soumitra Dutta, Bruno Lanvin, Sacha Wunsch-Vincent, 2017
- [3] Raumplanungsgesetz (RPG), SR 700

to us to lay the groundwork for this now. FEDRO is determined to do its part, and we are relying on the close cooperation of partners of politics, unions, industry, education and research.

- [4] Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz, 2015–2045, Bundesamt für Statistik, 2015
- [5] Verkehrsperspektiven 2040, Amt für Raumentwicklung, 2016
- [6] Sachplan Verkehr, Teil Infrastruktur Schiene, OB 10.1 Rigi, 17.08.2016

Sergio Massignani, Dipl. Bau-Ing. FH, EMBA FH, Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf/CH

A2-Sanierungstunnel Belchen

Konzept und Erfahrung bei gleichzeitigem TBM-Vortrieb und Innenausbau

Mit dem 3,2 km langen Sanierungstunnel Belchen (STB) wird eine dritte Röhre neben den beiden bestehenden Tunnels (BTB) auf dieser wichtigen Nord-Süd-Verbindung der A2 gebaut. Diese in den 60er-Jahren erstellten und im heterogenen Faltenjura liegenden Tunnels weisen durch die zunehmende Quellbelastung des Gebirges und eine massive Verkehrszunahme zusehends Schäden in der bestehenden, ungenügenden Tragstruktur auf. Während der künftigen, gestaffelten Instandsetzungsarbeiten der beiden BTBs können zusammen mit dem STB immer zwei Fahrspuren je Richtung gewährleistet werden. Die komplexe und geotechnisch anspruchsvolle Geologie erfordert für den Bau des STB ein massives Innengewölbe mit einer kurzen Ringschlusszeit. Deshalb wird hinter der aktuell schweizweit grössten TBM mit einem Durchmesser von rund 14 m gleichzeitig der komplette Innenausbau realisiert. Dieser ungewohnte Bauablauf stellt höchste Anforderungen an alle Teilnehmer.

A2 Belchen Refurbishment Tunnel

Concept and Experience in Simultaneous TBM Drive and Interior Construction

With the 3.2 km long Belchen refurbishment tunnel (STB), a third tunnel is being built next to both existing tunnels (BTB) on this important A2 north-south link. These tunnels, created in the 1960s in the heterogeneous Fold Jura, are visibly showing damages in the existing, insufficient supporting structure as a result of the rock's increasing swell load and a massive increase in traffic. During the future staggered repair works on both BTBs, together with the STB, two lanes can always be guaranteed in each direction. The complex and geotechnically demanding geology requires a massive inner vault with a short ring closure time for the construction of the STB. That is why the entire interior construction is being created at the same time behind what is currently the largest TBM in Switzerland with a diameter of around 14 m. This unusual construction process is extremely demanding for all involved.

1 Projektvorstellung

Der Belchentunnel (BTB) auf der A2 liegt zwischen den Gemeinden Eptingen (Kanton Baselland) und Hägendorf (Kanton Solothurn). Mit einem steigenden Verkehrsaufkommen von über 55 000 Kfz pro Tag und einem hohen Lkw-Anteil gehört er zu einem der meistbefahrenen Autobahnabschnitte der Schweiz und bildet zugleich einen wichtigen Abschnitt auf der europäischen Nord-Süd-Achse. Der Tunnel quert das heterogene Faltengebirge des Juras. Eine Sanierung der beiden seit dem Jahr 1970 in Betrieb stehenden Tunnelröhren ist dringend notwendig, hat doch der im Juragestein weitverbreitete Gipskeuper durch stetiges Quellen Schäden an der Tragstruktur verursacht. Um bei den künftigen Instandsetzungsarbeiten die damit verbundenen Verkehrseinschränkungen zu vermeiden, wird der Sanierungstunnel Belchen (STB) erstellt. Der neue Tunnel ist 3,2 km lang und liegt westlich der beiden bestehenden Röhren mit einem variablen Achsabstand zwischen 40 und 116 m. Der STB wird mit elf Querverbindungen an den BTB angebunden.

1 Project Concept

The Belchen tunnel (BTB) on the A2 is situated between the communities of Eptingen (canton of Basel-Landschaft) and Hägendorf (canton of Solothurn). With a rising volume of traffic of over 55,000 vehicles per day and a high proportion of lorries, it is one of the most-used motorway sections in Switzerland and is also an important section of the European north-south axis. The tunnel crosses the heterogeneous fold mountains of the Jura. Both of the tunnels, which have been in operation since 1970, require urgent renovation. However, the gypsum Keuper widespread within the Jura rock has caused damage to the supporting structure due to constant swelling. To avoid traffic restrictions associated with the future repairs, the Belchen refurbishment tunnel (STB) is being created. The new tunnel is 3.2 km long and lies west of the two existing tunnels with a variable centre distance between 40 and 116 m. The STB is connected to the BTB by eleven cross passages.

Tunnel d'assainissement de Belchen sur l'A2

Retour d'expérience sur la pose simultanée du revêtement du tunnel à l'avancée de la machine

Le tunnel d'assainissement de Belchen (TAB) long de 3,2 km est un troisième tube construit parallèlement aux deux tunnels existants (TEB) sur le très important axe nord-sud de l'A2. Ces tunnels datant des années 1960 traversent la région hétérogène du Jura plissé. Ils présentent des dégradations apparentes sur la structure portante existante laquelle se révèle insuffisante au regard de la pression de gonflement croissante exercée par la montagne et de l'augmentation massive de la circulation. Avec le TAB, deux voies peuvent rester ouvertes dans chaque sens de circulation pendant la durée des travaux de rénovation en cours sur les deux TEB. En raison de la géologie complexe et exigeante d'un point de vue technique, la construction du TAB impose la réalisation d'une énorme voûte intérieure avec une fermeture annulaire rapide. C'est pourquoi le revêtement intérieur est réalisé au fur et à mesure de la progression d'un tunnelier de quelque 14 m de diamètre, soit le plus imposant en action en Suisse. Ce procédé inhabituel pose de grands défis à tous les participants.

Galleria di risanamento del Belchen sulla A2

Concetto ed esperienza di avanzamento con fresa meccanica a piena sezione e opere murarie di finitura in contemporanea

Con la galleria di risanamento del Belchen (STB), lunga 3,2 km, viene costruita una terza canna accanto alle due gallerie esistenti (BTB) su questo importante collegamento nord-sud della A2. Queste gallerie, realizzate negli anni '60 e collocate nell'eterogeneo Giura piegato, presentano dei danni visibili nell'insufficiente struttura portante esistente, causati dalla crescente sollecitazione da rigonfiamento della montagna e da un massiccio aumento del traffico. Nel corso dei futuri lavori di riparazione scaglionati delle due BTB, grazie alla STB sarà sempre possibile garantire la presenza di due corsie per senso di marcia. La complessa geologia, impegnativa dal punto di vista geo-tecnico, richiede una massiccia volta interna con un breve tempo di cicizzazione per la costruzione della STB. Per questo, dietro alla fresa meccanica a piena sezione attualmente più grande della Svizzera, con un diametro di 14 m, vengono realizzate contemporaneamente le opere murarie di finitura complete. Questo procedimento costruttivo inusuale impone requisiti severissimi a tutti i partecipanti.

2 Die Geologie und die Gefahrenpotenziale

2.1 Die Geologie

Der Sanierungstunnel Belchen liegt im Faltenjura und durchörtert querschlägig triassische und jurassische Sedimentgesteine. Das Gebirge ist einer intensiven Tektonik unterworfen, was sich in einer Zergliederung der Formationen in zahlreiche, meist steil stehende Schuppen und Falten manifestiert. Aufgrund ihrer geotechnischen Eigenschaften kann man die Gesteine in zwei Gruppen unterteilen:

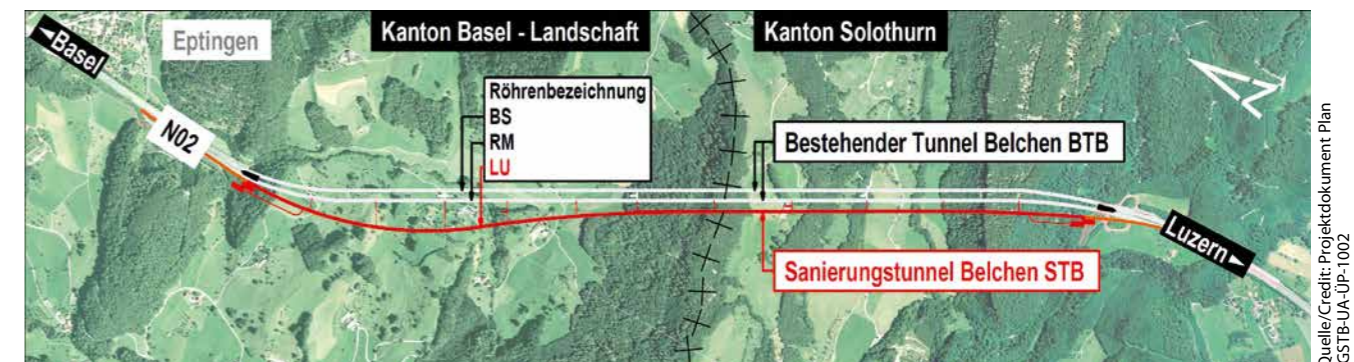
- 40% der Streckenlänge liegen in wasserführenden, geklüfteten, harten Dolomit- und Kalksteinen sowie Sandsteinen.
- 60% der Streckenlänge bestehen aus weichen, trockenen,

2 The Geology and the Potential Risks

2.1 The Geology

The Belchen refurbishment tunnel lies in the Fold Jura and crosses Triassic and Jurassic sedimentary rocks. The mountains are affected by intensive tectonics, which manifests in the formations being dissected into many, mostly precipitous, scales and folds. The rocks can be divided into two groups based on their geotechnical properties:

- 40% of the section is in water-bearing, fractured, hard dolomite, limestone and sandstone.
- 60% of the section consists of soft, dry, swelling and adhesion-prone clay and marlstone with anti-slip armour.



1 Lageplan
Site plan

Quelle/Credit: Projektdokument-Plan
IGSTB-UA-UP-1002

vielfach quellfähigen und verklebungsanfälligen Ton- und Mergelgesteinen mit Rutschharnischen.

Bedingt durch die Verfaltung treten einzelne Schichtglieder mehrfach und mit unterschiedlichem Einfallen im Tunnel auf. Der wichtigste Aquifer ist der Hauptmuschelkalk. Dessen Wasser fließt vor allem längs der Klüfte, in Bruchzonen und auf Schichtfugen. Da diese Formationen an der Erdoberfläche austreichen, ist der Wassernachschub vor allem auch von Niederschlagsereignissen abhängig. Eine Gasgefährdung besteht durch das mögliche Vorhandensein von Methan, Schwefelwasserstoff und/oder Kohlensäure.

2.2 Die Gefahrenpotenziale

Für den Tunnelvortrieb besteht ein Grundproblem darin, dass die Wechsellagerung von unterschiedlichen Gesteinen zu einer Verschleppung von Wasser – auch in kleinsten Mengen – in bis anhin trockene Schichten mit Quellpotenzial führen kann. Bestimmend für das Tunneldesign ist dadurch die Strecke des Gipskeupers mit einer Länge von rund 1,3 km.

Die quellhaften Gesteinszonen verlangen einen raschen Ringschluss, damit dem sich entwickelnden Quelldruck möglichst schnell ein Widerstand entgegengebracht werden kann. Der Baumethode mittels TBM, welche das Gebirge schnell und schonend abbaut, wurde daher gegenüber den konventionellen Ausbruchmethoden der Vorrang gegeben. Der Gefahr des Verklebens des Schildmantels wird mit der Auslegung der Vortriebsmaschine und mit einem ununterbrochenen Schichtmodell entgegengewirkt.

Die Gasgefährdung wird mit sieben Messstellen auf der TBM konstant überwacht und online aufgezeichnet. Bei einer Überschreitung des Alarmwertes (= 30% UEG) wird der Vortrieb automatisch abgeschaltet, der blasende Lüfter am Portaleingang auf das Maximum hochgefahren, die Arbeitsstellen evakuiert und die zuständige Gaskommission alarmiert. Die Freigabe der Vortriebsarbeiten erfolgt nach Nachmessungen durch den externen Gasexperten. Während der Vortriebsarbeiten wurden vereinzelt Gase durch die Messstation nachgewiesen. Der Alarmwert wurde jedoch nie überschritten.

The folding causes individual layers to occur repeatedly and with different inclinations in the tunnel. The most important aquifer is the main shell limestone. Its water mostly flows along the joints, in fracture zones and on layers. As these formations stretch across the earth's surface, water supplies are dependent most of all on precipitation events. The potential presence of methane, hydrogen sulphide and/or carbon dioxide poses a gas hazard.

2.2 Potential for Risks

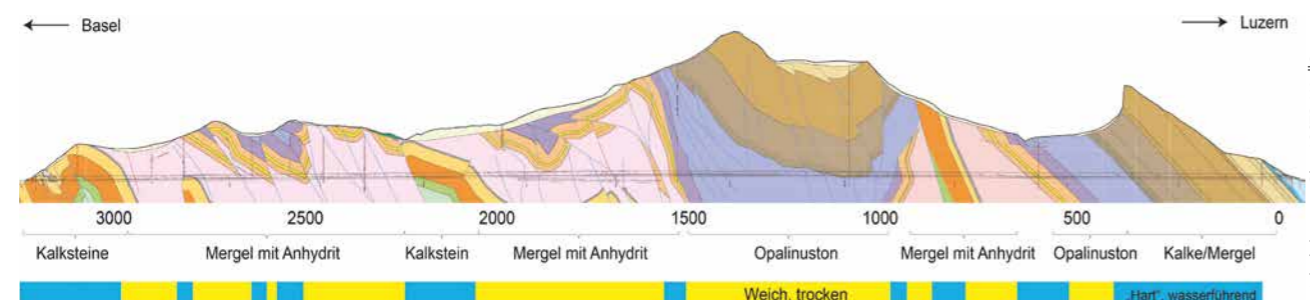
For the tunnel drive, there is a basic problem in that the interbedding of different rocks can lead to water being carried over – even in very small quantities – into hitherto dry layers with the potential for swelling. The Gipskeuper section with a length of approx. 1.3 km is therefore crucial for the tunnel design.

The zones of swelling rock require a rapid ring closure in order to apply resistance to the growing swelling pressure as quickly as possible. The construction method using TBM, which removes the mountain rock quickly and gently, is therefore preferred to conventional excavation methods. The risk of the shield jamming is avoided by a special TBM shield design and a continuous operation.

The gas hazard is constantly monitored using seven measuring points on the TBM and recorded online. If the alarm value (=30% LEL) is exceeded, the drive switches off automatically, the ventilator fans at the portal entrance are turned up to the maximum, the workplaces are evacuated and the relevant gas board is informed. Restart of excavation is approved based on resurveying by the external gas expert. During excavation, gases were recorded individually by the measuring station. However, the alarm value was never exceeded.

2.3 The Transition Zones

The drive route is 3,176 m long and crosses 20 different geological formations, some of which occur repeatedly. As a result, there are 48 geological layer changes in total. In the site set-up phase, the JV together with the construction management intensively dealt with the geological forecasts and the measures.



2 Geologisches Längenprofil
 Rote Ringe = kritische Übergangs-, Störzonen
 Blau = Kalk-, Dolomit- und Sandsteine, hart, wasserführend
 Gelb = Ton- und Mergelsteine, weich, trocken

Geological longitudinal profile
 Red rings = critical transition, fault zones
 Blue = limestone, dolomite and sandstone, hard, water-bearing
 Yellow = clay and marlstone, soft, dry

Quelle/Credit: Projektdokument Plan IGSTB-UA-UP-9002

2.3 Die Übergangszonen

Die Vortriebsstrecke hat eine Länge von 3176 m und durchquert dabei 20 verschiedene geologische Formationen, welche zum Teil wiederholt vorkommen. Dadurch ergeben sich insgesamt 48 geologische Schichtwechsel. In der Einrichtungsphase der Baustelle hat sich die ARGE gemeinsam mit der Bauleitung intensiv mit den geologischen Prognosen und den Massnahmen auseinandergesetzt.

Dazu wurden drei Schichtwechselmodelle [1] definiert, welche die Stelle jeder geologischen Übergangszone entweder zu Beginn, in der Mitte oder am Ende festlegen.

Das Ausbruchmaterial wird grundsätzlich entweder über ein Förderband in die nahegelegene Enddeponie Fasiswald (ISDF) des Bauherrn geführt oder es steht der ARGE für die Wiederverwendung zur Verfügung. Diese erfolgt einerseits direkt auf der Baustelle für die Hinterfüllung des Werkleitungskanals im Tunnel oder der Portalbauwerke im Aussenbereich. Andererseits erfolgt eine Materialabgabe an Dritte im Mittelland.

Für jeden geologischen Abschnitt wurden die Massenbilanz sowie die Verwendung bzw. die Deponierung bestimmt.

Aus den bereits erwähnten Schichtwechseln wurden insgesamt 15 Schichtwechselkombinationen als mögliche Störzonen mit einer akuten Gefahr von Vortriebsstillständen ermittelt. Diesen Übergangszonen wurden aus den Gefährdungsszenarien der IG STB [2] die möglichen Gefährdungsbilder zugeordnet und definiert.

Die Gefährdungen können einzeln zu Vortriebsstillständen von Tagen bis Wochen führen. In einem detaillierten Drehbuch wurde festgelegt, wie die einzelnen Übergangszonen zu durchfahren sind und welche materiellen und organisatorischen Massnahmen im Voraus zu treffen sind.

2.4 Vorauserkundungen und Ortsbrustaufnahmen

Die systematische Vorauserkundung erfolgte grundsätzlich mittels 30 bis 40 m langen Zerstörungsbohrungen durch eine Öffnung im Bohrkopf. Es wurden bewusst eher kürzere Erkundungen unternommen, damit diese sicher in der nächtlichen Wartungsschicht Platz haben und somit den eigentlichen Vortrieb nicht beeinträchtigen. Falls bei diesen «schnellen» Bohrungen Unklarheiten bestanden, so wurde jeweils zusätzlich eine genauere, jedoch zeitaufwendigere Kernbohrung angeordnet.

Die genaue Aufnahme der Ortsbrust ist eine unabdingbare Information zur Gewährleistung der Vortriebsicherheit und für den geologischen Soll-Ist-Vergleich. Dabei stellt jedoch der Bohrkopf mit 14 m Durchmesser bzw. mit seiner enormen Ausbruchfläche von über 153 m² einen erheblichen Zeitaufwand und ein Sicherheitsrisiko dar. Aus dem einzelnen Mannloch im Bohrkopf ist auch mit einem Scheinwerfer nur eine beschränkte Sicht der gesamten Ortsbrust möglich. Der Bohrkopf muss daher mehrere Male um einige Grad gedreht werden, was wiederum ein zeitaufwendiges Ein- und Aussteigen

For this purpose, three layer change models [1] were defined, determining the point of each geological transition zone either at the beginning, in the middle or at the end.

The excavated material is either moved to the client's nearby final landfill at Fasiswald (ISDF) using a conveyor belt or provided to the JV for re-use. This may take place directly on the site for the purpose of backfilling the service channel in the tunnel or the portal constructions at the exterior. Materials are also supplied to third parties in the Swiss plateau.

The mass balance and the use and/or disposal were determined for each geological section.

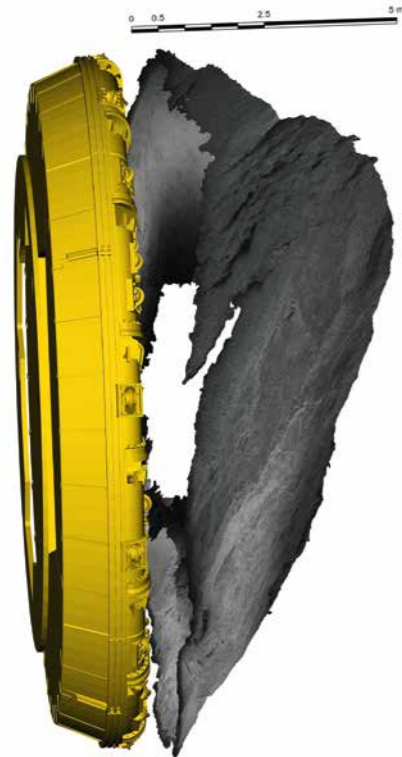
Based on the layer changes mentioned above, a total of 15 layer change combinations were calculated as potential fault zones with an acute risk of bringing excavation to a standstill. These transition zones were assigned to the potential hazard scenarios and defined based on the IG STB risk scenarios [2].

The risks may each bring excavation to a standstill lasting days or weeks. A detailed script set out how to pass through the individual transition zones and which material and organisational measures should be taken in advance.

2.4 Advance Probing and Face Mapping

Systematic advance probing was done through an opening in the cutterhead using 30 to 40 m long destruction bores. Relatively short probe holes were carried out deliberately to ensure that they could be completed during the night monitoring shift and therefore did not impact actual excavation. In case of any uncertainties with these 'quick' bores, a more precise but more time-consuming core drilling was additionally arranged.

The exact mapping of the face is crucial information to guarantee drive safety and for a geological target-actual comparison. However, the cutterhead with a diameter of 14 m and/or its enormous excavation area of over 153 m² is considerably time-consuming and represents a safety risk. The single manhole offers only a restricted view of the entire face with a headlamp. The cutterhead must therefore be turned several degrees multiple times which in turn requires time-consuming climbing in and out. The individual recordings acquired must also be combined in the office to give an overall view, requiring additional effort. The solution was to use an autonomous mapping unit. A selected photographic record was made of the face using a standard 'outdoor' camera (e.g. GoPro). This is fixed to the periphery of the cutterhead during the maintenance shift. A video is recorded along the circumference as the cutterhead is turned. At the same time, the necessary information on orientation is recorded on a smartphone or notepad, which is also used to control the camera angle. The video acquired is used to create a consistent three-dimensional image with the help of a special photogrammetric software. The resulting 3D images are used to quantify individual excavations



Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

3 Typische Ortsbrustaufnahme mit 3D-Modell vor dem Bohrkopf bei Tunnelmeter 1474

Typical face image with 3D model in front of the cutterhead at tunnel metre 1474

bedeutet. Die dadurch erhaltenen Einzelaufnahmen müssen zudem im Büro aufwendig zu einer Gesamtaussage zusammengestellt werden. Die Lösung bestand darin, eine autonome Aufnahmeeinheit einzusetzen. Die ausgewählte fotografische Ortsbrustaufnahme erfolgte mit einer handelsüblichen «Outdoor»-Kamera (Bsp. GoPro). Diese wird während der Wartungsschicht im peripheren Bereich des Bohrkopfes fest montiert. Während einer Drehung des Bohrkopfes wird entlang des Umfangs ein Video aufgenommen. Gleichzeitig werden über ein Smartphone oder ein iPad, welches zudem auch die Kameraeinstellung steuert, die notwendigen Orientierungsinformationen aufgezeichnet. Aus dem erhaltenen Video wird, unter Anwendung einer speziellen fotogrammetrischen Software, ein konsistentes dreidimensionales Bild erzeugt. Die resultierenden 3D-Bilder werden dazu benutzt, um einzelne Ausbrüche aus der Ortsbrust sowie die Ebenheit der aufgenommenen Bereiche zu quantifizieren. Sie dienen ausserdem für eine verbesserte geologische Kartierung inklusive der Bestimmung von Trennflächenorientierungen und stellen daher eine umfassende und objektive Dokumentation dar. Nach einer kurzen Einführungsphase wurde für eine Ortsbrustaufnahme im Mittel lediglich noch eine halbe Stunde benötigt.

3 Die Projektanforderungen

3.1 Die Ringschlusszeit 1 und 2

Der erste Ringschluss bzw. die fertig erstellte Ausbruchssicherung ist in den Quellabschnitten nach maximal einem

from the face and the evenness of the areas recorded. They are also used for improved geological mapping, including determining the orientation of discontinuities, thus providing comprehensive and objective documentation. After a short introductory phase, only half an hour was required to map the face in the middle.

3 The Project Requirements

3.1 Ring Closure Duration 1 and 2

The first ring closure and/or the completed excavation support must be installed in the sections of swelling rock at the latest one month after excavation. With the commissioned excavation method of a shield TBM with segment lining, this requirement is met at the same time as the excavation. The second ring closure and/or the completed inner lining must be installed in the sections of swelling rock at the latest four months after excavation. This requirement is met through simultaneous and coordinated excavation and lining. However, this requires a high degree of mechanisation of workflows to ensure smooth interplay between all stages of work and the required quality of execution. This in turn places very high demands on site organisation and work preparation for all involved.

3.2 The Tunnelling Equipment

In light of the geology and the potential risks, specific additional mechanical requirements [3] for the design of the tunnel boring machine were already set out in the tender. These were all considered and implemented in production.

4 The Tunnelling Experience

4.1 The Obstacles

With the exception of the widespread instability in Opalinus clay and a short section that passed through geogenically polluted material, all difficulties encountered were already detected in the work preparation phase. The negative impact of groundwater on the drive, for example through adhesion, was constantly feared, but occurred on only one occasion. The reason for this is certainly the fact that the mountain has already been extensively drained by the two existing BTB tunnels and the TBM was able to excavate in more favourable conditions.

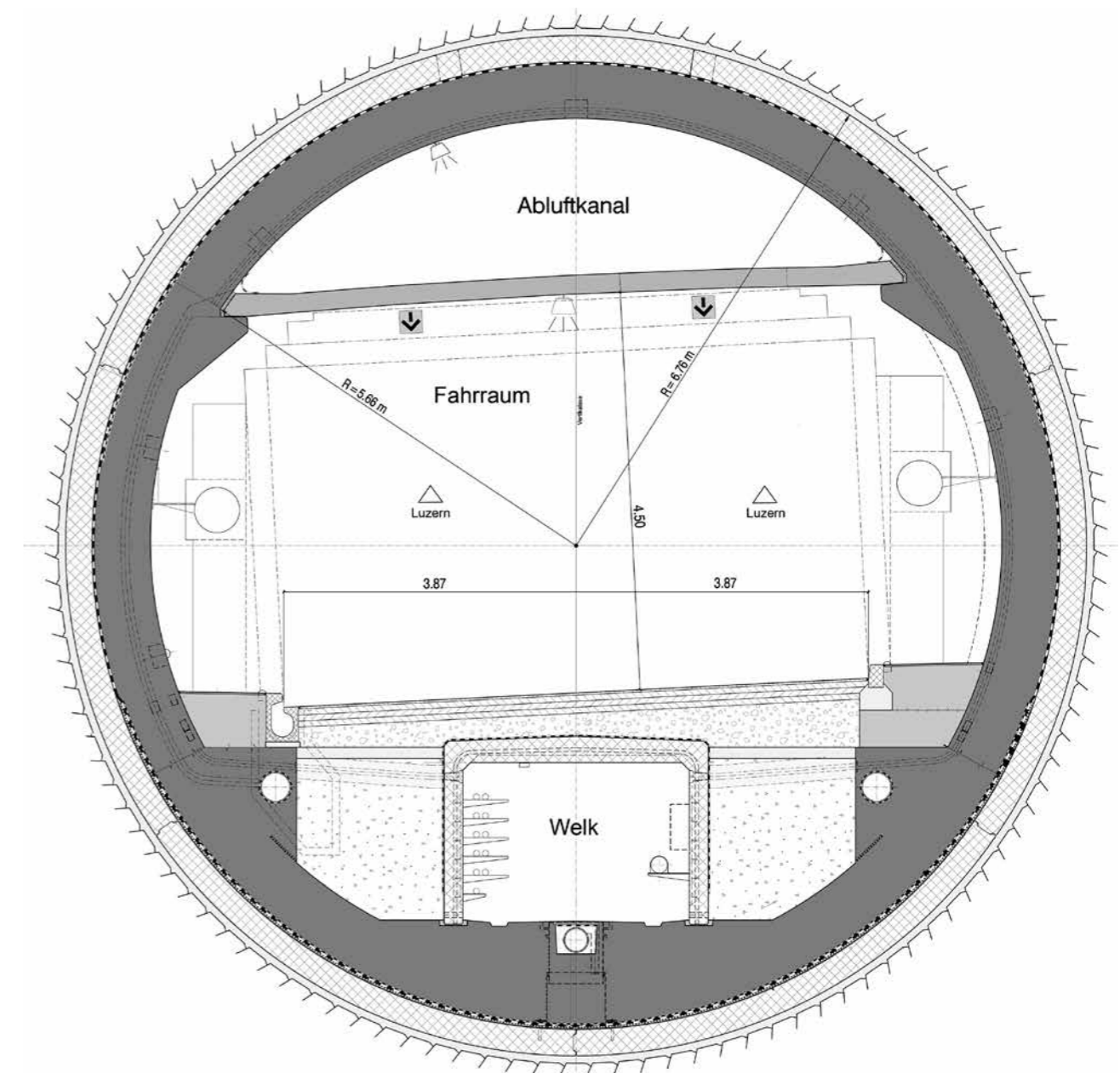
The following obstacles were overcome, in chronological order:

- tm 80 to 231: The increased hardness of the Hauptrogenstein required the cutterhead to be partly reinforced retrospectively and the cracks which occurred to be renovated.
- tm 366 to 378, transition zone no. 1: The unwelcome ingress of water between the Murchisonae and the Opalinus clay was interrupted by a draining facility. In addition, a section of coarse limestone led to a blockage of the conveyor belt transfer area, which was remedied through manual work.
- tm 623, transition zone no. 2: This highly critical zone (unstable face) between coloured marl and Schilf sand-

Monat zum Vortrieb einzubauen. Mit der beauftragten Ausbruchmethode Schild-TBM mit Tübbingeinbau wird diese Anforderung zeitgleich mit dem Ausbruch erfüllt. Der zweite Ringschluss bzw. das fertig erstellte Innengewölbe ist in den Quellabschnitten nach maximal vier Monaten zum Vortrieb einzubauen. Mit der gleichzeitigen und abgestimmten Ausführung der Vortriebs- und Verkleidungsarbeiten wird auch diese Anforderung erfüllt. Dies erfordert jedoch eine hohe Mechanisierung aller Arbeitsabläufe, um das reibungslose Zusammenspiel aller Arbeitsphasen und die geforderte Qualität der Ausführung zu gewährleisten. Dies wiederum stellt sehr hohe Anforderungen an die Baustellenorganisation und die Arbeitsvorbereitung aller Beteiligten.

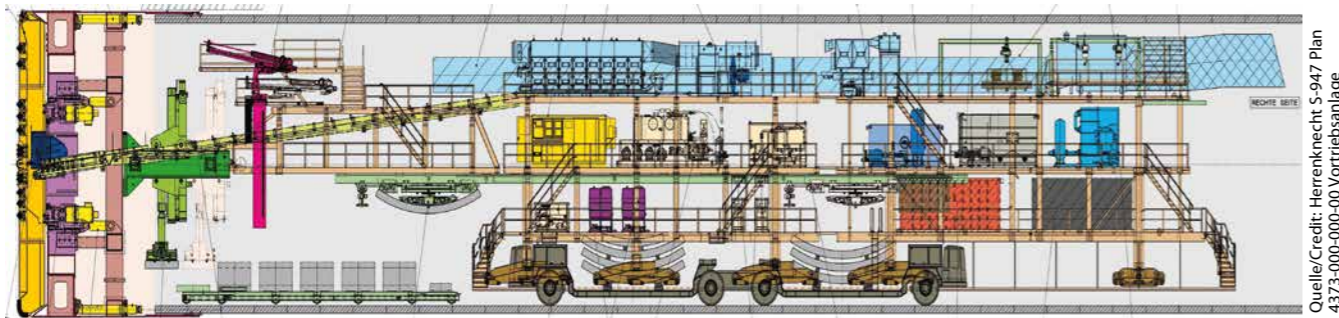
stone was tempered in advance by auxiliary construction measures. With the placement of the probedrilling unit on the erector, a series of GFRP face bolts was installed in the crown. It was then possible to pass through without incident.

- tm 783 to 821, transition zone no. 3: In the transition area between the Gipskeuper, the Lettenkohle and the dolomite to the Hauptmuschelkalk, excavated material naturally polluted by petrol, known as bituminous limestone, was excavated. The penetrating stench led to all works being interrupted for several days for analysis to take place. The drive team was then equipped for the duration of passage through the rest of the polluted sta-



4 Normalprofil PT II
PT standard profile

Quelle/Credit: Projektdokument Plan IGSTB-UA-TPI-1-2001



Quelle/Credit: Herrenknecht S-947 Plan 4373-000-000-00 Vortriebsanlage

5 Vortriebsanlage TBM S-947
Drive facility TBM S-947

3.2 Die Vortriebsausrüstung

In Kenntnis der Geologie und des Gefährdungspotenzials wurden bereits in der Ausschreibung spezifische zusätzliche maschinentechnische Anforderungen [3] an die Auslegung der Tunnelvortriebsmaschine gestellt. Diese wurden in der Herstellung alle berücksichtigt und umgesetzt.

4 Die Vortriebserfahrung

4.1 Die Vortriebsürden

Mit Ausnahme der ausgedehnten Instabilitäten im Opalinuston und eines kurzen Abschnitts, der durch geogen belastetes Material führte, wurden alle angetroffenen Schwierigkeiten bereits in der Phase der Arbeitsvorbereitung erkannt. Der ständig befürchtete negative Einfluss des Bergwassers auf den Vortrieb, zum Beispiel durch Verklebungen, ist mit Ausnahme eines Ereignisses nicht eingetreten. Ursache hierfür ist sicherlich die Tatsache, dass der Berg durch die beiden bestehenden Röhren des BTB schon umfangreich drainiert worden ist und die TBM so meistens entspannte Verhältnisse auffahren konnte.

In chronologischer Abfolge wurden die nachfolgenden Hürden überwunden:

- tm 80 bis 231: Durch die erhöhte Gesteinhärte im Hauptrogenstein musste der Bohrkopf nachträglich partiell verstärkt und die entstandenen Risse saniert werden.
- tm 366 bis 378, Übergangzone Nr. 1: Der unerwünschte Wasserzutritt zwischen dem Murchisonae und dem Opalinuston wurde mit einem Sickerschlitz unterbrochen. Zudem führte ein Vorausbruch aus grobblockigem Kalkstein zu einer Verstopfung der Bandübergabe, welche mit händischer Spitzarbeit behoben wurde.
- tm 623, Übergangzone Nr. 2: Diese als sehr kritisch beurteilte Zone (instabile Ortsbrust) zwischen Bunten Mergeln und Schilfsandstein wurde vorgängig durch Bauhilfsmassnahmen vergütet. Mit dem Aufsetzen der Sondierbohrereinheit auf den Erektor wurde im Firstbereich eine Serie GFK-Brustspiesse verbaut. Die anschliessende Durchfahrt verlief problemlos.
- tm 783 bis 821, Übergangzone Nr. 3: Im Übergangsbereich zwischen dem Gipskeuper, der Lettenkohle und dem Dolomit zum Hauptmuschelkalk wurde natürlich petrol-

tion with a complete set of protective breathing equipment.

- tm 937, transition zone no. 5: Between the Schilf sandstone and the dolomite to the coloured marl, the cutterhead repeatedly became jammed or stuck. The muck buckets (openings) of the cutterhead then had to be painstakingly cleared through heavy manual work. The cause of this disruption was partly due to the high rock strength of up to 230 MPa in the individual dolomite layers and in part due to the extremely low strength in the clay skins in between. As the Gansinger dolomite was also very fractured, whole sections of rock repeatedly slipped off the face. A large pile of brick-like blocks piled up in front of the TBM, which became so badly wedged during the drive with the reduced cutting speed of the cutting wheel that it led to a blockade. Consequently, to avoid such lengthy periods of downtime, the openings on the cutting wheel were reduced with additional bars and the TBM driving style was adapted. Before standstill (ring building), the excavation chamber in front of the cutterhead had to be emptied where possible.
- tm 937 to 1,037: Between the transition from coloured marl and Lias to Opalinus clay, the unstable face with large blocks required additional effort in removing the excavated



Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

6 Backsteinartige Blöcke des Gansinger Dolomits im Schneidrad bei Tunnelmeter 937
Brick-like blocks of Gansinger dolomite in the cutting wheel at tunnel metre 937

belastetes Ausbruchmaterial, der sogenannte Stinkkalk, aufgefahren. Der penetrante Gestank führte zu einem mehrtägigen Unterbruch der Vortriebs- und der Innenausbauarbeiten während der Dauer der Analytik. Die Vortriebsmannschaft wurde sodann für die Dauer der Durchfahrt durch den restlichen belasteten Abschnitt mit einer kompletten Atemschutz-Ausrüstung ausgestattet.

- tm 937, Übergangzone Nr. 5: Zwischen dem Schilfsandstein und dem Dolomit zu den Bunten Mergeln kam es wiederholt zu einem Verkleben bzw. Festsitzen des Bohrkopfes. Daraufhin mussten die Räumergassen im Bohrkopf jeweils durch schwere Handarbeit mühsam befreit werden. Die Ursache dieser Störung lag einerseits in der hohen Gesteinsfestigkeit von bis zu 230 MPa in den einzelnen Dolomitlagen und andererseits in der extrem geringen Festigkeit in den dazwischenliegenden Tonhäutchen. Da der Gansinger Dolomit zusätzlich noch stark geklüftet war, kam es in der Ortsbrust wiederholt zum Abrutschen ganzer Gesteinspakete. Es bildete sich vor der TBM ein grösserer Haufen von backsteinartigen Blöcken, die sich während des Vortriebs mit reduzierter Drehzahl im Schneidrad dermassen verkeilten, dass dies zur Blockade führte. Als Konsequenz, um solche zeitaufwendigen Stillstände zu vermeiden, wurden einerseits mit zusätzlichen Streben die Räumeroöffnungen des Schneidrades verkleinert und andererseits die Fahrweise der TBM angepasst. Vor Stillständen (Ringbau) musste die Abbaukammer vor dem Bohrkopf möglichst leergeschuttet sein.
- tm 937 bis 1037: Zwischen dem Übergang von Bunten Mergeln und dem Lias zum Opalinuston führte die instabile Ortsbrust mit grossen Blöcken zu einem Mehraufwand in der Abförderung des Ausbruchmaterials über die Bandanlage. Auslöser der Instabilität sind parallel zur Schichtung orientierte glatte Trennflächen, sogenannte Harnischflächen, mit extrem reduzierter Festigkeit. Während des Durchbohrens lösen sich diese immer wieder paketartig und führen so zu einer schwallartigen, sehr un stetigen Abförderung des Ausbruchmaterials. Als Konsequenz, um das Förderband nicht zu überfüllen bzw. die Bandübergaben nicht zu verstopfen, musste der TBM-Fahrer neben der Anpresskraft auch die Drehzahl des Schneidrades zurücknehmen.
- tm 1476 bis 1504: Ein Wasserzutritt im Übergangsbereich des Opalinustons zum Lias führte zu einem Verkleben bzw. Verstopfen der Räumergassen des Bohrkopfes. Daraufhin musste der Bohrkopf jeweils durch Hochdruckreinigung und schwere Handarbeit mühsam befreit werden.
- tm 3176 bis 3124: Gegenvortrieb ab dem Portal Eptingen. Im Frühjahr 2016 wurde programmgemäss neben dem Haupttunnel der parallele, 240 m lange Abluftstollen Nord im Sprengverfahren ausgebrochen. Dabei wurde zwischen Tunnelmeter 64 und 111 ein ausgedehnter Karstabschnitt durchörtert mit mehreren geologischen Niederbrüchen, erheblichen Wasserzutritten und Schlammengen. Diese Störung korreliert im Haupttunnel mit der letzten Übergangzone Nr. 15. Daher wurden im Oktober 2016 vier zusätzliche Kernbohrungen in diese Störung angeordnet.



Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

7 Typische Opalinustonblöcke auf dem Förderband
Typical Opalinus clay blocks on the conveyor belt

material via the TBM conveyor belt system. The causes of instability are smooth discontinuities running parallel to the layer, known as slickensides, with extremely reduced strength. During drilling, these come loose in packs and lead to a surging, erratic removal of excavated material. Consequently, to avoid overloading the conveyor belt and/or blocking the belt supply, the TBM driver must lower the contact pressure and reduce the speed of the cutting wheel.

- tm 1,476 to 1,504: Ingress of water in the transition area from Opalinus clay to Lias led to the spaces in the cutterhead becoming jammed and/or blocked. The cutterhead then had to be painstakingly released through high pressure cleaning and heavy work by hand.
- tm 3,176 to 3,124: Reverse drive from the Eptingen portal. In early 2016, as scheduled, the 240 m long north exhaust tunnel running parallel to the main tunnel was excavated by drill and blast. Between tunnel meters 64 and 111, an extended section of karst was intersected with several geological depressions, considerable ingress of water and quantities of mud. In the main tunnel, this disruption correlates with the last transition zone no. 15. Accordingly, in October 2016, four additional core drills were arranged in this disruption. They confirmed the poor geological condition of the rock mass. To prevent the TBM becoming blocked and/or stuck unnecessarily before the breakthrough, the client commissioned the JV to produce a 52 m-long top heading and bench drive with two additional pipe roofing umbrellas in November 2016. The additional works lasted from the beginning of February to the end of May 2017, as planned. From the beginning of June until the breakthrough, TBM was able to pass through the reverse drive section without incident.

Diese bestätigten den schlechten geologischen Zustand des Gebirges. Um ein unnötiges Blockieren bzw. Festfahren der TBM kurz vor dem Durchschlag zu verhindern, beauftragte der Bauherr die ARGE im November 2016 damit, einen Kalotten- und Strossenvortrieb von 52 m Länge, mit zwei zusätzlichen Rohrschirmetappen, zu erstellen. Diese Zusatzarbeiten dauerten planmässig von Anfang Februar bis Ende Mai 2017. Anfang Juni und bis zum Durchstich konnte die TBM den Gegenvortriebsabschnitt problemlos passieren.

Die oben erwähnten Hürden verursachten insgesamt einen rund anderthalbmonatigen Vortriebsstillstand und bildeten zu dessen Überwindung eine eigentliche Herkulesaufgabe für die Vortriebsmannschaft. Dank der Erfahrung und Flexibilität unserer Mitarbeiter konnten die Stillstände nicht nur auf ein Minimum reduziert, sondern durch höhere Vortriebsleistungen in den Abschnitten «dazwischen» sogar weitestgehend wieder aufgeholt werden.

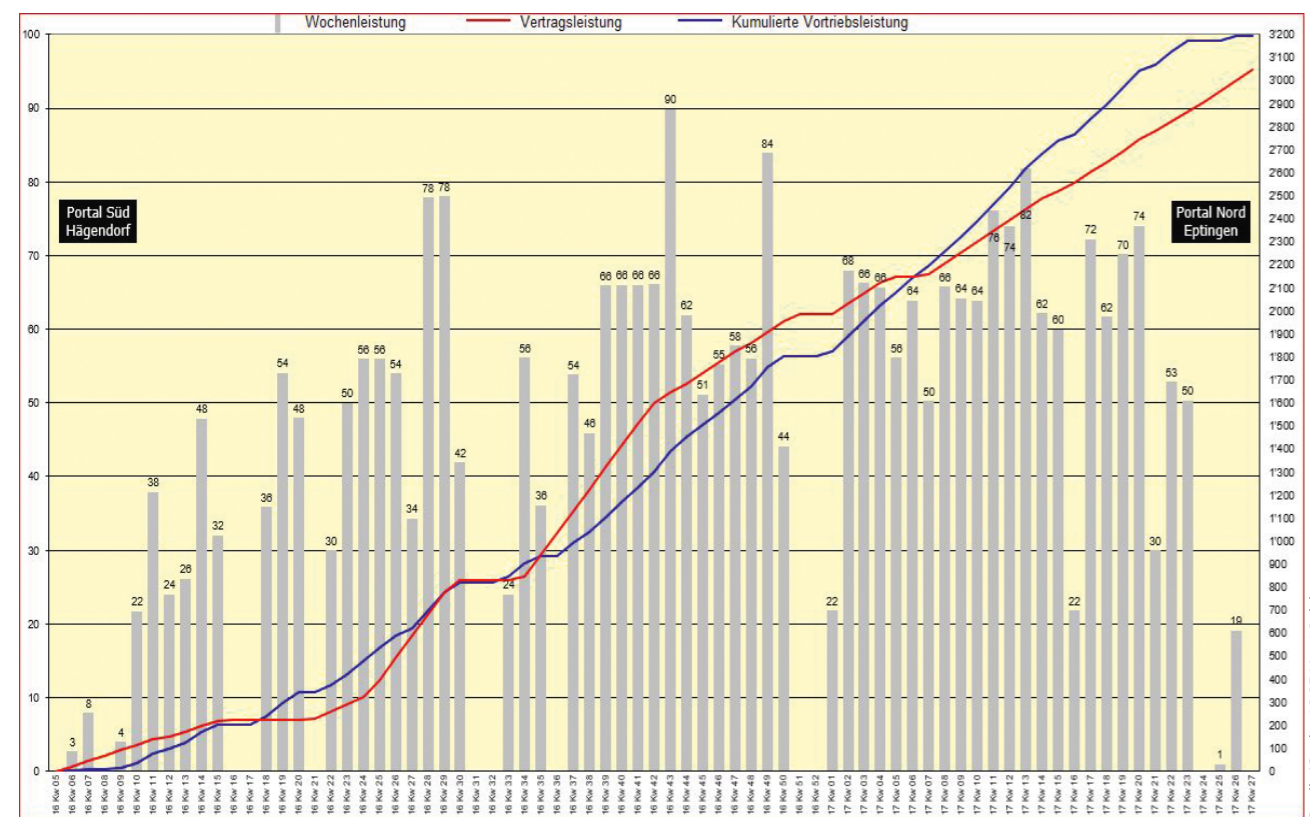
4.2 Die Vortriebsleistungen

Im Werkvertrag ist eine Brutto-Vortriebsleistung inklusive aller Unterbrüche infolge Geologie (Bauhilfsmassnahmen) und infolge Installationen für den Innenausbau (Unternehmer) von 7,6 m/AT vereinbart. Die Vortriebsarbeiten begannen termingerecht am 9. Februar 2016 mit der Andrehfeier. Das Vortriebszenario sah eine Anfahr- und Startphase in der ersten Abfolge von Kalk- und Mergelformationen bis zur

The obstacles mentioned above caused a total of approximately one and a half months of excavation downtime and took a Herculean effort to overcome on the part of the drive team. Thanks to the experience and flexibility of our staff, it was possible not only to reduce downtime to a minimum, but to catch up again for the most part thanks to higher advance rates in the sections 'in between'.

4.2 The Advance Rates

In the contract, a overall advance rate including all interruptions resulting from geology (auxiliary construction measures) and installations for the inner lining (contractor) of 7.6 m/working day is agreed. The excavation began as scheduled on 9 February 2016 with the inaugural ceremony. According to the drive scenario, there was to be a launch and start-up phase in the first sequence of limestone and marl formations up to the first transition area to Opalinus clay at tunnel metre 330. A 5/2 shift model was implemented to pass through this section. From tunnel metre 330 and at the beginning of the sections in swelling formations, this was switched to continuous drive using a 9/5 shift model. The daily production rate of the TBM of 14 m required to ensure the cadence of the inner lining – including the planned interruptions for formwork construction – was the most frequently achieved production rate. This was often exceeded with production rates of 16 to 20 m/working day. It was even possible to reach a peak production rate of 26 m/working day in the Gipskeuper. The weekly record was 90 m. After around 17 months of driving, on 21 June 2017, the



8 TBM-Vortriebsleistungen pro Woche
TBM drive outputs per week

Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

ersten Übergangszone zum Opalinuston bei Tunnelmeter 330 vor. Der Abschnitt wurde mit einem 5/2-Schicht-Modell aufgefahren. Ab dem Tunnelmeter 330 und mit Beginn der Abschnitte in quellfähigen Formationen wurde auf einen ununterbrochenen Vortrieb mit einem 9/5-Schicht-Modell umgestellt. Die für die Sicherstellung der Kadenz des Innenausbaus – inklusive der geplanten Parkstillstände für die Inbetriebnahme der Schalungen – geforderte Tagesleistung der TBM von 14 m stellte die meist erzielte Vortriebsleistung dar. Sie wurde vielfach mit Leistungen zwischen 16 und 20 m/AT übertroffen. Sogar eine Spitzenleistung mit 26 m/AT im Gipskeuper konnte erreicht werden. Der Wochenrekord lag bei 90 m. Nach rund 17 Monaten Vortriebsdauer fand am 21. Juni 2017 der von allen Beteiligten mit Freude erwartete Durchstich statt. In der Schlussbilanz wurde eine Bruttobohrleistung von 6,5 m/Tag und eine Nettobohrleistung von 11,4 m/AT erreicht.

5 Die Schnittstellenlösungen im Vortrieb und in der Verkleidung

Es bestand zur Einhaltung der geforderten Gleichzeitigkeit der Arbeiten auch die Möglichkeit, die Arbeitsabläufe für das Sohlgewölbe und den Werkleitungskanal im Nachläuferbereich der TBM zu integrieren. Diese starre Verkettung der Arbeitsstellen hat jedoch hinsichtlich Pannen und Flexibilität auch erhebliche Nachteile. Die vereinbarte viermonatige Ringchlusszeit lässt zudem bei einer zugrunde liegenden Blockkadenz von 10 m pro Tag einen rund 1200 m langen Arbeitsabschnitt zwischen der TBM und der Gewölbeverkleidung zu. Daher haben wir bewusst eine räumliche Trennung des Vortriebes und der Verkleidung angeboten. Dies erlaubt zum Beispiel bei einem Unterbruch des Vortriebes eine rund zwei- bis dreiwöchige Pufferzeit, bis auch die Gewölbearbeiten auflaufen würden. Im Bauprogramm war zudem der Arbeitsbeginn der Zwischendecke mit dem Ende der Vortriebsarbeiten gekoppelt. Ein möglicher Zeitrückstand des Vortriebes hätte so, bedingt durch den starren Zeitbedarf für die Zwischendecke, nicht mehr aufgeholt werden können. Auf Antrag der ARGE wurde daher – zur bestmöglichen Wahrung der Handlungsfreiheit – gemeinsam beschlossen, hinter der Verkleidungsarbeit auch die Zwischendecke mit zu erstellen.

Den kritischen Faktor für das Gesamtbauprogramm des Projektes bildet daher der fixe Takt des Innengewölbes mit einem 10-m-Block pro Tag und nicht die geologisch bedingten un stetigen Vortriebsarbeiten. Entsprechend wurden auch für die Arbeitsgattung der Verkleidung sämtliche Vorgänge bereits in der Arbeitsvorbereitung detailliert festgelegt. Diese beinhaltete das gesamte Bewehrungskonzept aus vorgefertigten Bewehrungskörben, die Ausführung der Kabelleerrohre und der dazugehörigen Aussparungen, das Einbinden der SOS-Nischen und das zeitsparende Aussparen der Eingangsbereiche zu den Querverbindungen mit einer angedockten Kragenschalung. Die Gewölbebetonarbeiten liefen über die ganze Tunnellänge während sieben Tagen pro Woche,

breakthrough that had been anticipated by all involved took place. In the final statement, a gross advance rate of 6.5 m/day and a net advance rate of 11.4 m/working day was achieved.

5 Interface Solutions in Excavation and Lining

To ensure works took place simultaneously as required, there was also the option of integrating workflows for the invert vault and the service channel in the back-up section of the TBM. Creating this rigid chain of workplaces, however, has significant disadvantages in terms of breakdowns and flexibility. The agreed four-month ring closure time also allows for an approximately 1,200 m long working section between the TBM and the inner lining on the basis of a block cadence of 10 m per day. We deliberately provided a spatial separation between the excavation and the lining accordingly. This allowed, for example, a buffer time of about two to three weeks in the event of an interruption in tunnelling, until the lining work would also accumulate. In the construction schedule, the beginning of work on the intermediate ceiling and the end of the excavation were also coupled. Accordingly, due to the strict timing requirement for the intermediate ceiling, it would no longer have been possible to make up any potential drive delay. Accordingly, at the JV's request – to ensure maximum possible room for manoeuvre – it was jointly decided to produce the intermediate ceiling after the lining work too.

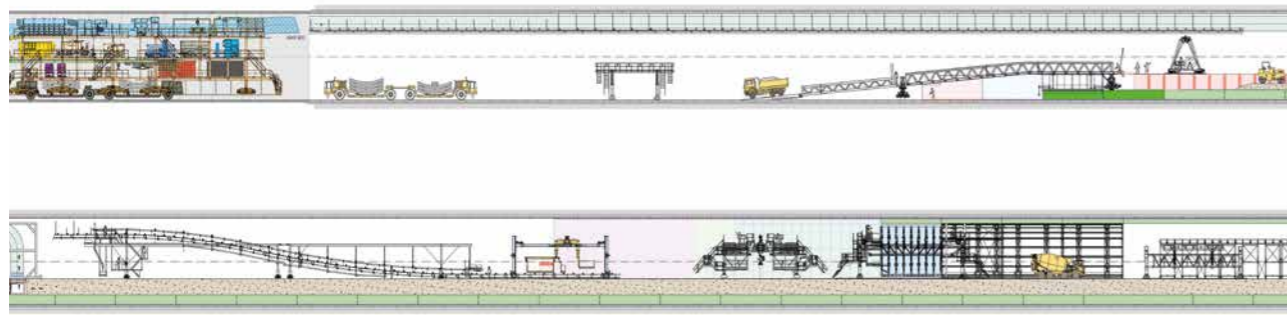
The critical factor for the entire construction schedule for the project is therefore the fixed cycle of the inner lining with a 10 m block per day and not the geologically caused discontinuous excavation work. Accordingly, all processes for the types of work involved in lining were already set out in detail in the work preparation. This included the entire reinforcement design made from pre-fabricated reinforcement cages, the design of the cable ducts and the associated recesses, the integration of the SOS niches and the time-saving recess of entrances to the cross-passages with an attached collar formwork. The lining concrete works ran for the entire length of the tunnel seven days a week without company holidays. To ensure all works can run simultaneously in an efficient and secure manner each day, smooth logistics must be ensured and any interfaces which occur must be neatly resolved. Some of these interfaces and their solutions will be described in more detail in the following sections.

5.1 The Segment Design

For the initial reinforcement, a single-cone, bolted segment lining ring consisting of six individual elements and a key-stone, 35 cm thick and 2 m wide, was chosen. The bolting served only to secure assembly during construction of the ring and annular gap filling. It was usually loosened and re-used in the last back-up deck.

The three following ring types were produced:

- 'Light' type in limestone and marl sections with a reinforcement content of 102 kg/m³;



Quelle/Credit: Projektdokument Plan 13-01-233-301h Bauablauf TBM-Vortrieb und Innenausbau

9 Bauablauf TBM-Vortrieb und Innenausbau
TBM drive and interior construction process

ohne Betriebsferien. Damit die Gleichzeitigkeit aller Arbeiten täglich effizient und sicher betrieben werden kann, muss eine reibungslose Logistik gewährleistet und die anfallenden Schnittstellen sauber gelöst werden. Einige dieser Schnittstellen und ihre Lösungen werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

5.1 Das Tübbingdesign

Für die Erstsicherung wurde ein unikonischer, verschraubter Tübbingring, bestehend aus sechs Einzelelementen und einem Schlussstein, mit einer Stärke von 35 cm und einer Breite von 2 m gewählt. Die Verschraubung diente lediglich als Montagesicherung während des Ringbaus und der Ringspaltverfüllung. Sie wurde in der Regel im Bereich des letzten Nachläufers wieder gelöst und wiederverwendet.

Bedingt durch die Geologie wurden die folgenden drei Ringtypen gefertigt:

- Typ «leicht» in den Kalk- und Mergelabschnitten, mit einem Bewehrungsgehalt von 102 kg/m³;
- Typ «mittel» im Opalinuston, mit einem Bewehrungsgehalt von 133 kg/m³;
- Typ «schwer» im Gipskeuper, mit einem Bewehrungsgehalt von 229 kg/m³.

Zudem sind alle Ringtypen zur Reduktion der Stabbewehrung und zur Verbesserung des Kantenschutzes mit 30 kg/m³ Stahlfasern bewehrt. Der Ringtyp «schwer» wurde zusätzlich zum Schutz vor sulfathaltigem Bergwasser mit dem Anstrichprodukt Sikagard-65WN versiegelt.

Im hauseigenen Produktionswerk in Balsthal wurden insgesamt 1589 Ringe produziert, gelagert und just in time auf die Baustelle geliefert.

5.2 Die Ringspaltverfüllung

Die korrekte und vollständige Ringspaltverpressung ist ein qualitatives Hauptanliegen des Projektes. Nur dadurch kann die gleichmässige Bettung des Tübbingrings gewährleistet bzw. das gewünschte Widerstandsprinzip im quellhaften Gebirge sofort erzielt werden und so die gefürchtete Längsläufigkeit von Bergwasser mit unterbunden werden. Die Anforderung an eine sulfatresistente Vermörtelung im ganzen

- 'Medium' type in Opalinus clay with a reinforcement content of 133 kg/m³;
- 'Heavy' type in Gipskeuper with a reinforcement content of 229 kg/m³;

All ring types are also reinforced with 30 kg/m³ steel fibres to reduce bar reinforcement and improve edge protection. The 'heavy' ring type is also sealed with a coating product in order to protect against sulphate-containing groundwater.

In the company's own production plant in Balsthal, 1,589 rings in total were produced, stored and delivered to the construction site just in time.

5.2 Annular Gap Backfilling

Correct and complete backfilling of the annular gap is a major quality aspect of the project. This way the regular bedding of the segment lining can be ensured, the desired resistance principle in the swelling rock can be achieved and the feared longitudinal flow of groundwater can be prevented. The requirement for sulphate-resistant grouting of the entire extent also led to the use of a two-component grout for the first time in Switzerland. To ease the burden on the TBM supply logistics, a stationary outside facility near the portal was chosen. It consists of a fully automated grout preparation facility of the company Häny, which is supplied by two 37 m³ silos of dry mortar and one 37 m³ silo of bentonite. The approximately 20 m³ of annular gap grouting required during a drive hub of 2 metres are evenly distributed through ten nozzles in the shield skin. The entire facility is fully automated and is managed and monitored by only one person at the TBM.

5.3 The Conveyor Belt System and Belt Transfer Carriage

The conveyor belt behind the TBM back-up is hung as usual in the crown area attached to the tubbing lining rings. This ensures that all workplaces in the area of the invert are bridged. For the subsequent works on the lining, however, the hanging belt structure poses an obstacle. The JV therefore had to come up with a solution of how this belt facility could be led securely through the lining formwork. At the quotation stage, a free-standing longitudinal beam in the crown area was considered. This would be led through the lining formwork construction. However, this solution proved to be impractical on a

Umfang hat erstmals auch in der Schweiz zum Einsatz eines Zwei-Komponenten-Mörtels geführt. Um die Versorgungslogistik der TBM zu entlasten, fiel die Wahl auf eine stationäre Aussenanlage in Portalnähe. Sie besteht aus einer vollautomatischen Mörtelaufbereitungsanlage der Firma Häny, welche über zwei Silos à 37 m³ mit Trockenmörtel und einem Silo à 37 m³ mit Bentonit versorgt wird. Die während eines Vortriebschubs von 2 Meter benötigten rund 20 m³ Ringspaltmörtel werden über zehn Lisenen im Schildmantel gleichmässig verteilt. Die gesamte Anlage ist vollautomatisch und wird lediglich von einem Mann auf der TBM gesteuert und überwacht.

5.3 Die Tunnelbandanlage und der Bandumsetzwagen

Das Tunnelband hinter der Vortriebsanlage wird wie üblich im Firstbereich an den Tübbing aufgehängt. Damit ist die Überbrückung der gesamten Arbeitsstellen im Bereich des Sohlgewölbes gewährleistet. Für die nachfolgenden Arbeiten am Innengewölbe stellt jedoch die aufgehängte Bandanlage ein Hindernis dar. Die ARGE musste daher eine Lösung dafür entwickeln, wie die Bandanlage sicher durch die Gewölbeschalung hindurchzuführen ist. In der Angebotsphase wurde ein unabhängig aufgestellter Brückenlängsträger im Firstbereich angedacht, welcher durch die Gewölbeschalungskonstruktion hindurchgeführt werden sollte. Diese Lösung erwies sich jedoch in der Detailbearbeitung als nicht praxistauglich. Aufgrund des grossen Tunnelquerschnittes bzw. des dadurch genügenden Platzangebotes im Fahrbahnbereich wurde ein eigens entwickelter, neuartiger Bandumsetzwagen realisiert. Dieser erlaubt es, das gesamte Förderband unter Betrieb von der Firste auf die Höhe der Fahrbahn herunterzuführen. Um ein Abheben des Bandes bei unterschiedlichen Belastungsfällen zu vermeiden, musste eine rund 80 m lange Rampe gewählt werden. Der hydraulisch verfahrbare Bandumsetzwagen übernimmt die Bandanlage in der Firste auf eine höhenverstellbare Arbeitsplattform. Diese Plattform hebt das Band an. Die dadurch entlasteten Aufhängeketten werden demontiert und stehen für die Wiederverwendung auf der TBM weiter zur Verfügung. Das Band wird nun über kürzere Ketten mit Rollsystemen an die zwei nebeneinanderliegenden Führungsschienen im Umsetzwagen eingehängt. Über diese Führungsschienen aus einem H-Profil, welche einem langegezogenen «S» entsprechen, gleitet die Bandanlage während der Vorwärtsbewegung des Umsetzwagens auf die Fahrbahn hinunter. Einmal unten angekommen, entlasten sich die Ketten und können ebenfalls für die Wiederverwendung demontiert werden. Die Bandanlage ruht nun am Boden auf den integrierten Stützböcken. Der Umsetzwagen hat sich im Betrieb vollends bewährt. Innerhalb einer halben Schichtdauer ermöglicht er das sichere Umsetzen der Tunnelbandanlage über mehrere hundert Meter. Mit dieser neuen und innovativen Lösung von Marti konnte einerseits die logistische Anforderung der Ver- und Entsorgung des Vortriebes vollumfänglich sichergestellt werden. Andererseits hat sie auch massgeblich zur Einhaltung der viermonatigen Ringschlusszeit beigetragen.

closer look at the details. Due to the large tunnel cross-section and the sufficient room available in the track area, a specially developed, new belt transfer carriage was produced. This allows the entire conveyor belt in operation to be lowered from the crown to the level of the track. To avoid the belt from detaching under different loads, a ramp of around 80 m in length was chosen. The hydraulically mobile belt transfer carriage takes the belt structure in the crown area onto a height-adjustable working platform. This platform lifts the belt. Thus relieved, the suspending chains are dismantled and are available once again for re-use on the TBM. The belt structure is now mounted using shorter chains with rollers on the two adjacent guide rails in the transfer carriage. On these guide rails made from an H-profile, which resembles a stretched 'S', the belt facility slides down as the transfer carriage moves forward on the track. Once it has reached the bottom, the chains are released and can be dismantled for re-use. The belt structure is now on the base of the integrated trestles. The transfer carriage has proven itself entirely in operation. Within a half-shift, it allows the secure implementation of the tunnel belt structure over a few hundred metres. With this new and innovative solution from Marti, the logistical challenge of drive supply and removal has been met. It has also contributed massively to adhering to the four-month ring closure duration.

5.4 TBM Supply and Disposal Lines

Usually, the various lines required for the TBM, such as both cooling conduits (cold/warm), the sewer pipe and the two-component grout line, are fed in the side wall of the segment ring with cable conduits. The time-consuming hanging of all these lines required in the invert area and inner lining areas, however, would not have been acceptable. A new approach had to be found in this area, too. We decided to lead all the various lines directly beneath the tunnel belt and arrange them flexibly so that they could pass the belt transfer carriage in operation and without further handling. For extension reasons, only the TBM power cable was hung on the side wall. In front of the inner lining, the cable had to be relocated at the side of the tunnel belt.

5.5 The Invert

To cross the workplace for the invert, a high-performance bridge was built. On the one hand, as a connection, it forms an interface for personnel and material supply for the TBM drive and, on the other hand, allows all works for the invert to be carried out beneath the bridge. The bridge spans 35 m and allows for a working area 10 m in length for sealing, reinforcement, forming and concreting works, with some more in reserve. Despite its considerable span, the bridge was designed without the usual wooden box girders to ensure a maximum working height and or freedom for invert works. The load-bearing capacity of 120 t required to bear a fully-loaded multi-service vehicle (MSV) carrying a complete segmental lining ring is provided by an integrated framework in the railing area. Beneath the bridge, next to the hanging invert formwork, a mobile crane is also installed. This allows required construc-

5.4 Die Ver- und Entsorgungsleitungen der Tunnelbohrmaschine

In der Regel werden die verschiedenen notwendigen Werkleitungen für die TBM, wie die beiden Kühlleitungen (kalt/warm), die Abwasserleitung und die 2-K-Mörtel-Leitung, mit Kabelhalterungen im seitlichen Paramentbereich der Tübbinge geführt. Das notwendige und zeitraubende Umhängen all dieser Leitungen im Bereich des Sohlgewölbes und des Innengewölbes wäre jedoch unzumutbar gewesen. Deshalb mussten auch in diesem Bereich neue Wege gefunden werden. Wir entschieden uns dazu, die diversen Leitungen alle direkt unterhalb des Tunnelbandes zu führen und diese so flexibel zu gestalten, dass sie unter Betrieb und ohne weiteres Handling den Bandumsetzswagen sicher passieren können. Aus verlängerungstechnischen Gründen wurde einzig das Starkstromkabel der TBM am Parament geführt. Vor dem Innengewölbe erfolgte ein einmaliges Umhängen des Kabels an die Seite des Tunnelbandes.

5.5 Das Sohlgewölbe

Zur Überbrückung der Arbeitsstelle für das Sohlgewölbe wurde eine leistungsfähige Überfahrbrücke konstruiert. Sie bildet einerseits als Überfahrverbindung die Schnittstelle für die personelle und materielle Versorgung des TBM-Vortriebes und ermöglicht andererseits unterhalb der Brücke die Ausführung sämtlicher Arbeiten für das Sohlgewölbe. Die Spannweite der Überfahrbrücke beträgt 35 m und ermöglicht mit etwas Reserve je ein Arbeitsfeld von 10 m Länge für die Abdichtungs-, Bewehrungs- sowie Schalungs- und Betonierarbeiten. Trotz der beträchtlichen Spannweite wurde die Brücke ohne die üblichen Hohlkastenträger konzipiert, um eine maximale Arbeitshöhe bzw. -freiheit der Sohlarbeiten zu gewährleisten. Die Tragfähigkeit von 120 t, welche nötig ist, um ein vollbeladenes Multi-Service-Vehicle (MSV) samt komplettem Tübbingring zu tragen, wird über ein integriertes Fachwerk im Geländebereich sichergestellt. Unter der Brücke ist neben der aufgehängten Sohlgewölbeschalung auch ein verfahrbarer Laufkran installiert. Dieser ermöglicht die flächenmäßige Verteilung der notwendigen Baumaterialien. Neben der Brückenfahrbahn wurde ein Betonverteiler montiert. Dessen Kinematik erlaubt es, jeden Betonierort des Sohlgewölbes bequem und sicher zu erreichen. Dazu dienen auch die speziellen Bodenöffnungen in der Brücke. Die ganze Überfahrbrücke samt der Sohlchalung mit einem Gesamtgewicht von 206 t lässt sich vollhydraulisch anheben und zum nächsten Betonierblock vordrehen. Die dazu notwendige rund einstündige Operation inklusive der Versetzung und Hinterfüllung der nachfolgenden vorfabrizierten Werkleitungselemente führt zu keinem Unterbruch der Vortriebsarbeiten. Mit einem Tübbingring auf dem Segmentfeeder und einem weiteren Tübbingring auf dem MSV bleibt der TBM-Vortrieb für rund anderthalb Stunden logistisch unabhängig.

5.6 Der Werkleitungskanal und die Frischluftzufuhr

Der künftige Werkleitungskanal (WELK) unter der Fahrbahn besteht aus vorfabrizierten, 2,25 m langen und 15 t schweren Betonelementen in U-Form. Diese werden ebenfalls, wie

tion materials to be distributed across an area. Alongside the bridge track, a concrete spreader has also been fitted. These kinematics make it possible to reach every area of the invert for concreting comfortably and safely. The special floor openings in the bridge also serve this purpose. The entire bridge and the invert formwork, with a total weight of 206 t, can be lifted hydraulically and driven up to the next concreting block. The operation required to do this, which takes around one hour including moving and filling the subsequent prefabricated works elements, does not interrupt drive works. With a segmental lining ring on the segment feeder and another segmental lining ring on the MSV, the TBM drive remains logistically separate for around one and a half hours.

5.6 The Utility Duct and Fresh Air Supply

The future utility duct (WELK) beneath the roadway consists of pre-fabricated U-shaped concrete elements that are 2.25 m long and weigh 15 t. These are also produced, like the segmental lining rings, internally in the company's factory in Balsthal using SCC concrete and delivered by truck to the day store at the construction site. A special industrial hauler is used to transport them from this store to the tunnel, two elements at a time per heavy duty trailer. The elements are placed using the portal crane immediately after the invert formwork is moved forwards. Pre-fabrication means they are immediately load-bearing and serve as a transport route for all construction logistics in the tunnel until the road is finally built. After the utility duct has been placed, the gaps in the side are filled with layers of excavated material, sealed and coated with a protective layer of lean concrete.

Fresh air is supplied for the excavation works as usual through a flat air duct hanging in the ridge area with a diameter of 2.40 m. A new supply solution also had to be found here in the area of invert works. The utility duct, unused during construction with its large cross-section of 6 m², was the ideal bypass for the fresh air supply. For this purpose, a series of service elements with side openings were also produced. In the portal area, the flat air duct was attached to the side of the utility duct using a specially formed steel channel. In the tunnel, after the special elements have been placed, the side filling is omitted and covered with transfer sheets. A side-loading lift can be used to place the ventilation transfer frame above the floor opening. In the framework itself, the integrated lay-flat duct can be lowered with chain hoists and bolted with another transfer sheet to the side opening of the works elements. Inside the service channel, there is also a mobile bulkhead acting as a temporary ventilation isolation for the cross section. The ventilation extension in the service channel is done in 300 m stages, also in a night shift. After the ventilation is transferred, the old wall openings in the utility duct are concreted over and the missing backfill is added.

5.7 Inner Lining Reinforcement

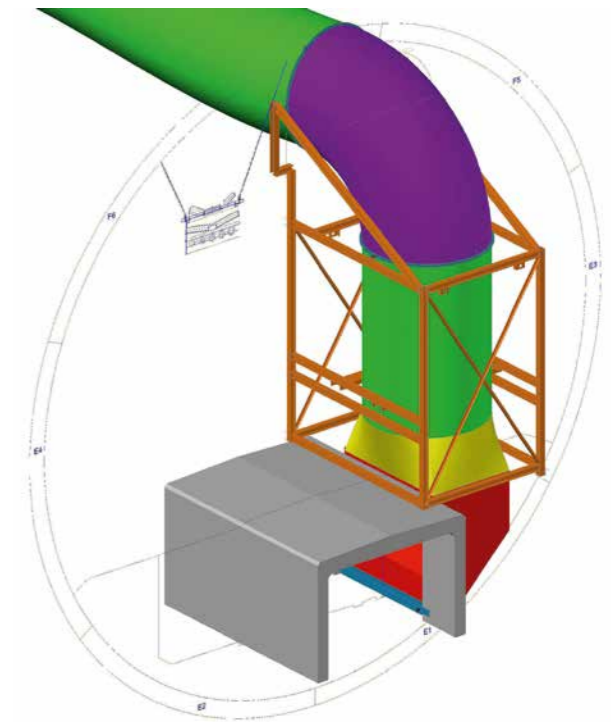
The inner lining is completely reinforced in the Gipskeuper sections at a total length of 1.3 km. The tender made provisions for

die Tübbinge, im hauseigenen Produktionswerk in Balsthal mit SCC-Beton hergestellt und mit Lastwagen auf ein Tagelager der Baustelle geliefert. Ab diesem Lager werden je zwei Elemente pro Schwerlast-Rollpalette mit dem dazugehörigen Industrieschlepper in den Tunnel transportiert. Die Versetzung der Elemente erfolgt, unmittelbar nach dem Vorfahren der Sohlchalung, mit dem Portalkran. Durch die Vorfabrikation sind sie sofort belastbar und dienen bis zur Fertigstellung des definitiven Strassenüberbaus als Fahrspur für die gesamte Baulogistik im Tunnel. Nach der Vernetzung des WELKs werden die seitlichen Lücken mit Ausbruchmaterial lageweise verfüllt, verdichtet und mit einer Schutzschicht aus Magerbeton abgedeckt.

Die Frischluftversorgung der Vortriebsarbeiten erfolgt wie üblich mit einer im Firstbereich hängenden Flachlutte von Ø 2,40 m. Auch hierzu musste im Bereich der Gewölbearbeiten eine neue Versorgungslösung gesucht werden. Der während der Bauausführung ungenutzte Werkleitungskanal mit seinem grossen Querschnitt von 6 m² bot sich als idealer Umweg für die Frischluftzufuhr an. Dazu wurde zusätzlich eine Serie Werkleitungselemente mit einer seitlichen Öffnung hergestellt. Im Portalbereich wird die Frischluftlutte über einen speziell geformten Blechkanal seitlich an den WELK angedockt. Im Tunnel wird nach dem Versetzen der Spezialelemente die seitliche Auffüllung ausgespart und mit Überfahrblechen abgedeckt. Mit einem Seitenstapler kann das Umsetzgerüst der Lüftung über die Bodenöffnung platziert werden. Im Gerüst selber kann die integrierte Faltlutte mit Kettenzügen abgesenkt und mit einem weiteren Übergangsblech an die seitliche Öffnung der Werkleitungselemente angeschraubt werden. Im Inneren des Werkleitungskanals dient noch eine mobile Schottwand als temporärer Lüftungsabschluss des Querschnittes. Die Lüftungsverlängerung im Werkleitungskanal erfolgt in 300-m-Schritten ebenfalls in einer Nachtschicht. Nach dem Umsetzen der Lüftung werden die alten Wandöffnungen im WELK zubetoniert und die fehlende Auffüllung ergänzt.

5.7 Die Bewehrung des Innengewölbes

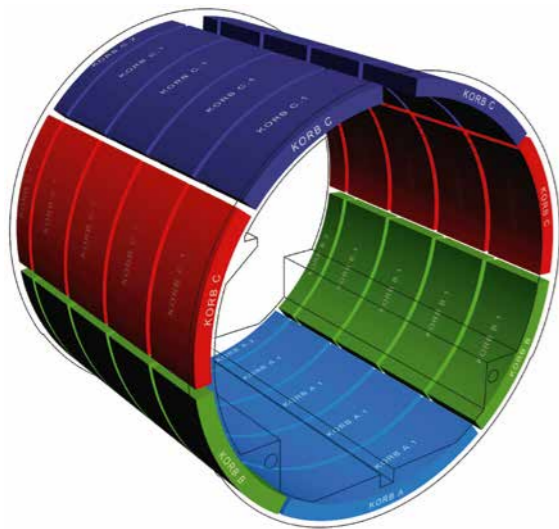
Das Innengewölbe ist in den Gipskeuperabschnitten auf insgesamt 1,3 km Länge rundum bewehrt. Die Ausschreibung sah eine lose Stabbewehrung, bestehend aus einer inneren und äusseren Lage aus Stäben von Ø 26 mm (4,17 kg/m), vor. Die gesamte Stahlmenge beträgt über 11 000 t. Bei einem täglichen Blocktakt von 10 m Länge müssen jeweils 24 t Armierung in der Sohle und 29 t im Gewölbe verlegt werden, und dies an sieben Tagen in der Woche. Aufgrund der Erfahrung aus ähnlichen Tunnelobjekten der A16, wie Mont Terri, Raimeux und Moutier, wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektverfassern und der Firma Sabag in Biel ein Armierungskonzept mit vorkonfektionierten, steckbaren Bewehrungskörben umgesetzt. Ein einzelner bananenförmiger Korb ist 2,10 m breit, rund 5 m lang und wiegt 1,9 t. In einem Querschnittsring des Innengewölbes werden drei Körbe in der Sohle und vier im Gewölbe verlegt. Eine kurze Montagelücke in der Firste wird von Hand geschlossen. Für einen



10 Umlenkstation der Lüftungslutte zwischen WELK und Firste
Ventilation duct return station between WELK and ridge

a conventional bar reinforcement, consisting of an inner and outer layer made of bars with a diameter of 26 mm (4.17 kg/m). The entire quantity of steel amounts to over 11,000 t. With a daily sequence of blocks of 10 m in length, 24 t of reinforcement needs to be laid in the invert and 29 t in the vault, seven days a week. Based on experience from similar tunnel projects on the A16, such as Mont Terri, Raimeux and Moutier, a reinforcement concept with pre-made, pluggable reinforcement cages was implemented in close collaboration with the project authors and the company Sabag in Biel. One single banana-shaped cage is 2.10 m wide, around 5 m long and weighs 1.9 t. In a cross-section ring of the inner lining, three cages are laid in the invert and four in the vault. A narrow assembly gap in the crown is closed by hand. Four of these cage rings and a thinner special ring for systematic cable radials are required for a 10 m long section of concreting.

The reinforcement cages are all produced in the Sabag factories in Biel to the exact millimetre and delivered to the construction site just in time using lorries. The reinforcement cages are taken to the installation site on rolling pallets. In the invert area, the cages are laid below the bridge with a telescopic cantilever with a gripper which was custom made especially for this purpose. The device supporting the gripper was a 23 t mobile excavator whose cabin can be adjusted to improve the operator's visibility. After a short practice period, laying times in the invert were between four and five hours and between six and seven hours for the vault. For the vault reinforcement, a specially developed hydraulic moving arm was integrated into a mobile portal framework. On this framework, more moving work platforms were installed. These pro-



Quelle/Credit: Projektdokument Plan IGSTB-UA-TP1-1-4201

11 Konzeptbild der Bewehrungskörbe für einen Betonierblock
Design image of the reinforcement cages for a concreting block

10 m langen Betonierabschnitt werden vier dieser Korbringe und ein schmaler Spezialring für die systematischen Kabelrundschnitte benötigt.

Die Bewehrungskörbe werden alle millimetergenau in den Werkshallen der Sabag in Biel hergestellt und mit Lastwagen just in time auf die Baustelle geliefert. Mit Rollpaletten gelangen die Armierungskörbe zur Einbaustelle. Im Sohlbereich erfolgte das Verlegen der Körbe unterhalb der Überfahrbrücke mit einem eigens dafür gefertigten Teleskopausleger mit Greifarm. Als Trägergerät des Greifarmes diente ein 23 t schwerer Mobilbagger, dessen Kabine zur besseren Sicht des Maschinisten höhenverstellbar ist. Nach einer kurzen Einspielzeit betragen die Verlegezeiten in der Sohle zwischen vier und fünf Stunden und für das Gewölbe zwischen sechs und sieben Stunden. Für die Gewölbebewehrung wurde der eigens entwickelte hydraulische Versetzar in ein fahrbares Portalgerüst integriert. Auf diesem Gerüst wurden zusätzlich noch bewegliche Arbeitsplattformen installiert. Diese ermöglichen einen bequemen und sicheren Arbeitsplatz für die Auspararbeiten und die Zusatzbewehrung in der Firste und den Konsolen.



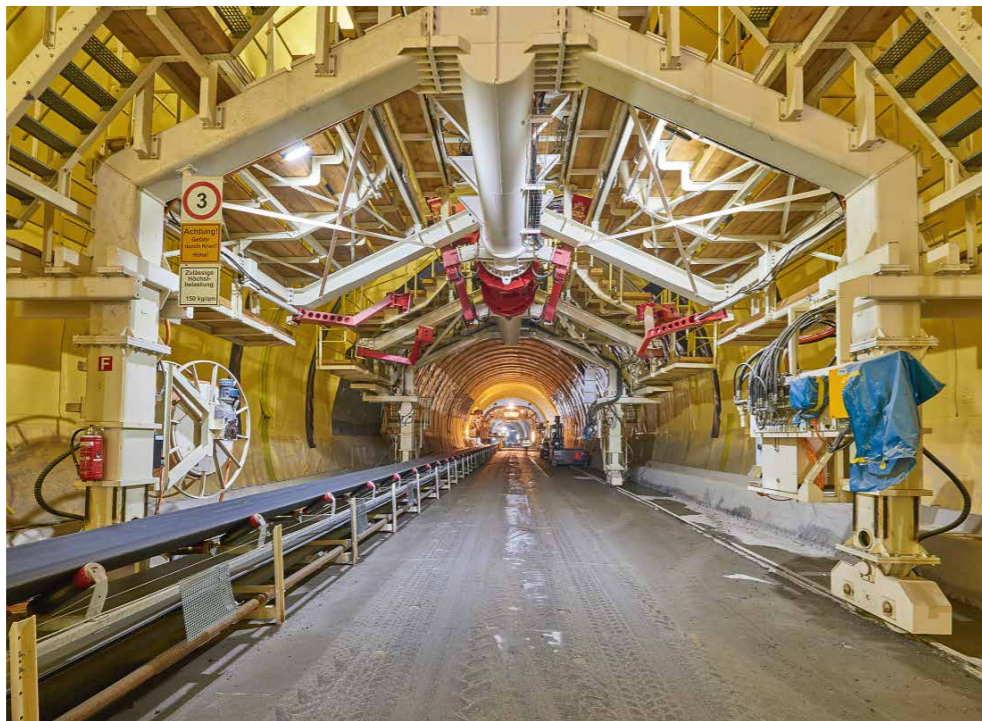
Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

12 Sohlgewölbe, mobiles Versetzgerät für die Bewehrungskörbe
Invert duct, mobile movement device for reinforcement cages

vide a comfortable and secure workplace for recess works and additional reinforcement in the crown and consoles.

5.8 The Intermediate Ceiling

With a distance of around one and a half kilometres from the excavation, the last workplace is the production of the intermediate ceiling. A total of eight formwork tables were used for the seven-day formwork period per ceiling section. Bringing forward the intermediate ceiling made it possible to immediately begin work on the side walkways once excavation was completed due to the logistics which were made available.



Quelle/Credit: ARGE Marti Belchen

13 Gewölbe, Portal-Versetzwagen für die Bewehrungskörbe
Vault, portal movement vehicle for reinforcement cages

5.8 Die Zwischendecke

Mit einem Abstand von rund anderthalb Kilometern zum Vortrieb erfolgte als letzte Arbeitsstelle das Herstellen der Zwischendecke. Für die siebentägige Ausschaltungsfrist pro Deckenplatte kamen insgesamt acht Schalungstische zum Einsatz. Das Vorziehen der Zwischendecke ermöglichte es, nach Vortriebsende dank der dadurch freigewordenen Logistik sofort mit den seitlichen Bankettarbeiten zu starten.

6 Lessons learnt

Das Projekt Sanierungstunnel Belchen hat auf eindrückliche Art und Weise unsere Stärke nach der Devise «Alles aus einer Hand» gefordert und gezeigt. Dabei wurden nicht nur alle Bauleistungen, wie Voreinschnitt, Spezialtiefbau, Brückenbau, Hochbau, Strassenbau, Tunnelbau und Abdichtungen, hausintern ausgeführt. Auch die dazu zahlreich benötigten Installationen, Schalungen und Ausrüstungen konnten durch die Eigenfertigung der Marti Technik zeitgerecht geliefert werden und eine rasche Inbetriebnahme gewährleisten. Unser Engineering und Know-how führte zu neuen Lösungsansätzen in den Bauabläufen und deren Verschachtelung. Die fortschreitende Digitalisierung der Prozesse wird uns hierzu künftig sicher noch weitere Fortschritte ermöglichen.

Nach dem Ende der nur knapp zwei Jahre dauernden Rohbauarbeiten am Haupttunnel kann festgestellt werden, dass die gesamte Baustelle gut auf Kurs ist. Die nicht minder anspruchsvollen Ausbruch- und Betonarbeiten der elf Querverbindungen zum BTB konnten planmässig gestartet werden, sodass der Endtermin des Bauherrn sicher eingehalten werden kann.

6 Lessons Learnt

The Belchen refurbishment tunnel project required and demonstrated our strengths in terms of offering services 'all under one roof' to a significant extent. Not only were all construction services, such as pre-cutting, special foundation works, bridge construction, building construction, road construction, tunnel construction and sealing provided internally: Marti Technik's in-house production was also able to deliver the numerous installations, formworks and equipment required on time and guarantee rapid commissioning. Our engineering and expertise led to new problem-solving approaches being developed and interwoven in construction processes. The progressive digitalisation of processes will certainly help us make further advances in this regard in future.

After work on the main tunnel structure came to an end after almost two years, it can be noted that the entire construction site is well on its way. It was possible to begin the no less demanding excavation and concrete works on the eleven cross passages to the BTB according to plan, ensuring that the client's final delivery date can be met.

Literatur/References

- [1] Projektdokument: IG BL-STB, Positionspapier Schichtübergänge vom 11.05.2016.
- [2] Chiaverio F.: Dritte Röhre Belchentunnel, Szenarien Gefährdungsbilder, Präsentation Swiss Tunnel Congress 2013, Tagungsband, Seiten 210–214.
- [3] Projektdokument: TBM 7.B03 Ergänzungen und Präzisierungen zum Leistungsverzeichnis, Artikel 4.9, Anforderungen an die Vortriebsausrüstung.

PROJEKTDATEN

Region Kantone Solothurn und Baselland	
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung Bundesamt für Strassenbau ASTRA, Filiale Zofingen, OBL Jauslin + Stebler Ingenieure AG	
Planung und Bauleitung IG STBelchen, c/o Emch + Berger AG, Aegerter & Bosshardt AG, ILF AG	
Ausführung ARGE Marti Belchen, c/o Marti Tunnelbau AG, Marti Solothurn AG, Marti Basel AG	
Kenndaten	
Bauzeit:	2015–2019
Inbetriebnahme:	2021
Baukosten Tunnel:	277 Mio. Schweizer Franken
Gesamtlänge:	3200 m
Ausbruchquerschnitt:	153 m ²
Besondere Merkmale TBM-Vortrieb und Innenausbau gleichzeitig	

PROJECT DATA

Region Cantons of Solothurn and Basel-Landschaft	
Client, project and contract management Federal Roads Office (FEDRO), Zofingen branch, OBL Jauslin + Stebler Ingenieure AG	
Client, project and senior construction management IG STBelchen, c/o Emch + Berger AG, Aegerter & Bosshardt AG, ILF AG	
Excavation JV Marti Belchen, c/o Marti Tunnelbau AG, Marti Solothurn AG, Marti Basel AG	
Fact file	
Construction period:	2015-2019
Commissioning:	2021
Tunnel construction costs:	277 million Swiss francs
Total length:	3200 m
Excavated cross-section:	153 m ²
Special features Simultaneous TBM drive and interior construction	

Guido Biaggio, Dipl. Bau-Ing. ETH, Bundesamt für Strassen, Ittigen/CH
Valentina Kumpusch, Dipl. Bau-Ing. ETH, Bundesamt für Strassen, Bellinzona/CH

2. Röhre Gotthardtunnel

Projektübersicht und ausgewählte Themen

Die geplante 16,9 km lange zweite Tunnelröhre durch den Gotthard stellt eine weitere Meisterleistung im Gotthardgebiet dar. Der folgende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über das Projekt, erläutert die Erkundung der Störzonen und das Vortriebskonzept für deren Durchörterung sowie die Materialbewirtschaftung und die Wiederverwertung des Ausbruchmaterials.

The Second Gotthard Tunnel Tube

Project Overview and Selected Topics

Featuring a length of 16.9 km, the planned second tunnel tube through the Gotthard will prove to be yet another outstanding feat in the Gotthard region. This contribution provides a short overview of the project, explains the investigation of the fault zones, outlines the excavation concept for piercing these zones and addresses both material management and the reuse of the excavation material.

1 Einleitung

Der Gotthardtunnel liegt als Teil der Nationalstrasse A2 auf der Nord-Süd-Achse und verbindet die Kantone Tessin und Uri zwischen Airolo und Göschenen. Der bestehende Autobahntunnel wurde 1980 eröffnet und ist gemäss Prognose aus der laufenden Überwachung in ca. 15 bis 20 Jahren sanierungsbedürftig. Im Rahmen einer ab dem Jahr 2009 durchgeführten Konzeptstudie «Erhaltungskonzept Gotthard» wurden verschiedene mögliche Erhaltungsvarianten ermittelt und untersucht. Neben einer Variante mit Bau einer zweiten Röhre und anschliessender Sanierung der ersten Röhre wurden dabei auch mehrjährige Vollsperrungen zur Sanierung der bestehenden Röhre mit Umleitung des Verkehrs über den Pass und/oder Bahnverlad der Fahrzeuge untersucht. Am 27. Juni 2012 hat sich der Bundesrat für den Bau einer zweiten Tunnelröhre mit anschliessender Sanierung der bestehenden Röhre entschieden. Das Volk und die Stände haben das Vorhaben mit der Volksabstimmung am 28. Februar 2016 angenommen.

Die gewählte Variante erhöht das Sicherheitsniveau des Gotthardtunnels erheblich und gewährleistet das Aufrechterhalten der wichtigsten Nord-Süd-Verbindung während der Sanierung der bestehenden Tunnelröhre.

Im Endzustand werden beide Röhren einspurig mit je einem Fahrstreifen und einem Pannestreifen pro Fahrtrichtung betrieben (siehe Bild 1). Damit wird der Alpenschutzartikel der Bundesverfassung respektiert, welcher eine Erhöhung der Transitstrassen-Kapazität im Alpengebiet untersagt.

1 Introduction

Located on the north-south axis of the A2 motorway, the Gotthard Tunnel connects the cantons of Ticino and Uri between Airolo and Göschenen. The existing motorway tunnel was opened in 1980, with forecasts based on ongoing checks indicating that it will be due for renovation in around 15 to 20 years. As part of the 'Gotthard conservation concept' study that began in 2009, efforts were made to identify and investigate on different feasible options for conservation. These included the prospect of constructing a second tunnel and subsequently renovating the first tunnel, as well as the possibility of enforcing complete closures lasting several years in order to enable the renovation of the existing tunnel. This latter option would have required the diversion of traffic via the pass and/or rail loading of the vehicles. On 27 June 2012, the Swiss Federal Council decided in favour of the construction of a second tunnel tube with subsequent renovation of the existing tube. The project was approved by the citizens, the Council of States and the National Council in a referendum on 28 February 2016.

The chosen solution significantly increases the level of safety in the Gotthard Tunnel and ensures that the most important north-south connection will remain open during the renovation of the existing tunnel tube.

When the project is completed, both tubes will feature single-lane operation with one standard lane and one service lane in each direction (see Fig. 1). This ensures compliance with the constitutional clauses relating to Alpine protection,

2^e tube du tunnel du Saint-Gothard

Vue d'ensemble du projet et thèmes choisis

La géologie du tunnel routier du Saint-Gothard est bien connue depuis la construction du premier tube du tunnel: malgré cela des carottages supplémentaires et des recherches en mécanique des roches ont été réalisés, notamment au niveau des deux zones de faille nord et sud longues de quelque 570 m, dans le but de mieux maîtriser le creusement. Une autre énorme chance est donnée par l'exploitation des déblais: l'excédent de matériaux d'excavation non pollués peut être réutilisé pour remodeler le terrain dans le secteur d'Airolo (Galleria di Airolo) et pour la renaturation des zones peu profondes du lac d'Urner.

2^a canna della galleria del San Gottardo

Panoramica del progetto e tematiche selezionate

La geologia della galleria stradale del San Gottardo è ampiamente nota alla luce della costruzione della prima canna esistente: ciononostante, per padroneggiare meglio l'avanzamento sono state eseguite delle trivellazioni di sondaggio supplementari e delle analisi di meccanica delle rocce, soprattutto presso le zone critiche nord e sud, lunghe in totale 570 m. La gestione del materiale offre un'ulteriore grande opportunità: il materiale di scavo non contaminato in eccesso verrà utilizzato delle rimodellazioni di terreno nella zona di Airolo (galleria di Airolo) e per la rinaturazione della zona di acque basse nel lago dei Quattro Cantoni.

Bereits beim Bau der ersten Röhre gab es eine Projektidee für eine zweite Tunnelröhre: Vorgesehen war, den parallel neben dem bestehenden Tunnel liegenden Service- und Infrastrukturstollen (SISTo) später zu einer zweiten Röhre aufzuweiten und auszubauen. Das heutige Projekt weicht davon ab, insbesondere aufgrund der heute vorhandenen einfacheren Baumethoden mit TBM-Vortrieb.

2 Projektbeschreibung

Die geplante zweite Tunnelröhre durch den Gotthard weist eine Länge von 16 866 m auf. Sie verläuft in einem Regelabstand von 40 m zum SISTo östlich des bestehenden Gotthardtunnels. Die Linienführung erfolgt grösstenteils parallel zur bestehenden Röhre (siehe Bild 2). In den Portalbereichen wird der Abstand reduziert und die Achse der zweiten Röhre auf die Achse des SISTo geführt. Als Tunnelportale werden sowohl in Airolo wie auch in Göschenen die bestehenden und bereits beim Bau der ersten Röhre für eine zweite Röhre konzipierten Portalbauwerke und Tagbautunnel verwendet. Um den SISTo auch im Endzustand durchgängig nutzen zu können, wird er in den Portalbereichen vorgängig umgelegt.

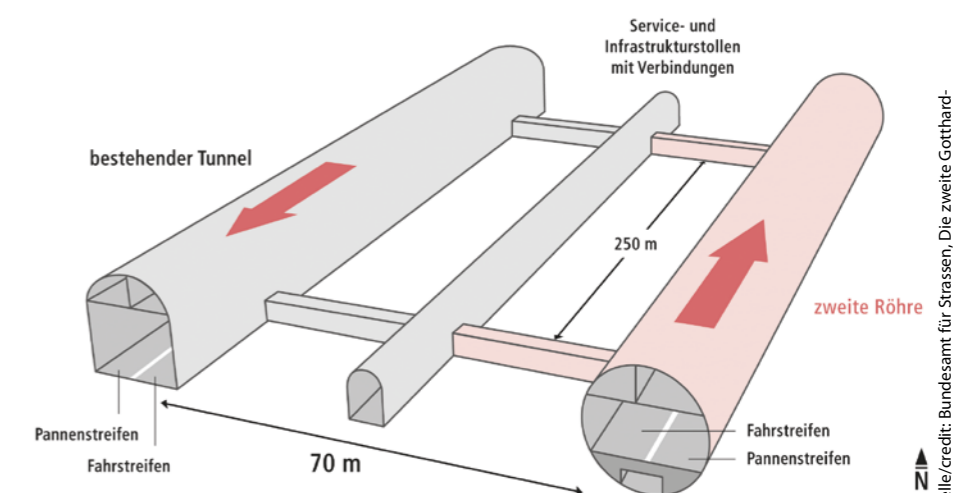
Die Tunnelröhren werden über 62 begehbare und sechs befahrbare Querverbindungen in regelmässigen Abständen verbunden. Die neuen Querverbindungen sind mehrheitlich in der Verlängerung der bestehenden Querverbindungen zum SISTo angeordnet.

which also preclude any attempts to increase the capacity of transit roads in the Alpine regions.

While the first tube was being constructed, there was already a project concept for a second tunnel tube. It was planned to subsequently expand the service and infrastructure tunnel that runs parallel to the existing tunnel to enable the establishment of a second tube. The current project deviates from this concept, especially as a result of the easier construction methods featuring TBM excavation that are available nowadays.

2 Project Description

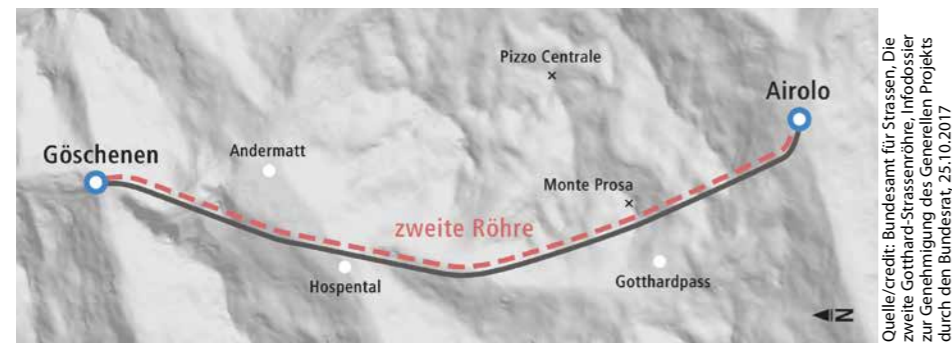
The planned second tunnel tube through the Gotthard has a total length of 16,866 m. It runs at a standard clearance



1 Übersicht Gesamtsystem Gotthard-Strassentunnel im Endzustand
Overview of the overall system at the completed Gotthard Road Tunnel

Quelle/Credit: Bundesamt für Strassen, Die zweite Gotthard-Strassentunnel, Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 23.10.2017

Das Normalprofil (siehe Bild 3) ist durch die Fahrbahnplatte und die Zwischendecke in drei Hauptbereiche unterteilt: den Fahrraum (Lichtraumprofil für eine Fahrspur und einen Pannestreifen mit beidseitigen Banketten in Anlehnung an die erste Röhre), den Zu- und Abluftkanal oberhalb der Zwischendecke und zwei Werkleitungskanäle (WELK) unterhalb der Fahrbahnplatte (ein WELK wird dabei für die Führung einer 380-kV-Leitung vorgesehen). Der Tunnel wird zwei-



2 Übersichtsplan zweite Gotthard-Strassenröhre
Overview of the second Gotthard road tunnel

schalig (Ausbruchsicherung und Innenschale) ausgebaut und mit einer Regenschirmabdichtung versehen. Das Drainagewasser wird gefasst und durch die in der Sohle angeordneten Bergwasserleitungen zu den Portalen geführt. Das Fahrbahnwasser wird über Schlitzrinnen und Siphonschächte in die Schmutzwasserleitung geleitet.

Die Lüftung stellt bei langen Strassentunneln eine grosse Herausforderung dar. Im Falle der zweiten Strassenröhre durch den Gotthard wird ein Lüftungssystem eingebaut, welches sowohl Richtungs- als auch Gegenverkehrsbetrieb im Unterhaltsfall zulässt. Die Lüftungssysteme der beiden Tunnelröhren sind voneinander unabhängig. Für die zweite Röhre werden drei neue unterirdische Lüftungszentralen sowie zwei Portalzentralen erstellt. Es werden lediglich die bei den bestehenden bergmännischen Lüftungszentralen bereits vorhandenen Lüftungsschächte, welche einen ausreichenden Lüftungsquerschnitt besitzen, gemeinsam genutzt. Diese Lüftungsschächte werden sowohl für die Abluft als auch die Zuführung der Frischluft für den Fahrraum genutzt. Für den Ereignisfall ist der Tunnel in fünf Lüftungsabschnitte unterteilt. Die Rauchgase werden über Abluftklappen in der Zwischendecke aus dem Fahrraum abgesaugt und über die jeweilige Zentrale durch den Lüftungsschacht ausgeblasen. Zusätzlich werden Strahlventilatoren zur Steuerung der Längsströmung im Fahrraum eingesetzt.

Im Rahmen von flankierenden Massnahmen wird auch der Autobahnanschluss Airolo umgestaltet. Dies beinhaltet u.a. die Erstellung der Galleria di Airolo samt Geländemodellierungen. Dieser zweiröhriige Tagbautunnel ist 1086 m lang und talseitig teilweise als Galerie ausgebildet. Die Galleria di Airolo trägt massgeblich zur ökologischen Aufwertung des Talbodens bei.

of 40 m from the service and infrastructure tunnel located east of the existing Gotthard Tunnel. The layout of the line runs largely parallel to the existing tube (see Fig. 2). The clearance is reduced in the portal areas in order to let the axis of the second tube run along the axis of the service and infrastructure tunnel. In Airolo and Göschenen, the existing portal structures – which were designed for the inclusion of a second tube already while the first tube was being constructed – and cut-and-cover tunnels are used as tunnel portals. To ensure full use of the service and infrastructure tunnel once the work is completed, the portal areas will be repositioned in advance.

The tunnel tubes are going to be connected at regular intervals by 62 walk-through cross-passages and six vehicle-accessible cross-passages. A majority of the new cross-passages will be arranged in the extension of the existing cross-passages to the service and infrastructure tunnel.

Because of the slab track and the intermediate ceiling the standard profile (see Fig. 3) will be divided into three main areas: the driving area (clearance envelope for one standard lane and one service lane with walkways on both sides according to the first tube), the intake and exhaust duct above the intermediate ceiling and two service ducts beneath the slab track (with one service duct intended for the routing of a 380 kV line). The tunnel will be given a double-lining construction (excavation support and inner lining) and an umbrella sealing. The drainage water will be collected and guided to the portals via water lines located in the invert while the water from the road surface will be directed into the wastewater line via slotted channels and siphon shafts.

Ventilation poses a major challenge when it comes to long road tunnels. When it comes to the second road tube through the Gotthard, a ventilation system will be installed which enables one-way as well as two-way traffic in case of maintenance. The ventilation systems of the two tunnel tubes are independent of one another, with three new underground ventilation control centres and two portal control centres being created for the second tube. Only those ventilation shafts that are already present in the existing underground ventilation control centres and provide a sufficient ventilation cross-section will be used for both tubes. These ventilation shafts will be used both for exhaust air and the intake of fresh air for the traffic area. In case of an emergency, the tunnel will be divided into five ventilation sections. The fumes are to be drawn out of the driving area via exhaust flaps into the intermediate ceiling and blown out through the ventilation shaft by the respective control cen-

3 Geologie und Hydrogeologie

3.1 Geologie

Die Geologie der zweiten Gotthard-Strassenröhre ist durch den Bau der danebenliegenden ersten Tunnelröhre bekannt (siehe Bild 4). Von Norden her durchquert der Tunnel das Aarmassiv, welches hauptsächlich aus Graniten und Paragneisen besteht. Anschliessend wird die Urseren-Zone, bestehend aus Metasedimenten des Mesozoikums und des Permokarbons, durchfahren. Die dritte Formation ist das Gotthardmassiv, welches mehrheitlich aus Para- und Granitgneisen und Graniten aufgebaut ist. Beim Portal Airolo wird die aus Metasedimenten (Mesozoikum) bestehende Nufenen-Zone angetroffen. In den Portalbereichen ergeben sich unterschiedlich lange Lockergesteinsabschnitte.

Entlang der Achse der geplanten zweiten Gotthard-Strassenröhre ist mit zwei Problemzonen zu rechnen, welche im Folgenden als Störzone Nord («Mesozoikum/Permokarbon») und Störzone Süd («Guspis-Zone») bezeichnet werden.

Die Störzone Nord befindet sich in der Urseren-Zone im Übergangsbereich zwischen Mesozoikum und Permokarbon. Sie weist eine Länge von ca. 270 m auf und besteht mehrheitlich aus Ton- und Serizitschiefern. Weiter werden Kalke, Gips und Dolomit erwartet. Die Gesteine der Störzone Nord sind mässig bis sehr stark kakiritisiert und weisen sowohl gebräches als auch druckhaftes Gebirgsverhalten auf.

Die Störzone Süd befindet sich im Gotthardmassiv in der Guspis-Zone. Die knapp 300 m lange Strecke weist einen Wechsel von verlehmteten, kakiritisierten und kompakteren, festen Biotit-Gneisen und -Schiefern, Hornblendeschiefern und vereinzelt Amphiboliten auf. Häufig sind auch Ganggesteine zu erwarten. Wie in der Störzone Nord ist ebenfalls mit gebrächen und druckhaften Verhältnissen zu rechnen.

3.2 Hydrogeologie

Die kristallinen Gesteine weisen insbesondere entlang der Klüftflächen eine mittlere bis gute Durchlässigkeit auf. Die altkristallinen Gneise und Schiefer zeigen im Vergleich zu den kristallinen Gesteinen eine etwas geringere Durchlässigkeit. Die alpin-metamorph überprägten sedimentären Gesteine des Mesozoikums und Permokarbons sind ebenfalls gering durchlässig und wirken eher als Stauer.

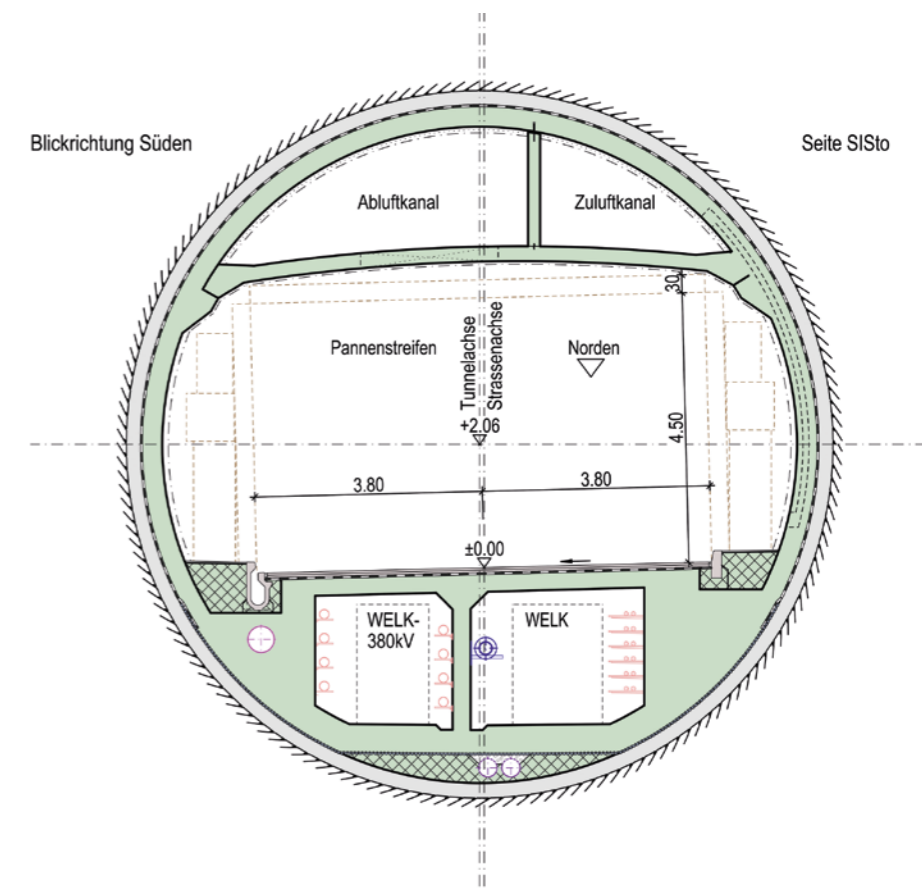
tre. Jet fans will also be used to control the longitudinal flow in the driving area.

The accompanying measures will also involve the rearrangement of the Airolo motorway connection, including tasks such as the creation of the Galleria di Airolo and corresponding terrain modelling. This cut-and-cover twin-tunnel will be 1,086 m long and take the form of a gallery in certain sections on the valley side, making a significant contribution to the ecological upgrading of the valley floor.

3 Geology and Hydrogeology

3.1 Geology

Thanks to the excavation of the adjacent first tunnel tube the geology of the second Gotthard road tunnel to be driven through is well known, (see Fig. 4). Approaching from the north, the tunnel crosses the Aar Massif that consists mainly of granites and paragneiss. It then passes through the Urseren zone, which is formed of meta-sediments from the Mesozoic and Permo-Carboniferous periods. The third formation is the Gotthard Massif, largely comprising paragneiss, granite gneiss and granite. The Nufenen zone composed of meta-sediments (from the Mesozoic period) is reached at the Airolo portal. The portal areas themselves feature loose rock sections of varying lengths.



3 Normalprofil zweite Gotthard-Strassenröhre
Standard profile of the second Gotthard road tunnel

Trotz hohem Bergwasserspiegel und erhöhten Durchlässigkeiten im Bereich von Störzonen, geklüfteten Gesteinen, entlang von Gesteinsgrenzen und in hydrothermal zersetztem Gestein wird aufgrund von Messungen in der bestehenden Anlage gesamthaft mit mässigem Wasseranfall gerechnet.

Stärker wasserführende Bereiche befinden sich insbesondere in den südlichen portalnahen Zonen. Der prognostizierte Bergwasseranfall am Portal beträgt 30–40 l/s im Norden und 95–110 l/s im Süden.

4 Vortriebskonzept

Das Vortriebskonzept sieht aufgrund der Tunnellänge je einen TBM-Vortrieb vom Nord- und Südportal her vor. Beide Vortriebe erfolgen steigend und weisen einen Ausbruchdurchmesser von 11,8 m auf.

Die Lockergesteinsstrecken in den Portalbereichen werden vorgängig konventionell ausgebrochen. Anschliessend erfolgen weitere 400 m (im Norden) resp. 750 m (im Süden) im Fels im Sprengvortrieb. Grund dafür sind die in den Portalbereichen sehr beschränkten Platzverhältnisse für die Montage und das Anfahren der TBM sowie bauprogrammliche und risikotechnische Überlegungen.

Zur Reduktion der Risiken und zur Optimierung des Gesamtbauprogramms werden zudem die Störzonen Nord und Süd (total ca. 570 m) vorgängig konventionell ausgebrochen und gesichert. Anschliessend werden die beiden TBM durch diese Bereiche geschoben. Die Erschliessung der Störzonen erfolgt durch separate, frühzeitig erstellte Zugangstollen von Norden (ca. 4,4 km) und von Süden (ca. 5 km) her. Diese werden mittels Gripper-TBM, mit einem Ausbruchdurchmesser von 6,0 m, aufgeföhren.

Along the axis of the planned second Gotthard road tube it is expected to encounter two problem zones: these will subsequently be referred to as the 'northern fault zone' (Mesozoic/Permo-Carboniferous) and the 'southern fault zone' (Guspis zone).

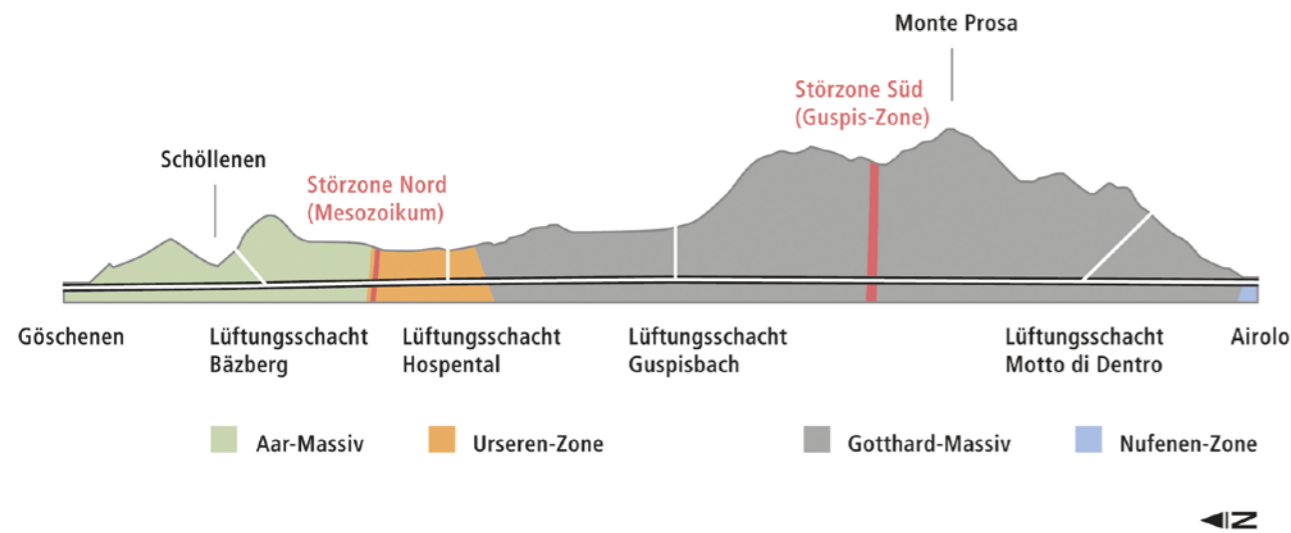
Located in the Urseren zone at the transition between the Mesozoic and Permo-Carboniferous sections, the northern fault zone is around 270 m long and largely consists of clay and sericite schists. Limestone, gypsum and dolomite are also expected in this zone. The rock in the northern fault zone shows moderate to very high levels of fault gouging and demonstrates both friable and squeezing rock behaviour.

The southern fault zone is located in the Guspis zone of the Gotthard Massif. Covering a distance of nearly 300 m, it contains a variety of more weathered and fault-gouged and also more compact and firm biotite gneiss and schists, hornblende schists and individual amphibolites. Dyke rocks are also expected to be frequent. As with the northern fault zone, friable and squeezing conditions are also anticipated in this section.

3.2 Hydrogeology

The crystalline rocks show average to good permeability, especially along the joint planes. Old crystalline gneiss and schists have a somewhat lower level of permeability than the crystalline rocks. The Alpine metamorphic sedimentary rock located above this, which originates from the Mesozoic and Permo-Carboniferous periods, also features low permeability and indeed acts largely as an impermeable layer.

Despite the high groundwater level and increased permeability in the area of the fault zones and the fissured rock, along rock borders and in hydrothermally disintegrated rock,



4 Geologisches Längenprofil
Geological longitudinal profile

Quelle/Credit: Bundesamt für Strassen, Die zweite Gotthard-Strassenröhre, Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 25.10.2017



5 Druckhaftes Gebirge beim Bau des Gotthard-Strassentunnels
Squeezing rock during construction of the Gotthard Road Tunnel

5 Durchörterung der geologischen Störzonen

5.1 Erfahrungen aus dem Vortrieb der ersten Gotthard-Strassenröhre

Auch beim Bau der ersten Gotthardröhre mussten die beiden Störzonen mit gebrächem bis druckhaftem Gebirgsverhalten durchfahren werden.

In der Störzone Nord war der Vortrieb im SISTo stark erschwert. Es kam zu Niederbrüchen mit Kaminbildung, Wassereintritten mit Aufweichungserscheinungen des Gebirges und allgemein geringen Standzeiten von wenigen Stunden. Injektionen führten zu keiner merklichen Verbesserung der Gebirgseigenschaften. Das anfallende Bergwasser wurde nur teilweise verdrängt.

Der Haupttunnel wurde aufgrund der Erfahrungen im SISTo im Bereich der Störzone Nord in der sogenannten deutschen

the overall expectations based on the measurements performed in the existing system point to the presence of moderate amounts of water.

Areas bearing more water are particularly clustered in the southern zones near to the portal. The amount of groundwater at the portal is forecast to be 30-40 l/s in the north and 95-110 l/s in the south.

4 Excavation Concept

Given the length of the tunnel, the planned excavation concept involves one TBM drive each approaching from the north and the south portal. Both drives are to proceed at an incline and will feature an excavation diameter of 11.8 m.

The loose rock sections in the portal areas will undergo conventional excavation in advance. Afterwards a further amount of rock (400 m in the north, 750 m in the south) will be excavated by blasting drive. This is due to the very cramped conditions in the portal areas, which will affect the assembly and launching of the TBMs, as well as additional issues relating to the construction programme and risk-related considerations.

In order to reduce the risks and optimise the overall construction programme, the northern and southern fault zones (totalling approx. 570 m) will be conventionally excavated and secured in advance. Once this has taken place, the two TBMs will be pushed through these areas. The fault zones will be reached via separate access tunnels approaching from the north (approx. 4.4 km) and the south (approx. 5 km), which will be created at an early stage. These tunnels will be excavated using Gripper TBMs with an excavation diameter of 6.0 m.

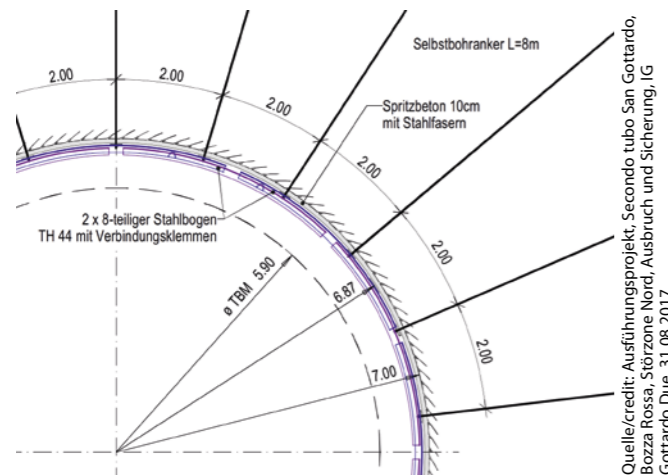
5 Piercing of Geological Fault Zones

5.1 Experience Gained from the Excavation of the First Gotthard Road Tube

During the construction of the first Gotthard tube, it was likewise necessary to pass through the two fault zones featuring friable to squeezing rock behaviour.

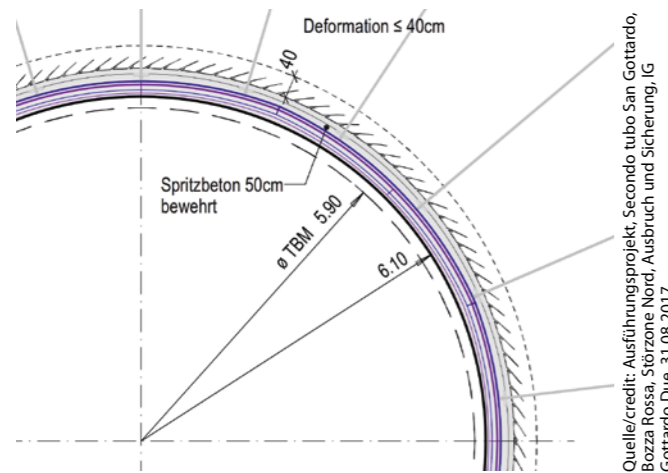
In the northern fault zone, there were considerable difficulties relating to the excavation of the service and infrastructure tunnel. There were rockfalls that generated so called chimneys, incidents of water ingress that left the rock showing signs of softening and generally low stability times of a few hours. Grouting did not lead to any noticeable improvement in the properties of the rock and the accruing seepage water was only partially displaced.

Based on the experience made while building the service and infrastructure tunnel, the main tunnel was excavated using the so called 'German' method (core method) in the



6 Nachgiebiger Ausbau im Bereich L1
Yielding lining in area L1

Quelle/credit: Ausführungsprojekt, Secondo tubo San Gottardo, Bozza Rossa, Störzone Nord, Ausbruch und Sicherung, IG Gottardo Due, 31.08.2017



7 Nachgiebiger Ausbau im Bereich L2
Yielding lining in area L2

Quelle/credit: Ausführungsprojekt, Secondo tubo San Gottardo, Bozza Rossa, Störzone Nord, Ausbruch und Sicherung, IG Gottardo Due, 31.08.2017

Bauweise (Kernbauweise) aufgeföhren. Dabei wurden zuerst die seitlichen Paramentstollen sowie der Firstbereich und anschliessend nach Fertigstellung der Tunnelwandung der Kern ausgebrochen.

Neben den lockergesteinsartigen Verhältnissen wurde auch druckhaftes Gebirgsverhalten angetroffen. Es wurden durchschnittliche Konvergenzen von ca. 0,4 m gemessen. Dabei konnte eine Abhängigkeit zwischen dem Auftreten der Konvergenzen und der Durchlässigkeit festgestellt werden: Bei hohen Durchlässigkeiten traten die Deformationen früh auf; bei geringen Durchlässigkeiten wurden Verformungen erst nach Stunden bzw. Tagen festgestellt.

Auch im Bereich der Störzone Süd wurden sowohl im S1Sto als auch in der Hauptröhre auf einer Länge von knapp 400 m druckhafte Verhältnisse angetroffen. Aufgrund von Erfahrungen aus dem Vortrieb des S1Sto in der Guspis-Zone wurde vorgängig ein Sondierstollen auf der Achse der ersten Röhre vorgetrieben. Es traten insbesondere in schiefrigen Partien

area of the northern fault zone. This involved the sidewall headings and the crown area being excavated first and after completing the tunnel walls the core was removed.

In addition to the loose rock-like conditions, it was also necessary to deal with squeezing rock behaviour as average convergences of approx. 0.4 m were measured. It was possible to establish a link between the occurrence of the convergences and the level of permeability: the deformations occurred early on in the case of high permeability, while deformations were only detected after a couple of hours or days in areas where permeability was low.

Squeezing conditions were also experienced along a nearly 400 m section in the area of the southern fault zone, both in the service and infrastructure tunnel and in the main tube. In light of the experience gained with the excavation of the service and infrastructure tunnel in the Guspis zone, an exploratory heading was driven in advance on the axis of the first tube. Considerable amounts of convergence occurred, especially in foliated sections of the paragneiss, and this could no longer be overcome by means of a simple steel support. For this reason, and also as a result of what happened with the north drive in the Mesozoic/Permo-Carboniferous section, the decision was taken to also excavate the main tube via an intermediate access point using the core method. A high level of rock pressure was detected in the process, with the resulting convergences amounting to as much as 1.5 m in the side walls (see Fig. 5).

5.2 Investigation of the Fault Zones

Starting from the existing service and infrastructure tunnel, a total of eight sub-horizontal exploratory probe holes each measuring approx. 70-75 m were created across both fault zones in 2016. This was done in order to investigate the geological conditions and to extract rock samples for laboratory testing. Three exploratory boreholes were drilled in the Jurassic limestones and clay schists of the Mesozoic layer in the Urseren zone and five boreholes were generated in the Guspis zone. Pressure gauges were installed at two boreholes and dilatometer tests were performed in five boreholes.

In addition, the laboratories of the École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) and ETH Zurich were commissioned to perform the following rock mechanics tests on rock samples:

- Uniaxial compressive strength tests
- Tri-axis tests (with and without consideration of the pore water pressure)
- Split tensile strength test
- Direct shearing tests
- Cerchar abrasivity tests

These were used to determine the strength and deformation properties of the fault-gouged rocks.

der Paragneise deutliche Konvergenzen auf, die mit einfachem Stahleinbau nicht mehr beherrscht werden konnten. Deshalb und auch aufgrund der Erfahrungen des Nordvortriebes im Mesozoikum/Permokarbon wurde entschieden, die Hauptröhre mithilfe eines Zwischenangriffs ebenfalls in Kernbauweise aufzuföhren. Dabei wurde ein starker Bergdruck festgestellt mit resultierenden Konvergenzen von bis zu 1,5 m in den Ulmen (siehe Bild 5).

5.2 Erkundung der Störzonen

Aus dem bestehenden S1Sto heraus wurden 2016 in den beiden Störzonen insgesamt acht je ca. 70-75 m lange subhorizontale Sondierbohrungen zur Erkundung der geologischen Verhältnisse und zur Entnahme von Felsproben für Laboruntersuchungen erstellt. Drei Sondierbohrungen wurden in den jurassischen Kalken und Tonschiefern des Mesozoikums der Urseren-Zone und fünf Sondierbohrungen in der Guspis-Zone ausgeföhrt. An zwei Bohrlöchern wurden Manometer eingebaut, und in fünf Bohrlöchern wurden Dilatometerversuche durchgeföhrt.

Zudem wurden folgende felsmechanischen Untersuchungen an Felsproben in den Laboren der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) in Auftrag gegeben:

- einaxiale Druckversuche
- Triaxialversuche (mit und ohne Berücksichtigung des Porenwasserdrucks)
- Spaltzugversuche
- direkte Scherversuche
- Cerchar-Abrasivitätsversuche

Damit wurden die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der kakiritischen Gesteine bestimmt.

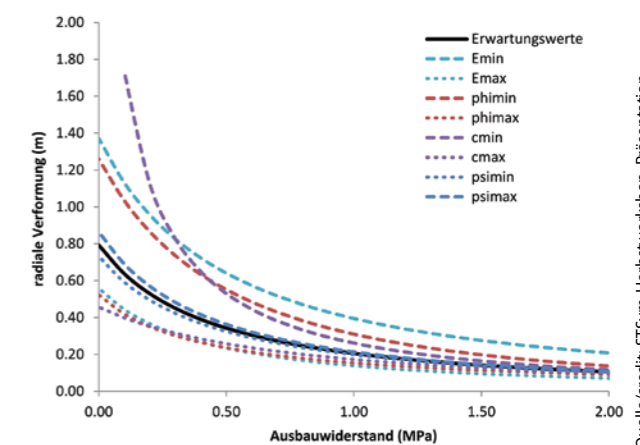
5.3 Vortriebs- und Sicherungskonzept

Basierend auf der prognostizierten Geologie und den Erfahrungen aus der ersten Gotthardröhre wurden mögliche Gefährdungsbilder für die Störzonen definiert und ein Baugrundmodell mit der Aufteilung in Homogenbereiche erstellt.

Aufgrund der schlechten Gebirgseigenschaften wurde entschieden, die beiden Störzonen im konventionellen Vortrieb zu durchföhren.

Mit dem Ziel, einen möglichst raschen Ringschluss zu erreichen, sieht das Vortriebskonzept der Störzonen einen Vollausbruch vor. Im Ausbruchquerschnitt (Da = 14-14,5 m) ist, neben dem Platz für die Sicherung und der Toleranz für das Verschieben der TBM, auf Basis von Deformationsberechnungen (siehe Kapitel 5.4) auch ein Raum für Konvergenzen (0,65 m resp. 0,5 m) berücksichtigt.

Als Bauhilfsmassnahme zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit werden im Firstbereich ausinjizierte Spiesse eingesetzt. Weiter wird Stahlfaserspritzbeton am Profil sowie an der Ortsbrust appliziert. In der Ortsbrust werden zudem Brustanker



8 Gebirgskennlinie in Abhängigkeit von den Gebirgskennwerten
Characteristic curve for rock according to characteristic values of rock

Quelle/credit: STSym-Herbstworkshop, Präsentation Problematik Durchföhren Störzonen, K. Wild/J. Amberg, 13.10.2017

5.3 Excavation and Support Concept

Based on the forecast geology and the experience gained from the first Gotthard tube, potential danger patterns were defined for the fault zones and a subsoil model divided into homogeneous areas was created.

Given the poor-quality properties of the rock, it was decided that both fault zones would be excavated by means of conventional excavation.

In the attempt of achieving ring closure as quickly as possible, the planned excavation concept for the fault zones involves full-face excavation. The excavation cross-section (Da = 14-14.5 m) features room for securing, tolerance for movement on the part of the TBM and space for convergences (0.65 m respectively 0.5 m) based on the deformation calculations (see Section 5.4).

Grouted anchor bolts will be deployed in the crown area as an auxiliary construction measure in order to ensure working safety. Steel fibre shotcrete will also be applied to the profile and the face, with face bolts also being installed in the latter (110x, l = 18 m, all 12 m). In order to allow the deformations to occur in a controlled manner, the plan calls for a yielding lining (as was used in the Tavetsch intermediate massif of the Gotthard Base Tunnel). This will involve the installation of mesh, steel ring beams with sliding connections (each featuring two interlocking, moveable TH-beams of type TH 44) and a radial bolting system (self-drilling anchors, l = 8-12 m). The ring beams are covered with shotcrete, in which inlays are implemented to keep specific areas open allowing a more controlled deformation (cf. Fig. 6). Only once most of the forecast deformations have occurred, the resistance will then be increased – firstly by completely shotcreting the open inlay areas and thus fixing the TH-beams in place, and secondly by ensuring that the excavation support reaches its target thickness of 50 cm through the application of mesh-reinforced shotcrete (cf. Fig. 7).

versetzt (110 St., L = 18 m, alle 12 m). Um die Verformungen kontrolliert zuzulassen, ist ein nachgiebiger Ausbau vorgesehen (analog zum Vorgehen im Tavetscher Zwischenmassiv des Gotthard-Basistunnels). Dabei werden Netze und Stahlbögen mit Gleitanschlüssen (jeweils zwei ineinander liegende, verschiebbare TH-Profile vom Typ TH 44) und eine radiale Systemankerung (Selbstbohranker L = 8–12 m) eingebaut. Die Einbaubögen werden mit Spritzbeton eingespritzt, wobei durch Einlagen «Deformationsgassen» offen gelassen werden (vgl. Bild 6). Erst nach Eintreten eines Grossteils der prognostizierten Deformationen wird der Widerstand erhöht, indem zum einen die Deformationsgassen vollständig eingespritzt und dadurch die TH-Profile festgesetzt werden und zum anderen die Ausbruchsicherung durch das Aufbringen von netzbewehrtem Spritzbeton auf ihre Sollstärke von 50 cm gebracht wird (vgl. Bild 7).

5.4 Deformationsberechnungen und verbleibende Unsicherheiten

Die Konvergenzen in den Störzonen wurden mittels des Kennlinienverfahrens berechnet. Ergänzend wurde für die Störzone Süd ein FE-Modell erstellt. Bei den Berechnungen wurde auch der Einfluss des Wandeffects auf kurze Störzonen untersucht. Dieser berücksichtigt den günstigen Einfluss auf das Verhalten einer geringmächtigen Störzone des angrenzenden, ungestörten Bereichs. Zusammen mit der Kennlinie des Ausbaus kann so der beste Zeitpunkt für den Einbau der TH-Profile und das Schliessen der Gleitverbindungen ermittelt werden, um eine optimale Beanspruchung des Ausbaus bei gleichzeitig kleinen Verformungen zu erzielen.

Trotz dem Vorwissen aus der ersten Gotthard-Strassentunnel-Röhre und guter Felserkundung bleiben wegen der Anisotropie des Gebirges und der grossen Bandbreite der Gebirgseigenschaften Unsicherheiten bei den Berechnungen bestehen (vgl. Bild 8).

Zudem spielt die Berücksichtigung des Porenwasserdrucks eine grosse Rolle, weil er die Kurz- und Langzeitentwicklung der Konvergenzen massgeblich beeinflusst. Ebenfalls besteht noch eine Aufschlusslücke am Nordrand der Störzone Süd.

Diese Themen müssen in der weiteren Projektierung mit vertieften Analysen untersucht werden.

6 Materialbewirtschaftung

6.1 Wiederverwendungskonzept

Das Projekt hat folgende Ziele für die Materialbewirtschaftung gesetzt:

- Das Ausbruchmaterial soll, soweit technisch möglich, verwertet werden.



9 Wiederverwendung des Ausbruchmaterials
Reuse of excavated material

Quelle/Credit: Bundesamt für Strassen. Die zweite Gotthard-Strassentunnel-Röhre. Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 25.10.2017

5.4 Deformation Calculations and Remaining Uncertainties

The convergences in the fault zones were calculated using the characteristic curve procedure. Additionally a FE model was created for the southern fault zone. The calculations were also used to investigate the influence of the wall effect on short fault zones, thereby accounting for the beneficial influence this has on the behaviour of a thin fault zone in the neighbouring unaffected area. Together with the characteristic curve of the excavation, this makes it possible to determine the best time for the installation of the TH-beams and for the closing of the sliding connections so as to enable optimum loading of the excavation with only minor deformations.

Despite the prior knowledge relating to the first Gotthard Road Tunnel tube and good-quality investigation of the rock, the anisotropy of the rock and the wide range of rock characteristics mean that the calculations remain subject to some uncertainties (cf. Fig. 8).

In addition, the consideration given to the pore water pressure plays a major role as it significantly influences the short-term and long-term development of the convergences. There is also still an outcrop gap at the northern border of the southern fault zone.

These issues will have to undergo more in-depth analysis in the course of subsequent project planning.

6 Material Management

6.1 Reuse Concept

The project has set the following objectives in relation to material management:

- The excavated material must be utilised as much as technically possible.
- The environmental impact of material management must be kept to a minimum.
- The material management concept must be economically acceptable.
- Material management must not be the ultimate performance-defining factor.

The excavation material is primarily generated from the main drives. Additional excavation material is also amassed from

- Die Umweltbelastungen aus der Materialbewirtschaftung sind zu minimieren.
- Das Materialbewirtschaftungskonzept soll wirtschaftlich vertretbar sein.
- Die Materialbewirtschaftung darf nicht der leistungsbestimmende Faktor sein.

Das Ausbruchmaterial stammt vorwiegend aus den Hauptvortrieben. Zudem fällt weiteres Ausbruchmaterial aus Nebenbauwerken, Zugangsstollen und Kavernen an. Die ausführlich dokumentierte Geologie, ergänzt um die im Jahr 2016 durchgeführten Sondierbohrungen, erlaubt eine gute Prognose der effektiven Wiederverwertbarkeit. Insgesamt fallen knapp 6,5 Millionen Tonnen Ausbruchmaterial an (siehe Bild 9), je zur Hälfte am Nord- und Südportal.

Rund 1,6 Millionen Tonnen können nach der Aufbereitung als Zuschlagstoffe für Beton verwendet werden. Rund 4,9 Millionen Tonnen unbelastetes Material, das sich nicht zur Aufbereitung eignet oder beim Materialaufbereitungsprozess ausgeschieden wird, wird im Rahmen von Schüttungen oder Renaturierungen wiederverwendet. Leicht belastete Schlämme und leicht verschmutztes Ausbruch- und Rückbaumaterial können nicht für Renaturierungen und Geländemodellierungen verwendet werden und werden gesetzeskonform entsorgt.

6.2 Materiallogistik

Aufgrund der begrenzten Flächen in Portalnähe und der exponierten Lage bzgl. Naturgefahren (insbesondere Portalbereich Göschenen) stehen die Installationen der Materialbewirtschaftung grösstenteils im Raum Airolo.

Das Ausbruchmaterial wird mittels Förderband von der Ortsbrust zu den Triageplätzen ausserhalb der Portale geführt. Das im Nordvortrieb anfallende zur Aufbereitung geeignete Material wird vom Portal Göschenen per Zug durch den Gotthard-Scheiteltunnel nach Airolo transportiert und von dort per Förderband zusammen mit dem Material aus dem Süd-vortrieb zu den Aufbereitungsanlagen in Stalvedro befördert.

auxiliary structures, access tunnels and caverns. The geology, which has been documented in detail and was further investigated via the exploratory boreholes drilled in 2016, enables positive forecasts to be made in relation to effective recycling. A total of nearly 6.5 million tons of excavation material will be accumulated (see Fig. 9), half at the north portal and half at the south portal.

It will be possible to use around 1.6 million tons as aggregates for concrete once this has been processed. Around 4.9 million tons of uncontaminated material that is not suitable for processing or is rejected during material processing will be recycled in the course of filling procedures or renaturation. Lightly contaminated silt and lightly polluted excavation and dismantling material cannot be used for renaturation or terrain modelling and will be disposed in compliance with the law.

6.2 Material Logistics

Due to the cramped conditions in the vicinity of the portal and the exposed location with respect to natural hazards (especially at the portal area in Göschenen), the material management installations will largely be located in the Airolo area.

The excavation material will be transported from the face to the triage points located outside of the portals by means of a conveyor belt. The material that is accumulated in the north drive and is suitable for processing will be taken by train through the Gotthard Tunnel from the Göschenen portal to Airolo. Once there, both this material and the material from the south drive will be transported via conveyor belt to the processing plants in Stalvedro.

The processed aggregates will then be transported from Stalvedro back to the silos of the concrete plants via conveyor belt and by train (in the case of Göschenen). With the exception of the preliminary lots, it will be possible to cover the full amount of gravel and aggregate required for the concrete through the processing of the A material.



10 Visualisierung Überdeckung Galleria di Airolo
Visualisation of covering of Galleria di Airolo

Quelle/Credit: Bundesamt für Strassen. Die zweite Gotthard-Strassentunnel-Röhre. Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 25.10.2017

Von hier werden die aufbereiteten Zuschlagstoffe mittels Förderband und Zug (Göschenen) zurück zu den Silos der Betonanlagen transportiert. Ausser für die Vorlose kann der gesamte Bedarf an Kies und Gesteinskörnung für Beton durch die Aufbereitung von A-Material gedeckt werden.

6.3 Schüttungen und Renaturierungen

Ein Teil des überschüssigen unverschmutzten Ausbruchmaterials (B-Material) wird in der näheren Umgebung von Airolo endgelagert. Im Rahmen der Umgestaltung des Anschlusses Airolo sind verschiedene Geländeanpassungen vorgesehen, die einen relevanten Materialbedarf aufweisen. Dazu gehört auch die Galleria di Airolo, die mit Ausbruchmaterial auf rund 1000 m Länge überdeckt wird und somit den Talboden markant aufwertet (siehe Bild 10).

Weitere rund 2,8 Millionen Tonnen Ausbruchmaterial werden im Kanton Uri für die Renaturierung der Flachwasserzonen des Reussdeltas und damit als Uferschutz der Reussebene (siehe Bild 11) benutzt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts bestand die Mündung der Reuss in den Urnersee aus einer ausgedehnten Flachwasserzone mit mehreren Inseln. Seit der Kanalisierung der Reuss und dem Start des Kiesabbaus zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts entwickelte sich die Flusslandschaft nicht mehr in natürlicher Dynamik. Die Uferlinien schoben sich gebietsweise und je nach Wasserstand 200 bis 300 m landeinwärts, und rund 24 ha Riedwiesen und Schilffelder fielen den menschlichen Eingriffen zum Opfer. Bereits in den Jahren zwischen 2000 und 2007 wurden in sieben Etappen total 3,3 Millionen Tonnen Ausbruchmaterial aus anderen Tunnelprojekten zur Renaturierung verwendet. Mit dem Ausbruchmaterial aus den Tunnelprojekten der neuen Axenstrasse sowie der zweiten Gotthard-Strassenröhre soll die Renaturierung komplettiert werden. Bei der sogenannten Seeschüttung III handelt es sich um ein separates Projekt des Kantons Uri, welches bereits im Sommer 2017 bewilligt wurde.

7 Schlussbemerkungen

Die Bauherrschaft ist überzeugt, dass dank einer ausgezeichneten Zusammenarbeit aller Beteiligten ein überzeugendes Projekt ausgearbeitet wurde, welches nach der öffentlichen Auflage schnellstmöglich zur Ausführung gebracht werden kann. Nach rund acht Jahren Bauzeit wird die zweite Gotthard-Strassenröhre, je nach Dauer des Bewilligungsverfahrens, voraussichtlich 2028 eröffnet werden können. Mit der Inbetriebnahme der zweiten Gotthard-Strassenröhre beginnt anschliessend die Sanierung der bestehenden ersten Tunnelröhre, welche rund drei Jahre dauert. Nach rund elf Jahren Bauzeit kann

6.3 Filling and Renaturation

A certain amount of the excess non-polluted excavation material (B material) will be deposited in the immediate surroundings of Airolo. The rearrangement of the Airolo connection features plans for various adjustments to the terrain that are associated with relevant material requirements. These also include the Galleria di Airolo, around 1,000 m of which will be covered with excavation material – thereby significantly upgrading the valley floor (see Fig. 10).

A further approx. 2.8 million tons of excavation material will be used in the canton of Uri for the renaturation of the shallow water zones of the Reuss delta and will therefore serve as embankment protection for the Reuss plain (see Fig. 11). At the beginning of the 20th century, the point at which the Reuss flowed in Lake Uri consisted of an expansive shallow water zone featuring multiple islands. Following the canalisation of the Reuss and the removal of gravel, which started at the turn of the 20th century, the river landscape ceased to develop in a natural manner. The shorelines moved 200 to 300 m inland in certain areas depending on the water level, with around 24 ha of reed meadows and fields falling victim to this human intervention. Between 2000 and 2007, a total of 3.3 million tons of excavation material from other tunnel projects was used for the purpose of renaturation in seven stages. The excavation material from the tunnel projects relating to the new Axenstrasse and the second Gotthard road tunnel will make it possible to complete this renaturation process. 'Lakefill III' is a separate project being run by the canton of Uri that was granted approval back in summer 2017.

7 Conclusions

The building contractor is convinced that the excellent collaboration among all participants has enabled the develop-



11 Visualisierung Renaturierung Flachwasserzone im Urnersee
Visualisation of renaturation of shallow water zone in Lake Uri

Quelle/Credit: Bundesamt für Strassen, Die zweite Gotthard-Strassenröhre. Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 25.10.2017

dann ein modernes, sicheres Gesamtsystem mit zwei Tunnelröhren und je einer Fahrspur dem Betrieb übergeben werden.

Literatur/References

- [1] Bundesamt für Strassen: Die zweite Gotthard-Strassenröhre. Infodossier zur Genehmigung des Generellen Projekts durch den Bundesrat, 25.10.2017. Vgl. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationals-trassen/sanierung-gotthard.html>
- [2] Wild, K.; Amberg, J.: Präsentation Problematik Durchörterung Störzonen, STSym-Herbstworkshop, 13.10.2017

PROJEKTDATEN	
Region	Kantone Tessin und Uri
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung	Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Bellinzona
Bauherrenunterstützung	IG Cielo + (Lombardi SA, EBP Schweiz AG, Filippini & Partner Ingegneria SA)
Planung Generelles Projekt und Ausführungsprojekt	<ul style="list-style-type: none"> IG Gottardo Due (Gähler und Partner AG, Sciarini SA, Gruner AG, Rothpletz, Lienhard + Cie AG, CES Bauingenieur AG, Brüniger + Co AG, BTG Büro für technische Geologie AG und Nabla Ingenieure GmbH) IFEC Ingegneria SA
Kenndaten	
Bauzeit	ca. 8 Jahre
Inbetriebnahme	2028 (exkl. Galleria die Airolo)
Baukosten Tunnel	2,09 Mia. Schweizer Franken
Gesamtlänge	16 866 m
Durchmesser	11,8 m

ment of a convincing project. Following public disclosure, it will be possible to quickly turn this project into reality. Once the construction period of around eight years has been completed, the second Gotthard road tunnel will be opened. This is estimated to take place in 2028, depending on the duration of the approval process. The commissioning of the second Gotthard road tunnel will be immediately followed by the renovation of the existing first tunnel, which will take around three years. After around eleven years of construction work a modern and safe overall system featuring two tunnels – each containing one lane – can be put into operation.

PROJECT DATA	
Region	Cantons of Ticino and Uri
Client; Project and Contract Management	Swiss Federal Roads Office (FEDRO), Bellinzona branch
Client Support	IG Cielo + (Lombardi SA, EBP Schweiz AG, Filippini & Partner Ingegneria SA)
Planning of General Project and Construction Project	<ul style="list-style-type: none"> IG Gottardo Due (Gähler und Partner AG, Sciarini SA, Gruner AG, Rothpletz, Lienhard + Cie AG, CES Bauingenieur AG, Brüniger + Co AG, BTG Büro für technische Geologie AG und Nabla Ingenieure GmbH) IFEC Ingegneria SA
Fact file	
Construction period:	approx. 8 years
Commissioning:	2028 (excluding Galleria di Airolo)
Tunnel construction costs:	2.09 billion Swiss francs
Total length:	16,866 m
Diameter:	11.8 m

Johann Herdina, B.Eng., TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck/AT

Projekt Gemeinschaftskraftwerk Inn

Grenzüberschreitende technische und vertragliche Herausforderungen

Im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Österreich wird im Engadin und in Tirol am Oberen Inn derzeit das grösste Ausleitungskraftwerk in den Alpen erstellt. Mit einem 23 km langen Triebwasserweg und einer Wehrbaustelle direkt auf der Grenze ergeben sich neben den technischen Herausforderungen auch grenzüberschreitende Themen, die zu lösen sind.

The GKI Hydroelectric Power Plant Project on the River Inn

Technical and Contractual Challenges across an International Border

In the border region between Switzerland and Austria, the largest hydroelectric run off river power station in the Alps, is being built in Engadine and in Tyrol on the upper reaches of the river Inn. With a 23 km headrace tunnel and a dam construction site directly on the border, apart from the technical challenges, there are also cross-border issues which have to be resolved.

1 Einleitung

Im östlichsten Punkt der Schweiz, im Unterengadin, und im Oberen Gericht in Tirol wird derzeit das grenzüberschreitende Projekt Gemeinschaftskraftwerk Inn umgesetzt. Dieses Projekt erstreckt sich auf die Gemeinde Valsot in der Schweiz und sieben Gemeinden in Österreich. Als Bauherr fungiert die Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH, die als Gesellschafter die TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG mit 76%, die Verbundgesellschaft mit 10% und die Engadiner Kraftwerke AG mit 14% Beteiligungsanteilen ausweist. Dieses Ausleitungskraftwerk am Oberen Inn wird eine Gesamtleistung von 89 MW haben und eine Gesamterzeugung von 440 Gigawattstunden pro Jahr aufweisen. Bei einer Fallhöhe von 132 m und einer Ausbauwassermenge von 75 m³/sec zählt dieses Projekt derzeit zu den grössten in Umsetzung befindlichen Wasserbauprojekten in Europa. Die Hauptbestandteile des Kraftwerkes sind ein Stauraum mit 500000 m³ Fassungsvermögen und eine Wehranlage mit einer Stauhöhe von 15 m. Diese beiden Projektteile liegen grenzüberschreitend am Inn, das heisst je zur Hälfte in der Schweiz und in Österreich. Der 23 km lange Druckstollen mit einem Aussendurchmesser von 6,5 m und einem Innendurchmesser von 5,8 m wird rein auf österreichischem Staatsgebiet errichtet und hat eine Überdeckung bis maximal 1250 m. Wasserschloss, Kraftabstieg und Unterwasserkanal liegen im Gemeindegebiet von Prutz, und das Krafthaus beherbergt zwei Francis-Turbinen mit zwei Generatoren und zwei Transformatoren.

1 Introduction

In the most easterly point in Switzerland in the Lower Engadine and in Oberes Gericht in Tyrol, southwest Austria, the cross-border hydroelectric power station project "Gemeinschaftskraftwerk Inn" is currently being built on the river Inn. This project extends over the local authority of Valsot in Switzerland and through seven local authorities in Austria. Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH (GKI), is acting as the client, and is a company in which TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG holds 76%, VERBUND AG 10% and Engadiner Kraftwerke AG 14% of the shares. This hydroelectric power station on the upper Inn will have a total capacity of 89 MW, producing a total of 440 gigawatt hours per year. With a head of 132 m and a water flow rate of 75 m³/sec this project currently counts amongst the largest hydraulic construction projects being implemented in Europe. The main parts of the power station are a reservoir to hold 500,000 m³ water and a 15 m high weir. These two parts of the project lie across the border on the river Inn, this means half each in Switzerland and Austria. The 23 km long headrace tunnel with an outer diameter of 6.5 m and an inner diameter of 5.8 m is being built solely on Austrian territory under a maximum rock cover of 1,250 m. The surge tank, penstock and the tailrace are within the local authority of Prutz, and the generator building holds two Francis turbines with two generators and two transformers.

Projet de centrale électrique en exploitation bilatérale sur l'Inn

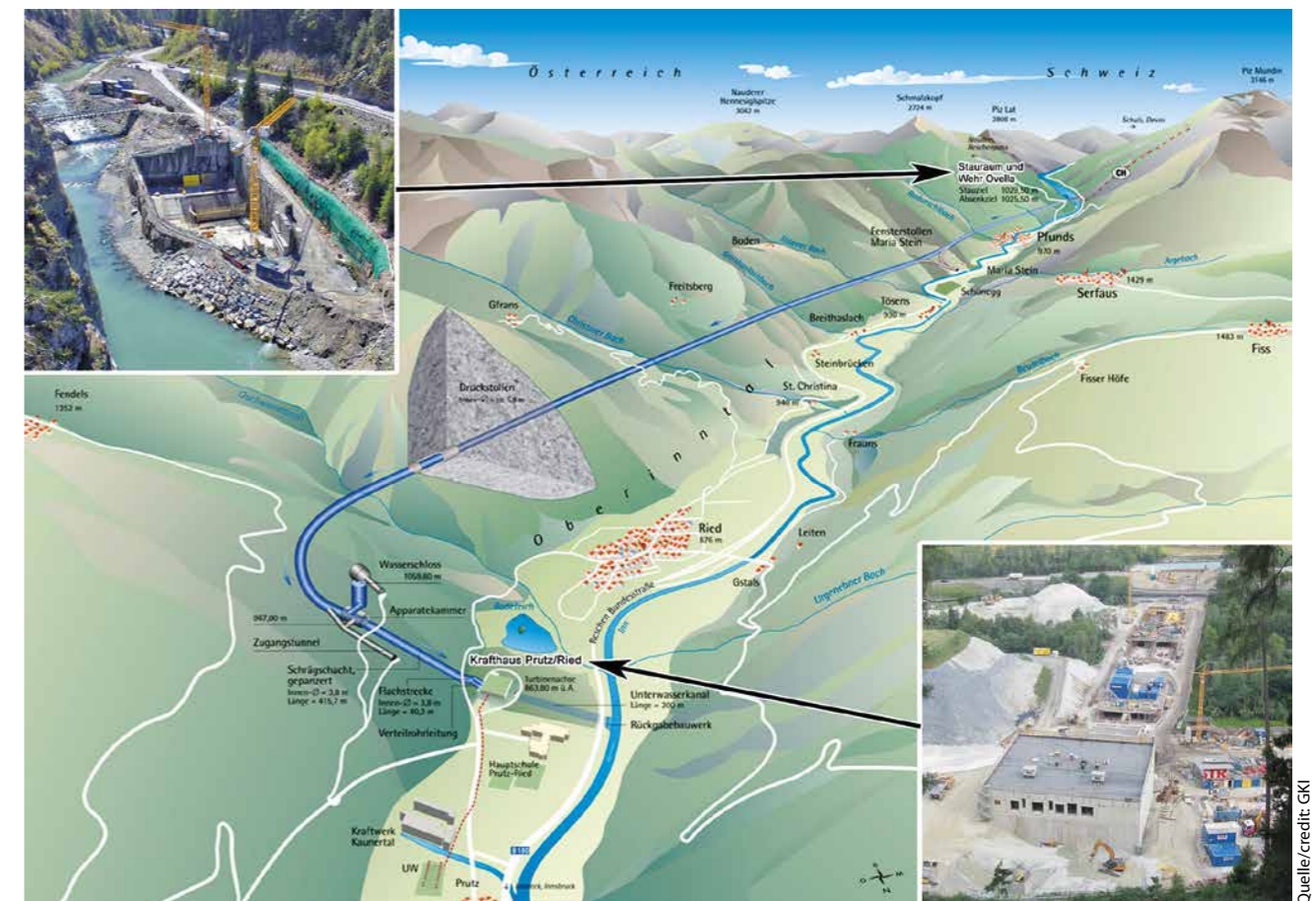
Défis techniques et contractuels transfrontaliers

Après une très longue phase de préparation du projet et une procédure d'autorisation impliquant deux États, il s'imposait de démarrer le projet à une période où les prix de l'électricité sur le marché européen étaient très bas. Outre les problèmes rencontrés au moment du lancement du projet, la construction du bief d'aménée a également nécessité un changement de contractant ainsi qu'une poursuite du suivi sur la base d'un nouveau modèle contractuel, à savoir un contrat d'alliance.

Progetto Gemeinschaftskraftwerk Inn

Sfide tecniche e contrattuali transfrontaliere

In seguito a un tempo di preparazione del progetto molto lungo e a una procedura di autorizzazione coinvolgente due stati, il progetto è dovuto essere iniziato in un periodo in cui i prezzi della corrente sul mercato europeo erano molto bassi. Oltre ai problemi all'inizio del progetto, nel corso della realizzazione della condotta dell'acqua motrice è stato necessario effettuare il cambio dell'appaltatore e proseguire con il nuovo modello contrattuale del contratto di alleanza.



1 Projektübersicht
Project overview

2 Die Geschichte des Projektes

Die energiewirtschaftliche Nutzung des Inns im Abschnitt des Unterengadins und des Oberen Gerichts in Tirol hat schon eine sehr lange Projektgeschichte. Die ersten noch vorliegenden Projektstudien stammen aus dem Jahr 1928, bei denen ein gewisser Herr Baum aus San Francisco Pläne

2 The History of the Project

The project to commercially exploit the energy of the river Inn in the section covering the lower Engadine and the Oberes Gericht in Tyrol has a very long history. The earliest project studies still in existence date from 1928, and these plans were presented by a certain Mr. Baum from San Fran-

vorlegte. Vor Ausbruch des Zweiten Weltkrieges und noch im Weltkrieg sind in diesem Raum verschiedenste Projekte belegt, welche aber nicht zur Umsetzung gebracht wurden. Erst nach Abschluss des Zweiten Weltkrieges begann man sowohl in der Schweiz als auch in Österreich mit neuen Überlegungen zum Ausbau der Wasserkraft in diesem Gebiet. Als erstes Projekt wurde das Kraftwerk Prutz-Imst von der TIWAG in den Jahren 1954 bis 1956 umgesetzt und zur gleichen Zeit in der Schweiz die Engadiner Kraftwerke AG mit Geschäftssitz in Zernez 1954 als Partnergesellschaft zur Nutzung der Wasserkraft im Engadin gegründet. Während in Österreich in weiterer Folge von der TIWAG das Speicherkraftwerk Kaunertal errichtet wurde, wurde in der Schweiz die obere Innstufe Schanf-Pradella und die internationale Stufe Livigno-Ova Spin errichtet, die seit 1970 in Betrieb sind. In weiterer Folge wurde in der Schweiz das Ausleitungskraftwerk Pradella-Martina errichtet, welches im Januar 1994 die Produktion aufgenommen hat. Seit dieser Zeit ist der Abschnitt zwischen Martina und Prutz eine nicht genutzte Stufe, wobei von den Kraftwerken der Oberlieger aus der Schweiz eine hohe Schwall- und Sunkbelastung auf den Inn im Grenzbereich zwischen der Schweiz und Österreich eingebracht wird.

In den 30 Jahren zwischen 1948 und 1978 wurden mehrere Projektvarianten in diesem Abschnitt überlegt, aber erst 1978 wurde mit einer intensiven Planung begonnen. Eine zweistaatliche Innkommission wurde gegründet, die Österreich-Schweizerische Kommission für die Wasserkraftnutzung der gemeinsamen Innstrecke, wobei hier für Österreich das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus und für die Schweiz das Eidgenössische Bundesamt für Wasserwirtschaft zuständig ist. 1982 wurde ein fertiges Projekt, das im Prinzip identisch mit dem jetzt zur Umsetzung gelangenden war, zur wasserrechtlichen Bewilligung eingereicht. Aufgrund unterschiedlicher Umstände und auch infolge eines gewissen Widerstands in der Bevölkerung wurde dieses Projekt nie zur Realisierung gebracht. Erst 2003 begann man wieder mit intensiveren Überlegungen zur Schliessung der Kraftwerkskette zwischen der Schweiz und dem Kraftwerk Prutz-Imst in Österreich.

3 Der Staatsvertrag und die Genehmigungsphase

Auf Drängen der Gesellschafter der GKI-GmbH wurde ein Abkommen zwischen der Republik Österreich und der Schweizerischen Eidgenossenschaft über die Nutzbarmachung des Inns und seiner Zuflüsse im Grenzgebiet mit Datum vom 29.10.2003 geschlossen. Dieser Staatsvertrag bildete die Basis für die weiteren planerischen Überlegungen. Die zwischenzeitlich um einiges verschärften Genehmigungserfordernisse hatten den Bedarf einer intensiven Planungsphase zur Folge. Am 05.04.2007 wurden die Genehmigungsanträge in Österreich und in der Schweiz den zuständigen Behörden zur Bearbeitung übergeben. Am 01.08.2008 trat das Abkommen vom 29.10.2003 zwischen der Republik Österreich und der Schweizerischen Eidgenos-

schen. Prior to the outbreak of World War II and even during the war, a variety of projects were planned but none came to fruition. It was only after World War II that, both in Switzerland and in Austria, new ideas were started for the development of hydroelectric power in this region. The Prutz-Imst power station was the first project to be implemented by TIWAG in the years from 1954 to 1956. At the same time in Switzerland, Engadiner Kraftwerke AG was founded in 1954 with its headquarters in Zernez as a partner company to use hydroelectric power in the Engadine. While in Austria, TIWAG then constructed the Kaunertal storage power station, in Switzerland the upper stage Schanf-Pradella and the international stage Livigno-Ova Spin were built, which have been in operation since 1970. Switzerland then built the Pradella-Martina power station which started production in January 1994. Since this time, the section between Martina and Prutz has been an unused stage, while the upstream power stations from Switzerland introduce hydro peaking in the river Inn in the border region between Switzerland and Austria.

In the 30 years between 1948 and 1978 several project variants were considered for this section, but it was only in 1978 that intensive planning really started. A two state commission for the Inn was founded, called the Austrian-Swiss commission for the use of hydroelectric energy along the joint section of the river Inn, with the responsibility held in Austria by the Federal Ministry for Sustainability and Tourism and in Switzerland by the Swiss Federal Authority for Water Management. In 1982 a finished project, which is basically identical to the one currently nearing completion, was submitted for approval by the water authorities. Due to a number of circumstances and also due to a certain resistance within the local population, this project was never implemented. It was only in 2003 that considerations began again to complete the chain of power stations between Switzerland and the Prutz-Imst power station in Austria.

3 The State Treaty and the Approval Phase

Under pressure from the GKI-GmbH shareholders, a treaty was signed between the Republic of Austria and the Swiss Confederation about the utilisation of the river Inn and its tributaries in the border region, dated 29 October 2003. This treaty then formed the basis for making further plans. As in the meantime the requirements for an approval had been considerably tightened up, this resulted in the need for an intensive planning phase. On 5 April 2007 the application for approval was submitted to the responsible authorities for processing in Austria and Switzerland. On 1 August 2008 the treaty from 29 October 2003 between the Republic of Austria and the Swiss Confederation about the utilisation of the river Inn and its tributaries in the border region came into force. In 2010 the sponsors of the project received a first instance notice of approval dated 12 July 2010 from the Tyrolean regional government and, for the Swiss part, on 11 October of the same year the concession and approval for

construction was issued by the Swiss federal department for the environment, traffic, energy and communication. These first instance notices of approval were opposed both in Austria and in Switzerland, and while in Switzerland the Swiss objection was rejected on 25 August 2011 by a decision of the federal administrative court, the senate for the environment in Austria only issued their second instance notice of approval on 5 December 2012. These two decisions came into effect, in accordance with the treaty, when diplomatic notes were exchanged in Vienna on 27 June 2013, so that the entire approval became legally binding from 1 July 2013.

4 The Start of Construction and Changes to the Shareholdings

As a legally binding permit was now available in both countries, the preparations for construction could begin. The detailed planning now had to be started and the procurement process for the individual sections of the construction work, which had already started, had to be completed. In parallel, at the same time, some compulsory purchase orders had to be initiated as no agreement had been possible with a small number of landowners about the required rights.

Construction work was scheduled to begin in spring 2014, although the varying rules of each shareholder's company meant that a variety of requirements had to be met for the decision to be made to start construction. It was thus at Easter in 2014 that early measures were started in the field of rockfall protection works for the construction of the weir in Ovella, after it became clear that these were time-critical for the project. Early in 2014, the majority shareholder, VERBUND AG was unable to get a decision from their board owing to the changed market situation for the price of electricity. To make a positive decision possible, the shareholdings were changed so that TIWAG took a share of 76% and VERBUND AG reduced its share from what was originally 50% down to 10%. As the commitment period for the individual tenders would have expired at the end of June 2014, GKI felt compelled to make a quick decision and to make a conditional cartel office had agreed to TIWAG's acquisition of the shares. With hindsight, the decision about the start of construction was definitely correct, as in the following years up to February 2016 the price for electricity fell quite strongly and has only now got back up to the level of 2013.

After this decidedly long approval and planning phase, which was also associated with frequent changes of the project manager, taking a close look at the project before the work was awarded would have been appropriate. Due to the external conditions, at that time the decision to start construction definitely seemed to be correct and, despite the various difficulties which arose due to insufficient planning and preparation for the project, ultimately it has turned out to be correct.

4 Baubeginn und Beteiligungsänderung

Da nun ein rechtskräftiger Baubescheid in beiden Staaten vorlag, konnten die Bauvorbereitungsarbeiten beginnen. Die Ausführungsplanungen mussten gestartet werden, und die bereits angelaufenen Vergabeverfahren für die einzelnen Bauleistungen mussten zu Ende geführt werden. Gleichzeitig war es erforderlich, parallel dazu noch einzelne Enteignungsverfahren anzustreben, da mit einer geringen Anzahl an Grundeigentümern keine Einigung zu den erforderlichen dinglichen Rechten erzielt werden konnte.

Der Baubeginn wurde auf Frühling 2014 festgelegt, wobei nach den diversen Regelungen in den einzelnen Häusern der Gesellschafter verschiedene Voraussetzungen für einen noch zu tätigen Baubeschluss erfüllt werden mussten. So ergab es sich, dass bereits Ostern 2014 mit vorgezogenen Massnahmen im Bereich der Felssicherungsarbeiten für die Errichtung der Wehranlage in Ovella begonnen wurde, nachdem diese Arbeiten als zeitkritisch erkannt worden waren. Die Verbundgesellschaft erklärte als Mehrheitseigentümerin im Frühjahr 2014 aufgrund der geänderten Marktsituation im Strompreis keinen Aufsichtsratsbeschluss herbeiführen zu können. Um dennoch einen positiven Baubeschluss herbeiführen zu können, wurden die Beteiligungsverhältnisse dahingehend geändert, dass die TIWAG einen Anteil von 76% übernahm und die Verbundgesellschaft ihren Anteil von ursprünglich 50% auf 10% reduzierte. Weil die Bindungsfrist der einzelnen Angebote bereits mit Ende Juni 2014 abgelaufen wäre, sah sich die GKI gezwungen, rasch zu entscheiden und noch vor der Zustimmung des Bundeskartellamtes zur Anteilsübernahme durch die TIWAG einen bedingten Baubeschluss zu fällen. Im Nachhinein betrachtet war die Entscheidung für den Baustart jedenfalls richtig, da der Strompreis in den Folgejahren bis Februar 2016 weiter stark sank und erst jetzt wieder das Niveau von 2013 erreicht hat.

Nach dieser ausgesprochen langen Genehmigungs- und Planungsphase, die noch mit einem häufigen Projektleiterwechsel verbunden war, wäre eine intensive Projektevaluierung vor Vergabe der Leistungen zweckmässig gewesen. Aufgrund der äusseren Randbedingungen erschien die Entscheidung zum Baustart zum damaligen Zeitpunkt jedenfalls richtig, und dies hat sich trotz der diversen Schwierigkeiten, die sich infolge mangelnder Planung und Projektvorbereitung gezeigt haben, letztlich als richtig erwiesen.

5 Technische Probleme der Wehranlage und im Bereich der Baugrube des Krafthauses

5.1 Wehranlage

Die Wehranlage und das Dotierkraftwerk kommen an einer Engstelle zu liegen, in der auf der orographisch rechten Seite eine 650 m hohe, sehr steile Felsflanke vorhanden ist. Von vornherein waren hier intensive Hangsicherungsarbeiten geplant, nur das Ausmass der tatsächlich erforderlichen Sicherungsmassnahme konnte erst im Zuge der tatsächlichen Arbeiten festgestellt werden. Zur Absicherung der Baustellen mussten zusätzliche Netzreihen und zusätzlich noch Boden-netze angebracht werden; diese Arbeiten liessen sich vor dem Einbruch des Winters 2014/2015 nicht beenden, sie mussten somit über die Winterpause ausgesetzt und konnten erst nach Ende der Frostperiode im Mai 2015 fortgesetzt werden.



2 Gesicherte Felsflanke oberhalb des Wehrs
Stabilised rock face above the weir

5 Technical Problems with the Weir and in the Area of the Powerhouse

5.1 The Weir and Intake

The weir and its small hydro power station came to be at a narrow part of the valley, in which, on the orographic right hand side there is a 650 m high, very steep rock face. Right from the start significant rockfall protection works had been planned here, but the extent of the stabilisation work which was actually necessary could only be determined as the work actually took place. To protect the construction sites, additional rows of wire mesh and also wire mesh on the floor had to be installed; this work could not be completed before the 2014/2015 winter arrived, so work had to pause through the winter and could only be restarted in May 2015 at the end of the frost period.

After, in parallel to this work, no preparatory work had been possible in the area of the weir's construction site, there was a significant delay of several months before work could begin. The difficult access to the actual site of the weir also meant that it was not possible to do any exploratory drilling on the exact site of the weir prior to the construction work. It was only after access roads had been built that exploratory drilling could be used to determine the actual course of the rock contour lines and the actual nature of the ground in the area of the foundations. The information resulting from this led to the

Nachdem parallel zu diesen Arbeiten keine Vorbereitungsarbeiten im Bereich der Wehrbaustelle hatten durchgeführt werden können, ergaben sich bereits zu Beginn der Baustelle doch erhebliche Verzögerungen von mehreren Monaten. Aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit des tatsächlichen Wehrstandortes war es auch nicht möglich, im Vorfeld der Baumassnahme detaillierte Erkundungsbohrungen exakt am Wehrstandort durchzuführen. Erst nach Herstellung der Baustrassen konnten mit Erkundungsbohrungen der tatsächliche Verlauf der Felslinien und die tatsächliche Bodenbeschaffenheit im Bereich der Fundierung bestimmt werden. Diese Erkenntnisse führten dazu, dass die Bohrpfahlängen von ursprünglich im Mittel 26 m auf 34 m erhöht werden mussten, wobei die tiefsten Pfähle eine Länge von 45 m in der Ausführung aufweisen. Diese Verlängerungen führten zu zusätzlichen Kosten aufgrund der Überlängen bei der Pfahlbewehrung und der zusätzlichen erforderlichen Bewehrungsstösse. Auch gestaltete sich das Bohren der Bohrpfähle in dem anstehenden Material mit Hangschutt und Blocklagen zum Teil ausgesprochen anspruchsvoll. Aufgrund der Mengen kam es zu weiteren Verzögerungen im Bereich der Fundierung, weshalb die Betonarbeiten für die Herstellung der Wehranlage erst im Frühjahr 2017 gestartet werden konnten.

5.2 Krafthausgrube

Im Bereich des Krafthauses wurde im Zuge der Detailplanung festgestellt, dass die ursprünglich angenommene Grundwasserkote um 2 m falsch vermutet wurde. Somit musste im Bereich der Krafthausbaugrube das Bauverfahren geändert und die bauzeitliche Abstimmung so gelegt werden, dass die kritischen Bauphasen mit den grössten Aushubtiefen zu einem Zeitpunkt stattfinden, in dem ein hoher Grundwasserspiegel ausgeschlossen werden kann. Im Bereich des geschlossenen Unterwasserkanals musste das gesamte Bauverfahren umgestellt werden; die ursprüngliche Planung, in einer offenen Baugrube den Unterwasserkanal herzustellen, musste durch ein Bauverfahren mit Spundwandkästen und Unterwasserbetonsole ersetzt werden.

6 Triebwasserweg, Vortriebsprobleme und Wechsel des Auftragnehmers

Von dem ca. 23 km langen Triebwasserweg sind 21,794 km mittels Vortriebsmaschinen herzustellen. Dafür wurden vom Auftragnehmer zwei Tunnelvortriebsmaschinen von der Firma The Robbins Company zum Einsatz gebracht. Die Vortriebsarbeiten wurden mit der Südmaschine im November 2015 und mit der Nordmaschine im März 2016 begonnen. Weil sich aufgrund unterschiedlichster Ursachen keine befriedigenden Vortriebsleistungen einstellten und der Auftragnehmer erhebliche Schwierigkeiten hatte, mit den angetroffenen Randbedingungen zurechtzukommen, wurde der Bauvertrag für die Herstellung des Triebwasserweges einvernehmlich zum Jahreswechsel 2016/2017 aufgelöst. Mit der Auflösung des Bauvertrages gingen alle Maschinen, Baustelleneinrichtungsgegenstände und sonstigen auf der Baustelle befindlichen Anlagen in das Eigentum der GKI-

average length of the bored piles having to be increased from 26 to 34 m, with the deepest pile actually having a length of 45 m. These extensions led to additional costs owing to the longer pile reinforcements and the increased number of pile drives required. Due to the material found on site with talus material and courses of blocks the drilling for the bored concrete piles was found to be extremely demanding at times. Owing to the increased quantities, there were further delays in the area of the foundations, which is why the concrete works to make the weir could only be started in early 2017.

5.2 Excavations for the Powerhouse

In the area of the powerhouse, during the detailed planning, it was found that the presumed spot height of the groundwater level was out by 2 m. In the area of the excavations for the generator building the construction process thus had to be changed, and the scheduling of the works had to be adjusted so that the critical phase of the work, with the deepest excavations, took place when a high level of groundwater could be excluded. In the area of the closed tailrace, the entire method of construction had to be changed. The original plan, to make the tailrace with an open excavation, had to be replaced by a method using sheet piling walls and a submerged concrete slab.



3 Übersicht Krafthaus mit UW-Kanal
Overview of the powerhouse with its tailrace channel

6 Headrace Tunnel, Tunnelling Problems and Changing the Contractor

Of the roughly 23 km long headrace, 21,794 km have to be made using tunnel boring machines. For this, the contractor used two tunnel boring machines made by The Robbins Company. With the south machine, tunnelling work started in November 2015 and with the north machine in March 2016. As insufficient progress was made due to a variety of causes and the contractor had considerable difficulties coping with the conditions, the contract for the construction of the headrace was terminated by mutual agreement at the turn of the year 2016/2017. With the termination of the construction contract, all of the machines, construction site equipment and other plant on the construction

Gesellschaft über. Diese und alle Anlagenteile wurden dem neuen Konsortium, das aus den Firmen Strabag AG, Jäger Bau GmbH und G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft m. b. H. besteht, zur Fortführung der Arbeiten im Rahmen eines Allianzvertrages überlassen.

site became the property of GKI. This and all parts of the plant were then given to the new consortium comprising Strabag AG, Jäger Bau GmbH and G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft mbH, to continue the work as part of an alliance agreement.



4 Baustelleneinrichtungsfäche Maria Stein
Construction site equipment area at Maria Stein

6.1 Der Allianzvertrag als neues Vertragsmodell

Aus der vorgegebenen Zwangslage heraus musste die GKI mit dem neuen Auftragnehmer ein Vertragsmodell vereinbaren, das für beide Vertragspartner möglichst faire Abwicklungsbedingungen gewährleistet. So wurde auf der Grundlage eines österreichischen Arbeitsgemeinschaftsvertrages in Anlehnung an den australischen Allianzvertrag eine Vertragsgrundlage für die Restabwicklung geschlossen. Kernpunkte des Vertrages sind die Definition von Zielkosten und Zielterminen mit einem «pain and gain sharing» bei Termin- und Kostenüberschreitungen, aber auch mit Anreizmodellen bezüglich Arbeitssicherheit, Herstellqualität und partnerschaftlichem Verhalten. Die GKI als Auftraggeber entsendet einen erfahrenen Mitarbeiter in die Allianz Sitzungen, die im Prinzip Firmenratssitzungen der Arbeitsgemeinschaft sind, und hat als Bauherr volle Einsicht in die Bilanzunterlagen und ist auch der Vorfinanzierer aller Baustellentätigkeiten.

6.2 Erfahrung aus der Abwicklung in einem Allianzvertrag

Die Erfahrungen sind grundsätzlich positiv, und als ein ausgesprochen gutes Zeichen kann berichtet werden, dass nach über einem Jahr Einsatz des Allianzvertrages dieser Vertrag noch nie von einem der Vertragspartner zur Hand genom-

6.1 A Project Alliance Agreement as the New Contractual Model

This predicament meant that GKI had to agree a contractual model with the new contractor, which ensured conditions that were as fair as possible for both parties. Based on an Austrian consortium agreement and using ideas from the Australian alliance agreement, a contractual basis was agreed for the remainder of the project. The core aspects of the contract are the definitions of target costs and deadlines with "pain and gain sharing" if deadlines and costs are exceeded, but also with incentive models for health and safety, manufacturing quality and cooperative behaviour in the partnership. GKI acting as the client sent an experienced employee to the alliance meetings, which are basically company board meetings for the consortium, it has full access to the financial documents and it provides the provisional finance for all work on the construction site.

6.2 Experiences from Working Within a Project Alliance Agreement

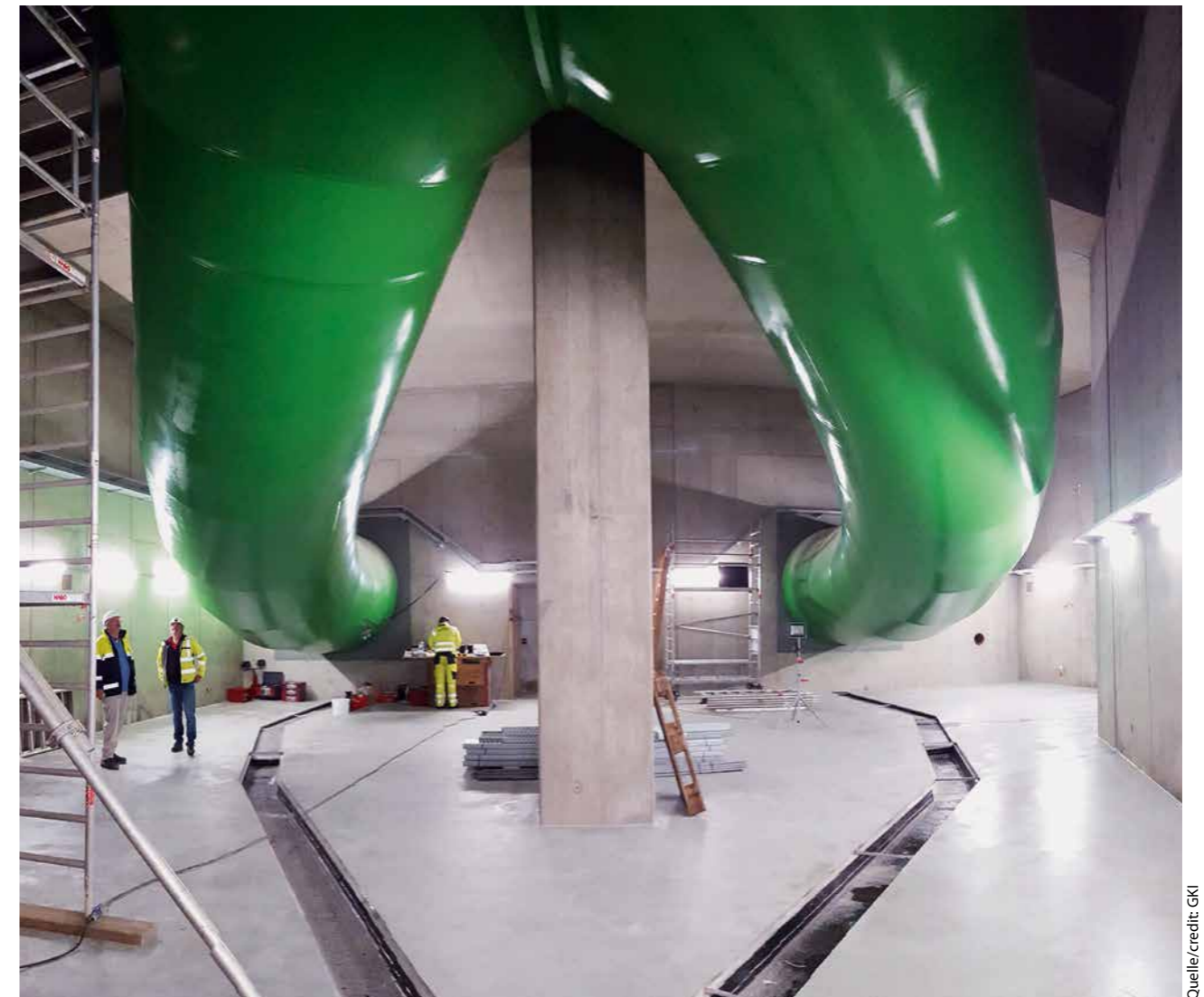
Fundamentally, the experiences have been positive and it can be seen as an extremely good sign that, after a year of using the alliance agreement, it has never been picked up by one of the partners for a dispute. The management of

men wurde. Die Baustelle konzentriert sich rein auf die Umsetzung der Baumaßnahme zu möglichst wirtschaftlichen Konditionen. Aus Sicht des Auftraggebers ist es unbedingt erforderlich, dass seitens des Auftraggebers eine erfahrene, in der Abwicklung von Baumaßnahmen in allen technischen Fragen bestens versierte Person die Interessen des Bauherrn vertritt. Ohne dieses Personal ist von einer Abwicklung eines Bauvertrags in einem entsprechenden Modell abzuraten, weil doch Entscheidungen vor Ort zu treffen sind, die kosten- und terminrelevant sind. Die Intensität, mit der sich die Vertreter der Auftragnehmer in die Allianz einbringen, hängt erfahrungsgemäss davon ab, inwieweit die Vertreter in anderen Bauvorhaben mit viel grösseren Problemen verhaftet sind.

Nachdem die angetroffenen geologischen Verhältnisse mit häufigen Störzonen doch wesentlich von der Urprognose abweichen, bringt der Allianzvertrag auch hier Vorteile in der Abwicklung und die Gewissheit, nicht zum Bauende mit grossen Nachträgen rechnen zu müssen.

the construction site simply concentrates on completing the construction work as cost effectively as possible. From the client's point of view, it is vital that they have someone to represent their interests who is experienced, and is well versed with all of the technical questions of doing construction work. Without someone like this, it is not advisable to work through a construction contract in a corresponding model, as decisions have to be made on site which affect both the costs and the deadlines. The energy which contractors' representatives bring to the alliance depends, as experience has shown, on the extent to which they are involved in other construction projects with much larger problems.

After the geological conditions encountered, with frequent fault zones, differed significantly from the original predictions, the alliance agreement is also beneficial here in getting things done and it provides certainty that there will not be large claims to be expected at the end of construction.



5 Krafthaus Prutz/Ried – Hosenrohr
Powerhouse at Prutz/Ried – Y pipe

7 Kosten und Zeitauswirkungen

Für die GKI-Gesellschaft hat sich bis zum heutigen Tag ein Zeitverlust von zwei Jahren eingestellt. Der ursprünglich geplante Termin einer Inbetriebnahme im April 2018 verschiebt sich aus heutiger Sicht in das Frühjahr 2020. Während die Bauarbeiten im Bereich des Krafthauses, des Druckabstieges und des Wasserschlossschachtes termingerecht abgewickelt werden konnten, sind bei den Baulosen zum Triebwasserweg und beim Baulos zur Wehrbaustelle Verzögerungen in der Größenordnung von zwei Jahren eingetreten. Derzeit ist nicht wirklich abschätzbar, welches der beiden Lose auf dem kritischen Weg liegt, wobei dies allein von den zukünftig anzutreffenden geologischen Verhältnissen im Bereich des Triebwasserweges abhängt. Neben den Erzeugungseinbusen aufgrund der zweijährigen Verspätung haben sich auch die Herstellkosten von ursprünglich 461 Millionen Euro auf derzeit 534 Millionen Euro erhöht, was sich aus der verlängerten Abwicklungszeit und den Mehraufwendungen ergibt.

8 Zusammenfassung

Im Projekt Gemeinschaftskraftwerk Inn mussten die Vertreter der Bauherren verschiedene Entscheidungen fällen, die bei einer solchen Massnahme ungewöhnlich sind. Über diese Entscheidungen wird sich im Nachhinein vortrefflich diskutieren lassen, wobei es für eine professionelle Projektabwicklung zwingend erforderlich ist, dass notwendige Entscheidungen seitens des Bauherrn auch zeitgerecht getroffen werden. Die Erfahrung zeigt auch, dass eine lange Projektlaufzeit mit mehrmaligem Wechsel der Projektleiter keine guten Voraussetzungen für eine straffe und erfolgreiche Projektabwicklung bildet.

Die Umsetzung von Grossbauvorhaben fordert von allen Beteiligten viel Können und Einsatzbereitschaft, und mit diesen Tugenden wird auch dieses Projekt zu Ende gebracht werden und für viele Jahre erneuerbare, regenerative Energie liefern.

7 Costs and the Effects on the Schedule

Up to now, for GKI there has been a delay of two years. The originally planned date for the start of operations in April 2018 is now expected to be early 2020. While the construction work in the area of the powerhouse, the tailrace and the surge tank were all finished on schedule, the construction sections for the headrace and for the weir and intake have been delayed by about two years. It is not currently possible to estimate which of the two sections represent the critical path, as this solely depends upon the geological conditions which will be encountered in future in the area of the headrace. Apart from the lost production of electricity due to the two year delay, the manufacturing costs of originally 461 million euros have grown to what is currently 534 million euros, which results from the longer construction time and the additional costs.

8 Summary

In the "Gemeinschaftskraftwerk Inn" project, to build a hydroelectric power station on the river Inn, the client's representatives had to make a number of decisions which are unusual for a project like this. After the event, it will be very easy to discuss these decisions, as to why it is absolutely necessary in the interests of professional project management, for the client to make the necessary decisions in good time. Experience also shows that a project with a long duration, with several changes of project manager, does not provide the best conditions for its streamlined and successful execution.

The implementation of major construction projects requires a lot of skill and commitment from everyone involved, and with these virtues this project will also be completed to provide renewable, regenerative energy for many years to come.

PROJEKTDATEN

Region

Tirol/Graubünden

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH, Landeck

Planung und Bauleitung

- Lahmeyer International GmbH, Bad Vilbel (Planung)
- Müller + Hereth, Ingenieurbüro für Tunnel- und Felsbau GmbH, Freilassing (Planung)
- Bernard Ingenieure ZT GmbH, Hall, und Pöyry Energie GmbH, Wien (Bauleitung)

Ausführung

- Baulos Stauraum: Bezzola Denoth AG/Nicol. Hartmann & Cie AG, Scuol
- Baulos Wehr: ARGE TEERAG-ASDAG AG/PORR Bau GmbH, Kematen
- Baulos Triebwasserweg: ALLIANZ GKI (STRABAG SE, Wien/Jäger Bau GmbH, Schruns/G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft m. b. H., Salzburg)
- Baulos Krafthaus: ARGE (G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft m. b. H., Salzburg/ BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck/Östu-Stettin, Leoben/Weys-Freytag, München)

Kenndaten

Bauzeit	Juli 2014 – Dezember 2021
Inbetriebnahme	Oktober 2020
Baukosten Tunnel	180 Mio. Euro
Gesamtlänge	ca. 23 km
Ausbruchquerschnitt	33,18 m ²

Besondere Merkmale

Triebwasserweg mit Tübbing ausgekleidet

PROJECT DATA

Region

Tirol/Graubünden

Client, project management & senior construction management

Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH, Landeck

Planning and construction management

- Lahmeyer International GmbH, Bad Vilbel (planning)
- Müller + Hereth, Ingenieurbüro für Tunnel- und Felsbau GmbH, Freilassing (planning)
- Bernard Ingenieure ZT GmbH, Hall and Pöyry Energie GmbH, Vienna (construction management)

Construction work

- Reservoir construction section: Bezzola Denoth AG/Nicol. Hartmann & Cie AG, Scuol
- Weir construction section: ARGE TEERAG-ASDAG AG/PORR Bau GmbH, Kematen
- Headrace construction section: ALLIANZ GKI (STRABAG SE, Wien/Jäger Bau GmbH, Schruns/G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft m.b.H., Salzburg)
- Powerhouse construction section: ARGE (G. Hinteregger & Söhne Baugesellschaft m.b.H., Salzburg
- BeMo Tunnelling GmbH, Innsbruck/Östu-Stettin, Leoben/Weys-Freytag, Munich)

Key data

Construction period	July 2014 – December 2021
Start operation	October 2020
Tunnel construction costs	180 million euros
Total length	Approx. 23 km
Cross section of the tunnel	33.18 m ²

Special characteristics

Headrace clad with prefabricated segments

Stefan Irngartinger, Dr.-Ing. Dipl. Bau-Ing. TU/SIA, BLS Netz AG, Bern/CH
 Daniel Pixley, Dipl. E-Ing. ETH, BLS Netz AG, Bern/CH
 Markus Aeschbach, Dipl. Bau-Ing. EPF, IG VALBT c/o SRP Ingenieur AG, Brig/CH

Lötschberg-Basistunnel

Herausforderungen beim Ausbau eines der längsten Eisenbahntunnel der Welt

Der Lötschberg-Basistunnel hat seine Kapazitätsgrenze erreicht. Der bahntechnische Ausbau des 14 km langen Rohbautunnels West erfordert grosse logistische und bautechnische Herausforderungen, da der Ausbau unter laufendem Betrieb im Basistunnel Ost erfolgen muss. Für den Teilausbau muss stark in die bestehende Infrastruktur eingegriffen werden, was bei einem direkten Vollausbau zu vermeiden wäre.

The Lötschberg Base Tunnel

The Challenges When Further Completing One of the Longest Railway Tunnels in the World

The Lötschberg Base Tunnel has reached the limit of its capacity. Further completion of the 14 km long unfinished western tunnel with railway infrastructure is associated with major logistical and construction challenges, as this has to be done while normal rail operations continue in the eastern base tunnel. To further complete just part of the tunnel system, major interventions are required in the existing infrastructure, which could be avoided if the entire system were to be directly finished.

1 Einleitung

Der insgesamt 34,6 km lange Lötschberg-Basistunnel (LBT) und der im Norden vorgelagerte 2,6 km lange Tunnel Engstlige sind seit 2007 in Betrieb und erfreuen sich einer hohen Verfügbarkeit. Aufgrund begrenzter finanzieller Mittel während der Bauzeit konnte die Lötschberg-Basisstrecke (LBS) damals nicht über die gesamte Länge mit voneinander getrennten Einspurröhren fertiggestellt werden.

Derzeit sind jeweils nur die Oströhren durchgehend unter Betrieb. Die Weströhre des LBT ist im Süden über knapp 14 km zwischen dem Südportal Raron und dem Fusspunkt Ferden bahntechnisch ausgebaut. Ab der Spaltungsweiche Ferden ist der Basistunnel bis zur Spaltungsweiche Adelrain über etwa 20 km nur einspurig befahrbar. Zwischen den Fusspunkten Ferden und Mitholz ist die Weströhre auf rund 14 km ausgebrochen und mit Bauhilfsmassnahmen gesichert. Dieser sogenannte Rohbautunnel dient derzeit für Rettung, Evakuierung und Erhaltung. Zwischen Fusspunkt Mitholz und Spaltungsweiche Adelrain ist die Weströhre auf etwa 6 km noch nicht ausgebrochen, da die Rettung und Evakuierung hier über den ehemaligen Sondierstollen Kandertal erfolgen kann.

1 Introduction

The Lötschberg Base Tunnel (LBT) with a total length of 34.6 km and the preceding 2.6 km Engstlige tunnel to the north have been in operation since 2007 and enjoy a high availability. As finance was limited at the time of construction, the Lötschberg Base Section (LBS) could not be finished over its entire length with separate single track tunnels.

Currently only the east tunnel is in continuous operation. In the LBT's west tunnel, railway infrastructure has been installed over just about 14 km in the south, between the south entrance at Raron and the Ferden basis. From the point at Ferden to the point at Adelrain the base tunnel only supports single track rail traffic for about 20 km. Between the Ferden and Mitholz basis the west tunnel has been cut for about 14 km and has been secured with provisional construction measures. This unfinished tunnel is currently used for rescue, evacuation and maintenance. Between the Mitholz basis and the point at Adelrain the west tunnel has not yet been cut for about 6 km, as rescue and evacuation is possible via the old Kandertal exploratory tunnel.

Tunnel de base du Lötschberg

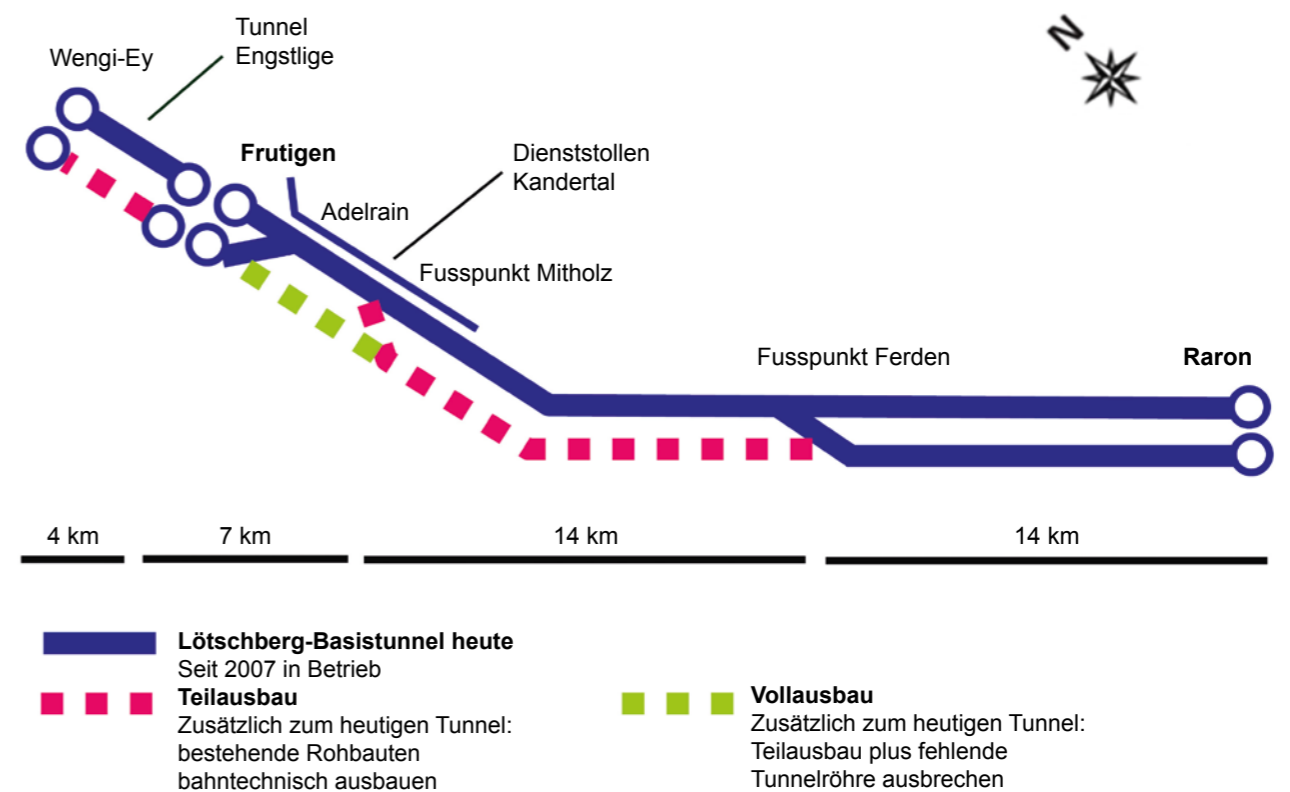
Défis posés par le revêtement de l'un des plus longs tunnels ferroviaires du monde

Pour des raisons de logistique et de sécurité, l'aménagement intérieur du gros œuvre du tube ouest du tunnel se fait pour l'essentiel dans une seule direction, ce qui a pour conséquence une durée de construction globalement plus longue. Afin de préserver durablement la disponibilité du tunnel, il est nécessaire de créer des galeries de ventilation et des réservoirs d'eau supplémentaires. L'intégration du nouvel aiguillage au point d'accès de Mitholz implique l'excavation d'une diagonale supplémentaire entre le tunnel ferroviaire déjà en service et le tunnel en gros œuvre. La caverne existante doit être prolongée et élargie, ce qui nécessite la fermeture totale du tunnel de base.

Galleria di base del Lötschberg

Le sfide legate all'ampliamento di una delle gallerie ferroviarie più lunghe al mondo

L'ampliamento interno della galleria ovest, costruita al grezzo, avviene principalmente solo da una direzione a causa delle condizioni quadro logistiche e rilevanti per la sicurezza, con un conseguente allungamento dei tempi di costruzione complessivi. Per mantenere durevolmente elevata la disponibilità della galleria, è necessario creare delle ulteriori gallerie di ventilazione e degli ulteriori serbatoi d'acqua. Per l'installazione del nuovo scambio di diramazione presso il punto di base di Mitholz è necessario scavare una diagonale supplementare tra la galleria ferroviaria in funzione e la galleria a costruzione grezza. La costruzione della caverna esistente deve essere allungata e ampliata; questa operazione è possibile solo con una chiusura completa della galleria di base.



1 Schematische Darstellung des Bestandes des LBT und des Teilausbaus Mitholz-Ferden
 Diagram of the current state of the LBT and of the partial completion from Mitholz to Ferden basis

Der Tunnel Engstlige ist als Tagbautunnel mit zwei richtungsgetretenen Röhren gebaut worden, allerdings ist nur die Oströhre bahntechnisch ausgerüstet. In der Lötschberg-Basislinie bestehen somit ein etwa 3,5 km langer Einspurabschnitt vor dem Nordportal und ein etwa 20 km langer im Basistunnel selbst. Diese Einspurabschnitte beeinträchtigen die Fahrplangestaltung der Strecke wesentlich, die mit einer

The Engstlige tunnel was built using the cut-and-cover technique, with two separate tunnels, one for each direction. However, only the east tunnel has been equipped with railway infrastructure. In the Lötschberg base line there is thus a roughly 3.5 km section of single track before the north entrance and about a 20 km section in the tunnel itself. These single track sections significantly impair the scheduling of

durchschnittlichen Auslastung von über 80% bereits heute ihre Kapazitätsgrenze erreicht hat.

Mit dem Beschluss zur Finanzierung der Bahninfrastruktur ist im ersten Ausbauschnitt STEP AS 2025 auch die Projektierung der bahntechnischen Ausrüstung zwischen den Fusspunkten Mitholz und Ferden angenommen worden. Die BLS Netz AG plant zusammen mit einem Gesamtplaner seit Frühjahr 2016 den Ausbau des Tunnels. Das Vorprojekt ist abgeschlossen, und das Auflageprojekt soll bis Frühjahr 2019 erarbeitet werden. Die Finanzierung des LBT-Ausbaus ist derzeit nicht gesichert; im Rahmen der Bundesratsvorlage zum Ausbauschnitt STEP AS 2030/35 werden die Eidgenössischen Räte 2019/2020 entscheiden, ob und in welchem Umfang der LBT-Ausbau finanziert und realisiert werden kann.

Im Folgenden wird dargestellt, welche bautechnischen und logistischen Herausforderungen gemeistert werden müssen, um den LBT unter Aufrechterhaltung des Betriebs und der bewilligten Rettungskonzepte ausbauen zu können.

2 Teilausbau Mitholz–Ferden

2.1 Übersicht

Der Teilausbau umfasst den Einbau der Sohle und der Tunnelinnenschale im Rohbautunnel West, den Einbau der Festen Fahrbahn sowie die gesamte bahntechnische Ausrüstung, bei der besonders auf eine Abstimmung zwischen bestehenden und neu einzubauenden Anlagenteilen zu achten ist. Während beim Rohbau der Ausbaustandard in weiten Teilen vom Bestand übernommen werden kann, muss bei der bahntechnischen Ausrüstung für jede Anlagenkomponente geprüft werden, ob und wann ein Wechsel auf eine andere Technologie notwendig ist. Ziel ist, den Bestand so wenig wie nötig anzupassen und eine optimale Abstimmung zwischen Bestand und Neubau zu erreichen.



2 Bestehende Spurwechselkaverne Mitholz Südwest im Rohbautunnel West
Existing track change cavern at Mitholz south-west in the unfinished west tunnel

trains, and with a current average utilisation of over 80% they have already hit their capacity limits.

With the decision to finance the railway infrastructure, in the first phase (known as STEP AS 2025) the plans to install railway infrastructure between the Mitholz and Ferden basis have also been accepted. Since early in 2016, BLS Netz AG has been planning the further completion of the tunnel together with a master planner. The preparatory project plan has been completed and the detailed project plan should be ready by early in 2019. The finance to further complete the infrastructure in the LBT is not currently guaranteed. As part of the proposal to the federal council for the STEP AS 2030/35 completion project, the Swiss federal councillors will decide in 2019/2020 whether and to what extent the further completion of the LBT rail infrastructure can be financed and carried out.

In the following we show the construction and logistical challenges which will have to be mastered if the LBT infrastructure is to be completed while at the same time maintaining day to day operations and the approved emergency rescue plans.

2 Completing the Mitholz–Ferden Section

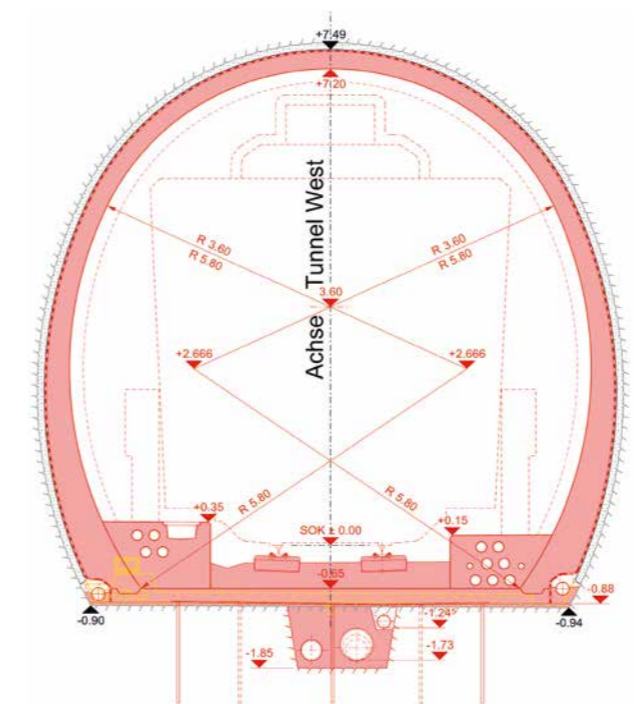
2.1 Overview

Completing this section means installing the tunnel invert and the inner lining into the unfinished west tunnel, installing the fixed ballastless track as well as the entire railway infrastructure. Particular care is required here to ensure that the existing infrastructure and the new parts to be installed are compatible. While existing standards can largely be followed to complete the unfinished tunnel, each part of the railway equipment must be checked to see if and when a change to a different technology will

Diese komplexen Abhängigkeiten bei der bahntechnischen Ausrüstung werden im vorliegenden Beitrag nicht näher betrachtet. Hier werden die wesentlichen Rohbauarbeiten aus bautechnischer Sicht vorgestellt.

2.2 Tunnelnormalprofil

Die gesamte LBS ist für das sogenannte Lichtraumprofil «Lötschberg-Shuttle» ausgelegt. Dieses berücksichtigt einen zukünftigen optionalen Betrieb eines Autoverlads mit geschlossenen Verladewagen analog dem Kanaltunnel zwischen Frankreich und den Britischen Inseln. Der Autoverlad durch den LBT ist erst bei einem zukünftigen Vollausbau und wesentlichen Arbeiten zur Erstellung der Terminals möglich und aktuell nicht konkret vorgesehen. Bedingt durch das grössere Lichtraumprofil weist der LBT einen Tunnelquerschnitt von $A = 47 \text{ m}^2$ auf, was eine optimierte Aerodynamik und einen geringeren Energieverbrauch der Züge mit sich bringt.



Quelle/credit: BLS Netz AG

3 Normalprofil LBT mit flacher Sohle und Lichtraumprofil LBT-Shuttle

LBT standard profile with a low tunnel invert and the LBT Shuttle minimum clearance outline

Beim Ausbau wird das Tunnelnormalprofil weitgehend beibehalten. Ein hochauflösender Tunnelscan des Rohbautunnels hat die Kubaturen an Über- und Unterprofil des bestehenden Ausbruchs aufgezeigt. In einer Optimierungsaufgabe wird derzeit geprüft, ob eine Vergrößerung des Tunnelnormalprofils wirtschaftlich ist, da gerade im südlichen Teil des bestehenden Rohbautunnels das vorhandene Überprofil bis zu knapp 10 m^3 pro Laufmeter betragen kann.

In etwa 3 km des Rohbautunnels wird ein Sohlgewölbe eingebaut, da diese Abschnitte entweder in stark druckhaftem oder in quellfähigem Gebirge liegen. Langjährige Messungen der

become necessary. The aim is to only modify the existing equipment as little as is absolutely necessary and only if required to be compatible with the newly installed infrastructure.

These complex dependencies in the railway equipment are not considered in any more detail in this paper. The focus here is more on the structural work.

2.2 The Tunnel's Standard Profile

The entire Lötschberg Base Section (LBS) was designed for the so-called "Lötschberg Shuttle" clearance gauge. This takes account of the optional future operation of a car shuttle train with closed carriages similar to the Channel Tunnel between France and the British Isles. A car shuttle train through the LBT would only be possible in future when the tunnel has been fully completed and after significant work to build the terminals. There are currently no definite plans to build that. Due to the larger clearance gauge, the LBT tunnel has a cross section of $A = 47 \text{ m}^2$, which also is ideal for the aerodynamics and for low energy consumption by the trains.

When further completing the unfinished tunnel the standard tunnel profile will largely be retained. A high resolution scan of the unfinished tunnel has revealed the cubage, where its profile is too large or too small. A check is currently in progress to see if enlarging the standard tunnel profile would make economic sense as, especially in the south part of the already excavated, unfinished tunnel in which the current standard profile is partially exceeded by up to 10 m^3 per meter due to the overbreak.

In about 3 km of the unfinished tunnel a vaulted invert is to be constructed as this section goes either through rock which can exert pressure or can swell. Measurements over several years of the deformation of the mountain were able to show that in the sections considered, continuous deformation will continue to occur, thus necessitating the construction of a vaulted invert.

Section for section, the tunnel will only be sealed with drainage fleece or with sealing sheeting and a drainage fleece, depending on how much water is encountered. Experience from the unfinished tunnel has shown where water arises so that the sealing solution can be matched to this.

2.3 The Mitholz High-Speed Point

One major construction challenge will be to build the new high-speed point at the Mitholz basis. When the LBT was originally built, plans were made for points for a subsequent dual track change. The caverns for the points and the diagonals between the west and the east tunnels were prepared for a speed of $v = 120 \text{ km/h}$. The new rail point will be used above all by trains travelling from south to north. Passenger trains in this direction currently travel as

Gebirgsdeformationen konnten zeigen, dass in den betrachteten Abschnitten weiterhin kontinuierliche Deformationen auftreten, sodass der Einbau eines Sohlgewölbes angezeigt ist.

Der Tunnel wird je nach Wasseranfall abschnittsweise nur mit Drainagevlies oder mit Abdichtungsfolie und Drainagevlies abgedichtet. Aus dem Rohbautunnel ist der bereichsweise Wasseranfall gut bekannt, sodass das Abdichtungskonzept hierauf abgestimmt werden kann.

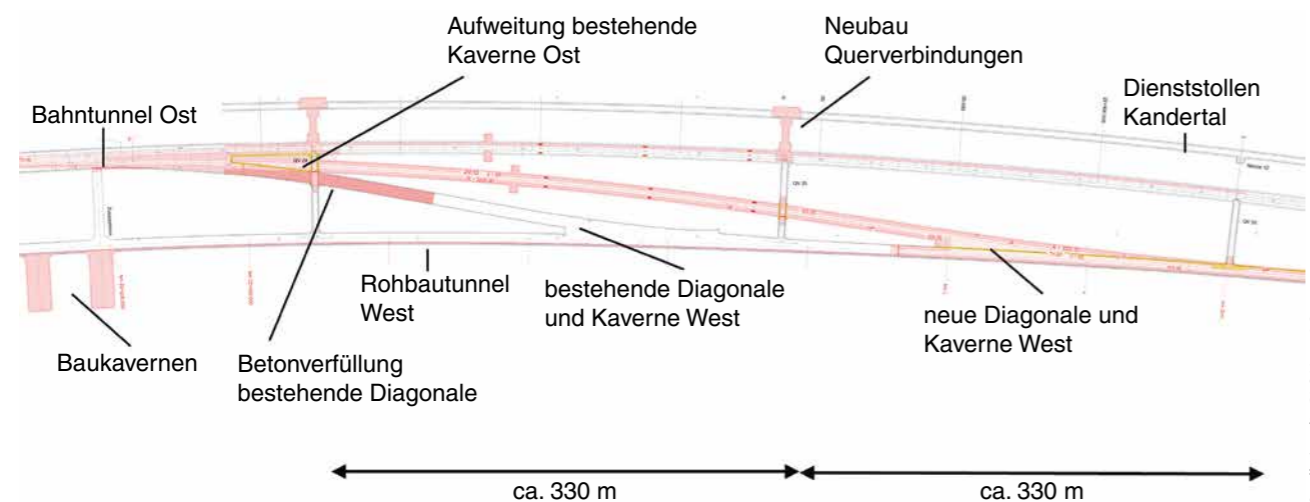
2.3 Spaltungsweiche Mitholz

Eine grosse bautechnische Herausforderung wird die Erstellung der neuen Spaltungsweiche am Fusspunkt Mitholz sein. Bereits beim Bau des LBT ist am Fusspunkt Mitholz ein späterer doppelter Spurwechsel vorgesehen worden. Die Spurwechselkavernen und die Diagonalen zwischen der West- und der Oströhre sind für eine Trassierungsgeschwindigkeit von $v = 120$ km/h vorbereitet worden. Die neue Spaltungsweiche wird von allen in Süd-Nord-Richtung verkehrenden Zügen befahren werden; Personenzüge weisen derzeit bei dieser Fahrtrichtung eine Regelgeschwindigkeit von $v = 200$ km/h auf. Bei einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit auf die früher vorgesehene Trassierungsgeschwindigkeit würde der Fahrzeitverlust so gross sein, dass der schweizweite Taktfahrplan nicht mehr betrieben werden könnte. Umfangreiche Studien haben aufgezeigt, dass die neue Spaltungsweiche Mitholz nur für eine maximale Geschwindigkeit auf Ablenkung von $v = 180$ km/h trassiert werden kann. Die hierfür notwendige gebogene Schnellfahrweiche ist europaweit einmalig und muss speziell konstruiert werden.

standard at a speed of $v = 200$ km/h. If the speed were to be reduced to the originally planned speed, the time lost would be such that the train intervals which apply across Switzerland could no longer be used. Extensive studies have shown that the high-speed point at Mitholz can only be used at a maximum speed of $v = 180$ km/h when changing tracks. The curved high-speed point needed for this will be the first in Europe and will have to be especially made.

On the construction side, the track change cavern for the east tunnel will have to be widened over a length of 65 m. In total, the cavern will then span over 20 m, connecting in the west to the diagonal which has already been cut for the prepared point, but which can no longer be used. To avoid impairing the load-bearing ability of the vault any further, the existing diagonal for the originally planned rail point have to first be filled with concrete over a length of about 150 m. The rock where the cavern is to be widened is Kieselkalk (Helvetic siliceous limestone) which has good rock mechanical characteristics.

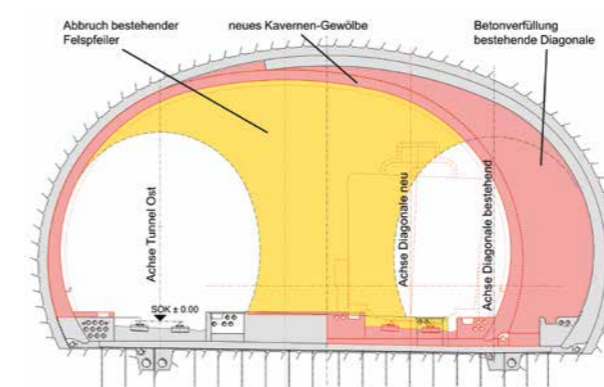
After that, the diagonal for the track change must be completely newly cut over a length of about 450 m to the LBT standard profile and the south-west track change cavern has to be built as well. These are in the geological formations of the Sichel-Kalk (a sort of limestone) and Palfris-Schiefer (a sort of shale), which have a low strength and ability to swell. The diagonals and the south-west part of the cavern must be cut while normal train operations continue in the east tunnel.



4 Übersicht über die neu zu erstellenden Tunnelbauobjekte am Fusspunkt Mitholz
Overview of the new parts of the tunnel to be built at the Mitholz basis

Bautechnisch muss die bestehende Spurwechselkaverne der Oströhre auf einer Länge von etwa 65 m aufgeweitet werden. Insgesamt ergibt sich eine Spannweite der Kaverne von über 20 m, die im Westen unmittelbar an die bereits ausgebrochene, aber nicht mehr nutzbare Diagonale des vorbereiteten Spurwechsels anschliesst. Um die Tragfähigkeit des Gewölbes nicht weiter zu beeinträchtigen, muss die beste-

All of the measures at the Mitholz basis are only needed for the partial completion of the LBT and would no longer be needed if the base tunnel were subsequently to be completely finished, as from today's point of view, no additional dual track change would then be necessary. The widening of the track change cavern in the south-east seriously impinges in the existing structure so it can only be done when



5 Aufweitung Spurwechselkaverne Mitholz Südost zur Realisierung der neuen Spaltungsweiche
Widening of the track change cavern at Mitholz south-east to build the new high-speed point

hende Spurwechseldiagonale über eine Länge von etwa 150 m vorgängig mit Beton verfüllt werden. Die Kavernenaufweitung erfolgt im Kieselkalk, der günstige felsmechanische Kennwerte aufweist.

Anschliessend an die Kaverne Südost muss die Diagonale der Spaltungsweiche auf einer Länge von etwa 450 m im LBT-Normalprofil ebenso wie die Spurwechselkaverne Südwest komplett neu ausgebrochen werden. Die Objekte liegen in den geologischen Formationen des Sichel-Kalks und Palfris-Schiefers, die über geringere Festigkeit und Quellpotenzial verfügen. Der Ausbruch der Diagonale und der Kaverne Südwest erfolgt unter Aufrechterhaltung des regulären Bahnbetriebs in der Oströhre.

Alle Massnahmen am Fusspunkt Mitholz sind nur für einen Teilausbau des LBT notwendig und würden bei einem allfälligen späteren Vollausbau des Basistunnels entfallen, da aus heuti-

the LBT is completely closed. The high investment costs for the Mitholz high-speed point and the required complete shutdown of the LBT are the fundamental drawbacks of step by step completion instead of doing everything at once.

2.4 Reservoirs for Continuous Water Flows and to Supply Cooling Water

Currently about 60 l/s of seepage water arise in the Lötschberg Base Tunnel, some of which is used to operate the tunnel. The LBT has a continuous flow of water in the tunnel drainage system, of about 5 l/s per tunnel and direction (total consumption 4×5 l/s). This serves to bind gases which may occur (primarily methane) and in case of an accident, to quickly transport explosive liquids out of the tunnel.

The water is also used to cool the railway systems in the total of eight subterranean technical centres for the LBT. Heat exchangers move the heat from the systems to the water and the slightly heated water is then returned to the drainage system.

To make sure that the constant flow and the supply of cooling water are always guaranteed, the seepage water must be collected along the tunnel and be pumped via pressurised lines to the tunnel's peak point. Via a balancing reservoir, it is fed to the individual lines of the constant flow and is used to cool the tunnel centres. The arising water found in the LBT has a strong tendency to sinter and deposit dissolved minerals. The tunnel currently only has one pressurised line and a small balancing reservoir, which have so far not been a problem. Through the unfinished tunnel, the equipment for the water supply was accessible at any time, so that a quick reaction was possible in case of a fault.



6 Bestehende Spurwechselkaverne Ferden Nordost mit Schnellfahrweiche im Bahntunnel Ost
Existing track change cavern at Ferden north-east with high-speed point in the east railway tunnel

ger Sicht beim Vollausbau kein zusätzlicher doppelter Spurwechsel notwendig ist. Die Aufweitung der Spurwechselkaverne Südost greift massiv in den Bestand ein und ist nur während einer Totsperrung des LBT realisierbar. Die hohen Investitionskosten für die Spaltungsweiche Mitholz und die notwendige Vollsperrung des LBT sind die wesentlichen Nachteile des stufenweisen Ausbaus gegenüber einem direkten Vollausbau.

2.4 Reservoirs für Stetslauf und Kühlwasserversorgung

Im Lötschberg-Basistunnel fallen aktuell etwa 60 l/s Bergwasser an, welches in Teilen für den Betrieb des Tunnels genutzt wird: Der LBT verfügt einerseits über einen kontinuierlichen Stetslauf in der Tunnelentwässerung von jeweils 5 l/s je Röhre und Richtung (Verbrauch total 4 x 5 l/s). Dieser Abfluss dient dazu, austretende Gase (vor allem Methan) zu binden und im Havariefall explosive Flüssigkeiten rasch aus dem Tunnel zu befördern.

Zudem wird das anfallende Bergwasser zur Kühlung der bahntechnischen Anlagen in den total acht unterirdischen Tunnelzentralen des LBT verwendet: Über Wärmetauscher wird die Abwärme der Anlagen an das Bergwasser abgegeben; das leicht erwärmte Wasser wird wieder in die Bergwasserdrainage zurückgeführt.

Damit der Stetslauf und die Kühlwasserversorgung jederzeit gewährleistet sind, muss das anfallende Bergwasser längs der Tunnel gefasst und über Druckleitungen an den Kumulationspunkt gepumpt werden. Über ein Ausgleichsbecken wird es dort den einzelnen Strängen des Stetslaufs zugegeben und für die Kühlung der Tunnelzentralen Mitte verwendet. Das im LBT anfallende Bergwasser neigt sehr stark zur Versinterung. Derzeit verfügt der Tunnel über nur eine Druckleitung und ein kleines Ausgleichsbecken, was bis anhin unproblematisch war: Denn über den Rohbautunnel sind die Anlagenteile der Wasserversorgung jederzeit zugänglich, sodass im Falle eines Defekts schnell reagiert werden kann.

Bei einem Ausbau des LBT sind diese Anlagenteile nicht mehr jederzeit zugänglich. Somit muss das Ausgleichsbecken am Kumulationspunkt vergrößert werden, um die Verfügbarkeit des Tunnels weiterhin hoch zu halten. Die Dimensionierung der Beckengröße lagen diverse Risikoüberlegungen zum Ausfall einzelner Elemente und zur Verfügbarkeit des Tunnelsystems zugrunde. Mit dem Ausbau des LBT werden neu zwei redundante Druckwasserleitungen aus dem Norden und eine aus dem Süden zum Kumulationspunkt geführt. Um den Betrieb während 24 Stunden nach einem allfälligen Ausfall eines Pumpwerks sicherzustellen, muss die Grösse des Reservoirs von aktuell 20 m³ auf 2x 215 m³ erhöht werden.

Die Becken werden in einer neu zu erstellenden Kaverne zwischen der Ost- und der Weströhre angeordnet werden. Die Lage zwischen den beiden Röhren bietet für die Erhaltung und mögliche kurzfristige Reparaturmassnahmen wesentliche Vorteile: Nicht geplante Unterhaltmassnahmen

When the LBT is completed, these items will no longer be accessible at just any time. This means that the balancing reservoir at the tunnel's peak must be enlarged to ensure that the tunnel's availability remains high. The size of the reservoir was based on a number of risk analyses for the failure of individual parts and on the availability of the tunnel system. With the further completion of the LBT, two new redundant pressurised water lines will be installed from the north and one from the south, towards the tunnel's peak. To ensure that operations can be maintained for 24 hours after a possible failure of a pump, the size of the reservoir must be increased from what is currently 20 m³ to 2 x 215 m³.

The reservoirs will be put in a cavern which must be newly built between the east and the west tunnels. This position, between the two tunnels offers significant advantages for maintenance and possible short-term repair measures. Unplanned repair measures could then be done by shutting down one quarter of the tunnel (closing the north-east or the north-west tunnel) while maintaining railway operations. Putting it on the west side would restrict access to the north-west tunnel which is considered to be too strong a restriction.

The new cavern and the connecting tunnel to the nearest cross passage will be cut from the existing west tunnel in very compact Lauterbrunnen-Kristallin rock. In the coming phase of the project, the geometry of the reservoir and of the connecting tunnel will be further optimised, to minimise the effect of the excavation on the existing east tunnel.

2.5 Changing Tracks and the Ventilation Shaft at Ferden

At the moment, near the Ferden basis, next to the emergency station, there is also a high-speed point to change from single to double track. A second diagonal to change tracks was cut during the construction phase, however no lining was fitted. When the caverns were constructed, they were permanently stabilised using shotcrete, doing without the installation of an inner lining.

With the further completion of the LBT, a set of dual track change points will be needed at Ferden, making it possible to shut down one quarter of the tunnel. For this, an inner lining must be added to the already cut south diagonal and a total of four new sets of rail points have to be installed. Monitoring of the existing caverns has shown that the rock pillars in the portal walls are usually being overloaded and have been plasticised. During the further completion, reinforcement measures will be taken here.

To permit quarters of the tunnel to be shut down, it is necessary to excavate a new ventilation shaft. This starts in the vicinity of the Ferden basis, it crosses the west tunnel and at the northern diagonal it goes centrally to the level of the LBT.

können dann bei einer Viertelsperrung des Tunnels (Nordost- oder Nordweströhre gesperrt) bei Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs durchgeführt werden. Eine Anordnung auf der Westseite hätte die Zugangsmöglichkeiten auf die Nordweströhre beschränkt, was als eine zu starke Restriktion angesehen worden ist.

Die neue Kaverne und der Verbindungsstollen zum nächstgelegenen Querschlag werden von der bestehenden Weströhre im sehr kompakten Lauterbrunnen-Kristallin vorgegraben. In den kommenden Projektphasen werden die Geometrie der Becken und die des Verbindungsstollens noch optimiert werden, um den Einfluss des Ausbruchs auf die bestehende Oströhre zu minimieren.

2.5 Spurwechsel und Lüftungsstollen Ferden

Im Bereich des Fusspunktes Ferden befindet sich aktuell neben der Nothaltestelle auch die Spaltungsweiche von Ein- auf Doppelspur. Bereits während der Bauphase ist eine zweite Spurwechseldiagonale ausgebrochen, allerdings nicht mit einer Innenschale ausgebaut worden. Bei den Kavernenbauwerken ist eine dauerhafte Sicherung mit Spritzbeton vorgesehen worden, auf den Einbau einer Innenschale wurde verzichtet.

Mit dem Ausbau des LBT wird in Ferden ein doppelter Spurwechsel notwendig, damit Viertelsperrungen des Tunnelsystems möglich werden. Hierfür muss die ausgebrochene Diagonale Süd mit einer Innenschale ausgebaut und es müssen total vier neue Weichen eingebaut werden. Eine Überwachung der bestehenden Kavernen hat gezeigt, dass die Felspfeiler der Brillenwände in der Regel überbeansprucht und plastifiziert sind. Im Zuge des Ausbaus werden hier Verstärkungsmassnahmen durchgeführt.

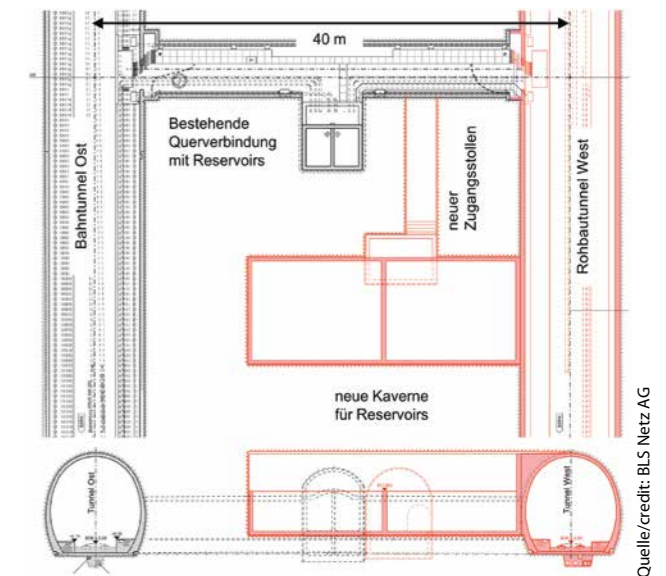
Um Viertelsperrungen des Tunnels zu ermöglichen, ist das Auffahren eines neuen Lüftungsstollens notwendig. Dieser beginnt im Bereich des Fusspunktes Ferden, überquert die Weströhre und führt bei der Diagonalen Nord mittig wieder auf das Niveau des LBT.

Für die Arbeiten am Fusspunkt Ferden wird auch die für den Einbau der Spaltungsweiche Mitholz notwendige Totsperrung des LBT genutzt. Im Falle eines unmittelbaren Vollausbaus können die Arbeiten am Fusspunkt Ferden bei einer jeweils einseitigen Sperrung des Ost- oder Westtunnels ausgeführt werden.

3 Baulogistik

Sämtliche Bautätigkeiten, insbesondere die vorgestellten ergänzenden Tunnelvortriebe, aber auch der Ausbruch des Sohlgewölbes und notwendiger Muffenkammern im Rohbautunnel dürfen den bestehenden Bahntunnel nicht beeinträchtigen und die vorhandene Tragstruktur nicht schädigen.

Neben diesen bautechnischen Aspekten stellen beim Ausbau des LBT vor allem aber die Baulogistik und die Materialbewirtschaftung zentrale Fragestellungen dar.



7 Situation und Schnitt der neuen Wasserreservoirs am Kumulationspunkt
 Situation and section through the new water reservoir at the tunnel's peak
 Quelle/credit: BLS Netz AG

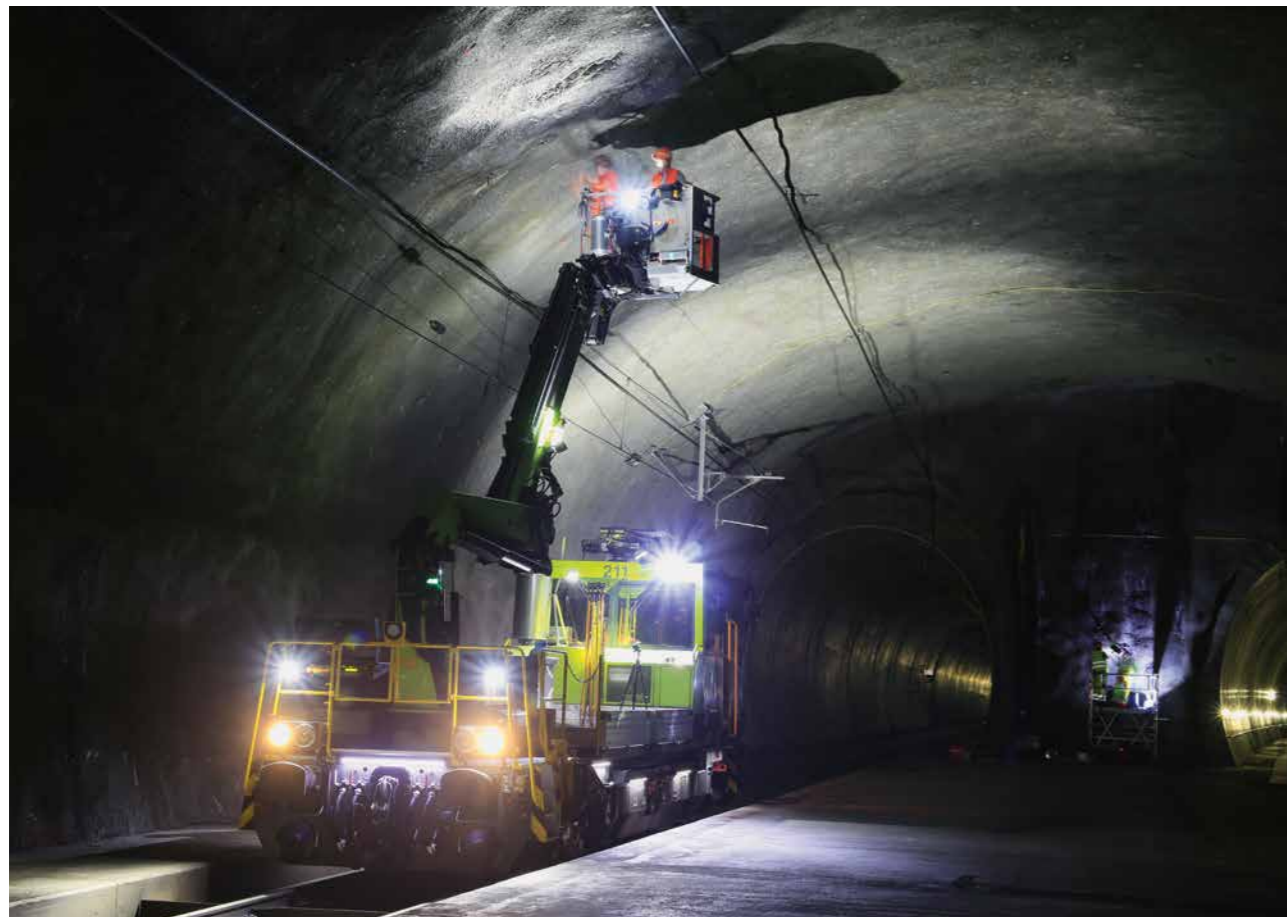
The work at the Ferden basis will also use the total shut down of the LBT required for the installation of the high-speed point at Mitholz. If the entire tunnel system were to be directly and fully completed, then the work at the Ferden basis could be done by just shutting down one side, i.e. the east or the west tunnel.

3 Site Logistics for the Construction

All of the construction work, and especially the additional tunnelling, but also the excavation of the vaulted invert and the necessary cable coupling chambers in the unfinished tunnel must not impair the existing railway tunnel and must not damage the existing load-bearing structure.

Apart from these construction aspects, when further completing the LBT, above all the logistics for the construction work and for the management of materials is a central question.

All of the work will be done while railway operations continue. As a rule there will only be an eight hour maintenance window available per week for work in or from the train tunnel. When planning the construction processes, the existing rescue concept must also be considered. If the train tunnel has to be evacuated, the existing unfinished tunnel is the escape tunnel. This is why, during the further completion work, only individual cross passages between the west and east tunnels may be closed for construction work. The entire length of the west tunnel must be accessible for rescue vehicles at all times. During an evacuation, all of the building sites within the unfinished tunnel must be cleared within a few minutes so that the rescue forces can have unrestricted access to the tunnel system. The dependencies between normal railway operation, regular construction work and



8 Zustandsuntersuchung der Spritzbetonverkleidung in der Spurwechselkaverne Ferden Nordost im Bahntunnel Ost
Investigating the state of the shotcrete lining in the track change cavern at Ferden north-east in the east railway tunnel

Der gesamte Ausbau erfolgt unter Bahnbetrieb; im Regelfall steht nur ein achtstündiges Erhaltungsfenster je Woche für Arbeiten im oder aus dem Bahntunnel zur Verfügung. Bei der Planung der Bauabläufe muss zudem das bestehende Rettungskonzept berücksichtigt werden: Im Falle einer Evakuierung aus dem Bahntunnel ist der bestehende Rohbautunnel die Fluchtröhre. Daher dürfen während des Ausbaus nur vereinzelte Querverbindungen zwischen Ost- und Weströhre für Bautätigkeiten geschlossen werden. Die gesamte Weströhre muss jederzeit für Rettungsfahrzeuge durchgehend befahrbar sein; bei einer Evakuierung sind alle Baustellen im Rohbautunnel innert weniger Minuten zu räumen, sodass die Rettungskräfte uneingeschränkten Zutritt zum Tunnel-system haben. Die Abhängigkeiten zwischen normalem Bahnbetrieb, regulärem Baubetrieb und Erhaltungsarbeiten sowie bei Betriebsstörungen und Evakuierungen müssen eng abgestimmt und koordiniert werden.

Der LBT-Ausbau soll weitgehend über den früheren Installationsplatz Mitholz abgewickelt werden, der sich im Bereich eines Steinbruches mit Bahnanschluss befindet und somit ideale Voraussetzungen bietet. Beim Bau des LBT sind die Vortriebsarbeiten zusätzlich aus dem Süden vom Installationsplatz Goppenstein und vom Zugangsstollen Ferden aus ausgeführt worden. Da dieser ehemalige Installationsplatz

maintenance work as well as operational faults and evacuations must be closely agreed and coordinated.

The further completion of the LBT will largely make use of the installation site at Mitholz. This is close to a quarry with a railway connection thus providing ideal conditions. During the construction of the LBT, the tunnelling work was also done from the south from the installation site at Goppenstein via the access tunnel at Ferden. As the old installation site is badly connected for traffic and is exposed to natural hazards, the access tunnel at Ferden will be used as little as possible. The current logistics concept is shown in a diagram.

These conditions impede an efficient construction process. The supply and removal of material has to go via Mitholz, which is associated with long distances to travel in the tunnel. Once the vaulted invert has been excavated and the inner lining has been installed, it will no longer be possible for trucks to pass by one another, which is why a turning option is planned for every kilometre.

The logistics will also be made more difficult by the restricted ventilation capacity and the high temperatures inside the mountain of up to 35 °C, thus requiring extensive cooling and ventilation measures for the construction work.

verkehrlich schlecht angebunden ist und Naturgefahren ausgesetzt ist, soll der Zugang via Zugangsstollen Ferden nur in geringem Masse verwendet werden. Das derzeitige Logistik-Konzept ist schematisch dargestellt.

Diese Randbedingungen beeinträchtigen einen effizienten Bauablauf: Die Ver- und Entsorgung muss von und nach Mitholz erfolgen, was lange Fahrstrecken im Tunnel mit sich bringt. Nach Einbau der Innenschale sowie beim Ausbruch der Sohlgewölbe ist ein Kreuzen von Lastwagen nicht möglich, weshalb auf jedem Kilometer eine Wendemöglichkeit vorgesehen wird.

Die Baulogistik wird des Weiteren noch durch die beschränkten Lüftungs-kapazitäten und die hohen Gebirgstemperaturen von bis zu 35 °C erschwert, was umfangreiche Massnahmen zur Baulüftung und Baukühlung erfordert.

Der bahntechnische Ausbau soll weitgehend bahngelinkt ab einem zusätzlichen Installationsplatz in der Nähe des Bahnhofs Frutigen erfolgen. Dieser Zugang ist erst nach Einbau der Spaltungsweiche Mitholz möglich; die Einfahrt der Bauzüge in den Tunnel muss in den regulären Fahrplan im LBT integriert werden.

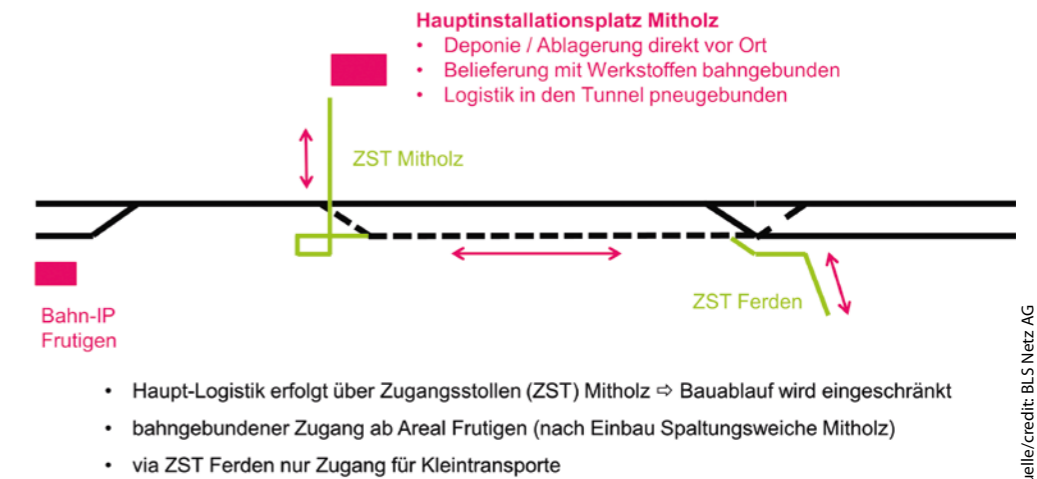
Für die Rohbauarbeiten und die bahntechnische Ausrüstung erweist sich somit der Fusspunkt Mitholz als kritisch, da hierüber alle Arbeiten abgewickelt werden müssen und eine Parallelisierung von Rohbau- und Ausrüstungstätigkeiten erschwert wird. Derzeit wird geprüft, inwieweit eine Anpassung der üblichen Einbauvorgänge (z. B. Montage des Fahrleitungstragwerks ab Pneu) und eine intensivere Nutzung des Zugangsstollens Ferden logistische Vorteile bieten können.

Die im Vorprojekt ermittelte Gesamtbauphase für den Teilausbau beträgt zwischen sieben und neun Jahre. Der Ermittlung sind die einschränkenden Randbedingungen und die erschwerte Logistik zugrunde gelegt. Die vergleichsweise lange Gesamtbauphase verdeutlicht die Erschwernisse, die beim Bauen unter Bahnbetrieb zu berücksichtigen sind.

4 Schlussbemerkung

Der Lötschberg-Basistunnel ist seit 2007 sehr erfolgreich in Betrieb. Durch das steigende Personen- und Güterverkehrsaufkommen hat der Tunnel seine Kapazitätsgrenze erreicht. Ein Ausbau des LBT ermöglicht den IC-Halbstundentakt zwischen Bern und Visp und stellt langfristig ausreichende Kapazitäten für den Güterverkehr zur Verfügung.

The further completion of the railway infrastructure will largely make use of the railway, starting from an additional installation site close to the station at Frutigen. It will only be possible to use this when the high-speed point at Mitholz has been installed. The entrance of the construction trains into the tunnel must then be integrated into the regular train timetable in the LBT. For both the construction of the tunnels and their equipping with railway infrastructure, the Mitholz access turns out to be critical, as all of the work has to be done via this basis, making it more difficult to



- Haupt-Logistik erfolgt über Zugangsstollen (ZST) Mitholz ⇒ Bauablauf wird eingeschränkt
- bahngelinkter Zugang ab Areal Frutigen (nach Einbau Spaltungsweiche Mitholz)
- via ZST Ferden nur Zugang für Kleintransporte

9 Logistik-Konzept Ausbau LBT, Phase Vorprojekt
Logistics concept for the further completion of the LBT, project preparation phase

do the tunnelling and equipping work in parallel. It is currently being checked to what extent the usual installation procedures can be modified (e.g. installing the supports for the overhead power line from a road not a rail vehicle) and whether a more intensive use of the access tunnel at Ferden could offer logistical advantages.

The total construction time determined in the preparatory project for the partial completion was between seven and nine years. This was based on the restricted conditions and the more difficult logistics. The comparatively long total construction time makes the difficulties clear which have to be considered when building while railway operations continue.

4 Final Comment

The Lötschberg Base Tunnel has been operating very successfully since 2007. Due to the increasing amount of passenger and goods traffic, the tunnel has reached the limits of its capacity. Further completion of the LBT would enable intercity trains to run every 30 minutes between Bern and Visp and, in the long term, would make sufficient capacity available for goods traffic.

The further completion of the 14 km unfinished west tunnel is to be done while normal rail operations continue in



10 Rohbautunnel West mit Fluchtrampe aus einer Querverbindung
The unfinished west tunnel with an escape ramp from a cross passage

Der Ausbau des 14 km langen Rohbautunnels West soll unter laufendem Bahnbetrieb in der Oströhre stattfinden, was wesentliche Randbedingungen für die Bauabläufe und die Baustellenlogistik mit sich bringt. Einerseits muss im Ereignisfall trotz der Bautätigkeit eine sofortige Intervention möglich sein, andererseits müssen die Bauverfahren so abgestimmt sein, dass die Auswirkungen auf den bestehenden Bahntunnel minimal sind.

Als grosse bautechnische Herausforderung wird der Bau der neuen Spaltungsweiche am Fusspunkt Mitholz angesehen, wofür eine Vollsperrung des gesamten Basistunnels notwendig ist. Die hohen Investitionskosten für den Neubau der Spaltungsweiche und die Totalsperre sind die wesentlichen Nachteile des Teilausbaus gegenüber einem direkten Vollausbau. Bei einem ergänzenden Ausbruch des Tunnels West zwischen Mitholz und Adelrain könnten zwei durchgängige Einspurröhren realisiert werden und die aufwendigen Arbeiten am Fusspunkt Mitholz entfallen. Ein direkter Vollausbau kann ohne Vollsperrung des LBT realisiert werden.

Die Finanzierung des LBT-Ausbaus ist derzeit nicht gesichert, da das Projekt bisher in der Vernehmlassung zum Ausbauschnitt STEP AS 2030/35 nicht enthalten ist. Voraussichtlich 2019/2020 werden die Eidgenössischen Räte hierüber entscheiden – alle Projektbeteiligten, die Reisenden und die Güterverkehrsbranche sowie die Kantone Bern und Wallis hoffen auf eine Aufnahme des LBT-Ausbaus in diesen Ausbauschnitt.

the east tunnel, which is associated with significant limitations for the construction procedures and the logistics for the building site. On the one hand, if something happens then, despite the construction work, it must be possible to immediately intervene. On the other hand, the construction process must be adapted so that its effects on the existing, finished railway tunnel are minimised.

The construction of the new high-speed point at the Mitholz basis must be seen a major challenge, requiring the entire base tunnel to be shut down for normal rail traffic. The high investment costs to build the new point and the required complete shutdown are the fundamental drawbacks of step by step completion instead of doing everything at once. With the additional excavation of the west tunnel between Mitholz and Adelrain, two uninterrupted single track tunnels could be implemented, removing the need for the extensive work at the Mitholz basis. Directly and fully completing the tunnel could be done without having to completely shut down the LBT.

The finance to further complete the LBT is not currently assured, as the project has so far not been included in the consultation process for the STEP AS 2030/35 completion project. It is expected that in 2019/2020 the Swiss federal councillors will make a decision about this. Everyone involved in the project, the passengers and the transport sector as well as the cantons Bern and Wallis hope that the further completion of the LBT will be included in this step.

PROJEKTDATEN	
Region	Kantone Bern und Wallis
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung	BLS Netz AG, Bern
Planung und Bauleitung	IG Vollendung Ausbau Lötschberg-Basistunnel p. a. SRP Ingenieur AG, Brig
Ausführung	In Planung
Kenndaten	
Bauzeit	ca. 7–9 Jahre
Inbetriebnahme	ca. ab 2028
Baukosten Tunnel	ca. 920 Mio. Schweizer Franken (Stand 2015)
Gesamtlänge	gesamt 34,6 km, davon 14,0 km im Teilausbau
Ausbruchquerschnitt	64 m ² ohne Sohlgewölbe
Besondere Merkmale	Ausbau der bereits ausgebrochenen Weströhre unter Aufrechterhaltung des Betriebs der bestehenden Oströhre, Sprengvortriebe parallel zum Bahnbetrieb, anspruchsvolle Logistik durch eingeschränkte Zufahrten und Aufrechterhaltung des Rettungskonzepts

PROJECT DATA	
Region	Cantons of Bern and Wallis
Client, project management & senior construction management	BLS Netz AG, Bern
Planning and construction management	IG Vollendung Ausbau Lötschberg Basistunnel p. a. SRP Ingenieur AG, Brig
Construction work	To be defined
Fact file	
Construction period	Approx. 7–9 years
Start operation	From about 2028
Tunnel construction costs	approx. 920 million Swiss francs (as of 2015)
Total length	Total of 34.6 km, of which 14.0 km is further completion of the unfinished tunnel
Cross section of the tunnel	64 m ² without the vaulted invert
Special features	The work involves completing the already cut but unfinished west tunnel while railway operations are maintained in the east tunnel. Drilling and blasting will be used in parallel to railway operations, the logistics are demanding due to restricted access and the need to maintain the emergency rescue concept.

Erfahrungen beim Bau der Metro Doha Green Line mit dem Vertragsmodell «Design-Build plus Provisional Sums»

Im Rahmen der «Qatar National Vision 2030» wird Katars Hauptstadt Doha zunehmend zu einem modernen Zentrum für Wirtschaft, Handel und Sport ausgebaut. Ein wesentlicher Bestandteil hierbei ist die Schaffung einer leistungsfähigen Infrastruktur mit modernen Massentransportmitteln. Unter anderem gehört auch die Errichtung eines U-Bahn-Netzes dazu, das nicht zuletzt wegen der im Jahr 2022 in Katar stattfindenden Fussballweltmeisterschaft in kürzester Zeit in Betrieb sein muss.

Das Design-and-Build-Projekt Green Line Underground wurde im Sommer 2013 an ein Joint Venture (JV) aus PORR (Federführung), der Saudi Binladin Group und dem lokalen Bauunternehmen HBK vergeben und beinhaltet die «schlüsselfertige» Errichtung des unterirdischen Abschnittes der Green Line mit einer Tunnellänge von zweimal 17 km, sechs Stationen, Spurwechsel- und Weichenanlagen sowie Querschlägen und Notausstiegsschächten.

Die Vortriebe der ca. 34 km Haupttunnel konnten bei gleichzeitigem Betrieb von sechs Earth-Pressure-Balance-Schildmaschinen (EPB-Maschinen) in nur 18 Monaten abgeschlossen werden. Auch die 32 Querschläge und zwei zusätzlichen Strassenunterführungen sind mittlerweile fertiggestellt worden. Nach einem Rückblick auf die Tunnelbauarbeiten werden in diesem Beitrag insbesondere die Erfahrungen mit dem Vertragsmodell «Design-Build plus Provisional Sums» vorgestellt.

Experience Gained in the Construction of the Metro Doha Green Line with the “Design-Build Plus Provisional Sums” Contract Model

The Qatar National Vision 2030 programme will see the capital Doha increasingly develop into a modern centre for business, trade and sport. A key element of this process is the creation of high-performance infrastructure featuring cutting-edge means of mass transportation. A further aspect is the establishment of an underground railway network, which needs to enter operation as soon as possible – not least in light of Qatar’s role as host nation of the 2022 Football World Cup.

In summer 2013, the Green Line Underground design and build project was awarded to a joint venture (JV) comprising PORR (as the project lead), the Saudi Binladin Group and the local construction company HBK. The project includes the turnkey construction of the underground section of the Green Line, which features two tunnels each with a length of 17 km, six stations, crossovers and rail points, cross passages and emergency exit shafts.

The drive of the main tunnel, covering an approximate distance of 34 km, was finished in a mere 18 months thanks to the simultaneous use of six earth pressure balance shield tunnelling machines (EPB machines). The 32 cross passages and two additional underpasses have also now been completed. This contribution will begin with a review of the tunnelling work before paying particular attention to the experience gained with the ‘design-build plus provisional sums’ contract model.

Expérience acquise dans le cadre de la construction de la ligne verte du métro de Doha sur le modèle contractuel « Design-Build plus Provisional Sums »

Dans le cadre de la « Qatar National Vision 2030 », la ville de Doha, capitale du Qatar, poursuit son développement en vue de devenir un centre économique, commercial et sportif ultramoderne. L’un des volets majeurs de cette démarche consiste dans la création d’une infrastructure moderne intégrant des moyens de transport à très grande capacité. Il s’agit entre autres de la création d’un réseau métropolitain avec une mise en service à court terme, notamment en raison de l’organisation au Qatar de la Coupe du monde de football en 2022.

À l’été 2013, le projet Design-and-Build de la ligne verte de métro a été attribué à un consortium réunissant PORR (responsable de projet), le Saudi Binladin Group ainsi que l’entrepreneur de BTP local HBK. Le projet comprend la réalisation « clé en main » de la section souterraine de la ligne verte qui totalise deux fois 17 km de tunnel, de six stations, des dispositifs d’aiguillage, des galeries transversales et des galeries de secours. Grâce à la mise en œuvre simultanée de six boucliers à pression de terre (machines EPB), le tunnel principal d’env. 34 km a pu être achevé en 18 mois seulement, de même que les 32 galeries transversales et les deux galeries inférieures supplémentaires. Cet article résume le retour d’expérience de la percée du tunnel du projet « Design-Build plus Provisional Sums ».

Esperienze nella costruzione della linea verde della metropolitana di Doha con il modello contrattuale « Design-Build plus Provisional Sums »

Nel quadro di « Qatar National Vision 2030 », la capitale qatariota Doha verrà ampliata e trasformata in un centro per l’economica, il commercio e lo sport. Una componente importante di questo programma è la creazione di un’infrastruttura performante con moderni mezzi di trasporto di massa. In questo quadro si inserisce anche la realizzazione di una rete metropolitana, che dovrà entrare in funzione in tempi brevissimi, non da ultimo alla luce dei campionati del mondo di calcio che si terranno in Qatar nel 2022.

Il progetto di design e costruzione della linea verde della metropolitana – assegnato nel 2013 a una joint venture (JV) composta da PORR (responsabilità), dal Saudi Binladin Group e dalla locale impresa edile HBK – prevede la costruzione « chiavi in mano » della tratta sotterranea della linea verde, con una lunghezza della galleria di 17 km per due, sei stazioni, impianti di cambio dello scartamento e scambio, gallerie traversobanco e pozzetti per l’uscita di sicurezza.

Gli avanzamenti del tunnel principale di circa 34 km sono potuti essere conclusi in soli 18 mesi grazie all’impiego contemporaneo di sei TBM di tipo scudato a contropressione di terra (macchine EPB). Anche le 32 gallerie traversobanco e i due sottopassaggi supplementari sono stati nel frattempo ultimati. In questo contributo, dopo uno sguardo retrospettivo sui lavori di costruzione della galleria, sono presentate soprattutto le esperienze relative al modello contrattuale « Design-Build plus Provisional Sums ».

1 Einleitung

Im Rahmen der «Qatar National Vision 2030» hat sich der regierende Emir das Ziel gesetzt, die schnell wachsende und lebendige Hauptstadt Katars – Doha – zu einem modernen Zentrum für Wirtschaft und Handel auszubauen. Mit Investitionen im hohen zweistelligen Milliardenbereich soll der Wüstenstaat Katar zu einem der modernsten der Welt entwickelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil zur Realisierung dieses Zieles ist die Errichtung einer leistungsfähigen Infrastruktur mit modernen Massentransportmitteln. Das «Qatar Integrated Railway Project» umfasst neben Hochgeschwindigkeits-Bahnlinien auch ein umfassendes Metrosystem in Doha. Dieses soll dazu dienen, zusätzliche Transportkapazitäten bereitzustellen, um so ein ökonomisches Wachstum um den Stadtkern Dohas herum zu ermöglichen. Ausserdem trägt die Errichtung eines Metronetzes zur Verbesserung der Lebensqualität der Menschen und zum Schutz der Umwelt bei. Die angespannte Verkehrssituation in und um die Stadt herum kann ebenfalls deutlich verbessert werden.

1 Introduction

With the Qatar National Vision 2030 programme, the reigning Emir has set the country’s sights on developing its fast-growing and vibrant capital Doha into a cutting-edge centre for business and trade. Investment running into the many tens of billions is intended to help the desert nation of Qatar develop into one of the most modern countries in the world. A key element in terms of achieving this objective is the construction of high-performance infrastructure featuring the latest means of mass transportation. The Qatar Integrated Railway Project encompasses both high-speed railway lines and a comprehensive metro system in Doha. This is intended to ensure additional transport capacity and thus enable economic growth in the area around Doha city centre. The construction of a metro network will also contribute to improving people’s quality of life, boosting environmental protection and significantly relieving traffic congestion in and around the city.

2 Projektvorstellung

Das Gesamtprojekt «Metro Doha», welches vier Linien umfasst, wird in zwei Phasen bis etwa 2026 realisiert. In Phase 1 werden die Red Line South, die Red Line North, die Golden Line und die Green Line gebaut (Bild 1) [1]. Die Gesamtlänge der herzustellenden Metro-Linien beträgt 216 km, von denen 96 km unterirdisch, 91 km aufgeständert und die übrigen Strecken ebenerdig verlaufen. Des Weiteren sind ca. 90 Stationen zu errichten, die von 80 Zügen mit je sechs Wagen bedient werden.

Die Green Line wurde an ein Joint Venture, bestehend aus PORR (Federführung), der Saudi Binladin Group und dem lokalen Bauunternehmen HBK, vergeben. Der Auftrag umfasst die «schlüsselfertige» Errichtung des unterirdischen Abschnittes der Green Line mit einer Tunnellänge von zweimal 17 km, sechs Stationen, Spurwechsel- und Weichenanlagen sowie 32 Querschlägen und sechs Notausstiegsschächten.

Die Trasse der Green Line verläuft vom westlich gelegenen Al Rayyan Stadium nach Osten, zunächst aufgeständert bis zur «Trough». Ab hier wird die Linie unterirdisch fortgeführt (Bild 2). An der zentralen Station Musheireb trifft die Green Line auf die anderen Linien. Eine grundsätzliche Funktion der Green Line ist die Anbindung der Education City – ein grosses Neubauviertel und gleichzeitig Standort verschiedener Universitäten – im



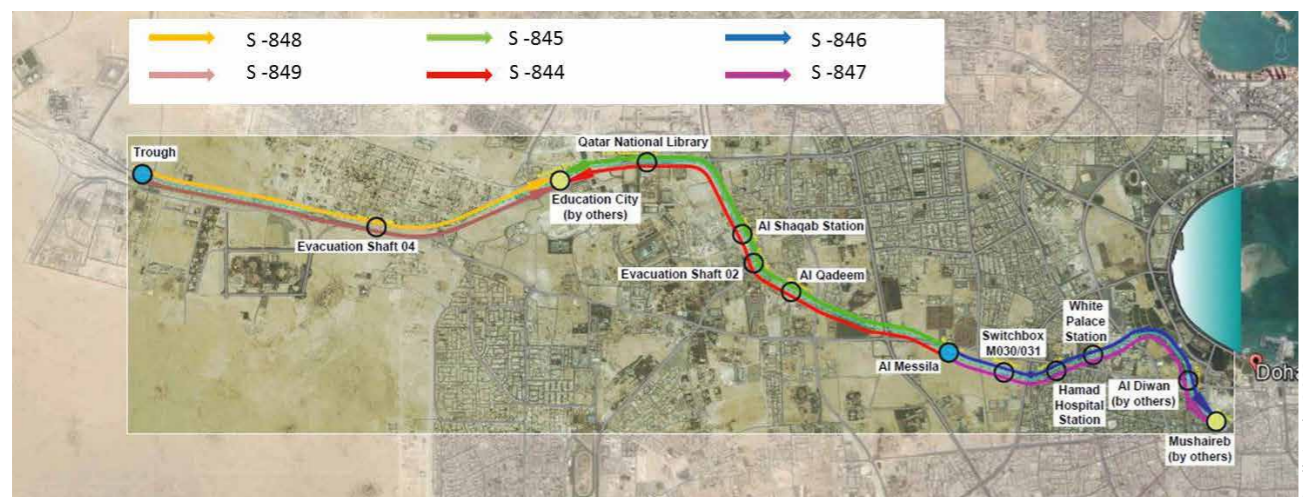
1 Übersicht Doha Metro, Phase 1
Overview of Doha Metro phase 1

2 Project Concept

The overall Metro Doha project comprises four lines and is to be completed by around 2026 in two separate phases. Phase 1 involves the construction of the Red Line South, Red Line North, Golden Line and Green Line (Fig. 1) [1]. The metro lines that are to be created run to a total length of 216 km, with 96 km of this being underground, 91 km elevated and the remainder at ground level. This phase also includes the construction of approximately 90 stations that are to be served by 80 six-car trains.

The Green Line was awarded to a joint venture consisting of PORR (as the project lead), the Saudi Binladin Group and the local construction company HBK. The order includes the turnkey construction of the underground section of the Green Line, which features two tunnels each with a length of 17 km, six stations, crossovers and rail points, 32 cross passages and six emergency exit shafts.

The Green Line starts at the Al Rayyan Stadium in the west, heading along an elevated section in an easterly direction before reaching the «Trough» and subsequently continuing underground (Fig. 2). The Green Line overlaps with the other lines at the centrally located Musheireb Station. One of the key functions of the Green Line is to establish a connection between Education City – a large new district in the west of Doha that is also the site of several universities – and



2 Trassenverlauf Green Line Underground
Route of Green Line Underground

Westen der Stadt Doha an das Zentrum. Daher erhält die Green Line auch den Namenszusatz «Education Line».

3 Rückblick auf die Tunnelbauarbeiten

3.1 Geologie

Die Tunnel wurden nahezu ausschliesslich im Kalkstein aufgeföhren, wobei dieser in verschiedenen Verwitterungsgraden auftreten kann. Als oberste Lage, etwa 10–25 m stark, tritt die sogenannte Simsima-Schicht auf. Sie weist Festigkeiten von 25–50 MPa und lokal bis 120 MPa auf. Durch Grund- und Regenwasser haben sich in dieser Lage viele Klüfte und Hohlräume gebildet, die mancherorts grosse Kavernen bilden. Je nach Tiefenlage sind sie mit Grundwasser gefüllt und kommunizieren in Küstennähe direkt mit dem Meer. Unter der Simsima-Schicht folgt die 1–3 m starke Midra Shale, die grosse Tonanteile enthält und dadurch als Stauer wirkt. Darunter liegt die Rus-Formation, ein Kalkstein mit geringeren Festigkeiten zwischen 5 und 15 MPa. Das in dieser Schicht gespeicherte Grundwasser ist gespannt, wobei der Druck rechnerisch teilweise bis 3 m über Geländeoberkante reicht. Die vorgegebene Tunnelgradienten verläuft durch alle drei Schichten. Das Grundwasser ist aufgrund sehr hoher Salz- und Sulfatanteile als sehr aggressiv einzustufen. Daher war aufgrund der geforderten 120 Jahre Lebensdauer der Bauwerke hier eine sehr anspruchsvolle Betonrezeptur erforderlich.

Um Risiken durch den stark heterogenen Baugrund für den Tunnelvortrieb zu reduzieren, wurde ein engmaschiges Erkundungsprogramm aufgelegt [1]. Geotechnische Voruntersuchungen (z. B. Erkundungsbohrungen oder seismische Messungen) wurden von der Oberfläche aus über die gesamte Tunneltrasse durchgeführt. Zur zusätzlichen Vorerkundung waren die Schildmaschinen mit Bohrungen ausgerüstet. Die Installation eines geotechnischen Vorerkundungssystems auf jeder Vortriebsmaschine stellte eine Besonderheit dar. Das sogenannte BEAM-System (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring) diente zur frühzeitigen Identifizierung von Änderungen in der Geologie und zeigte Bereiche geringerer Dichte bzw. höherer Porosität sowie vertikale Klüfte und stärker verwittertes, weniger festes Gestein [1] (Bild 3). Dadurch konnte eine rechtzeitige Anpassung der Vortriebsparameter umgesetzt werden. Die Reichweite der Messungen betrug drei Tunneldurchmesser, also etwa 21 m.

In Bezug auf mögliche Karsterscheinungen war der Respekt gross, daher erfolgten die umfangreichen Vorerkundungen und der Einsatz von BEAM. Tatsächlich wurden dann allerdings keine wesentlichen Karststrukturen angetroffen, die zu einer Vortriebsbehinderung hätten führen können.

3.2 Vortrieb und Logistik

Ursprünglich sollten vier TVM – jeweils zwei aus einem Startschacht – zum Einsatz gebracht werden. Dann wurde die aufzuföhrende Tunnelstrecke durch den Auftraggeber um

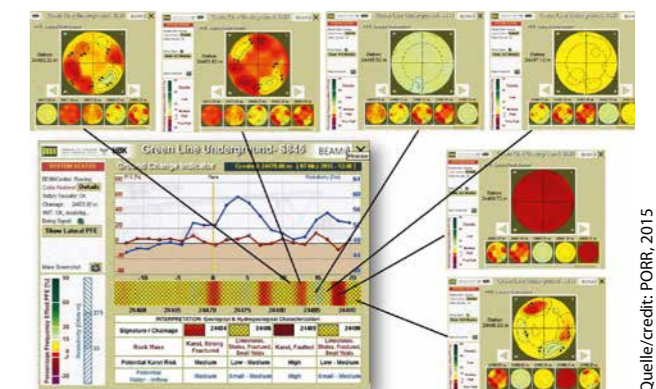
Doha city centre, which is why the Green Line is also named the «Education Line».

3 Review of the Tunnelling Work

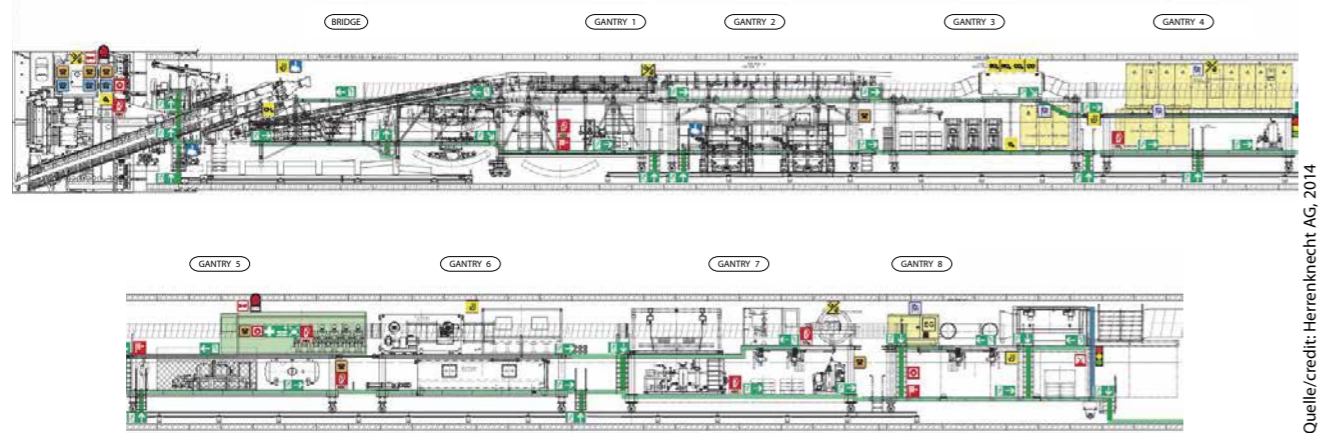
3.1 Geology

The tunnels were excavated almost entirely in limestone that featured various degrees of weathering. At the top is the Simsima layer, which featured a thickness of around 10–25 m and a strength of 25–50 MPa – rising to as much as 120 MPa in particular areas. Groundwater and rainwater have led to the formation of a number of fractures and cavities in this layer, with large caverns appearing at certain points. Depending on the depth at which they occur, these are filled with groundwater and even communicate directly with the sea in coastal locations. The Simsima layer is followed by the 1–3 m thick Midra Shale, which contains high proportions of clay that render it impermeable. Below this is the Rus Formation, a limestone layer with a low strength of 5–15 MPa. In theory, the piezometric level of the groundwater in this layer is as high as 3 m above ground level in certain sections. The specified tunnel gradient passes through all three layers and the very high proportions of salt and sulphate that are present in the groundwater ensure that this is classified as very aggressive. In light of these issues and the required 120-year service life of the structures, a highly sophisticated concrete recipe was therefore essential.

In an effort to reduce the risks presented by the extremely heterogeneous subsoil during the tunnel drive, a closely monitored exploratory programme was implemented [1]. Geotechnical advance investigations (such as exploratory drilling and seismic measurements) were performed from the surface along the entire route of the tunnel. The shielded tunnel boring machines were equipped with probe drilling systems in order to enable additional advance exploration. One special feature of this process was the installation of a geotechnical advance exploration system on each TBM. Known as the BEAM system (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring), this was used for early identification of changes in the geology and also pinpointed areas featur-



3 Anzeigen BEAM-System
BEAM system displays



4 Längsschnitt TVM
TBM longitudinal section

rund 3 km verlängert sowie zwei zusätzliche TVM gefordert. Durch verzögerte Baufeldübergaben, Planungsverzug sowie verspäteten Baugrubenaushub wurde anschliessend eine Umstellung des Vortriebsablaufes erforderlich, sodass schlussendlich das tatsächlich umgesetzte Konzept mit sechs TVM, von denen vier aus demselben Schacht starten mussten, entwickelt wurde. Der hiermit verbundene Mehraufwand wurde durch die wegen der Umstellung reduzierten Umbauten und die entfallenen Wiedermontagen relativiert.

Bei den eingesetzten TVM handelte es sich um EPB-Maschinen (Bild 4), wobei die Gesamtlänge inklusive der acht Nachläufereinrichtungen jeweils etwa 120 m betrug. Der Schild selbst wies eine Länge von 9,10 m auf. Der Schilddurchmesser belief sich auf 7,05 m, der Durchmesser des Schneidrades auf 7,10 m.

Die Materialandienung der sechs Vortriebsmaschinen erfolgte über die zwei Startschächte Al Messila (vier TVM) bzw. Trough (zwei TVM). Neben drei respektive zwei fest installierten Turmdrehkränen kam eine Vielzahl an Mobilkränen zum Einsatz. Die zahlreichen Schnittpunkte bei gleichzeitiger Herstellung der Tunnel, Querschläge und Stationen erforderten eine vorausschauende Planung und Organisation. Tübbinge und Betriebsmittel wurden über sogenannte Multi-Service-Vehicles (MSVs) zu den Maschinen befördert.

Für die Stromversorgung der TVM waren zu Spitzenzeiten in Al Messila 28 bzw. in Trough 16 Dieselgeneratoren zu je 1000 kW installiert, die zusammen ca. 20000 Liter Diesel pro Tag verbrauchten. Von der Leistung wurden 18 MW für die sechs Vortriebsmaschinen benötigt, 5 MW entfielen auf die Förderbandanlagen unter Vollast, 1 MW wurde für Wetter- bzw. Wasserkühlung verbraucht. Der Gesamtwasserbedarf für alle sechs TVM summierte sich auf etwa 5000 m³ pro Tag. Hierzu waren Kühltürme sowie Wasserentsalzungsanlagen auf der Baustelle installiert. Der tägliche Mörtelbedarf aller

ing lower density, higher porosity, vertical fractures and more heavily weathered rock with lower levels of strength [1] (Fig. 3). This enabled timely adjustments to be made to the drive parameters. The range of the measurements themselves amounted to three tunnel diameters (approximately 21 m).

The possibility of karst formations was handled with a great deal of caution, which was the reason behind the comprehensive advance explorations and the use of BEAM. In fact, no substantial karst structures that could potentially have hindered the drive work were found.

3.2 Drive and Logistics

The original plan called for the use of four TBMs, with two starting from the same shaft in each case. However, the client subsequently extended the tunnel that was to be driven by around 3 km and requested the use of two additional TBMs. The late handover of the construction area, planning delays and the performance of excavation work behind schedule made it necessary to adjust the drive process. This led to the development of the six-TBM concept that was ultimately implemented, with four of these TBMs having to start from the same shaft. The resulting additional workload was put into perspective by the reduced amount of modification work and by the reassembly work that no longer needed to be performed as a result of the project adjustments.

The TBMs used were EPB machines (Fig. 4), with the total length including the eight back-up decks amounting to around 120 m in each case. The shield itself featured a length of 9.10 m, the shield diameter ran to 7.05 m and the cutterhead diameter was 7.10 m.

The transport of materials to and from the six TBMs was performed via the two start shafts, known as Al Messila (four TBMs) and the trough (two TBMs). These featured three and two permanently installed revolving tower cranes respectively, and a variety of mobile cranes were also deployed. The

sechs Maschinen von ca. 500 m³ wurde durch den Einsatz von drei Mörtelmischanlagen gedeckt.

Nicht nur die Versorgung der Maschinen, sondern auch die Förderung des Ausbruchmaterials erforderte einen hohen logistischen Aufwand. Zum Ende des Projektes betrug die Länge der installierten Förderbandstrecke etwa 75 km, und es wurden etwa 1,3 Mio. m³ abgebautes Material gefördert. Neben einem gigantischen Förderbandsystem im Startschacht Al Messila für vier TVM sowie einer grossen Zwischendeponie erforderte auch die weitere Entsorgung des Bodenmaterials ein ausgefeiltes logistisches Konzept [1].

Eine weitere Herausforderung ergab sich aus der parallelen Herstellung der Tunnelbauwerke, der Querschläge und der Rettungsschächte sowie der sechs Stationen. Hierbei ergab sich die Parallelität insbesondere der TVM-Vortriebe und der Herstellung der Querschläge erst im Zuge der Projekt- abwicklung aufgrund von Verzögerungen zu Beginn des Projektes sowie wegen der Anordnung zusätzlicher Querschläge zur Umsetzung der einzuhaltenden Sicherheitsstandards. Für die Schnittstelle zwischen den TVM-Vortrieben und den Schächten war das Einhalten der Terminpläne zwingend erforderlich, da die Maschinen durch die Stationen geschleppt wurden. Das bedeutet, dass die Aushubarbeiten abgeschlossen und die permanente Bodenplatte hergestellt sein musste, bevor die Maschinen die jeweilige Station erreichten. Des Weiteren wurden eine temporäre Schildwiege, auf der Gleitschienen installiert wurden, sowie ein «receiving block» für die Ankunft der Maschine betoniert.

3.3 Vortriebsleistung

In Bild 5 sind die Vortriebsleistungen aller TVM zusammengefasst. Die geringen Monatsleistungen zu Beginn lassen sich dadurch erklären, dass von September 2014 zwei, ab Januar 2015 vier und erst ab Februar 2015 alle sechs Vortriebsmaschinen angefahren wurden. Weiterhin ist dies der üblichen Lernkurve geschuldet. Ein deutlicher Einbruch der Vortriebsleistungen war während des Ramadans bzw. der «summer working hours» mit geringeren Arbeitszeiten zu beobachten. Hinzu kam, dass sich in diesem Zeitraum vier Vortriebsmaschinen in einer Station befanden (Gleiches gilt für zwei TVM im Monat September/Oktober 2015).

Der finale Durchschlag zweier Maschinen erfolgte am 28.11.2015 bzw. 12.12.2015 in der Musheireb Station, zwei weitere Maschinen schlugen am 28.02.2016 bzw. 01.03.2016 in der Education City Station durch. Die beiden letzten TVM gelangten am 27.03.2016 bzw. 29.03.2016 an ihr Ziel in der Education City Station. Alles in allem konnten die Vortriebe ca. einen Monat früher als geplant abgeschlossen werden.

Die beste Monatsleistung aller Maschinen wurde im November 2015 erreicht (ca. 3520 m), mit einer Maschine wurde eine Monatsbestleistung von 864 m erzielt. Die beste

task of navigating the numerous intersections during the simultaneous creation of the tunnels, cross passages and stations demanded forward-looking planning and organisation, with tunnel segments (tubbings) and equipment being transported to the machines using multi-service vehicles (MSVs).

In order to ensure the power supply to the TBMs at peak times, 28 diesel generators were installed in Al Messila and 16 in the trough – each delivering 1,000 kW and consuming around 20,000 litres of diesel per day. 18 MW of the power was required for the six TBMs, 5 MW was used by the conveyor belt systems at full load and 1 MW went on air and water cooling. The total water requirement for all six TBMs amounted to around 5,000 m³ per day, with cooling towers and water desalination plants being installed on the construction site for this purpose. The six machines collectively required around 500 m³ of grout every day, which was covered by the use of three grout mixing plants.

There was a high logistical workload, not only in terms of ensuring the supply to the machines but also with respect to transporting the excavation material. By the end of the project, the installed conveyor belts covered a length of approximately 75 km and around 1.3 million m³ of excavated material had been transported. As well as a gigantic conveyor belt system in the Al Messila start shaft for four TBMs and a large intermediate disposal site, the subsequent disposal of the muck also demanded a refined logistical concept [1].

The simultaneous creation of the tunnel structures, cross passages, rescue shafts and six stations presented an additional challenge. The parallel processing of these different aspects, especially the TBM drives and the creation of the cross passages, only came about during the execution of the project itself as a result of delays at the beginning of the project and due to the implementation of additional cross passages to ensure compliance with the applicable safety standards. In terms of the interface between the TBM drives and the shafts, it was essential to adhere to the schedules as the machines had to be hauled through the stations. This meant that the excavation work needed to be completed and the permanent ground slab needed to be produced before the machines reached the station in question. In addition, a temporary shield cradle – on which slide rails were installed – and a receiving block were both concreted so as to be ready for the arrival of the machine.

3.3 Driving Performance

Figure 5 depicts the drive performance of all TBMs combined. The low monthly performance in the early stages can be explained by the fact that only two boring machines were used as of September 2014 and only four were deployed as of January 2015, with all six boring machines finally in action as of February 2015. The typical learning curve also served as an extra factor in this regard. Significant dips in the boring

Erfahrungen beim Bau der Metro Doha Green Line mit dem Vertragsmodell «Design-Build plus Provisional Sums»

Wochenleistung einer TVM belief sich auf ca. 278 m. Die Tagesbestleistung betrug 56 m.

3.4 Tübbinge

Der Ausbau des Tunnels erfolgte mittels einschaliger Tübbingauskleidung, wobei der Ringspalt mit einem 2-Komponenten-Mörtel verpresst wurde. Ein Tübbingring besteht aus fünf Segmenten und einem Schlussstein. Die Tübbinge haben eine Breite von 1,6 m und eine Dicke von 0,30 m (Durchmesser aussen: 6,77 m; Durchmesser innen: 6,17 m). Das Gewicht eines Segmentes war mit ungefähr 4,5 t angegeben, wodurch sich das Gesamtgewicht eines Rings auf etwa 25 t aufaddierte.

Neben den klimatischen Bedingungen lag eine planerische wie betontechnologische Herausforderung in den hohen Anforderungen an den Beton in Bezug auf die Sulfatbeständigkeit. So war z.B. ursprünglich ein konventionell bewehrter Tübbing vorgesehen. Aufgrund des hohen Sulfatgehaltes des Grundwassers ergab sich in der Bemessung allerdings eine derart grosse Betondeckung, dass massive Abplatzungen zu befürchten waren. Somit kamen Stahlfasertübbinge der Güte C50/60 mit 40 kg Stahlfasergehalt und 1,8 kg PP-Fasern je Tübbing (zur Reduzierung von Abplatzungen im Brandfall) zum Einsatz [3]. Die hohen Temperaturen haben im Übrigen dazu geführt, dass ein einbetonierter und kein geklebter Dichtraahmen zum Einsatz kam. Kein Hersteller der

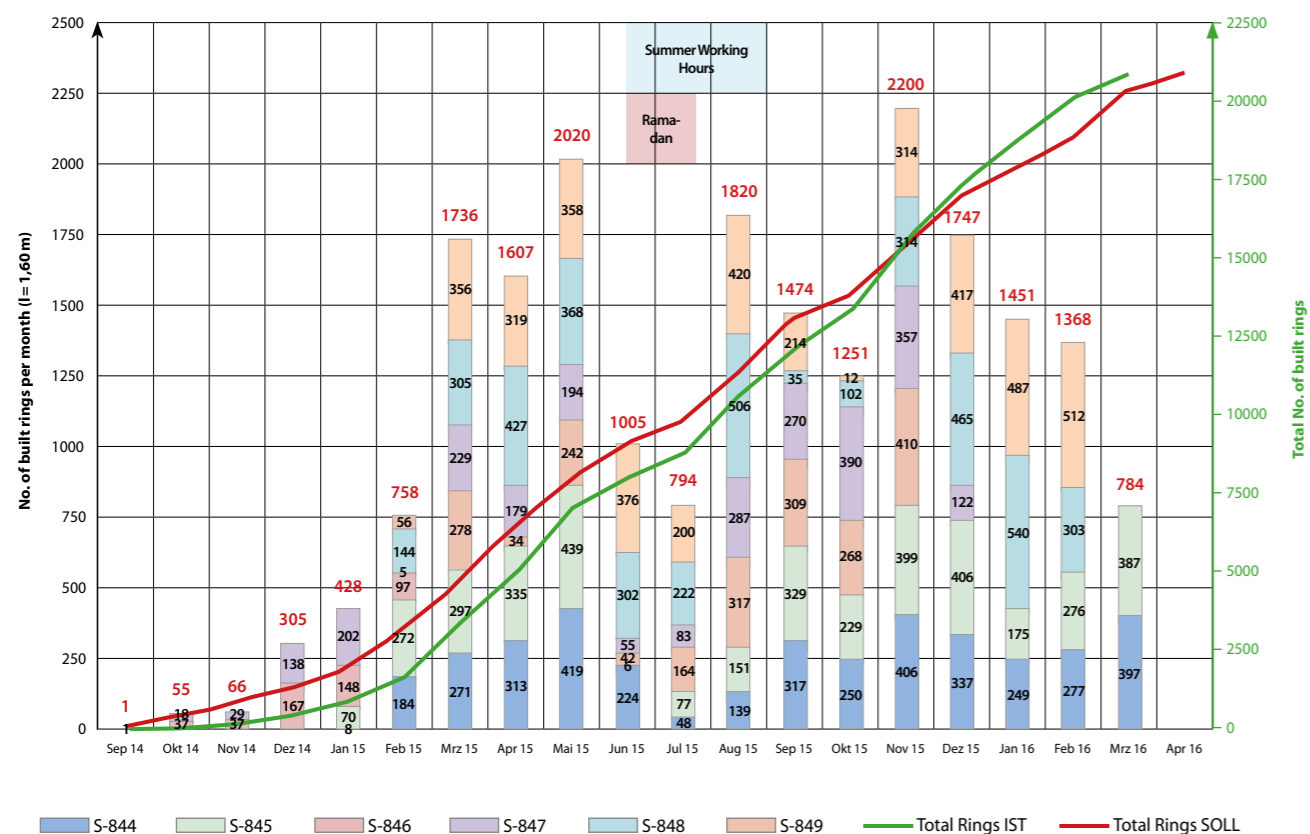
performance were observed during Ramadan and the time of reduced summer working hours. It should additionally be borne in mind that four TBMs were located in one station during this period (and the same was true of two TBMs in September/October 2015).

The final breakthrough of two machines took place in Musheireb Station on 28 November 2015 and 12 December 2015 respectively, with a further two machines breaking through at Education City Station on 28 February 2016 and 1 March 2016. The last two TBMs reached their destination at Education City Station on 27 and 29 March 2016. All in all, the drives were completed around one month earlier than planned.

The best monthly performance of all machines combined was achieved in November 2015 (approx. 3,520 m). In terms of individual machines, the best monthly performance of a single TBM amounted to 864 m, the best weekly performance was approx. 278 m and the best one-day performance reached 56 m.

3.4 Precast Segments

The tunnel was constructed using a single-shell segmental lining and the annular gap was backfilled with a two-component mortar. Each ring consisted of five segments and a keystone. The segments featured a width of 1.6 m and a thickness of

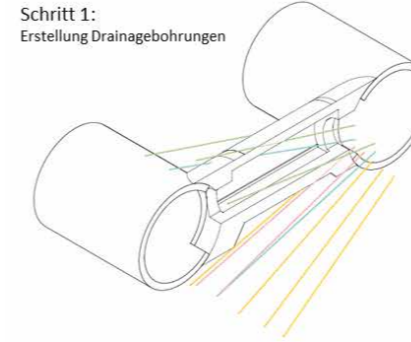


5 Gesamtvortriebsleistung der TVM
Total driving performance of TBM

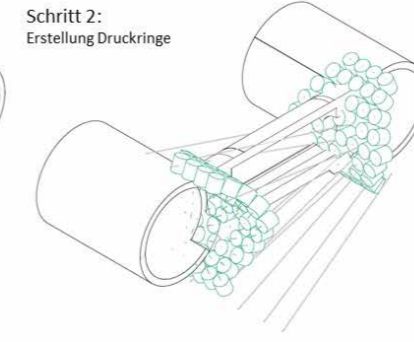
Quelle/credit: PORR, 2016

Experience Gained in the Construction of the Metro Doha Green Line with the “Design-Build Plus Provisional Sums” Contract Model

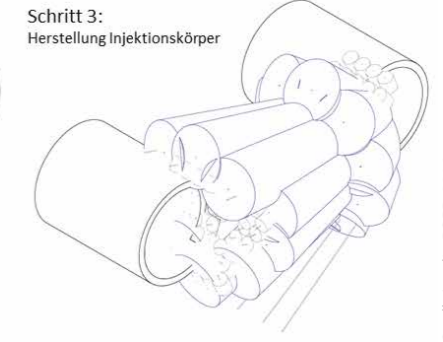
Schritt 1:
Erstellung Drainagebohrungen



Schritt 2:
Erstellung Druckringe



Schritt 3:
Herstellung Injektionskörper



6 Injektionsarbeiten an den Querschlägen
Grouting work on the cross passages

üblichen Kleber konnte die erforderliche Funktionstüchtigkeit bzw. Beständigkeit insbesondere bei direkter Sonneneinwirkung gewährleisten.

Die Tübbingproduktion fand in einem eigens für das Projekt errichteten Werk, in das ein eigenes Betonwerk integriert war, statt. Um auf die extremen klimatischen Bedingungen reagieren und den erforderlichen qualitativ hochwertigen Beton produzieren zu können, war es in der Regel erforderlich, die Zuschlagstoffe im Betonwerk zu kühlen. Die Segmente wurden in massgefertigte Formen gegossen, wobei jede Form mindestens zweimal pro Tag gefüllt wurde. Daraus ergab sich eine Produktionsleistung von im Schnitt 2,25 Segmenten je Form und Tag. In der Spitze waren 30 Schalsätze im Einsatz, um eine ausreichende Vorproduktion zu ermöglichen. Dazu waren grosse Lagerkapazitäten vorgesehen. Die hergestellten Segmente verblieben maximal 36 Stunden im Werk und wurden anschliessend 26–27 Tage ausserhalb gelagert, bevor sie zur Baustelle transportiert wurden. Für alle sechs Vortriebe wurden insgesamt 20870 Ringe, also 125 220 Tübbinge, produziert.

Die Eigenfertigung war von Anfang an so vorgesehen, der Einsatz von «ungelerntem» Personal entpuppte sich als relativ unproblematisch. In der Phase der Lernkurve war mehr Aufsichtspersonal erforderlich als erwartet. Die Qualität war dafür aber von Beginn an einwandfrei, die Änderungen bzgl. der Bewehrung und des Dichtrahmens sind als voller Erfolg zu bezeichnen.

3.5 Querschläge

Vor Beginn der Ausbrucharbeiten für die Querschläge wurde die Sohle im Haupttunnel auf einer Länge von 20 m um ca. 1 m auf das Niveau der Querschläge aufgeschüttet, um die Andienung mit Geräten und Materialien zu vereinfachen. Sofern Grundwasser im Bereich der Querschläge anstand, musste der angrenzende Baugrund vorbereitet werden, bevor die Tübbingröhre geöffnet wurde. Hierfür wurden zunächst aus einer Röhre heraus Probebohrungen und Drainagebohrungen erstellt und das anstehende Wasser in ein Absatzbecken abgeführt. Je nach anstehendem Wasserdruck und Wassermenge war es notwendig, den Baugrund zu injizieren. Zur Vorbereitung wurde hierzu zunächst von

0.30 m (external diameter: 6.77 m; internal diameter: 6.17 m). The weight of a segment was stated at around 4.5 t, with the total weight of a ring amounting to approximately 25 t.

Besides the climatic conditions, the high demands placed on the concrete in relation to sulphate resistance represented a further challenge in terms of both planning and concrete technology. As a result, the original plan called for the use of conventionally reinforced segments. However, the high sulphate content in the groundwater meant that the required concrete cover identified during the dimensioning process was extremely thick – giving rise to fears of significant spalling. Steel fibre segments of class C50/60 were therefore used, featuring a 40 kg steel fibre content and 1.8 kg of PP fibres per segment (to reduce spalling in the event of fire) [3]. The high temperatures also led to the use of seals that were encased in concrete, rather than one that was bonded. None of the manufacturers of conventional adhesives was able to guarantee the necessary functionality and resistance, especially in the context of direct sunlight.

The segments were produced in a factory that was set up especially for the project and featured its own integrated concrete plant. In order to respond to the extreme climatic conditions and produce the required high-quality concrete, it was usually necessary to cool the aggregates in the concrete plant. The segments were mass-produced in precast formworks, with each of these being filled at least twice per day. This led to an average production output of 2.25 segments per form each day. At the peak, 30 formwork sets were deployed so as to enable sufficient advance production and large storage capacities were required as a result. The segments that were produced remained in the factory for a maximum of 36 hours and were subsequently stored elsewhere for 26–27 days before being transported to the construction site. A total of 20,870 rings – corresponding to 125,220 segments – were produced for all six drives.

In-house production had been planned from the start, with the deployment of ‘non-expert’ personnel ultimately causing relatively few issues. Although more supervisory personnel were required during the learning curve phase than had been anticipated, the level of quality was perfect from the

Quelle/credit: PORR, 2016



7 Vortriebsarbeiten Querschlag
Cross passage excavation

beiden Röhren aus jeweils ein Druckring hergestellt. Diese Ringe sollten die Röhren vor ungewollten und ungleichmässigen Deformationen schützen. Anschliessend konnte der Injektionskörper erstellt werden. Bild 6 zeigt die Schritte der Injektionsarbeiten zur Abdichtung der Querschläge. Der Querschlag ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht erstellt und in der Abbildung nur nachrichtlich dargestellt.

Alle 32 Querschläge mussten durch Drainagebohrungen entwässert werden und/oder mithilfe von Injektionen abgedichtet werden. Als Notfallplan für nicht vollständig abgedichtete Querschläge wurde vorgesehen, den Grundwasserspiegel von der Oberfläche aus mithilfe von Brunnen abzusenken. Dieses Szenario trat jedoch nicht ein.

Die Geräte zur Erstellung der Querschläge mussten auf die begrenzten Platzverhältnisse abgestimmt sein (Bild 7). Kleine Maschinen mit hoher Beweglichkeit und ausreichender Leistung mussten teilweise extra importiert werden.

word go and the changes relating to the reinforcement and the precast segment seals were entirely successful.

3.5 Cross Passages

Prior to the start of the excavation work for the cross passages, a 20 m section of the invert in the main tunnel was heaped by approx. 1 m up to the level of the cross passages. This then made it easier to transport the equipment and materials. If groundwater was present in the area of the cross passages, the neighbouring subsoil had to be prepared before the tubbing was opened in that area. For this purpose, probe drilling and drainage bores were created in a pipe and the in situ water was then discharged into a sedimentation tank. Depending on the prevailing water pressure and the amount of water present, it was necessary to grout the subsoil. For preparatory purposes, an additional pressure ring (to stabilise the segments) was first implemented in both tunnels. These rings were intended to protect the tunnel segments against undesired and uneven deformations.



8 Abdichtung und Innenschale Querschlag
Cross passage sealing and inner lining

Nach Fertigstellung der Ausbruch- und Sicherungsarbeiten wurde eine umlaufende Abdichtung installiert, bevor nacheinander die Sohle und anschliessend das Gewölbe bewehrt und betoniert wurden (Bild 8). Im Bereich der Übergänge hat die Innenschale eine Dicke von 1 m, im regulären Querschnitt von 0,40 m.

3.6 Strassenunterführungen

Im Umfang des Projektes sind die Stationsbauwerke Hamad Hospital und Al Messila enthalten. Um die Zugänglichkeit der Stationen aus dem gesamten Umfeld sicherzustellen, wurden zwei Unterführungen (sog. «underpasses») unter der stark befahrenen, achtspurigen Al Rayyan Road von je 76 m Länge bergmännisch erstellt (Bild 9).

Die Vortriebsarbeiten der ersten Unterquerung am Hamad Hospital begannen am 04.09.2016 und wurden nach einer Anlernphase für die Rohrschirmherstellung in einem 2-Schicht-Durchlaufbetrieb (24 h/7 d) mittels 20-t-Hydraulikbagger mit Meisselhammer und 4,5-m³-Lader ausgeführt [4]. Das Vortriebskonzept sah eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts in Kalotte und Sohle vor (Bild 10).

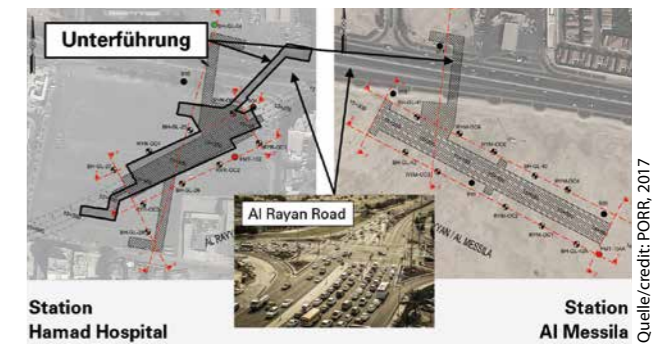
Die Abschlagslänge des Kalottenvortriebs (Bild 11, rechts) betrug jeweils 1 m (Ausbruchquerschnitt 58,6 m² bis 73,6 m²). Nach jedem zweiten Abschlag wurde ein Sohlabschlag von 2 m nachgezogen. Gesichert wurde das umgebende Gestein durch Ausbaubögen, Bewehrungsmatten, Felsanker und eine 25 cm starke Spritzbetonschicht. Je nach Ausbruchverhalten und Setzungsverlauf konnte eine Stützung der Ortsbrust mittels Spritzbeton und Ortsbrustankern notwendig werden. Die Bohrlänge der Rohre betrug 15 m inklusive 3 m Überlappung der Rohrschirme [4].

Um Setzungen an der Oberfläche möglichst auszuschliessen, waren die auftretenden Verformungen im Tunnel auf 3–5 mm limitiert, wurden baubegleitend kontinuierlich gemessen und konnten bestätigt werden. Als zusätzliche Schutzmassnahme wurde eine vorausseilende Sicherung mittels eines verpressten Rohrschirms realisiert (Bild 11, links).

Als Besonderheit ist die Unterführung einer nahezu gefüllten Abwasserleitung mit 1,5 m Durchmesser im lichten Abstand von 80 cm zu benennen, in deren Einflussbereich zur Reduzierung von Erschütterungen auf einen Baggervortrieb mit Anbaufräse umgestellt wurde.

Nachdem die Vortriebsarbeiten am Hamad Hospital am 17.12.2016 abgeschlossen worden waren, konnte die gesamte Vortriebseinrichtung zur Unterführung in Al Messila umgesetzt werden und die Vortriebsarbeiten am 30.12.2016 dort fortgesetzt werden. Alle Vortriebsarbeiten konnten unfallfrei und zur Zufriedenheit des Auftraggebers am 29.03.2017 abgeschlossen werden [4].

Die Herstellung der bewehrten Innenschale der Unterführung am Hamad Hospital lief bauparallel zu den Vortriebs-



9 Lageplan Strassenunterführungen
Layout plan for underpasses

Once this had been done, it was possible to create the grout injection block. Fig. 6 shows the steps involved in the grouting work for the purpose of sealing the cross passages to be excavated. The cross passage had not yet been created by this point and is only depicted in the figure for information purposes.

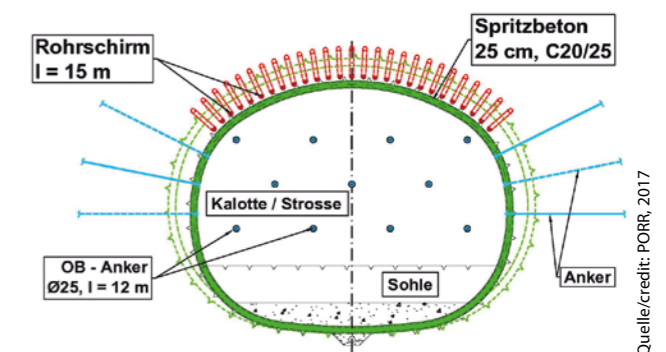
All 32 cross passages had to be drained via drainage bores and/or sealed by means of grouting. An emergency plan was established for cross passages that were not fully sealed, which involved lowering the groundwater level from the surface using draining wells. However, no such scenario occurred.

The equipment used to create the cross passages had to be suitable for the confined conditions (Fig. 7). Small machines featuring excellent manoeuvrability and sufficient output had to be specially imported in certain cases.

Once the excavation and support work had been completed, all-round sealing was installed. Following this step, the invert and then the vault were reinforced and concreted (Fig. 8). The inner lining, which was 1 m thick in the area of the transitions, featured a regular cross-section of 0.40 m.

3.6 Underpasses

The project also included the Hamad Hospital and Al Messila station structures. In order to ensure that the stations were



10 Regelquerschnitt Strassenunterführungen
Standard cross-section of underpasses



11 Herstellung Rohrschirm (links) und Ausbruch (rechts)
Production of pipe umbrella (left) and excavation (right)

arbeiten an der Unterführung Al Messila. Die Innenschale wurde in zwei Schritten hergestellt. Der erste Schritt sah die Erstellung einer umlaufenden Abdichtung der Betoninnenschale vor. Der zweite Schritt war die Herstellung der Betoninnenschale mit einer vorlaufenden Betonage des Sohlgewölbes gegenüber dem Kalottengewölbe (Bild 12). Es wurden neun Blöcke mit Blocklängen zwischen 5,30 m und 9,40 m erstellt.

Die Herstellung der Innenschale in der Unterführung Hamad Hospital konnte am 05.04.2017 abgeschlossen werden. Im Anschluss wurde die Innenschale in der Unterführung Al Messila eingebaut, und Mitte Juli 2017 waren alle Arbeiten abgeschlossen [4].

3.7 Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz

Besonders stark geprägt war und ist das Projekt durch die ausgereiften Arbeits- und Gesundheitsschutzkonzepte, die den Anforderungen auf europäischen Projekten in keiner Weise nachstehen [3]. Bevor der Zugang zur Baustelle gewährt wurde, durchlief jeder einzelne der über 5000 Arbeiter und Angestellten eine intensive Einweisung. Weitere Sicherheitsvorkehrungen, damit jeder die Baustelle am Ende des Tages unversehrt verlassen konnte (Zero-Harm Policy), waren unter anderem abgetrennte Fahrwege, Sicherheitskleidung sowie auffällige Beschilderungen und Warnhinweise.

Auf dem gesamten Projekt waren über 200 Arbeitssicherheitsmitarbeiter zur Überwachung der Arbeitssicherheit und zur Vermeidung von Unfällen im Einsatz. Die Durchführung von Schulungen wurde durch die teils geringen Englischkenntnisse (bzw. Analphabetismus) vieler Arbeiter erschwert. Daher war häufig eine simultane Übersetzung der Sicherheitseinweisungen in die Muttersprache notwendig [3]. Dazu war das Ausbildungsniveau der meisten Arbeiter nicht mit dem europäischen Standard, speziell im Bereich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz, zu vergleichen. Die Unwissenheit oder Sorglosigkeit bedingte ein hohes Fehler- und Gefahrenpotenzial, was eine intensive Anleitung und Überwachung sowie ständige Wie-

accessible from the entire surroundings, two 76-metre underpasses were tunnelled under the heavily used eight-lane Al Rayyan Road (Fig. 9).

The drive work for the first crosscut at Hamad Hospital began on 4 September 2016 and, following a learning phase for the production of the pipe umbrella, was carried out in two-shift continuous operation (24/7) using 20 t hydraulic excavators featuring hydraulic hammers and 4.5 m³ wheel loaders [4]. As part of the drive concept, the excavation cross-section was divided into the crown and the invert (Fig. 10).

The round length of the crown drive (Fig. 11, right) was 1 m in each case (excavation cross-section 58.6 m² to 73.6 m²) and a invert round of 2 m was excavated after every second round. The surrounding rock was secured by means of support arches, wire mesh sheets, rock bolts and a 25 cm layer of shotcrete. Depending on the excavation behaviour and the settlement results, it was sometimes necessary to support the face using shotcrete and face bolts. The drilling length of the pipe umbrella was 15 m, including a 3 m overlap of the umbrellas [4].

In order to rule out settlements at the surface as far as possible, the deformations that occurred in the tunnel were limited to 3–5 mm – these were continuously measured during the construction process and subsequently confirmed. As an additional protective measure, an advance support was also implemented using grout injection pipe roofing (Fig. 11, left).

A special feature of the project was the process of tunnelling at a clearance of 80 cm under an almost full sewage pipe with a diameter of 1.5 m. In order to reduce the vibrations in the corresponding zone of influence, the decision was made to switch to an excavator using a transverse cutter attachment.

After the excavation at Hamad Hospital had been completed on 17 December 2016, the entire drive equipment was relocated to the underpass in Al Messila and the drive

derholung von Task-Briefings, Toolbox-Talks etc. durch qualifizierte Fachkräfte erforderte. Als nützlich erwiesen hat sich vor allem die Installation grosser Plakatwände, auf denen die wesentlichen Punkte und Massnahmen bezüglich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz bildlich dargestellt waren (Bild 13).

Der im Zusammenhang mit den Themen Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz stehende Aufwand war höher als erwartet, der erzielte Erfolg war allerdings auch wesentlich besser als erwartet.

4 Vertragsmodell «Design-Build plus Provisional Sums»

4.1 Grundlegende Gestaltung des Vertragsmodells

Grundsätzlich lehnt sich das Vertragsmodell an den Kanon der FIDIC-Regelungen an. Es handelt sich zunächst einmal um einen gerade im arabischen Bereich üblichen «design & build contract», dessen Charakteristika im Wesentlichen die folgenden sind:

Vom Auftraggeber wurde den Bewerbern im Rahmen des Vergabeverfahrens ein grobes funktionales Design überge-

work continued there on 30 December 2016. No accidents occurred during the excavation, which was completed to the satisfaction of the client on 29 March 2017 [4].

The reinforced inner lining of the underpass at Hamad Hospital was produced at the same time as the drive work was being performed on the Al Messila underpass. The inner lining was implemented in two stages: the first stage featured the creation of all-round sealing on the primary concrete lining, whereas the second stage involved the pouring of the concrete inner lining with advance concreting of the invert opposite the crown vault (Fig. 12). A total of nine blocks featuring lengths between 5.30 m and 9.40 m were created.

The inner lining in the Hamad Hospital underpass was completed on 5 April 2017. This was followed by the construction of the inner lining in the Al Messila underpass, with all work being finished by mid-July 2017 [4].

3.7 Working Safety, Health Protection

The project was and is strongly characterised by its sophisticated working safety and health protection concepts, which do not fall short of the requirements for European



12 Innenschale Strassenunterführung
Inner lining of underpass



Quelle/credit: PORR, 2017

13 Beispiele Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz
Examples of working safety and health protection

ben. Dieses Design enthielt neben Angaben zu der Lage und den Abmessungen der einzelnen Bauwerke (Tunnel, Stationen, Querschläge, Rettungsschächte, Spurwechselanlagen, Abstellanlagen etc.) auch Anforderungen und Erwartungen der später für den Betrieb Verantwortlichen bezüglich Funktionalität. Hierzu zählten beispielsweise Informationen zu dem prognostizierten und damit von der zu bauenden Infrastruktur sicher zu beherrschenden Fahrgastaufkommen, was sich sowohl auf die Zugkompositionen als auch auf die Dimensionierung der Zugangsbauwerke und ihrer betriebstechnischen Ausstattung auswirkte.

Auf dieser Basis und unter eigenverantwortlicher Berücksichtigung der gesetzlich geltenden Bau- und Sicherheitsvorschriften war dann von den Bewerbern in der Angebotsphase ein grobes Design für die Tunnel und Stationen zu entwickeln. Dies beinhaltete neben den statisch-konstruktiven Ausarbeitungen auch Lösungen für MEP, Heizung, Lüftung, Klimatechnik und die Vertikaltransporte (Aufzüge, Rolltreppen) für die Stationen. Ausserdem waren Fluchwegkonzepte für die Tunnel und die Stationen gefordert.

Dieses Design war dann im nächsten Schritt in Leistungsverzeichnisse bzw. BOQs zu überführen. Die Rohbauarbeiten waren hierbei dann konventionell als Teil-«lump sums» abzubilden. Der Ausbau und die MEP-Arbeiten waren – und hier kommt die grosse Besonderheit des Vertragsmodells zum Einsatz – als sogenannte «provisional sums» darzustellen. Hierunter ist zu verstehen, dass eine Art vorläufige Verpreisung der funktionalen und architektonisch noch zu entwickelnden Leistungsbereiche auf Basis des jeweiligen Verständnisses des Bewerbers im Zuge des Designs erfolgen musste. Im Zuge der Vertragsabwicklung waren bzw. sind dann für die so abgebildeten Arbeitspakete detaillierte Designs zu erstellen. Der vertragliche Mechanismus sieht dann eine Prüfung und Genehmigung des Auftraggebers vor inklusive umfangreicher Änderungsbefugnisse. Weiterhin wird dem Auftraggeber bei der Vergabe der mit diesen

projects in any way [3]. Each of the 5,000-plus workers and employees underwent intensive instruction before being granted access to the construction site. Additional safety measures implemented as part of the zero-harm policy, which ensured that all workers were able to leave the construction site without injury at the end of the day, included separate roadways, safety clothing, and clear signage and warnings.

Over 200 working safety staff were involved in the overall project, tasked with monitoring working safety and preventing accidents. The fact that many of the workers had poor English skills (or were indeed illiterate) made it more difficult to conduct training and often resulted in a simultaneous interpreter having to translate the safety instructions into the workers' mother tongue [3]. In addition, the education level of most of the workers did not compare to the European standard – particularly in terms of working safety and health protection. This lack of awareness and lack of concern meant that there was a high potential for errors and hazards, which made it necessary to have qualified specialists provide intensive instruction, monitoring and constant repetition of aspects such as task briefings and toolbox talks. One particular approach that proved beneficial was the installation of large billboards featuring illustrations of key aspects and measures relating to working safety and health protection (Fig. 13).

Although the workload in relation to working safety and health protection was higher than anticipated, the success achieved as a result was also much greater than expected.

4 'Design-Build Plus Provisional Sums' Contract Model

4.1 Basic Structure of the Contract Model

The contract model is based on the canon of FIDIC regulations and is principally a 'design and build contract', which is a common format in the Arab world and features the following key characteristics:

During the awarding process, the client provided the applicants with a rough functional design. This design featured specifications for the location and dimensions of the individual structures (tunnels, stations, cross passages, rescue shafts, crossovers, storage facilities, etc.), plus the functional requirements and expectations as stated by those who would subsequently be responsible for operation. This included information such as the forecast passenger volume, which therefore had to be safely accommodated by the infrastructure that was to be constructed. As a result, this had an influence not only on the train compositions but also on the dimensions of the access structures and their operational equipment.

On this basis, the applicants were subsequently tasked with developing a rough design for the tunnels and stations dur-

Arbeitspaketen im Zusammenhang stehenden Leistungen an Subunternehmer sowie beim Einkauf der zugehörigen Gerätschaften und Materialien ein umfangreiches Mitspracherecht eingeräumt.

Neben dieser eher ungewöhnlichen Vertragskonstruktion mit den «provisional sums» gab es noch die im arabischen Raum durchaus üblichen, in Europa aber doch eher selten vorkommenden vertraglichen Regelungen, dass die Schildmaschinen erst einmal grundsätzlich ins Eigentum des Auftraggebers übergehen und dass durch den Bewerber bzw. Auftragnehmer de facto das Baugrundrisiko übernommen werden muss. Letzteres wird z.B. durch die geforderte Bestätigung sichergestellt, dass die angebotenen Bauverfahren in jedem Fall ausreichen, um alle auftretenden Baugrundverhältnisse zu beherrschen. Auch der Vergütungsmechanismus nach sogenannten «payment milestones» in z.B. 20%-Schritten je «lump sum item» lässt sich in europäischen Vertragsmodellen nicht häufig finden.

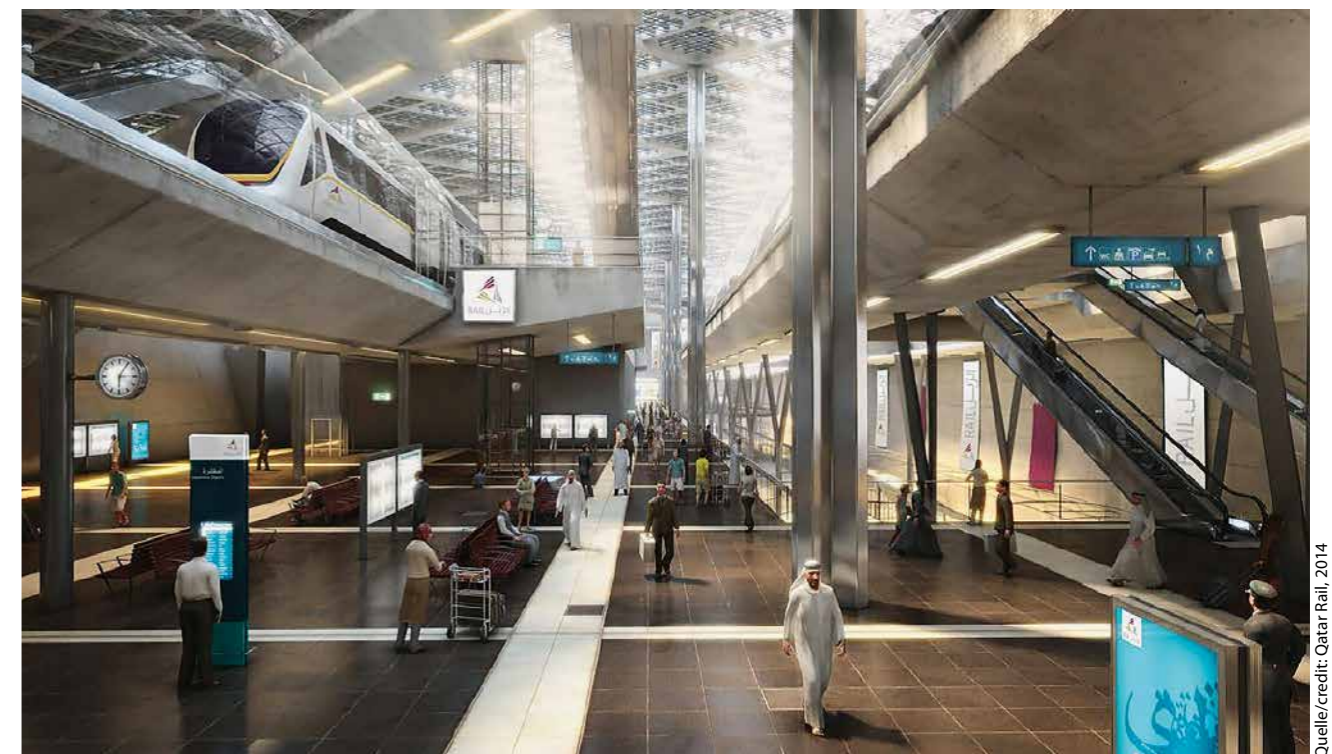
4.2 Erfahrungen bei der Projektabwicklung

Das Leben des beschriebenen Vertragsmodells hat bisher bei der Metro Doha Green Line überwiegend zufriedenstellend funktioniert. Förderlich hierfür war und ist sicherlich, dass die Leistungen der ARGE den Erwartungen des Auftraggebers entsprochen haben und weiterhin entsprechen. Ausserdem war es sicherlich ebenso gut für das Zusammenfinden der Vertragspartner, dass die Thematik des Umgangs mit den «provisional sums» nicht direkt ab Tag 1 in grossem Umfang zu behandeln war, sondern dass der

ing the tendering phase. They were also required to take responsibility for ensuring compliance with the applicable statutory construction and safety provisions. In addition to structural plans, this featured solutions for MEP, heating, ventilation, air-conditioning technology and vertical transportation (lifts, escalators) at the stations. Escape route concepts for the tunnels and stations were also required.

In the next step, this design was transformed into service specifications and/or BOQs. The structural work had to be depicted conventionally in the form of 'part lump sums'. The excavation and MEP work was to be presented in the form of 'provisional sums', which represents the key characteristic of this contract model and means that a type of preliminary pricing for the functional and architectural services that are still to be developed has to be performed within the scope of the design on the basis of the respective understanding of the applicant. Detailed designs then had to or have to be created during contract processing for the work packages that are depicted in this way. The contract mechanism then calls for the client to perform inspection and approval, with recourse to comprehensive amendment powers. The client is also given a significant say when it comes to awarding the services associated with these work packages to subcontractors and purchasing the corresponding equipment and materials.

In addition to this relatively unusual contract structure featuring the provisional sums, there were also contractual regulations – thoroughly typical in the Arab world, less so



Quelle/credit: Qatar Rail, 2014

14 Vision des Auftraggebers von einer Station
Client vision of a station

grosse Leistungsumfang des Rohbaus mit vielfach erprobten Mechanismen abgewickelt werden konnte.

Bei der Behandlung der «provisional sums» ist es dann relativ wenig überraschend zu Meinungsverschiedenheiten gekommen. Wenn ein aus europäischer Sicht zweckmässiges und funktionales Design beispielsweise einer Station auf die in Bild 14 abgebildete Vision des Auftraggebers von derselben Station trifft, sind mitunter nicht unerhebliche Unterschiede in der Höhe der betreffenden «provisional sum» relativ einfach vorstellbar.

Zu divergierenden Meinungen ist es beispielsweise ebenfalls bei den Definitionen der Funktionalität des Systems gekommen. Es gibt einfach unterschiedliche Wege, die geforderte Transportkapazität zur Verfügung zu stellen, sowie unterschiedliche Interpretationen der entsprechend geltenden Gesetze, Vorschriften und Richtlinien.

Die Lösung von Konflikten dieser Art verursacht dann mitunter zeitliche Verzögerungen im Bauablauf und letztendlich Mehrkosten, über die dann nicht anders als bei anderen Vertragskonstrukten verhandelt wird.

5 Zusammenfassung

Die Tunnelbauarbeiten bei der Metro Doha Green Line konnten trotz aller Herausforderungen und Besonderheiten vor allem dank des hochmotivierten Einsatzes des Personals in bemerkenswert kurzer Zeit vollendet werden. Sämtliche tunnelbautechnischen Aufgabenstellungen wurden erfolgreich gelöst – von dem gleichzeitigen Betrieb von sechs EPB-Schildmaschinen über die kleinteilige, logistisch besonders herausfordernde Herstellung von 32 Querschlägen bis hin zu dem grossflächigen, extrem setzungsarmen konventionellen Vortrieb mit vorausseilender Sicherung mittels Rohrschirmen.

Bezüglich des Vertragsmodells ist hervorzuheben, dass insbesondere die Thematik der «provisional sums» mit den entsprechenden Interpretationsspielräumen ein erhöhtes Konfliktpotenzial mit sich bringt. Begegnen sich die Vertragspartner allerdings sachlich, höflich und mit Respekt, sind immer für alle Seiten zufriedenstellende Lösungen herbeizuführen. Bisher sind die handelnden Personen in dieser Art und Weise miteinander umgegangen, sodass auch die vertragliche Abwicklung als Erfolg bezeichnet werden kann.

Literatur/References

- [1] Rengshausen, R.; Köhler, H.; Heilmeyer, G.: Metro Doha Green Line: Erfahrungen beim Tunnelbau mit sechs TBM unter besonderen geologischen und klimatischen sowie kulturellen Rahmenbedingungen. Vorträge der STUVA-Tagung 2015 (Forschung + Praxis 46) (2015), S. 44–50
- [2] Qatar Rail: Doha Metro. <https://www.qr.com.qa>, abgerufen am: 13.06.2016.

in Europe – requiring that the TBMs first be transferred to the ownership of the client and that the applicant/contractor assume the de facto subsoil risk. This latter prerequisite is ensured for example by the required confirmation which states that the tendered construction procedure is entirely sufficient for dealing with any subsoil conditions that may occur. The remuneration mechanism that is based on payment milestones, for example in 20% increments per lump sum item, is another aspect that is not commonly found in European contract models.

4.2 Experience Gained during the Execution of the Project

Taken as a whole, this contract model has thus far proven largely satisfactory in terms of the Metro Doha Green Line project. It was and is clearly necessary in this regard that the services provided by the consortium corresponded to the expectations of the client and continue to do so. In addition, it was certainly positive for the cooperation between the contract partners that the issue of how to handle the provisional sums did not have to be addressed to a significant extent on day one – instead, it was possible to deal with the wide-ranging scope of services relating to the basic construction using well-proven mechanisms.

It was relatively unsurprising that there were differences of opinion when it came to addressing the matter of the provisional sums. When a design that is suitable and functional from a European standpoint, such as for a station, comes up against the client's vision for the same station as illustrated in Fig. 14, it is not difficult to see how there will be fairly significant variations in the provisional sums involved.

Divergent views were also aired in relation to other factors, such as the definitions of the system functionality. There are quite simply different ways to provide the necessary transport capacity and varying interpretations of the applicable laws, regulations and guidelines.

The resolution of such conflicts causes delays in the construction workflow and ultimately leads to added costs that cannot be negotiated any differently to other contractual constructs.

5 Summary

Despite all the challenges and special characteristics of the project, the tunnelling work for the Metro Doha Green Line was completed in a remarkably short time. This outcome was thanks above all to the highly motivated personnel. Solutions were successfully found for all tunnelling tasks, ranging from the simultaneous operation of six EPB shield tunnelling machines and the detailed production of 32 cross passages that proved such a logistical challenge, through to the large-scale, extremely low-settlement conventional drive featuring advance support provided by pipe roofing.

- [3] Rengshausen, R.; Köhler, H.; Heilmeyer, G.: Metro Doha Green Line – Rückblick und Erfahrungen beim Bau eines komplexen Tunnelbauprojektes unter aussergewöhnlichen Randbedingungen. 5. Münchener Tunnelbau Symposium (Vortrag), 03.06.2016
- [4] Wittke-Schmitt B.; Küpper H.-J.; Wenkenbach H.: Green Line in Qatar – bergmännische Unterfahrung einer 8-spurigen Strasse in Doha. 3. Felsmechanik- und Tunnelbautag 2017, WBI-PRINT 20

In terms of the contract model, it must be emphasised that the issue of the provisional sums is particularly associated with an increased potential for conflict as a result of the corresponding scope for interpretation. However, solutions that are satisfactory for all sides can always be achieved if the contract partners interact in an objective, polite and respectful manner. As the individuals involved have thus far worked with one another in this manner, the contract processing has also been handled successfully.

Tobias Witschi, Dipl. Bau-Ing. ETH, B+S AG, Bern/CH
Alessandro Ferrari, Dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, B+S AG, Bern/CH

Tunnel de Champel

Erfahrungen aus 1,6 km Lockergesteinsvortrieb unter der Stadt Genf

Der Tunnel de Champel ist Teil der neuen Bahnlinie CEVA, welche in naher Zukunft den Genfer Hauptbahnhof Cornavin mit der grenznahen Stadt Annemasse in Frankreich verbinden wird. Für den 1622 m langen Doppelspurtunnel wurden zwischen März 2014 und Juni 2017 insgesamt 36 Gebäude bei Überdeckungen von 6 bis 30 m erfolgreich unterquert.

Tunnel de Champel

Experience from 1.6 km Tunnelling in Soil beneath the City of Geneva

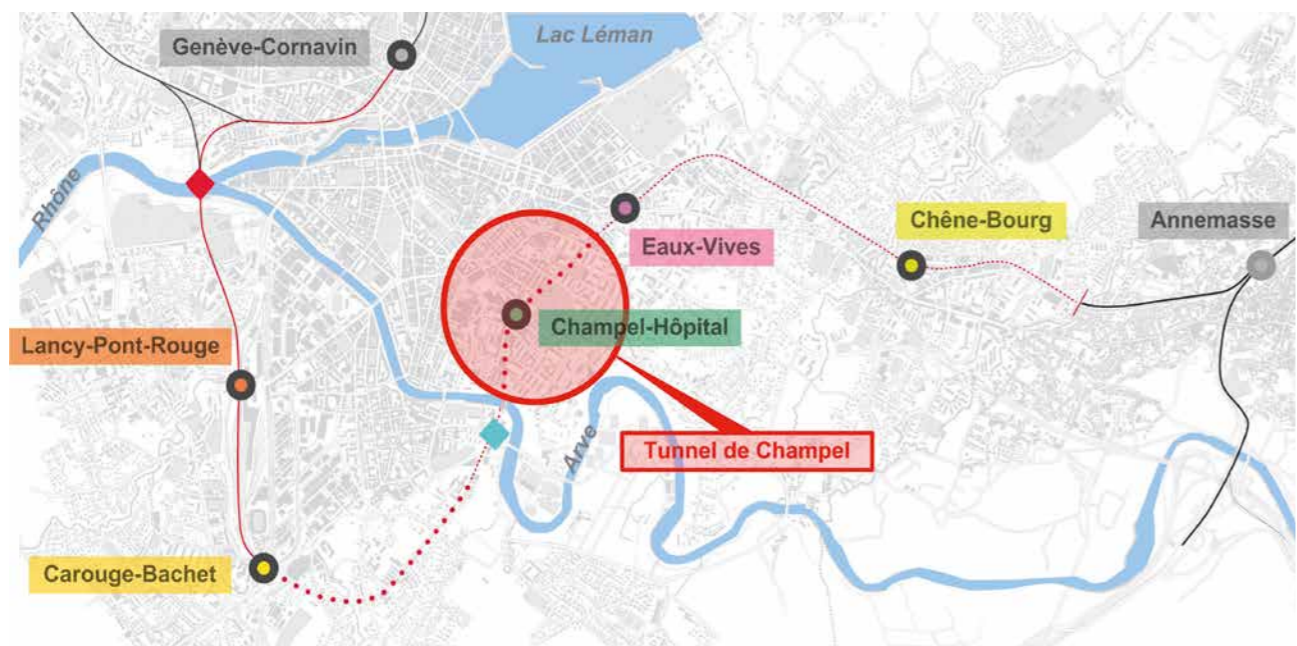
The Tunnel de Champel is part of the new CEVA railway line, which will connect the Geneva Cornavin main station with the French border city of Annemasse in the near future. Between March 2014 and June 2017, a total of 36 buildings with cover between 6 m and 30 m were successfully tunnelled underneath with the 1,622 m twin-track tunnel.

1 Das Projekt in Kürze

Das Projekt CEVA steht für die 16 km lange Bahnlinie, welche künftig den Genfer Hauptbahnhof Cornavin mit der Stadt Annemasse in Frankreich verbinden wird. Bereits 1912 in einem Vertrag ratifiziert, schliesst das Projekt nicht nur eine Lücke zwischen dem SNCF- und dem SBB-Schiennetz, sondern dient gleichzeitig der Anbindung mehrerer Zentren der Stadt Genf.

1 Brief Introduction to the Project

The CEVA project is a 16 km railway line, which in future will connect the Geneva Cornavin main station with the French town of Annemasse. Ratified in a treaty as early as 1912, the project not only closes a gap between the SNCF and SBB rail networks, but also serves to connect several centres in the city of Geneva.



1 Linienführung der Bahnlinie CEVA
CEVA railway line routing

Tunnel de Champel

Retour sur expérience d'un avancement de 1,6 km en terrain meuble sous la ville de Genève

Le tunnel de Champel fait partie de la nouvelle voie ferrée CEVA qui reliera bientôt la gare de Genève-Cornavin à la gare d'Annemasse, ville voisine située en France. Pour réaliser ce tunnel à double voie de 1622 m entre la période de mars 2014 et juin 2017, il a fallu passer sous 36 bâtiments avec un recouvrement de 6 à 30 m. L'avancement en terrain meuble a été effectué en pleine section avec une voûte parapluie et un soutènement systématique du front de taille. La section d'excavation atteignant parfois 160 m² a requis un réajustement permanent de la méthode d'avancement selon l'évolution des relevés géotechniques ainsi que des contrôles géométriques en surface.

Der 1622 m lange, doppelspurige Tunnel de Champel ist eines der Kernstücke des Projekts CEVA (siehe Bild 1). Er unterquert bei Überdeckungen von 6 bis 30 m das gleichnamige, stark urbanisierte Plateau de Champel [1]. Die in Deckelbauweise parallel zum Tunnelvortrieb erstellte Haltestelle Champel-Hôpital unterbricht das Untertagebauwerk ca. nach der Hälfte der Tunnellänge (siehe Bild 2).

Die Bauarbeiten für den Tunnel de Champel haben Ende 2012 beim Südportal mit der Steinschlagsicherung und dem Voreinschnitt im steilen Gelände begonnen. 2013 wurde der Start-

Galleria di Champel

Esperienze acquisite durante 1,6 km di avanzamento in terreno sciolto sotto la città di Ginevra

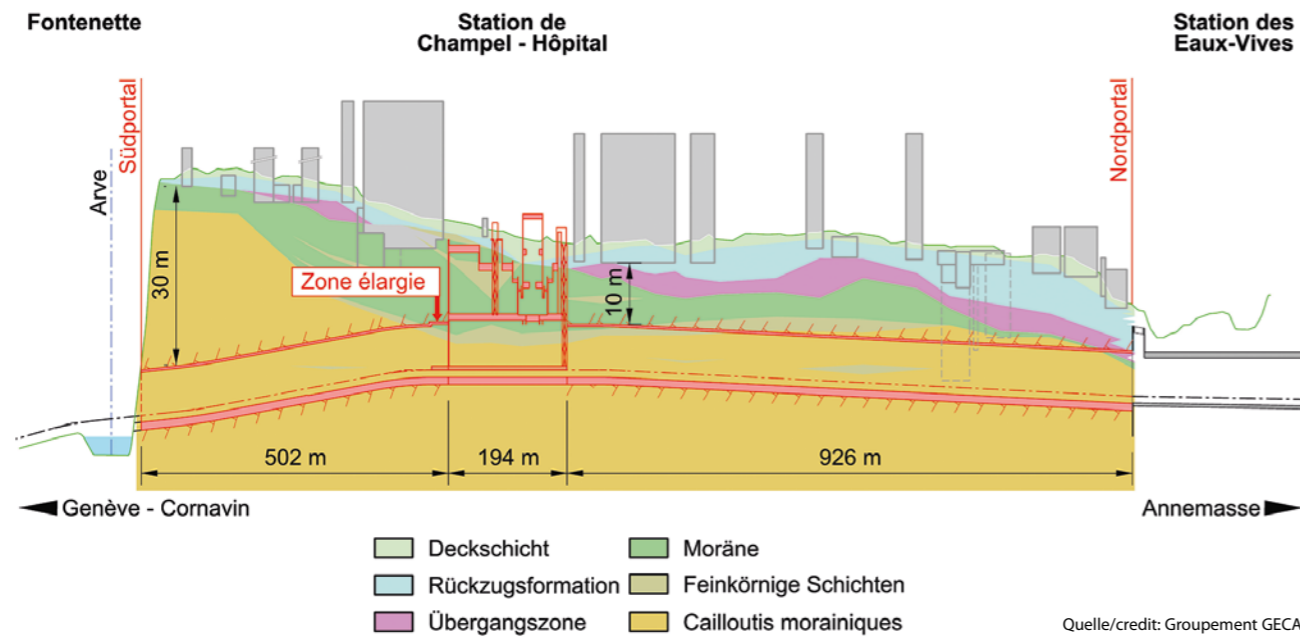
La galleria di Champel è parte della nuova linea ferroviaria CEVA, che nel prossimo futuro collegherà la stazione centrale ginevrina di Cornavin con la città di Annemasse in Francia. Durante la costruzione della galleria a doppio binario lunga 1622 m – tra il marzo del 2014 e il giugno del 2017 – sono stati sottopassati con successo 36 edifici, con coperture da 6 a 30 m. L'avanzamento in terreno sciolto è avvenuto con uno scavo convenzionale a piena sezione sotto la protezione sistematica di un ombrello di infilaggi e ancoraggi al fronte. La sezione di scavo fino a 160 m² ha richiesto la costante sintonizzazione di valutazione geotecnica, concetto di avanzamento e misure di monitoraggio.

The 1,622 m long, twin-track Tunnel de Champel is one of the core elements of the CEVA project (see Fig. 1). With cover between 6 m and 30 m, it passes beneath its heavily urbanised namesake, the Plateau de Champel [1]. Champel-Hôpital station, which is built using the cut and cover method parallel to tunnelling, interrupts the underground structure approximately halfway along the length of the tunnel (see Fig. 2).

The construction work for the Tunnel de Champel began in late 2012 at the south portal with the slope stabilisation works and the pre-cut in steep terrain. In 2013, the launch



2 Blick über die Haltestelle Champel-Hôpital
View of Champel-Hôpital station



3 Geologisches Längenprofil des Tunnel de Champel
Tunnel de Champel longitudinal geological profile

schacht in Eaux-Vives für den Gegenvortrieb ab dem Nordportal abgeteuft. Die eigentlichen Vortriebsarbeiten konnten im März 2014 aufgenommen und im Juni 2017 abgeschlossen werden. Der Abschluss der Rohbauarbeiten mit Verkleidung und Innenausbau ist für die erste Hälfte 2018, die Inbetriebnahme der gesamten Bahnlinie auf Ende 2019 vorgesehen.

2 Baugrundverhältnisse

Die zwischen 2004 und 2011 durchgeführten Baugrunduntersuchungen umfassten insgesamt 14 Kernbohrungen. In den Abschnitten mit geringster Überlagerung wurden zur Bestimmung der Schichtabfolge weitere acht dynamische Penetrometer-Versuche realisiert. In Kombination mit zahlreichen In-situ- und Laborversuchen standen somit bereits für die Planung detaillierte geotechnische Grundlagen zur Verfügung, welche während der Ausführung durch Aufnahmen des Geologen fast ausnahmslos bestätigt werden konnten.

Der Vortrieb erfolgte auf der gesamten Länge oberhalb des Grundwasserspiegels in quartären Sedimenten (siehe Bild 3). Zumindest die untere Hälfte des Tunnelprofils lag in den – in Genf als «Cailloutis morainiques» bezeichneten – alten Schottern. Diese dicht gelagerten, überkonsolidierten, sauberen bis siltigen Kiese wiesen mit ihrer grossen Scherfestigkeit und ihrer hohen Steifigkeit für den Vortrieb im innerstädtischen Umfeld günstige Eigenschaften auf. Überlagert wurden die alten Schotter von einer ebenfalls dicht gelagerten, undurchlässigen Moräne, bestehend aus siltigem Kies bis hin zu tonigem Silt. Die prognostizierten durchlässigeren, wassergesättigten Linsen wurden nur untergeordnet aufgeföhren und konnten mittels sporadischer Bauhilfsmassnahmen wie Drainagen, zusätzlicher Brustanker oder Rohrschirmrohren beherrscht werden.

shaft in Eaux-Vives was sunk to facilitate the counter drive from the north portal. The actual tunnelling works began in March 2014 and were completed in June 2017. The completion of the structural works with lining and interior work is scheduled for the first half of 2018, and commissioning of the entire railway line for the end of 2019.

2 Ground Conditions

The ground investigations carried out between 2004 and 2011 comprised a total of 14 core-borings. In the sections with the least cover, an additional eight dynamic penetrometer tests were performed to determine the stratigraphy. In combination with numerous in-situ and laboratory tests, detailed geotechnical baseline data was already available at the planning stage, which it was possible to almost completely confirm by the geologist's findings during the execution phase.

The entire length was tunnelled above the groundwater table in Quaternary sediments (see Fig. 3). At least the lower half of the tunnel profile lay in the old gravel – known in Geneva as 'Cailloutis morainiques'. These dense, overconsolidated, clean to silty gravels, with their high shear strength and stiffness, display favourable properties for tunnelling in an urban environment. The old gravels were overlain by equally dense, impermeable moraine material, consisting of silty gravels to clayey silts. The predicted more permeable, saturated lenses were only subordinate in nature and were controlled by means of sporadic auxiliary construction measures such as drainage, additional face bolts or pipe roofings.

The majority of the buildings to be passed beneath were founded in a formation formed during glacial retreat. This unit, overlying the moraine, displayed highly unfavourable

Die meisten der zu unterquerenden Gebäude waren in einer während des Gletscherrückzugs entstandenen Formation fundiert. Diese die Moräne überlagernde Einheit wies insbesondere hinsichtlich Setzungsverhalten sehr ungünstige Eigenschaften auf, wurde jedoch nur im Bereich des Nordportals vom Tunnelvortrieb direkt angetroffen.

3 Lockergesteinsvortrieb unter der Stadt Genf

3.1 Konzeptionelle Überlegungen

In Anbetracht der geringen Überlagerung und der dichten Bebauung waren Oberflächensetzungen so weit wie möglich zu begrenzen und Ortsbrustinstabilitäten oder gar Tagbrüche zu verhindern. Zudem musste ein flexibles Vortriebsverfahren gewählt werden, um sowohl auf unterschiedliche Baugrundverhältnisse als auch den vergrösserten Ausbruchquerschnitt am Süden der Haltestelle Champel-Hôpital (siehe weiter unten) reagieren zu können.

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Vortriebsstrecke sowie der innerstädtischen Verhältnisse, welche die Möglichkeit von Interventionen von der Oberfläche stark einschränkten, wurde ein konventioneller Vortrieb gewählt. Basierend auf den ausführlichen Baugrunduntersuchungen wurde ein Vollausbuch trotz der grossen Querschnitte als machbar eingestuft, dies jedoch nur, solange grössere Deformationen und somit der Verlust des dilatanten Baugrundverhaltens vermieden werden konnten. Dementsprechend wurde ein langsamer Vortrieb mit kurzen Abschlüssen und sofortigem Ringschluss angestrebt. Zur weiteren Begrenzung der Oberflächensetzung bzw. zur Gewährleistung der Ortsbruststabilität wurden systematische vorausseilende Bauhilfsmassnahmen in Form eines Rohrschirms und langer Brustanker vorgesehen (siehe Bild 4).

Vervollständigt wurden die Sicherungstypen durch sporadische vordefinierte Zusatzmassnahmen wie die Erhöhung des Grades der Bruststützung oder zusätzliche Rohrschirm-

properties, in particular with regard to settlement response, but was only directly encountered by tunnelling in the region around the northern portal.

3 Tunnelling in Soil beneath Geneva City

3.1 Conceptual Considerations

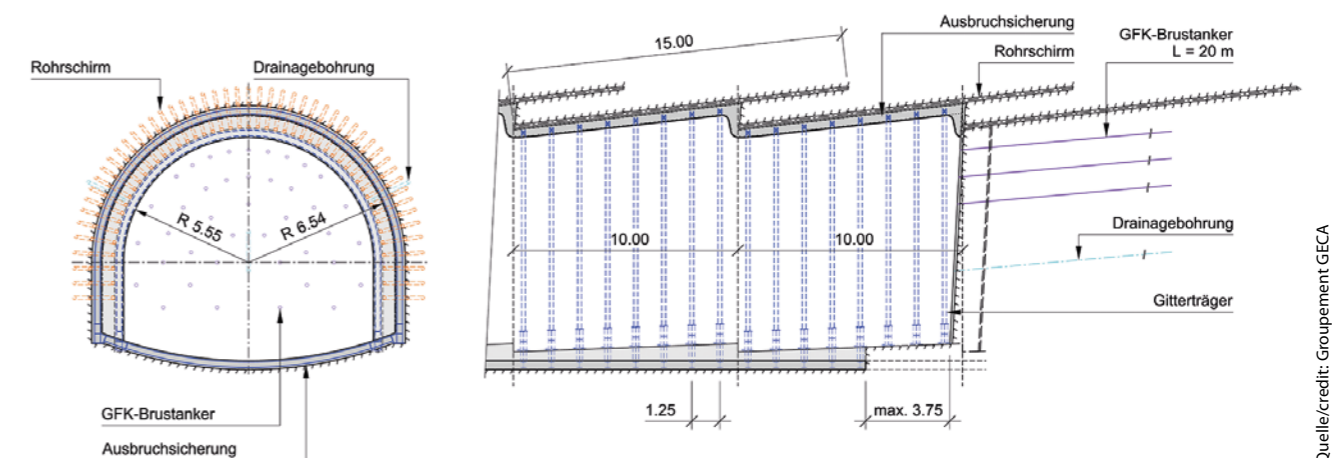
In view of the thin cover and dense surface building, surface settlements needed to be limited as far as possible and instability of the face or even collapse had to be avoided. In addition, a flexible tunnelling method needed to be selected in order to be able to react both to different ground conditions and to the increased excavation cross-section at the southern end of the Champel-Hôpital station (see below).

Due to the comparatively short tunnelling distance and the inner-city conditions, which severely limited the possibility of interventions from the surface, a conventional tunnelling method was opted for. Based on the exhaustive ground investigations, full excavation was regarded as being feasible despite the large cross-sections, but only if larger deformations, and thus the loss of dilatant ground conditions, could be avoided. Accordingly, slow tunnelling with short rounds and immediate ring closure was aimed for. In order to further limit surface settlement and ensure the stability of the face, systematic advance auxiliary construction measures in the form of a pipe umbrella and long face bolts were employed (see Fig. 4).

These protection methods were complemented by occasional, predefined, additional measures such as increasing the degree of face support or additional pipe roofing, which have proven to be particularly effective as a measure against local instabilities.

3.2 Tunnelling at the South and North Portals

The underground construction works commenced in late March 2014 at the south portal. After excavating



4 Vortriebsverfahren des Tunnel de Champel
Tunnel de Champel tunnelling method

rohre, die sich insbesondere als Massnahme gegen lokale Instabilitäten bewährt haben.

3.2 Vortriebe ab Süd- und Nordportal

Die Untertagbauarbeiten konnten Ende März 2014 am Südportal aufgenommen werden. Nach Ausbruch von 47 Rohrschirmetappen bzw. 502 m wurde im Juni 2016 die Schlitzwand zur Haltestelle Champel-Hôpital durchbrochen (siehe Bild 5). Nach Querung des 194 m langen, bereits im Rohbau fertiggestellten Deckelbaus und dem anschließenden Ausbruch von weiteren 28 Rohrschirmetappen bzw. 258 m durfte am 8. Juni 2017 schliesslich der Hauptdurchschlag gefeiert werden.

Aufgrund der für das Vortriebsverfahren typischen geringen Vortriebsleistung von ca. 1,3 m pro Arbeitstag wurde bereits in der Planungsphase ein Gegenvortrieb vom Nordportal vorgesehen. Dieser konnte im September 2014 aufgenommen werden und umfasste bis zum Hauptdurchschlag insgesamt 67 Rohrschirmetappen bzw. 667 m.

Die Gesamtlänge einer Ausbruchtappe betrug im Normalfall 10 m. Der mit einer Neigung von ca. 7° fächerförmig gebohrte Rohrschirm resultierte in einer variablen Ausbruchfläche zwischen 110 m² am Etappenanfang bzw. 140 m² am Etappen-

ende. 47 pipe roofing stages, or 502 m, the diaphragm wall to the Champel-Hôpital station was broken through in June 2016 (see Fig. 5). After crossing the 194 m long, structurally complete top-down construction and the subsequent excavation of another 28 pipe umbrella stages, or 258 m, the main breakthrough was finally celebrated on 8 June 2017.

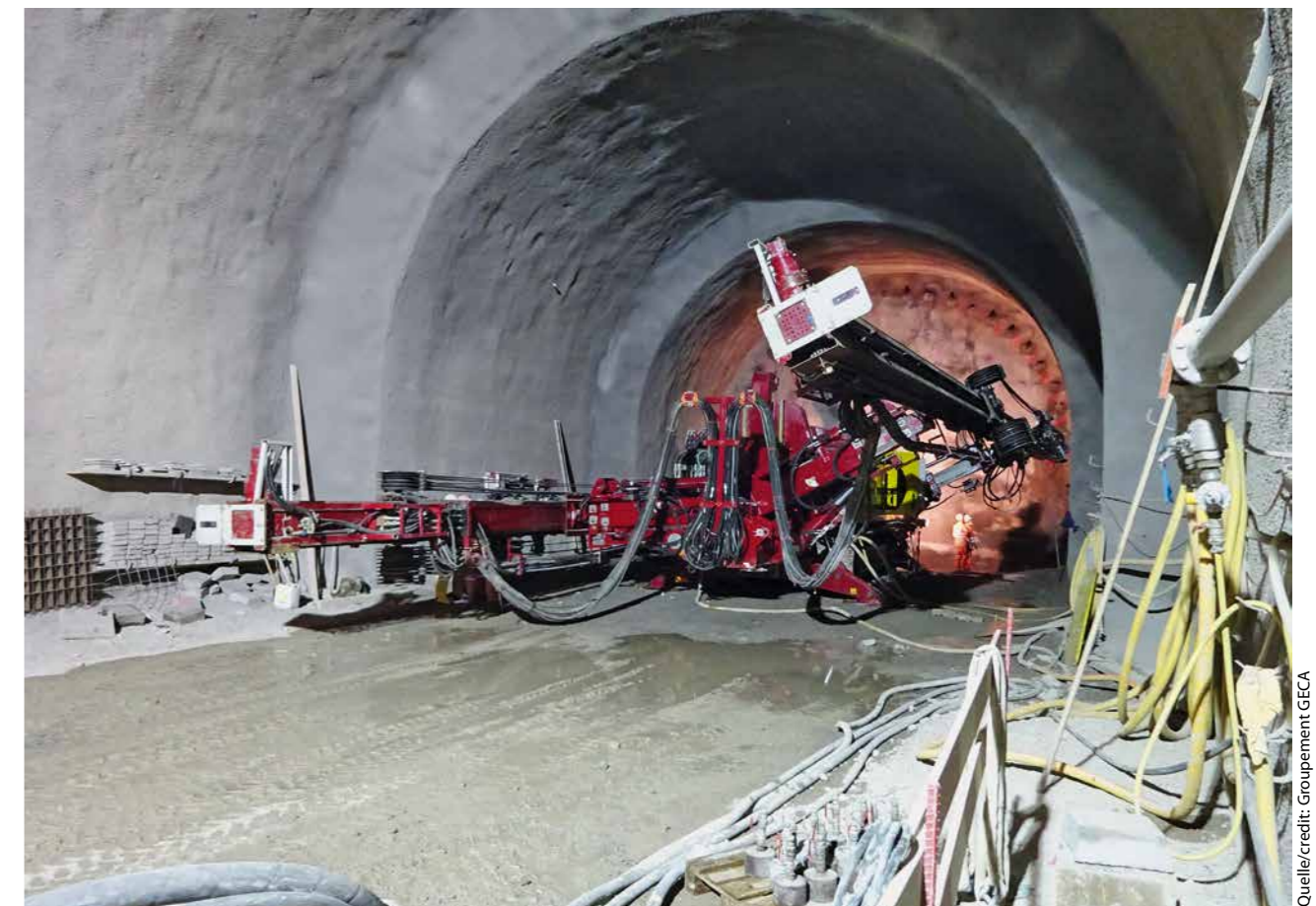
Due to the low tunnelling rate of advance of approx. 1.3 m per working day, which is typical for this tunnelling method, counter-driving from the north portal was envisaged as early as the planning phase. This was commenced in September 2014 and comprised a total of 67 pipe roofing stages, or 667 m, as far as the main breakthrough.

The total length of a normal excavation stage was 10 m. The pipe roofing, drilled in a fan-shaped formation at an angle of approx. 7°, resulted in a variable excavated area between 110 m² at the beginning of the stage and 140 m² at the end of the stage. The respective excavation rounds were 1.25 m long. In two-shift operations, two rounds per working day were possible, i.e. one stage could be excavated in four working days. The subsequent boring and grouting of the auxiliary construction measures additionally required approx. four working days (see Fig. 6).



5 Durchschlag zur Haltestelle Champel-Hôpital
Breakthrough to Champel-Hôpital station

Quelle/credit: CEVA et Groupe 13.76, http://www.ceva.ch



6 Rohrschirm- und Brustankerbohrgerät des Südvortriebs
South heading pipe roofing and face bolting drill rig

Quelle/credit: Groupement GECA

de. Der Ausbruch erfolgte in Abschlügen von jeweils 1,25 m Länge. Im Zweischichtbetrieb konnten zwei Abschlüge pro Arbeitstag realisiert, d. h., eine Etappe konnte in vier Arbeitstagen ausgebrochen werden. Das anschließende Bohren und Injizieren der Bauhilfsmassnahmen bedurfte jeweils weiterer ca. vier Arbeitstage (siehe Bild 6).

Ein einfacher Rohrschirm bestand aus 51 im Achsabstand von 40 cm angeordneten Stahlrohren. Die 15 m langen Rohre wiesen einen Durchmesser von 140 mm und eine Wandstärke von 10 mm auf und wurden über vier Ventile pro Laufmeter injiziert. Auf eine Rohrkupplung wurde verzichtet, wobei bereits die Ausschreibungsunterlagen aus Steifigkeitsgründen maximal eine Kupplung pro Rohr zuließen. Die Brustsicherung erfolgte systematisch durch 36 bis 47 subhorizontale Anker. Die 20 m langen GFK-Anker wurden analog zum Rohrschirm vor Beginn einer Ausbruchtappe gebohrt [2].

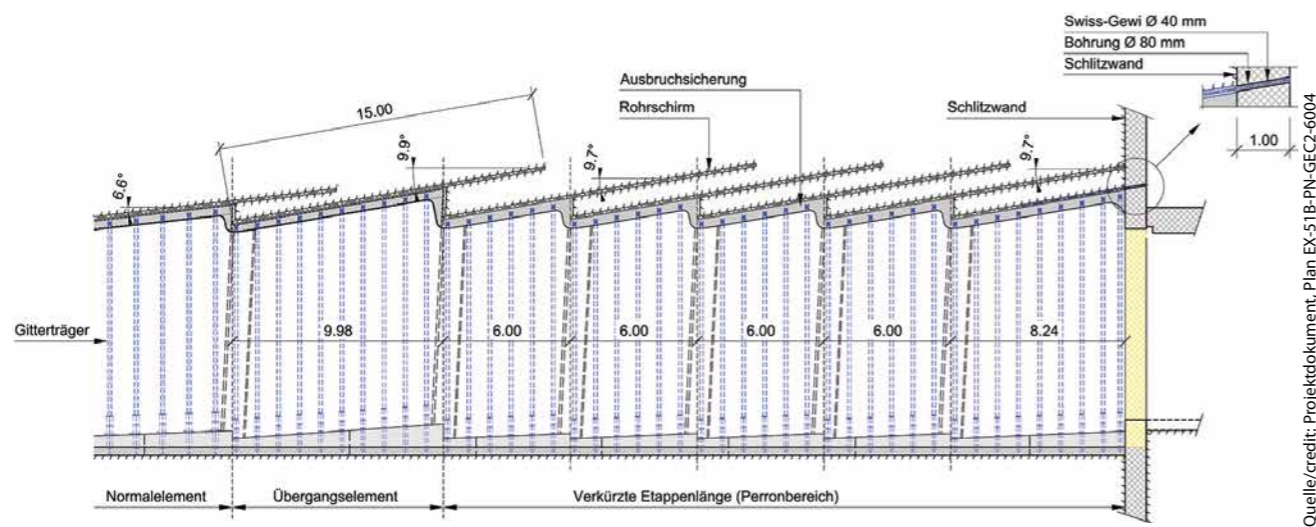
Die Sofortsicherung von Ausbruchrand und Ortsbrust bestand aus in zwei Phasen aufgebrachtem Stahlfaserspritzbeton, in dessen Schutz ein Gitterträger 4G-220/30 auf einem vorfabrizierten Stahlfuss versetzt wurde. Vor dem nächsten Abschlag wurden weitere Lagen Stahlfaserspritzbeton bis zur Endstärke von 44 cm aufgebracht. Der Ring-

A simple pipe umbrella consisted of 51 steel tubes installed at 40 cm centres. The 15 m long pipes have diameters of 140 mm and wall thicknesses of 10 mm, and were grouted using four valves per running metre. A pipe coupling was dispensed with, while the tender documents allowed a maximum of one coupling per pipe to preserve stiffness. Systematic face stabilisation was ensured using 36 to 47 subhorizontal anchors. Analogous to the pipe umbrella, the 20 m long GRP anchors were drilled prior to each excavation stage [2].

Immediate protection of the excavation perimeter and the face consisted of steel fibre-reinforced shotcrete applied in two phases, under the protection of which a 4G-220/30 lattice girder was placed on a prefabricated steel foot. Prior the next round, additional layers of steel fibre-reinforced shotcrete were applied to give a final thickness of 44 cm. Ring closure was carried out by means of a wide-flange steel section (HEB 260) at a distance of about 3 m to the face.

3.3 Élargie Zone (Enlarged Cross-Section) and Crossing through the Station

The southern section of Champel-Hôpital station was situated directly beneath an existing residential building and therefore could not be executed using the cut and cover top down method. In order to facilitate the required platform



7 Profilaufweitung und verkürzte Etappenlänge in der Zone élargie
Profile expansion and reduced stage length in the élargie zone

schluss erfolgte mittels eines Stahlprofils HEB 260 in einer Distanz von ca. 3 m zur Ortsbrust.

3.3 Zone élargie und Querung der Haltestelle

Der südliche Teil der Haltestelle Champel-Hôpital kam direkt unter einem bestehenden Wohngebäude zu liegen und konnte nicht in Deckelbauweise erstellt werden. Um die geforderte Perronlänge von 220 m zu ermöglichen, musste somit das bergmännische Ausbruchprofil in der sogenannten Zone élargie auf knapp 30 m Länge vergrößert werden.

Ursprünglich war vorgesehen, aus der Haltestelle, d. h. entgegen der Vortriebsrichtung, einen doppelten Rohrschirm zu erstellen. Dies erwies sich jedoch aufgrund von terminlichen Abhängigkeiten im Bauablauf der Haltestelle als schwierig: Das Bohren und Injizieren des Rohrschirms hätte eine grosse Aussparung in der Decke über der Fahrbene erfordert und so den Baufortschritt der Haltestelle verzögert. Um zusätzlich das bautechnisch schwierige Kreuzen der Rohrschirme aus der Haltestelle bzw. aus dem ankommenden Vortrieb direkt unter dem bestehenden Gebäude zu vermeiden, wurde entschieden, sämtliche für die Zone élargie erforderlichen Arbeiten aus dem Vortrieb zu realisieren.

Um die notwendige Profilaufweitung auf maximal 160 m² zu erreichen, musste der Rohrschirm in einer Übergangsetappe steiler als im Regelfall gebohrt werden. Diese Bohrneigung wurde anschliessend beibehalten, jedoch gleichzeitig die Etappenlänge von 10 auf 6 m verkürzt, um einen durchgehenden doppelten Rohrschirm zu erhalten (siehe Bild 7). Mit dieser Massnahme konnten die Setzungen des darüberliegenden Gebäudes trotz des grossen Ausbruchquerschnitts auf wenige Millimeter begrenzt werden.

Für den sicheren Durchschlag zur Haltestelle musste schliesslich die letzte Rohrschirmetappe in die Schlitzwand eingebunden werden. Da ein direktes Einbohren des Rohrschirms

length of 220 m, the tunnel profile to be excavated in what is known as the élargie zone had to be increased to almost 30 m in length.

The original plan was to install a double layer pipe umbrella from within the station, i.e. in the opposite direction to tunnelling. However, this proved difficult as a result of scheduling constraints in the station construction workflow: drilling and grouting the pipe umbrella would have required a large opening in the roof above the train level and thus delayed the station's construction progress. In order to avoid executing the additional and structurally complex intersecting of the pipe umbrellas directly beneath the existing building from within the station or the incoming tunnel, it was decided to implement all the work required for the élargie zone from within the tunnel.

In order to achieve the required profile widening to a maximum of 160 m², the pipe umbrella needed to be drilled at a greater angle than is normally the case in a transitional stage. This angle was then maintained, but simultaneously shortened the stage length from 10 m to 6 m, to obtain a continuous double layer pipe umbrella (see Fig. 7). Thanks to this measure, it was possible to limit the settlements of the overlying building to a few millimetres, despite the large excavation cross section.

The final pipe roofing stage had to be integrated into the diaphragm wall for safe breakthrough to the station. Since direct drilling of the pipe umbrella in the heavily reinforced concrete was not possible, the diaphragm wall was penetrated from the tunnel by coring through the umbrella pipes. The load-bearing connection was created from within the station by inserting a SwissGewi rod through the core into the steel pipe.

Due to the smaller excavation cross-section in comparison to the élargie zone, it was possible to work from within

in den stark bewehrten Beton nicht möglich war, wurde die Schlitzwand aus dem Vortrieb mittels Kernbohrungen durch die Rohrschirmrohre durchdrungen. Die Erstellung des kraftschlüssigen Auflagers erfolgte aus der Haltestelle durch Einführen eines SwissGewi-Stabes durch die Kernbohrung in das Stahlrohr.

Am nördlichen Ende der Haltestelle waren aufgrund des im Vergleich zur Zone élargie kleineren Ausbruchquerschnitts Arbeiten aus der Haltestelle ohne grössere Behinderungen des Bauablaufs möglich. Bereits vor dem Durchschlag des Südvortriebs zur Haltestelle wurden deshalb die Bauhilfsmassnahmen der ersten Ausbruchtappe erstellt und die Schlitzwand abgebrochen. Auf den folgenden 30 Vortriebsmetern wurde in wiederum auf 6 m verkürzten Etappen ein die prognostizierte Setzungsmulde überspannendes Gebäude ohne nennenswerte Deformationen unterquert, um anschliessend für die restliche Vortriebsstrecke auf den standardmässigen Sicherungstyp zu wechseln.

3.4 Optimierung der Sicherungs- und Bauhilfsmassnahmen

Im Laufe der Ausführung wurde das Vortriebskonzept mehrfach angepasst, jedoch nicht grundlegend verändert. So war für den Ausbruch im Bereich des Nordportals mit in der Rückzugsformation liegender Firste die Ergänzung des Rohrschirms mittels subhorizontaler Jetting-Säulen vorgesehen. Auf Letztere wurde jedoch aufgrund von Vorversuchen und festgestellten Suspensionsaustritten an der Oberfläche verzichtet. Stattdessen wurde entschieden, einen doppelten Rohrschirm auszuführen.

Ende 2014 waren ein Unfall im Brustbereich und ein anschliessender Arbeitsunterbruch Anlass für intensive Diskussionen bezüglich des Vortriebskonzepts. Schliesslich wurde entschieden, einen Teil der im Projekt als sporadisch vorgesehenen Bauhilfsmassnahmen systematisch auszuführen: Im Ulmenbereich wurden zusätzliche Rohre mit vergrössertem Achsabstand vorgesehen und der Grad der Bruststützung erhöht. Auf Vorschlag der Unternehmung konnte im Gegenzug nach ergänzenden statischen Abklärungen die Abschlagslänge von ursprünglich 1,00 auf 1,25 m erhöht werden. Diese Massnahme hat sich insbesondere in Bezug auf die Vortriebsleistung als vorteilhaft erwiesen. Als weitere Massnahme zur Reduktion der Aufenthaltszeit im unmittelbaren Brustbereich wurde für den Einbau des Sohlsprenners ergänzend zur maximalen Ringschlussdistanz ein minimaler Abstand zur Ortsbrust definiert.

4 Deformationsüberwachung im innerstädtischen Umfeld

4.1 Deformationsprognose

In Anbetracht der dichten Überbauung stellte die konsequente Begrenzung von Oberflächensetzungen eine zentrale Projektanforderung dar. In der Planung erforderte dies nebst der Wahl eines geeigneten Vortriebsverfahrens in

the station without major impediments to the construction workflow at the northern end of the station. Therefore, before the southern tunnel breakthrough to the station, the first excavation stage's auxiliary construction measures were implemented and the diaphragm wall demolished. During the following 30 m of tunnelling, a building that spanned the projected settlement depression was passed beneath in stages shortened to 6 m, without appreciable deformations, and then the standard stabilisation type employed for the remaining tunnel section.

3.4 Optimisation of Stabilisation and Auxiliary Construction Measures

The driving concept was adapted several times in the course of execution, but not fundamentally altered. For example, in the region of the north portal crown, with the apex in the glacial retreat formation, it was planned to implement the pipe umbrella by means of subhorizontal jet-grouting columns to facilitate excavation. As a result of preliminary testing, however, the latter was dispensed with due to observed slurry escape to the surface. Instead, it was decided to employ a double pipe umbrella.

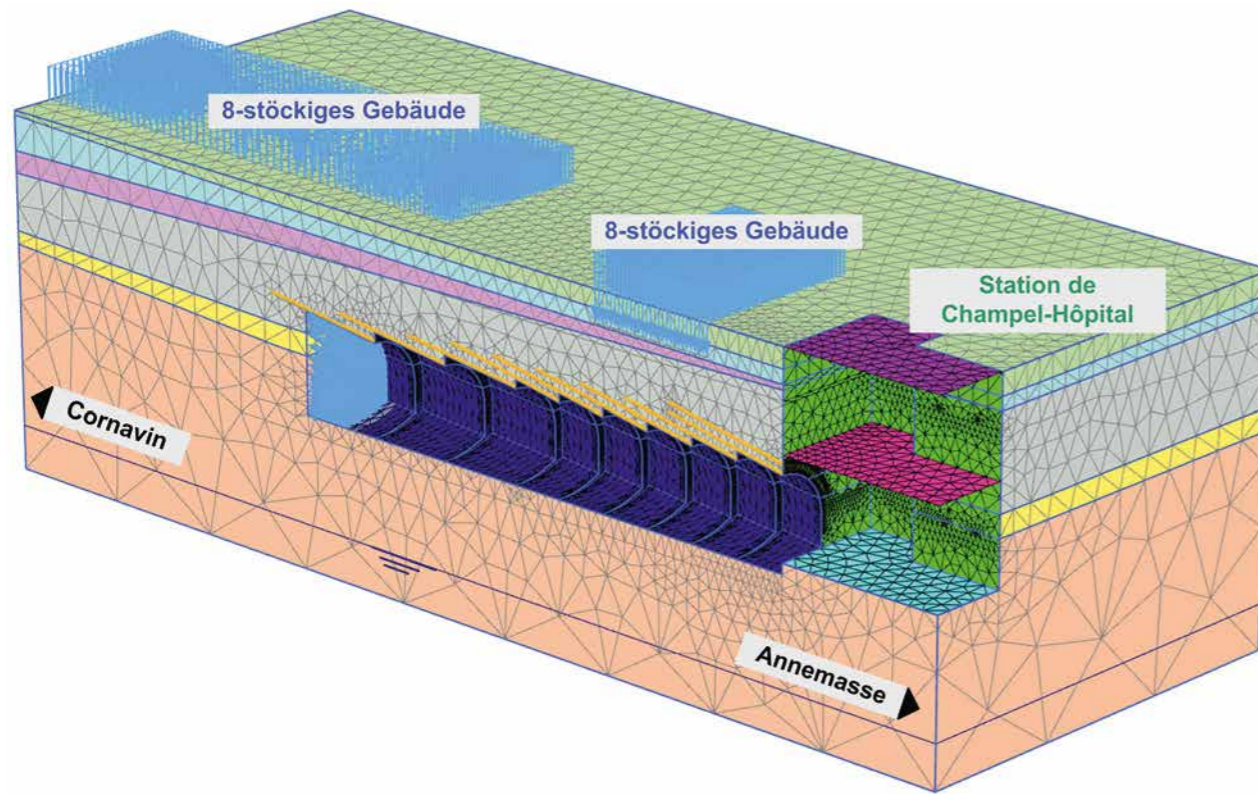
In late 2014, an accident at the face and a subsequent work stoppage gave rise to intensive discussions regarding the tunnelling concept. Eventually, it was decided to systematically implement some of the project's auxiliary construction measures, originally planned as sporadic measures: in the sidewall area, additional pipes with an increased distance to one another were planned and the degree of face support increased. In return, at the suggestion of the contractor and following additional structural analyses, the round length was increased from the original 1.00 to 1.25 m. This measure proved to be particularly advantageous in terms of tunnelling performance. As a further measure to reduce the residence time in the immediate face area, a minimum distance to the face was defined for an invert strut installation in addition to the maximum ring closure distance.

4 Deformation Monitoring in an Urban Environment

4.1 Deformation Prediction

In view of the dense building cover, the strict limitation of surface settlements represented a central project requirement. In an initial planning step, this required prediction of the deformation anticipated as a result of tunnelling, in addition to the choice of a suitable tunnelling method.

Because of the large damage potential in the urban environment, deformation prediction by means of detailed, three-dimensional finite-element models was considered expedient and necessary (see Fig. 8). By replicating tunnel excavation as realistically as possible, the aim was to estimate the absolute and differential building settlements as a function of the tunnelling progress. After carrying out parameter studies and comparing them with empirical analysis



Quelle/credit: Projektdokument, Bericht EX-53B-RA-GEC2-4364

8 Beispiel eines dreidimensionalen FE-Berechnungsmodells
Example of a three-dimensional FE analysis model

in einem ersten Schritt die Prognose der aufgrund des Tunnelvortriebs zu erwartenden Deformationen.

Aufgrund des grossen Schadenpotenzials im innerstädtischen Umfeld wurde die Deformationsprognose mittels detaillierter, dreidimensionaler Finite-Elemente-Modelle als zweckmässig und notwendig beurteilt (siehe Bild 8). Durch die möglichst realitätsgetreue Nachbildung des Tunnelausbruchs sollten hierdurch die absoluten und differentiellen Setzungen der Gebäude in Abhängigkeit vom Vortriebsstand abgeschätzt werden können. Nach der Durchführung von Parameterstudien sowie einem Vergleich mit empirischen Berechnungsmethoden konnte so die erwartete Bandbreite der Oberflächensetzungen als Grundlage für die Beurteilung der daraus resultierenden Auswirkungen bereitgestellt werden [3].

4.2 Boden-Bauwerks-Interaktion

Die überlagernden Gebäude wiesen entsprechend ihrem jeweiligen Baujahr sehr unterschiedliche Fundamentverhältnisse auf. Nach Zuordnung zu einer Klasse der Schadenanfälligkeit wurden den Gebäuden vorerst anhand eines vereinfachten Ansatzes entsprechende Grenzwerte bezüglich absoluter und differentieller Setzung zugeordnet. Nach Abgleich mit der Deformationsprognose konnten die Gebäude so in Risikoklassen hinsichtlich der erwarteten Schadensbilder eingeteilt werden.

Diejenigen Gebäude, welche in der vereinfachten Analyse einem nicht akzeptierten Risiko zugeordnet worden waren,

methods, the anticipated range of surface settlements could be provided as the basis for assessing the resulting effects [3].

4.2 Soil-Structure Interaction

The overlying buildings had very different foundations, depending on their year of construction. After being assigned to a damage susceptibility class, the buildings were initially allocated appropriate limit values with regard to absolute and differential settlements based on a simplified approach. After comparison with the predicted deformation, the buildings could be classified into risk classes with regard to the anticipated damage patterns.

Those buildings that had been assigned an unacceptable risk in the simplified analysis, were subsequently subjected to an in-depth structural analysis, e.g. by means of the finite-element method. The aim here was to more reliably specify the risk class and propose risk-minimising measures, if necessary. In the case of the Tunnel de Champel, the buildings could be assigned to a lower risk class in all examined cases and the deformation limits adjusted accordingly.

4.3 Monitoring Results

Convergence measurements were carried out in the tunnel during each excavation stage. The desired low-deformation, load-bearing behaviour of the excavation stabilisation was confirmed by the maximum measured convergence of 4 mm. In addition, subhorizontal inclinometers and reverse-head extensometers were installed in the pipe umbrella at the face.

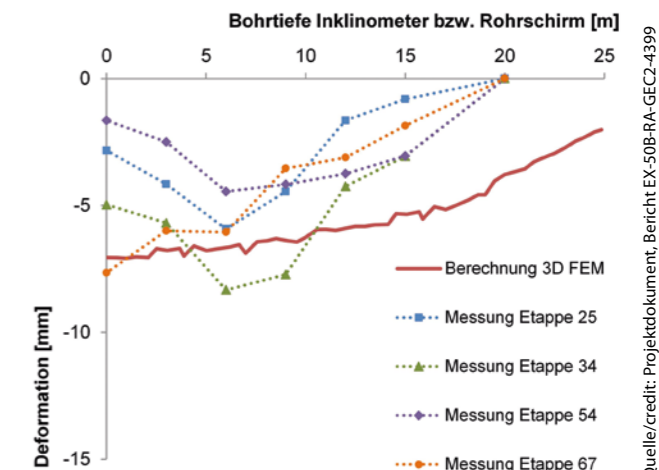
wurden anschliessend einer vertieften Tragwerksanalyse, z.B. mittels der Finite-Elemente-Methode, unterzogen. Diese hatte zum Ziel, die Risikoklasse zuverlässiger festzulegen und bei Bedarf risikomindernde Massnahmen vorzuschlagen. Im Falle des Tunnel de Champel konnten so in allen untersuchten Fällen die Gebäude einer tieferen Risikoklasse zugeordnet und die Deformationsgrenzwerte entsprechend angepasst werden.

4.3 Messergebnisse

Im Tunnel wurden in jeder Ausbruchtappe Konvergenzmessungen durchgeführt. Das angestrebte deformationsarme Tragverhalten der Ausbruchsicherung konnte durch die maximal gemessene Konvergenz von 4 mm bestätigt werden. Ergänzend wurden im Rohrschirm subhorizontale Inclinometer sowie Reverse-Head-Extensometer in der Ortsbrust installiert. Die Inclinometer zeigten Rohrschirmdeformationen von mehrheitlich 10 bis lokal 25 mm (siehe Bild 9). Die mittels der RH-Extensometer aufgezeichneten, dem Vortrieb vorausgehenden Deformationen waren auf 3 bis 10 mm begrenzt und konnten so das Baugrundmodell bzw. die hohe Steifigkeit insbesondere der alten Schotter bestätigen.

An der Oberfläche wurden die im Einflussbereich des Tunnelvortriebs liegenden Gebäude mittels manueller und automatisierter Messungen überwacht. Zusätzlich wurden entlang den Tunnel querender Strassen Messquerschnitte zur Bestimmung der Setzungsmulde eingerichtet. In den Abschnitten, in welchen das Ausbruchprofil eine genügende Überlagerung durch die alten Schotter bzw. die Moräne aufwies, lagen die gemessenen Setzungen zwischen 0 und 10 mm und damit unter den prognostizierten Werten (siehe Bild 10). Der Ortsbrust vorausgehende Setzungen beschränkten sich auf ca. einen Tunneldurchmesser und entsprachen so den Messresultaten der RH-Extensometer.

Grössere Oberflächensetzungen konnten lediglich auf den ersten 200 m Vortrieb ab dem Nordportal beobachtet werden. Hier kam der obere Profilbereich entsprechend der



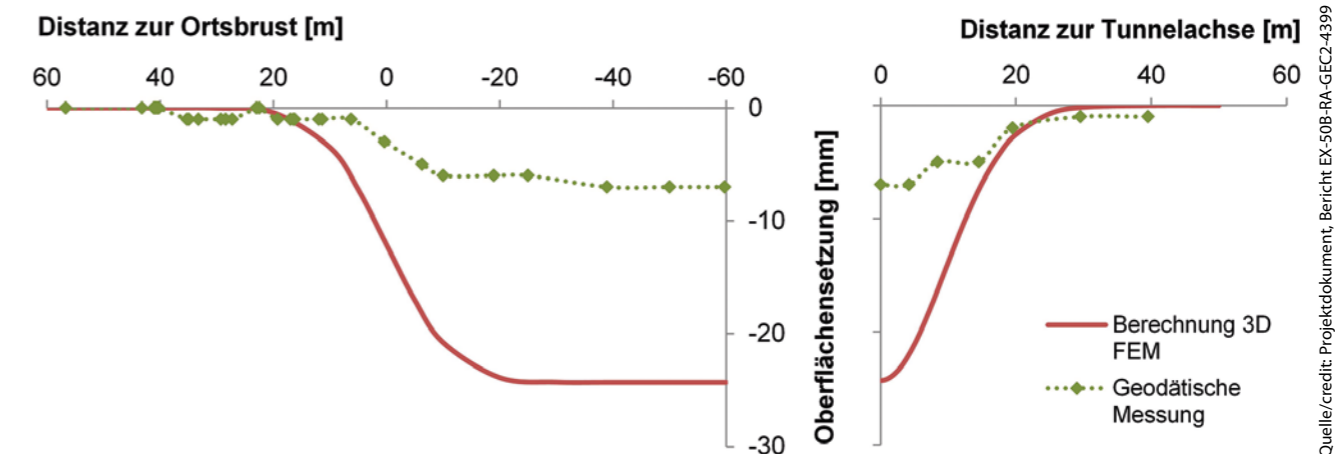
Quelle/credit: Projektdokument, Bericht EX-50B-RA-GEC2-4399

9 Inclinometermessungen im Rohrschirm
Inclinometer measurements in the pipe umbrella

The inclinometers revealed pipe umbrella deformations predominantly between 10 mm and locally 25 mm (see Fig. 9). The deformations in the ground in advance of tunnelling recorded by means of the RH extensometers were limited to between 3 mm and 10 mm, thus confirming the ground model and the high stiffness of the old gravel in particular.

At the surface, the buildings in the tunnelling zone of influence were monitored by means of manual and automated measurements. In addition, measurement sections were established along roads crossing above the tunnel to determine the settlement trough. In the sections in which the excavation profile had sufficient cover by the old gravel or moraine, the measured settlements were between 0 mm and 10 mm and were thus lower than the predicted values (see Fig. 10). Settlements ahead of the face were limited to approximately one tunnel diameter and thus corresponded to the results monitored by the RH extensometers.

Larger surface settlements were only observed in the first 200 m of tunnelling from the north portal. Here, the upper



Quelle/credit: Projektdokument, Bericht EX-50B-RA-GEC2-4399

10 Setzungsmessungen an der Geländeoberfläche
Surface settlement measurements

geologischen Prognose in der Rückzugsformation zu liegen. Die sehr ungünstigen geotechnischen Eigenschaften dieser vorwiegend tonigen Einheit, kombiniert mit der minimalen Überlagerung von nur 6 m, hatten eine auf 10 m ab Tunnelachse begrenzte Setzungsmulde sowie eine Maximalsetzung von 60 mm zur Folge. Dieser Wert entsprach ziemlich gut den prognostizierten Werten. Zusätzlich verursachte das Bohren des in diesem Bereich vorgesehenen doppelten Rohrschirms durch Verdrängung des tonigen Bohrguts eine temporäre Hebung der Oberfläche.



11 Ortsbrustaufnahme in der Zone élargie
Face in the élargie zone

5 Fazit

Aufgrund der nunmehr gewonnenen Erfahrungen kann festgehalten werden, dass sich die ausführlichen geologischen Untersuchungen als sehr wertvoll erwiesen haben. Auch wenn sich deren Realisierung im innerstädtischen Umfeld häufig als schwierig erwiesen hat, bildeten sie die Grundlage für eine nahezu lückenlose geotechnische Beurteilung. Durch detaillierte Analysen der für den Vollausschuss massgebenden Ortsbruststabilität sowie die Prognose der Auswirkungen des Tunnelvortriebs auf die bestehende Infrastruktur konnte so bereits in der Planungsphase ein dem sensiblen Umfeld angepasstes Vortriebsverfahren gewählt werden. Unerlässlich blieb dennoch ein ausgedehntes Messprogramm zur Überprüfung des Verhaltens von Baugrund und Ausbruchsicherung: Unerwartete Deformationen und ein damit verbundenes Überschreiten der Höchstschersfestigkeit hätten aufgrund des grossen Schadenpotenzials weitgehende Folgen gehabt.

Anlass zu Diskussionen war die Schadenanfälligkeit der überlagernden Gebäude. Rückblickend kann bemerkt werden, dass sich die Anwendung eines mehrstufigen Verfahrens zur Festlegung der Deformationsgrenzwerte bewährt hat. Einer vereinfachten Einteilung in Risikoklassen folgte im Bedarfsfall eine vertiefte Tragwerksanalyse, bei welcher dank des «langsamen» Vortriebs auch bereits Auswertungen der Überwachungsmessungen berücksichtigt werden konnten.

Ebenfalls zu Meinungsverschiedenheiten führten die grossen Ausbruchquerschnitte im Lockergestein (siehe Bild 11). Es kann festgehalten werden, dass sich das geplante Vortriebskonzept ohne grundlegende Veränderung bewährt hat, jedoch durchaus Optimierungen realisiert werden konnten. Zur Erhöhung der Arbeitssicherheit beigetragen haben die Vorgabe einer Mindestdistanz zur Ortsbrust für den Einbau

section of the profile came to rest in the soft retreat formation in accordance with the geological prediction. The highly unfavourable geotechnical properties of this predominantly clayey unit, combined with the minimal cover of only 6 m, resulted in a settlement depression limited to 10 m from the tunnel axis and a maximum settlement of 60 mm. This corresponded well with the predicted values. In addition, drilling the double pipe umbrella planned for this area caused temporary surface heave as a result of displacement of the clayey cuttings.

5 Conclusion

Based on the experience gained here, it can be said that the detailed geological investigations have proved to be extremely valuable. Although their execution in urban areas often proved difficult, they formed the basis for an almost complete geotechnical appraisal. Through detailed analyses of the stability of the face crucial to full excavation and predictions of the effects of tunnelling on existing infrastructure, it was possible to select a tunnelling method adapted to the sensitive environment early in the planning phase. Nevertheless, an extensive monitoring programme for examining the ground and excavation stabilisation response remained indispensable: unanticipated deformations and any associated maximum shear strength violations would have had far-reaching consequences due to the large damage potential.

The susceptibility to damage of the overlying buildings gave rise to discussions. In retrospect, it can be noted that the use of a multi-stage method for determining the deformation limits has proven to be successful. Simplified classification

des Sohlsprengrers sowie die Anordnung von zusätzlichen, im Projekt als sporadisch vorgesehenen Bauhilfsmassnahmen. Hier hat es sich als sehr lohnend erwiesen, dass im Regelprofil bereits ausreichend Platz für ergänzende Massnahmen wie beispielsweise einen doppelten Rohrschirm projektiert war. Die Verlängerung der Abschlagslänge bei entsprechend leichter Verstärkung der Ausbruchsicherung hat sich schliesslich nicht nachteilig auf die Tragsicherheit ausgewirkt und sich durchaus als positiv für das Bauprogramm erwiesen.

Literatur/References

- [1] Ferrari, A.; Witschi, T.; Steiner, W.: 2013. CEVA Tunnel de Champel – 1,6 km innerstädtischer Tunnelvortrieb im Lockergestein. Swiss Tunnel Congress 2013. Genf 2013.
- [2] Ferrari, A.; Witschi, T.: 2015. Tunnel de Champel: Herausforderung in der Stadt Genf. Kolloquium Bauhilfsmassnahmen im Tunnelbau. Zürich 2015.
- [3] Witschi, T.: 2013. Setzungsprognosen mittels der FE-Methode am Beispiel des CEVA Tunnel de Champel. Geotechnik Schweiz. Herbsttagung 2013: FEM in der Geotechnik. Biel 2013. Abstracts, 69–76.

into risk classes was followed by a detailed structural analysis, where necessary, in which, thanks to the 'slow' tunnelling, analyses of the monitoring measurements could also be taken into consideration.

The large excavation cross-sections in soil also led to differences of opinion (see Fig. 11). It can be said that the planned tunnelling concept has proved to be successful without fundamental modifications, but that optimisation was also possible. Stipulation of a minimum distance to the face for installation of the invert strut contributed to an increase in occupational safety, as well as the implementation of additional auxiliary construction measures, planned in the project as sporadic auxiliary construction measures. Here, the fact that sufficient space was planned in the standard profile for complementary measures such as a double pipe umbrella, for example, proved to be highly advantageous. The extension of the round length with corresponding minor reinforcement of the excavation stabilisation, finally, did not adversely affect bearing capacity and proved to be quite positive for the construction programme.

PROJEKTDATEN

Bauherr
Projet CEVA, 1201 Genève

Planung, Oberbauleitung und Bauleitung
Groupement GECA
• B+S AG, 3000 Bern
• Stucky SA, 1020 Renens
• edms SA, 1213 Petit Lancy

Bauausführung
Consortium Tunnel de Champel
• Marti Construction SA, 1217 Meyrin
• Marti Tunnelbau AG, 3302 Moosseedorf

PROJECT DATA

Client
Projet CEVA, 1201 Genève

Planning, contract management and site management
Groupement GECA
• B+S AG, 3000 Bern
• Stucky SA, 1020 Renens
• edms SA, 1213 Petit Lancy

Construction
Consortium Tunnel de Champel
• Marti Construction SA, 1217 Meyrin
• Marti Tunnelbau AG, 3302 Moosseedorf

Nicolas Deschamps, ingénieur en chef des ponts et chaussées, BG Ingénieurs Conseils, Ivry-sur-Seine/F

Le Grand Paris Express

Essais d'étanchement et étude de la géothermie

La Société du Grand Paris, chargée de la construction de 200 km de nouvelles lignes de métro automatique presque entièrement souterraines, demande à ses ingénieries à la fois la maîtrise des risques techniques et le développement des innovations, notamment en matière d'écoconception. Deux exemples illustrent cette démarche, le puits d'essai d'étanchement et les recherches en matière de géothermie.

The Grand Paris Express

Soil Permeability Reduction Techniques and Study of Geothermal Energy

The Société du Grand Paris, which commissioned the construction of 200 km of new automated metro lines almost entirely underground, asked its engineering teams both to manage technical risks and also to develop innovative solutions, particularly with regard to environmentally friendly design. Two examples illustrate how this requirement has been met: testing soil permeability reduction techniques executed in the scope of an experimental shaft, and research into geothermal energy.

1 Introduction

1.1 Un projet déjà présenté au STC

Philippe Yvin, précédent président du directoire de la Société du Grand Paris (SGP), a déjà présenté, lors de l'édition 2016 du Swiss Tunnel Congress (STC), la nature du projet du Grand Paris Express (GPE) et ses principaux enjeux. Il n'est pas opportun de revenir sur les détails de son exposé d'il y a deux ans, consultables dans les actes de ce congrès [1] et, dans leur très grande majorité, encore d'actualité aujourd'hui.

1.2 Les deux sujets développés

La SGP demande à l'ensemble des ingénieries mobilisées sur le projet de respecter un programme précis et ambitieux, en particulier sur deux axes forts : la maîtrise des risques techniques et l'innovation en matière d'écoconception.

Les deux sujets développés ici fournissent chacun un exemple de la manière dont ces axes sont traités.

Le puits d'essai d'étanchement réalisé à Aulnay a fourni à la SGP une démonstration de l'efficacité comparée des deux techniques testées dans l'horizon fréquent et délicat des sables de Beauchamp, à savoir les colonnes de jet-grouting et la congélation des sols.

L'étude des géostructures thermiques a permis à la SGP d'affiner sa stratégie vis-à-vis de l'opportunité de recourir à la géothermie pour optimiser l'efficacité énergétique du GPE.

1 Introduction

1.1 A Project Previously Presented to the STC

Philippe Yvin, former chair of the board of management of the Société du Grand Paris (SGP), has previously presented the details and the main challenges of the Grand Paris Express (GPE) project at the 2016 Swiss Tunnel Congress (STC). Topics presented in 2016 will not be further discussed in this report but can be found in his report for this congress [1] and are, for the most part, still relevant today.

1.2 The Two Issues Covered

The SGP requested that all engineering teams involved in the project adhere to a precise and ambitious plan, considering two key areas in particular: the management of technical risks and the development of innovation in terms of environmentally friendly design.

The two subjects covered in this article provide an example of how these requirements were met:

- The testing shaft at Aulnay provided the SGP with a demonstration of the comparative efficiency of two techniques to reduce soil permeability in order to excavate in safe conditions. The challenging ground conditions selected were the commonplace yet sensitive layers of the Beauchamp sands. The two methods tested at this location were jet-grouting and ground freezing.
- The study of thermal geostructures allowed the SGP to refine its strategy with regard to the potential of exploiting geothermal energy to improve the GPE's energy efficiency.

Der Grand Paris Express Abdichtungsprüfungen und Geothermie-Studie

Der Grand Paris Express umfasst einerseits die Verlängerung der bestehenden U-Bahn-Linien 11 nach Osten und 14 nach Norden und Süden sowie als Umfahrung und zur Erschließung der strategischen Stadtteile von Paris den Neubau der Linien 15, 16, 17 und 18. Gelenkt wird dieses aussergewöhnliche Projekt, an dem zahlreiche Bauunternehmen und Architekturbüros beteiligt sind, durch eine vom französischen Staat geschaffene öffentliche Anstalt. Die ersten Bauarbeiten haben 2014 begonnen für eine schrittweise Inbetriebnahme zwischen 2020 und 2030. Die Bewältigung der technischen Risiken sowie die Umweltverträglichkeit stehen im Mittelpunkt des Projekts.

Il progetto Grand Paris Express Prove di tenuta all'acqua e studio della geotermia

Il Grand Paris Express è un progetto che prevede, da una parte, il prolungamento delle linee metropolitane 11 ad est e 14 a nord e sud e, dall'altra parte, la costruzione delle nuove linee 15, 16, 17 e 18 ad anello attorno a Parigi, per servire i quartieri strategici della metropoli. Lo stato francese ha creato un ente pubblico dedicato che sovrintende alle fasi di questo progetto ciclopico, che coinvolge un gran numero di società di ingegneria e di architettura. I primi lavori sono iniziati nel 2014 e sono previste delle messe in servizio scaglionate fra il 2020 e il 2030. La gestione dei rischi tecnici e la progettazione ecocompatibile sono al centro del progetto.

2 Le puits d'essai d'Aulnay

2.1 Objectif de l'expérimentation

La ligne 16 du projet du Grand Paris Express relie les futures gares de Saint-Denis-Pleyel à Noisy-Champs sur 35 km environ. Le profil en long de cette ligne traverse, sur une longue distance de son parcours, la formation meuble, aquifère et sous nappe des sables de Beauchamp. Pour cette raison, il sera nécessaire de procéder au préalable à un traitement d'étanchement du terrain afin de réaliser certains ouvrages de raccordement en souterrain. Pour ce faire, deux techniques ont été proposées par la maîtrise d'œuvre : par jet-grouting et par congélation. Toutefois l'efficacité de ces deux méthodes dans ces horizons reste à démontrer.

Dans ce cadre-là, un puits d'essais a été programmé et réalisé pour le compte de la Société du Grand Paris sur la commune

2 The Aulnay Experimental Shaft

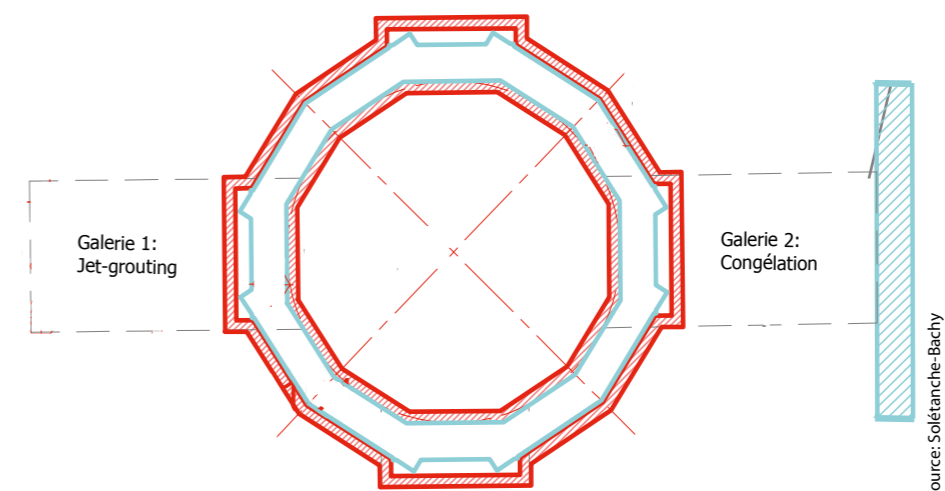
2.1 Aim of the Experiment

Metro Line 16 of the Grand Paris Express project links the future stations of Saint-Denis-Pleyel to Noisy-Champs across approximately 35 km. The geotechnical profile of this line lies mainly within the Beauchamp sands formation, a loose aquiferous layer beneath the water table, for a long section of its tunnel layout. Accordingly, it will be necessary to improve and stabilise the ground in advance of some tunneling works in order to complete the installation of the underground structures. Two techniques have been proposed by the project manager, namely: general soil stability improvement and permeability reduction by jet-grouting and by ground freezing. The efficacy of these two methods in these ground conditions has not previously been clearly demonstrated.

In order to evaluate these two methods, an experimental shaft was realised by Société du Grand Paris in the Aulnay-sous-Bois city for the future Aulnay station. This station is one of the ten metro stations on line 16 where construction of works is managed by Egis and the contractual and technical management is of the responsibility of the SGP project management assistant ARTEMIS.

2.2 Nature of the Conducted Works

The civil engineering works consisted of realising a circular



1 Implantation des galeries de jet-grouting et de congélation du puits d'essai
Trial shaft, jet-grouting and freeze tunnel

d'Aulnay-sous-Bois dans l'emprise de la future gare d'Aulnay, une des dix gares de la ligne 16 dont l'exécution des travaux est sous la direction d'Egis, tandis que la gestion contractuelle et technique est confiée à l'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) ARTEMIS.

2.2 Nature des travaux

Les travaux ont consisté en la réalisation d'un puits en paroi moulée avec deux galeries dans les massifs traités par jet-grouting et par congélation. Une campagne d'essais et de reconnaissances géotechniques et géophysiques s'est déroulée avant, pendant et après la réalisation de l'ouvrage.

Le puits de forme circulaire et de 7,5 m de diamètre intérieur a été excavé à une profondeur d'environ 22,5 m sous le niveau du terrain naturel. Ensuite, les deux galeries en forme de fer à cheval de diamètre excavé d'environ 3 m ont été creusées en méthode conventionnelle sur une longueur d'environ 5 m.

2.3 Contexte géologique

Les couches géologiques traversées ont été identifiées à partir des sondages carottés réalisés dans l'emprise du projet, à savoir (figure 2) :

- remblais (R) ;
- marnes à Pholadomyes (MPH) ;

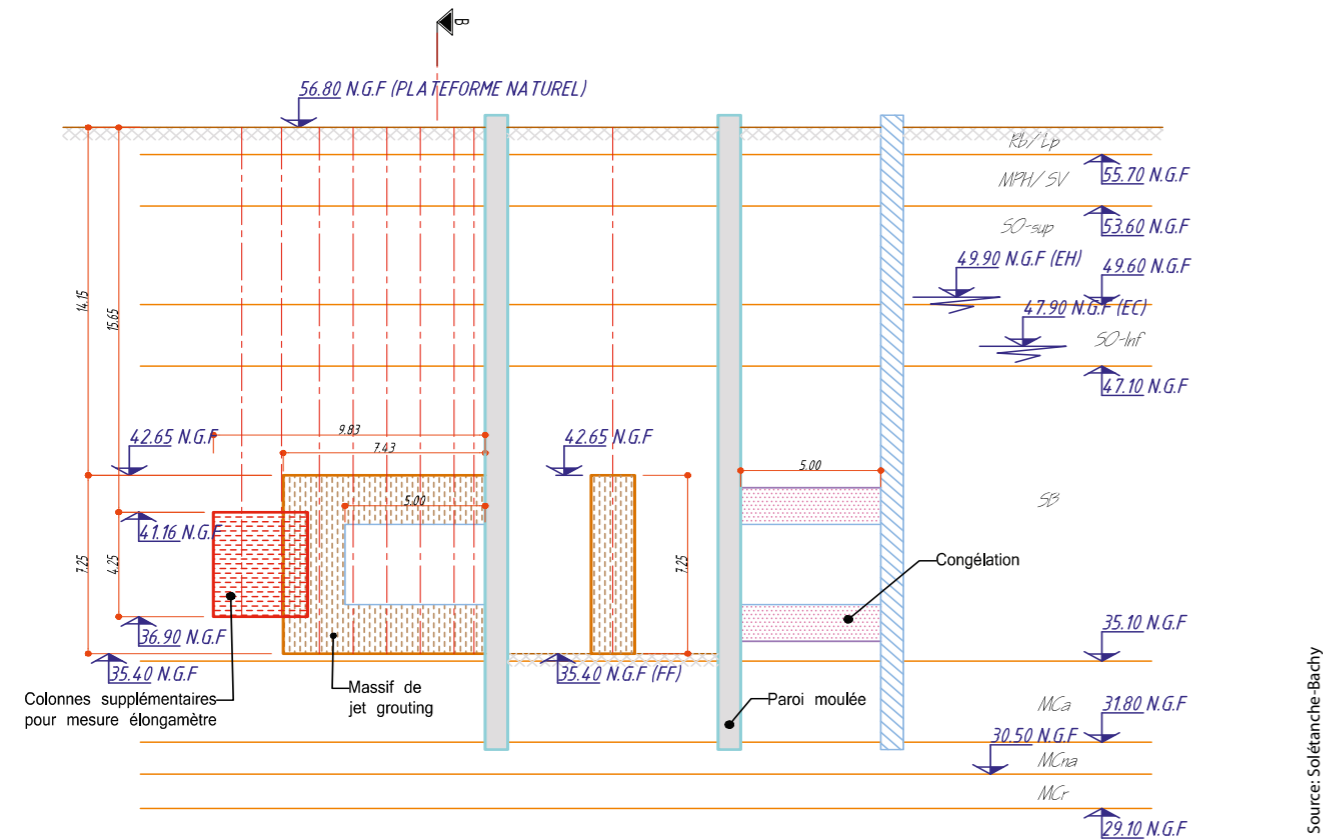
diaphragm wall shaft with two openings excavated to obtain short tunnels located in the sands at the bottom of the shaft. These tunnels were created by excavating through treated soil by jet-grouting columns and freezing ground. A series of tests and geotechnical and geophysical surveys took place before, during and after the works.

The circular shaft had an inner diameter of 7.5 m and a depth of approximately 22.5 m below the surface. At the bottom of the shaft, short horseshoe-shaped tunnels were excavated using conventional tunnelling methods. These had diameters of approximately 3 m and were 5 m in length.

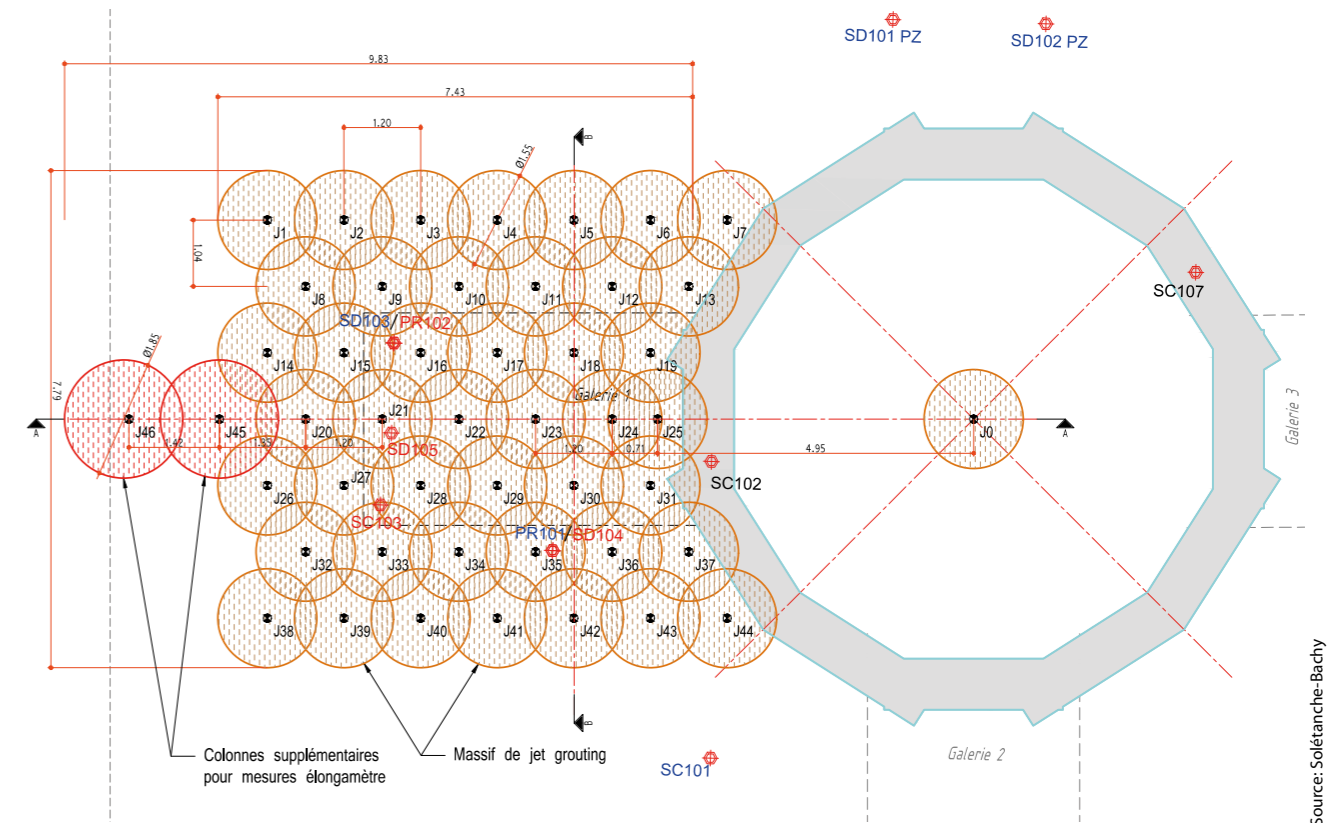
2.3 Geological Context

The identification of the geotechnical layers to be excavated was based on boreholes drilled from the surface. The identified layers consisted of (Fig. 2):

- Backfill (R)
- Pholadomyes marl (MPH)
- Greensand (SV)
- Saint-Ouen limestone (SO)
- Beauchamp sands (SB), slightly clayey, silty fine sands with moderate to good mechanical properties (this layer is the main subject of the study for ground improvement by jet-grouting and ground freezing).



2 Profil en long géologique à Aulnay-sous-bois
Geological longitudinal profile at Aulnay-sous-bois



3 Implantation des colonnes jointives de jet-grouting
Installation of overlapping jet-grouting columns

- sables verts (SV) ;
- calcaire de Saint-Ouen (SO) ;
- sables de Beauchamp (SB), sables fins peu argileux à silts présentant des caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes (cette couche fait l'objet privilégié de l'étude de traitement de terrain par jet-grouting et congélation) ;
- marnes et caillasses (MC) présentant une frange altérée en partie supérieure (la fiche mécanique des parois moulées et l'essentiel de la jupe injectée destinée à limiter les débits d'exhaure en fond de fouille sont situés dans cette couche) ;
- calcaire grossier (CG) dans lequel est ancrée la jupe injectée sur environ 1 m.

Les niveaux de nappe de référence (EB), de chantier et des hautes eaux sont définis respectivement à 10,5 m, 9,9 m et 7,9 m de profondeur sous le niveau du terrain naturel (TN).

2.4 Technique du jet-grouting

Le principe de traitement par jet-grouting consiste à déstructurer un sol en profondeur en mélangeant le sol érodé à un coulis de ciment créant ainsi une enceinte étanchée et renforcée en vue de l'excavation en méthode conventionnelle. Le sol est déstructuré en utilisant un jet de fluide à haute pression (généralement compris entre 20 et 40 MPa) dans le forage en profondeur.

Différentes méthodes de jet-grouting (jet simple, jet double, jet triple) sont utilisées en fonction de l'énergie hydrodynamique.

- Marl and pebbles (MC), the mechanical plug of the diaphragm walls designed to limit dewatering flows at the bottom of the excavation is located in this layer.
- Coarse limestone (CG), into which the wall is anchored by around 1 m.

For design issue, the reference water table (EB), construction period water level and high water levels are set at 10.5 m, 9.9 m and 7.9 m below the level of natural terrain (NT) respectively.

2.4 Jet-Grouting Technique

The principle of ground improvement by jet-grouting requires the injection of a stabilising slurry into the porous ground surrounding a bored hole. The jets both erode the soil in-situ and simultaneously mix it with a grout slurry, creating a stabilised zone through which a tunnel (for example) can be constructed using conventional tunnelling methods. The jets are directed in 360 degrees around the bored hole, thereby creating a 'column' of stabilised ground.

In deep holes the ground is eroded by using a high-pressure fluid jet (pressure generally between 20 and 40 MPa).

Different jet-grouting methods (single, double and triple jet) are used based on the hydrodynamic energy required to erode and mix the ground with a grout slurry.

Column head depth Profondeur de tête de colonne	13 m
Column base depth Profondeur de base de colonne	22 m
Type of jet Type de jet	double
Jet speed Débit Jet	345 l/min
Jet pressure Pression Jet	355 bars
Tempo	12–20 s/pas
Vertical step Pas vertical	2 cm
Rotation speed Vitesse de rotation	10–16 rot./min
Estimated diameter Diamètre estimé	1.84 m–2.18 m

Tableau 1 Paramètres ajustés pour la réalisation des colonnes de jet-grouting

Table 1 Parameters adjusted for the creation of jet-grouting columns

mique nécessaire pour détruire et mélanger le terrain avec un coulis liquide.

Dans le cadre des travaux du puits d'essais, le protocole retenu est celui du jet double. Un plot d'essais composé de quatre colonnes de jet-grouting a été réalisé préalablement afin d'évaluer les paramètres adéquats pour réaliser le massif traité par des colonnes verticales jointives de jet-grouting pour composer un volume de 7 × 7 × 9 m (L × l × h) dans les sables de Beauchamp (figure 3).

Les diamètres moyens des colonnes témoins sont mesurés par une technologie géophysique basée sur les mesures de résistivité du terrain.

Les paramètres indiqués dans le tableau 1 ont été ajustés et utilisés pour réaliser les colonnes jointives du massif traité d'une profondeur d'environ 13 m à 22 m sous le TN (figure 3).

Une galerie de 5 m de longueur a été creusée avec un robot de démolition dans le massif traité avec une cadence de 1 m/jour à l'abri d'un soutènement constitué par des cintres en profilés HEB. Un radier en béton armé a été réalisé à l'avancement du creusement de la galerie. Un blindage a été mis en œuvre entre les cintres.

La galerie a été équipée pour mesurer les déformations axiales, horizontales ainsi que les convergences du rameau pendant et après creusement. Plusieurs essais géotechniques *in situ* ont été réalisés, tandis que des prélèvements de carottes dans les directions verticales et horizontales ont été effectués pour déterminer d'une part les caractéristiques mécaniques du massif traité et d'autre part pour vérifier sa qualité.

As part of the work of the testing shaft, the protocol adopted is that of double jet. A test plot composed of four jet-grouting columns was previously carried out in order to evaluate the adequate parameters to create the solid mass treated by jet-grouting vertical columns to compose a volume of 7 × 7 × 9 m (L×W×H) in the sands of Beauchamp (Fig. 3).

The average diameters of the tested columns were measured using a geophysical technology based on terrain resistivity measurements.

The parameters (Table 1) have been adjusted and used to create the jointed columns body in the treated soil at a depth of around 13 m to 22 m beneath the NT (Fig. 3).

A 5 m long tunnel was excavated in the treated ground with an automated rock breaker at a rate of 1 m per day with a support liner consisting of HEB ring beams. A reinforced concrete invert or slab was cast in place while tunnel excavation is progressing. Timber cladding was placed between the ring beams as tunnel protection.

The tunnel was equipped with tools to measure the axial and horizontal deformation and the convergences during and after excavation. Several in-situ geotechnical tests were conducted while vertical and horizontal core drilling was performed, partly to determine the mechanical features of the treated ground and partly to assess its quality.

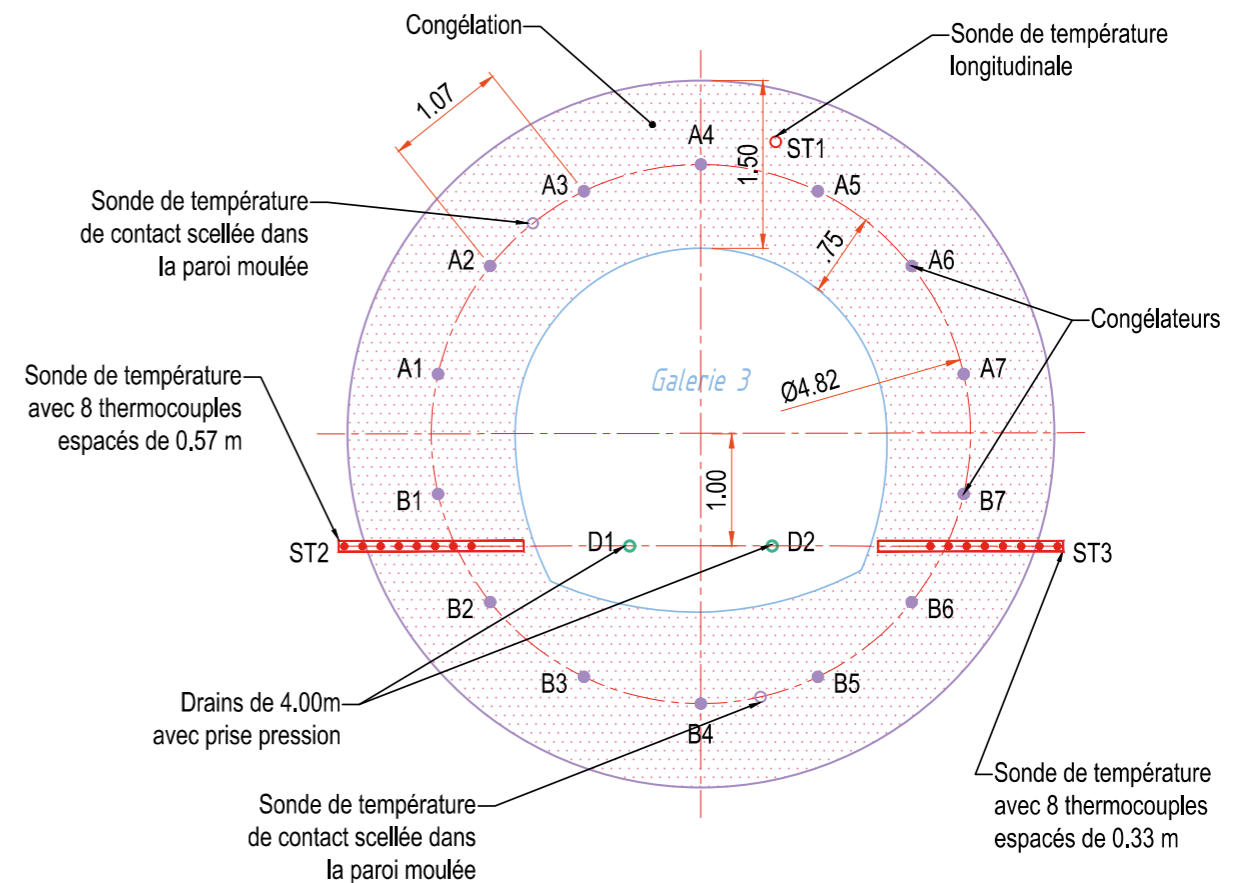
Despite some difficulties encountered during backfilling of the exploratory boreholes in the treated ground, the tunnel excavated through the jet-grout body was constructed without any particular difficulties and the jet-grout columns formed a very sufficient impervious area. Indeed, no significant ingress of water was observed.

2.5 Freezing Technique

The idea behind the freezing technique is to transform the pore water in the ground into ice, creating a tight and resistant link between the grains of soil.

There are different methods for freezing the ground (the method known as 'open', using liquid nitrogen; the method known as 'closed', using brine mixed with a refrigerant; and the method known as 'mixed'). The choice mostly depends on the construction work planning and the freezing phase.

The shaft freezing works began with performing horizontal drillings of a freeze-pipe circuit under airlock from a platform, which was established in the shaft for this purpose. The freezing pipes were then equipped with temperature sensors. Two horizontal and one vertical thermocouple systems were installed in the ground in order to measure and observe the temperature inside the frozen soil mass. The monitoring equipment and drains were also drilled in this tunnel branch (Fig. 4).



4 Implantation des équipements de suivi des températures
Installation of temperature monitoring equipment

Malgré quelques difficultés rencontrées lors du comblement des sondages réalisés dans le massif, la galerie traitée par jet-grouting a été réalisée sans difficulté particulière avec une étanchéité performante. En effet, aucune venue d'eau significative n'a été observée.

2.5 Technique de la congélation

Le principe de la technique de congélation est de transformer l'eau interstitielle du terrain en glace, assurant une liaison étanche et résistante entre les grains du sol.

Différentes méthodes de congélation des sols existent (la méthode dite « ouverte », à l'azote liquide ; la méthode dite « fermée », à la saumure mélangée avec un liquide frigorigène ; et la méthode dite « combinée »). Le choix dépend principalement des durées du chantier et de la phase de congélation.

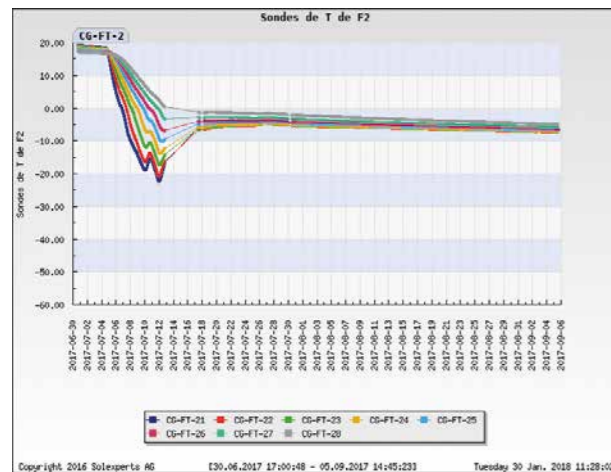
Les travaux de congélation du puits ont démarré par la réalisation des forages horizontaux sous sas à partir d'une plateforme établie dans le puits afin d'installer les tubes de circuit de congélation. Les tubes ont été ensuite équipés par les sondes de température. Deux chaînes de thermocouples horizontaux et une chaîne de thermocouples verticaux ont été installées dans le terrain de manière à mesurer la température du terrain dans l'épaisseur du massif congelé. Les

A combined freezing method was used in this project. In a first stage the ground was frozen by using nitrogen for 14 days. During this phase, a major water pressure increase and a significant cessation of water flow were observed in the drains. This indicated stability of the ring of ice surrounding the tunnel and that water tightening had theoretically been achieved after the first few days following the cooling phase. The second cold sustaining stage initially began with a test run of the freeze plant, cooling the brine to the desired temperatures.

The cold sustain lasted for a total of four months and was maintained throughout the excavation phase with a brine temperature around -25°C. The freeze body target temperature was set at -10°C and was achieved after two months of cold maintenance (Fig. 5). It must be noted that this temperature is not the same throughout the tunnel. Indeed, the temperatures measured at the sidewall area and the invert of the tunnel portal were around -4°C while a temperature of around -15°C was recorded in the centre of the frozen soil body. Excavation works of this tunnel branch then began.

The tunnel was excavated at an advance rate of 0.5 m per day using the same automated rock breaker and the same type of tunnel support structure as used previously in the

Source: Solétanche-Bachy



5 Suivi des températures de la chaîne de thermocouples CG-FT-2
Monitoring the temperature of thermocouple system CG-FT-2

équipements d'auscultations et les drains ont été forés également dans ce rameau (figure 4).

Dans le cadre de ce projet, une méthode de congélation combinée a été utilisée. Le sol a été congelé premièrement par une phase de mise en froid à l'azote pendant 14 jours. Durant cette phase, une importante montée en pression d'eau et un arrêt d'écoulement d'eau significatif ont été observés dans les drains. Cela a mis en évidence une continuité de l'anneau de glace autour de la galerie et donc de l'étanchéité théoriquement atteinte après les premiers jours qui suivent la mise au froid. La phase de l'entretien du froid a démarré tout d'abord par un essai de fonctionnement du groupe frigorifique refroidissant le fluide aux températures désirées.

L'entretien au froid a duré au total quatre mois et il a été maintenu pendant la phase de creusement avec une température du fluide frigorifique d'environ -25°C. La température cible au niveau du massif était fixée à -10°C et a été atteinte après deux mois de maintien du froid (figure 5). Il est

first tunnel treated by jet-grouting. The creep deformation of the frozen soil mass was monitored for a period of three weeks after excavation. No significant deformation has been measured or recorded.

The tunnel treated by freezing technique was completed without any particular difficulties and the inside of the excavated tunnel was completely impervious. No ingress of water was observed.

2.6 Lessons to Be Learned

Regarding soil permeability reduction and waterproofing issue, the performance of the two techniques in the Beauchamp sands was confirmed and the aims of the experimental shaft were achieved (Fig. 6 and 7). Feedback generally showed that the freezing technique is more reliable in terms of making the soil mass more impervious and resistant than that of the treated ground by jet-grouting but remains more expensive (+60% in this case).

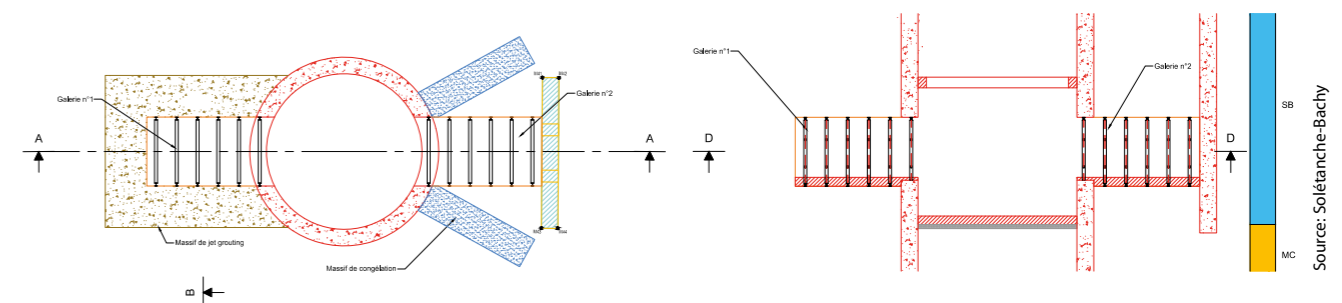
Furthermore, freezing works can only be installed and start once the bottom of the shaft has been reached and the invert or slab has been cast in place.

If the brine freeze plant is not adequately sized, the duration of the cooling must be prolonged. This may have a significant impact on planning and the cost of the project. Other risks to be mentioned are the creep behaviour of the frozen ground (not significant in the case of the Aulnay shaft) and the impact of defrosting caused by failure of one of the freezing devices, causing settlement or a rupture in the tunnel.

In the case of the jet-grouting method, it is important to note that its success depends on the vertical development and overlapping of the columns within the soil mass in order to prevent any ingress of water into the grouted body.



6 Photos des deux galeries traitées par jet-grouting (à gauche) et par congélation (à droite)
Pictures of the two tunnels treated by jet-grouting (left) and freezing (right)



7 Coupes horizontale et verticale du puits d'essai et des deux galeries
Horizontal and vertical cross sections of the trial shaft and the two tunnels

à signaler que cette température n'était pas homogène tout le long de la galerie. En effet, les températures mesurées du côté de l'ouverture de galerie et au fond de galerie étaient de l'ordre de -4°C alors qu'on a pu mesurer une température de -15°C environ au centre du massif. Les travaux de creusement du rameau ont démarré par la suite.

La galerie a été creusée avec le même robot de démolition à la cadence de 0,5 m/jour à l'abri d'un soutènement constitué par des cintres en profilés HEB. La déformation dite de fluage du massif congelé a été suivie après le creusement pendant trois semaines. Aucune déformation significative n'a été mesurée.

La galerie traitée par congélation a été réalisée sans difficulté particulière avec une étanchéité très performante. Aucune venue d'eau n'a été observée.

2.6 Enseignements

La performance des deux techniques d'étanchement dans les sables de Beauchamp a été confirmée et les objectifs du puits d'essai ont été atteints (figures 6 et 7). Le retour d'expérience a généralement montré que la technique de congélation est plus fiable en termes d'étanchéité et de résistance du sol traité, mais reste plus onéreuse (+60% dans ce cas) que la méthode par jet-grouting. De plus, elle ne peut être mise en place qu'une fois atteint le fond de fouille dans les puits.

Si le dispositif d'entretien au froid n'est pas correctement dimensionné, la durée de mise au froid doit être prolongée. Cela peut avoir des impacts non négligeables sur le planning et le coût du projet. D'autres risques peuvent être mentionnés comme le comportement de fluage des terrains congelés (non significatif dans le cas du puits d'Aulnay), ainsi que l'impact de la décongélation causée par le dysfonctionnement d'un des dispositifs de congélation engendrant un tassement ou une rupture de la galerie.

Dans le cas de la technique d'étanchement par jet-grouting, il est important de signaler que sa réussite dépend du bon maintien de la verticalité, ainsi que du recouvrement des colonnes de manière à empêcher la formation d'éventuelle venue d'eau dans le massif.

3 Study into Geothermal Energy

3.1 Context

The SGP has implemented an eco-friendly design procedure comprising several focus points, namely: nuisances control, energy management, material supply management and waste disposal, air quality, minimising impact on groundwater and surface water, as well as maintaining biodiversity.

The environment is a key factor in the overall acceptability of the project and the eco-friendly design procedure must of course be in line with the cost, risk and planning objectives.

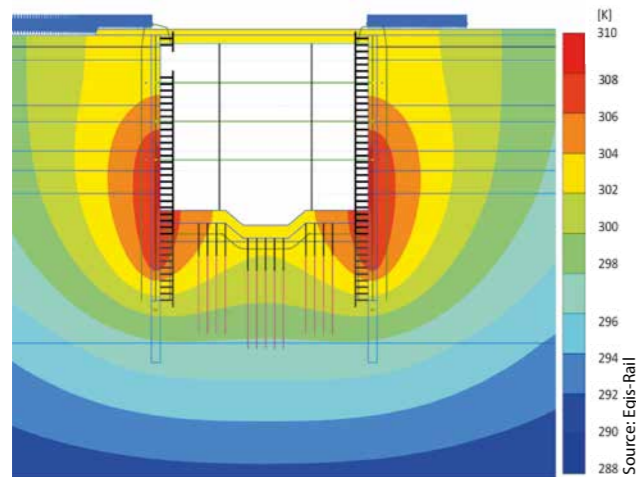
Since October 2013, the SGP has been working with Efficacy, a research and development institute for the city's energy transition bringing together 28 public and private partners, to study the geothermal potential of the underground train main stations of the future GPE network.

Studies have been conducted into the recovery of medium-depth geothermal energy by means of thermoactive structures (diaphragm walls, piles, inverts or raft and tunnels equipped with heat-transfer pipes), not only to meet the Grand Paris stations' energy requirements, but also to benefit surrounding buildings or urban projects that will accompany the arrival of the metro.

3.2 Regulatory Framework

In France, due to their shallow depth and lack of impact on their surroundings, thermal geostructures were recently excluded from the scope of the Mining Code, which represents the regulatory frame of reference for geothermal energy, by Decree No. 2015-15.

Despite the publication of 'Recommendations for the design, planning and implementation of thermal geostructures' [2] by the group CFMS/SYNTEC INGENIERIE/SOFFONS-FNTP in January 2017, French feedback is still poorly documented, particularly on the structural impact that can result from the thermal variation produced during heat exchanges between the ground and heat transfer pipes installed in the geostructures.



8 Répartition de la température dans le modèle d'une gare en été
Temperature distribution modelled on a train station in summer

3 Étude de la géothermie

3.1 Contexte

La SGP a mis en place une démarche systématique d'écoconception qui comprend plusieurs volets : la maîtrise des nuisances, la gestion de l'énergie, la gestion de l'approvisionnement en matériaux et de l'évacuation des débris, la qualité de l'air, la minimisation des impacts sur les nappes et les eaux de surface, ainsi que le maintien de la biodiversité.

L'environnement est un enjeu important d'acceptabilité du projet et la démarche d'écoconception doit bien sûr s'inscrire dans les objectifs de coûts, de risques et de délais du projet.

Depuis octobre 2013, pour étudier le potentiel géothermique des gares du futur réseau du GPE, la SGP collabore avec Efficacity, un institut de recherche et de développement pour la transition énergétique de la ville qui regroupe 28 partenaires publics et privés.

Des études ont été menées sur la récupération de l'énergie géothermique de moyenne profondeur par l'intermédiaire de structures thermoactives (parois moulées, pieux, radiers et tunnels équipés de tubes caloporteurs), à la fois pour répondre aux besoins énergétiques des gares du Grand Paris, mais aussi pour bénéficier aux constructions environnantes ou aux projets urbains qui accompagneront l'arrivée du métro.

3.2 Cadre réglementaire

En France, du fait de leur caractère superficiel et de leur faible influence sur les avoisinants, les géostructures thermiques ont récemment été exclues du champ d'application du Code minier, qui constitue le référentiel réglementaire pour la géothermie, par le décret n° 2015-15.

Malgré la publication en janvier 2017 par le groupe CFMS/SYNTec INGENIERIE/SOFFONS-FNTP des « Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques » [2], le retour d'expérience français reste peu documenté notamment sur

3.3 Technical Questions

To better understand this behaviour, the engineering firms studied the following issues in detail:

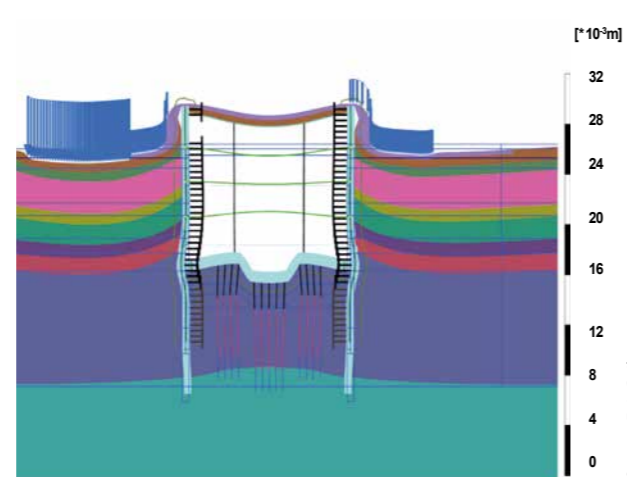
- Heat-transfer tube shape and spacing for optimum profitability
- Impact of the geometry of the geostructure (diaphragm wall, invert, pile) on thermal diffusion?
- How to model the three-dimensional thermal diffusion in a unit consisting of heat transfer liquid pipes installed in a reinforced concrete diaphragm wall?
- Is the classical in-situ thermal response test the most adapted to determine the thermal parameters by ground layer in case of diaphragm walls?
- What are the usage scenarios for the geothermal system?
- What are the induced temperatures into the ground and therefore the transferred heat into the water table for short and long term conditions?

The aim of these studies is to examine the energy yield of the structural elements under different hydraulic, thermal, geometric or usage conditions, and to precisely grasp the sum total of their effects.

The different simulations have led to an axis to axis distance of 33 cm being maintained between the pipes, meaning a density of 3 ml per sensor per m² of equipped diaphragm wall.

In terms of structural impact, Fig. 8, taken from the thermal modelling carried out using Plaxis software on one of the train main stations on line 16, shows that the temperature increase affecting the equipped area (red area) spreads to the rest of the diaphragm walls and the invert. The temperature difference in the invert reaches $\Delta T = +15^\circ\text{C}$, a value taken into account later to integrate its thermal expansion behaviour.

The thermal modelling therefore also makes it possible to estimate the volume deformation (2D)/distortions (3D) caused to the structures (Fig. 9).



9 Vue générale des déformations en cas de dilatation
General view of distortions in case of expansion

l'impact structurel que peut induire la variation thermique produite lors des échanges de chaleur entre sol et tubes caloporteurs installés dans les géostructures.

3.3 Questions techniques

Pour mieux appréhender ce comportement, les maîtres d'œuvre ont étudié en détail les sujets suivants :

- Espacement et forme des tubes caloporteurs pour une rentabilité optimale ?
- Impact de la géométrie de la géostructure (paroi, radier, pieu) sur la diffusion thermique ?
- Comment modéliser la diffusion thermique tridimensionnelle dans un ensemble constitué de tubes de liquide caloporteur installés dans une paroi en béton armé ?
- L'essai *in situ* du test de réponse thermique est-il le plus adapté pour déterminer les paramètres thermiques par couche de sol ?
- Quels scénarios d'exploitation du système géothermique ?
- Quelles sont les températures induites dans le sol et donc dans la nappe à court et à long termes ?

L'objectif de ces études est d'examiner le rendement énergétique des éléments de structure sous différentes conditions hydrauliques, thermiques, géométriques ou encore d'exploitation, et d'appréhender finement l'ensemble de leurs impacts.

Les différentes simulations ont conduit à retenir un entraxe des tubes de 33 cm, soit une densité de 3 ml de sonde par m² de paroi moulée équipée.

En termes d'impact structurel, la figure 8 issue de la modélisation thermique avec le logiciel Plaxis effectuée sur une des gares de la ligne 16 montre que l'augmentation de température imposée à la zone équipée (zone rouge) se propage au reste des parois moulées et au radier. L'écart de température dans le radier atteint $\Delta T = +15^\circ\text{C}$, valeur prise en compte par la suite pour intégrer sa dilatation.

La modélisation thermique permet donc d'approcher également les déformations volumiques induites dans les structures (figure 9).

Ces impacts structurels significatifs, dans un contexte français dépourvu de règlements et de normes, ont amené les contrôleurs techniques à émettre des avis réservés sur les géostructures thermiques, en demandant qu'elles fassent d'abord l'objet d'appréciations techniques d'expérimentation (ATEX) avant de se prononcer.

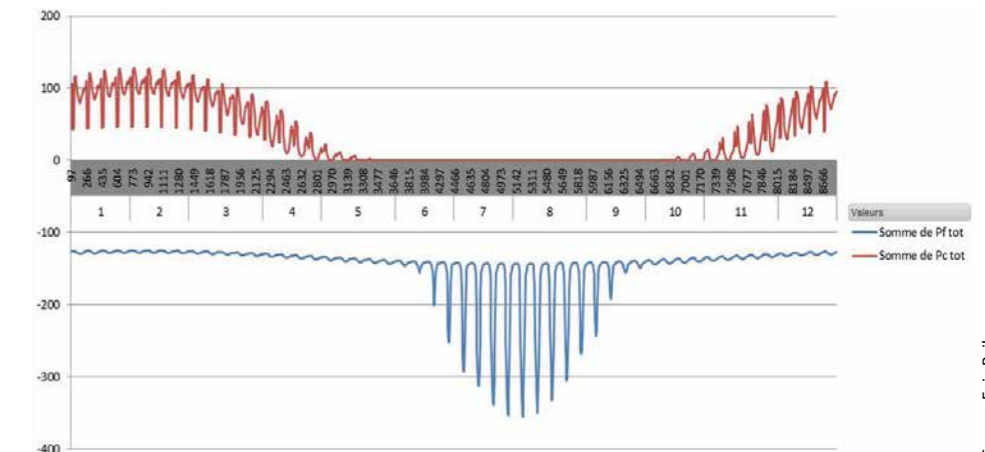
These significant structural impacts, in a French context stripped of regulations and standards, have led the technical inspectors to issue qualified opinions on thermal geostructures, asking that experimental technical assessments (ATEX) be carried out on them first before giving their authorisation for execution.

3.4 Exploiting Geothermal Potential

Independently of technical implementation giving access to the potential geothermal energy resource, it is necessary to examine potential ends to which the latter could be used.

Energy production is based on the possibility of an alternating thermal exchange with the ground in order to be able to:

- collect heat energy in winter,
- expel the heat generated by refrigerating production in summer.



10 Répartition annuelle des besoins thermiques d'une gare
Annual distribution of thermal requirements in a train station

It is therefore necessary to determine the thermal needs (heating/cooling):

- of the underground train station itself (public areas and machine rooms),
- of superstructures emerging above the underground train station,
- of planned new buildings around the underground train station.

The principles of exploiting this potential were considered based on an analysis with multiple criteria, particularly environmental and economic (global cost), as well as in terms of structural impact.

The underground train station's thermal requirements are essentially served by the air vector coming from the air processing units. At the same time, it must be noted that the train station's thermal requirements approximate an operation requiring twelve months of cold and four months of heat (Fig. 10), while the energy demand of mixed (residential, commercial, office) property projects corresponds to an

3.4 Valorisation du potentiel géothermique

Indépendamment de la mise en œuvre technique de l'accès à la ressource géothermique potentielle, il est nécessaire d'examiner vers quels débouchés cette dernière peut être utilisée.

La production d'énergie s'appuie sur la possibilité d'un échange thermique alternatif avec le sol afin de pouvoir :

- en hiver, prélever des calories,
- en été, rejeter la chaleur générée par la production frigorifique.

Il faut distinguer les besoins thermiques (calorifiques/frigorifiques) :

- de la gare proprement dite (zones publiques et locaux techniques),
- des émergences en superstructure au-dessus de la gare,
- des nouvelles constructions prévues autour de la gare.

Les principes de valorisation de ce potentiel ont été envisagés selon une analyse multicritères notamment environnementale et économique (coût global), ainsi qu'en termes d'impact structurel.

Les besoins thermiques de la gare sont essentiellement compensés par le vecteur aéraulique à partir de centrales de traitement d'air (CTA). Toutefois, il faut savoir que les besoins thermiques de la gare sont proches d'un fonctionnement nécessitant 12 mois de froid et 4 mois de chaleur (figure 10), alors que la demande énergétique des projets immobiliers mixtes (logements, commerces, bureaux) correspond à un cycle annuel de production de chaleur et de froid de 6 mois de froid, 1 mois de repos, 4 mois de chaud et 1 mois de repos.

En termes financiers, les économies d'exploitation espérées sont évaluées de 1 à 3 k€/an au maximum par gare, à rapprocher de surcoûts d'investissement d'au moins 500 k€.

Doter les structures enterrées du GPE d'équipements géothermiques n'a donc d'intérêt que pour en faire bénéficier des constructions ou équipements avoisinants.

Une fois écartées les serres agricoles et l'aquaculture, nous avons considéré deux cas possibles de valorisation géothermique externe :

- un parc résidentiel virtuel
- un parc immobilier mixte virtuel

Pour s'adapter aux cas de figure envisagés (figures 11 et 12), le maître d'œuvre a pro-

annual heat and cold production cycle of six months of cold, one month of rest, four months of heat and one month of rest.

In terms of financial issue, it is hoped that usage savings of EUR 1,000–3,000 per year maximum could be made per train station, to be reconciled with extra investment costs of at least EUR 500,000.

So the main interest of providing the GPE's underground structures with geothermal energy equipment relies essentially when benefiting adjacent buildings or facilities.

Once agricultural greenhouses and aquaculture were set aside, we considered two possible cases of external geothermal exploitation:

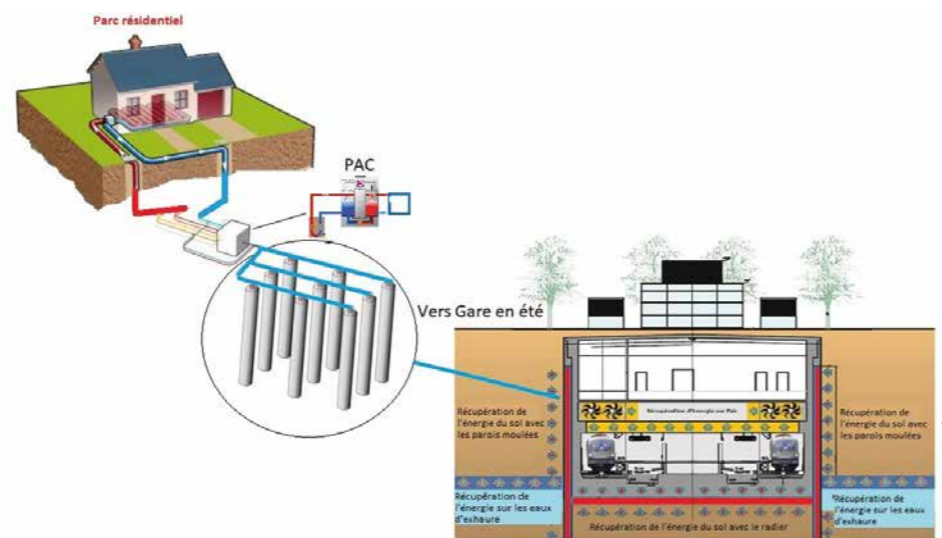
- a potential residential development
- a potential mixed property development

To adapt to the specific cases considered on figures (Fig. 11 and 12), the project manager proposed working in two phases based on a flexible and reversible solution for the train stations.

In the first phase, geothermal energy shall be used to improve the energy efficiency of air conditioning of public spaces in the underground train station by making it possible, at extreme hot summer hours, to cool heat pump condensers using on a cooler temperature (that of the ground) instead of outside air.

In the second phase, geothermal energy will be used with the help of an external energy centre making it possible to monitor the operation of the unit and to transfer the cold and heat energy to the property development.

In the case of a residential development, the geothermal energy will cool the underground train station in summer and



11 Géothermie via un pôle énergie externe – Gare/Parc résidentiel
Geothermal energy via external energy centre – Train Station/Residential development

posé de travailler en deux phases à partir d'une solution flexible et réversible pour les gares.

Dans la première phase, la géothermie sera utilisée pour améliorer la signature énergétique de la climatisation des espaces publics de la gare en permettant, pendant les heures extrêmes d'été, de refroidir les condenseurs des TFP (thermo-frigo-pompes ou pompes à chaleur) à partir d'une température plus fraîche (celle du sol) que celle de l'air extérieur.

Dans la deuxième phase, la géothermie sera utilisée à l'aide d'un pôle énergie externe permettant de contrôler le fonctionnement de l'ensemble et de transférer les frigorifiques et les calories vers le parc immobilier.

Dans le cas du parc résidentiel, la géothermie servira à refroidir la gare en été et à chauffer les immeubles d'habitation en hiver. Dans celui du parc mixte, celui-ci bénéficiera des calories en hiver et des frigorifiques en été.

Un exemple des premiers résultats de ces simulations au niveau de trois gares de la ligne 16 est présenté dans le tableau 2 qui donne les principaux ordres de grandeur des cas étudiés.

Dans ce tableau, la puissance P1 correspond à une puissance maximale théorique dimensionnant le linéaire de tubes échangeurs de chaleur dans les parois moulées et la puissance P2 correspond à une puissance exploitable moyenne après 30 ans de fonctionnement, établie sur la base d'un scénario d'exploitation très conservateur.

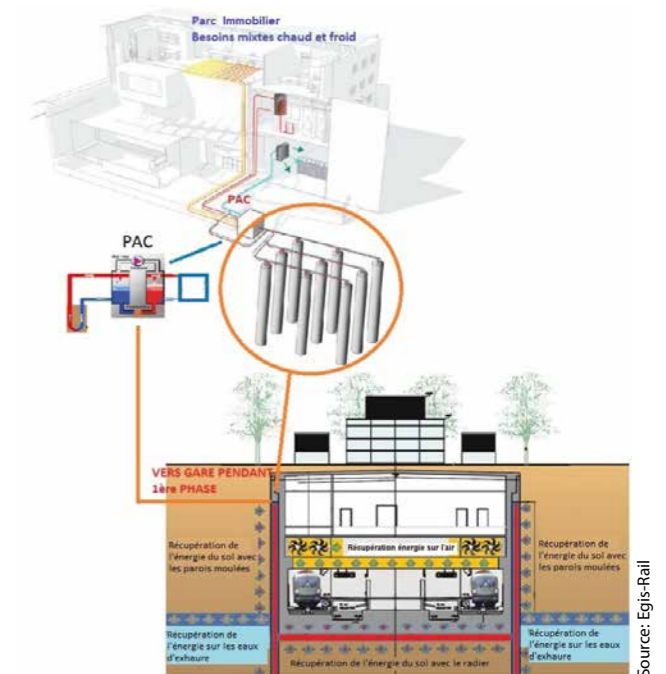
Outre les intérêts économiques et environnementaux de la démarche, on notera que le fait de coupler les besoins énergétiques de la gare à ceux d'un projet immobilier connexe ou d'un programme immobilier de quartier présente l'avantage de pérenniser dans le temps la ressource géothermique et maximiser les puissances extractibles, tout en équilibrant les variations de température du terrain dans le temps.

La conception proposée est donc souple et réversible. Elle s'appuie sur une phase d'apprentissage consistant à utiliser la géothermie pendant un an ou deux à l'usage exclusif des gares pour observer le potentiel réel de la ressource et, accessoirement, bénéficier d'une amélioration de la signature énergétique de la gare.

En fonction du potentiel géothermique réellement constaté durant cette première phase, le couplage avec un parc immobilier pourra être réalisé pour favoriser l'émergence d'écoquartiers auxquels les gares du GPE apporteront aussi leur plus-value énergétique.

3.5 Enseignements

Les études conduites ont permis d'accroître les connaissances techniques et de mieux cerner tous les paramètres pour prendre les bonnes décisions d'investissements.



12 Géothermie via un pôle énergie externe – Gare/Parc immobilier mixte
Geothermal energy via external energy centre – Train Station/Mixed development

heat the residential properties in winter. Mixed developments will benefit from heat energy in winter and cooling in summer.

An example of the initial results of these simulations in the context of three line 16's metro stations is shown in the table 2, which gives the main orders of magnitude in the studied cases:

In this table, the power P1 corresponds to a theoretical maximum power dimensioning the linear of heat exchanger pipes in the diaphragm walls and the power P2 corresponds to an average exploitable power after 30 years of operation, based on a scenario of very conservative use.

As well as the economic and environmental benefits of the approach, it can be noted that coupling the underground train station's energy needs to those of a connected or local property development has the advantage of sustaining the geothermal resource over time and maximising the amount of power that can be extracted, all while balancing the variations in the temperature of the ground over time.

The proposed design is therefore flexible and reversible. It is based on an experimental phase which involves using the geothermal energy exclusively for the train stations for a period of one or two years in order to observe the actual potential of the resource, as well as to benefit, on a second order, of an improved energy efficiency of the train station.

Based on the geothermal potential actually determined during this initial stage, coupling with a property develop-

Ouvrage	Capacité de production					Surcoûts d'investissement (k€)	
	Surface de paroi équipée (m ²)	Puissance installée P1 (kW)	Puissance exploitable P2 (kW)	Parc résidentiel virtuel (m ²)	Parc immobilier mixte virtuel (m ²)	Parois moulées	Équipements
Saint-Denis Pleyel	12 705	762	190	13 000	23 000	706	100
La Courneuve	1 798	107	26	2 000	3 000	462	50
Le Blanc-Mesnil	4 704	282	70	5 000	8 000	436	50

Tableau 2 Surfaces correspondantes des projets externes et surcoûts d'investissement

Table 2 Corresponding areas of external projects and extra investment costs

Néanmoins, l'absence de cadre normatif et réglementaire a amené les contrôleurs techniques à exiger des ATEX avant de se prononcer.

Le cas d'usage le plus favorable consiste à exploiter la géothermie pour améliorer la signature énergétique de la gare pendant une première période et pour déterminer le potentiel réel de la ressource avant d'en faire bénéficier un éco-quartier mixte qui se construira autour de la gare du GPE.

Références/ References

- [1] Les Actes du Swiss Tunnel Congress 2016, pp 13-21
- [2] Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques (janv. 2017), publiées par le groupement suivant :
 - Comité français de mécanique des sols (CFMS)
 - Syndicat des sociétés d'ingénierie (SYNTEC)
 - Syndicat des entreprises de forage (SOFFONS)
 - Fédération nationale des travaux publics (FNTP)

ment park may occur in order to facilitate the emergence of eco-friendly areas to which the GPE train stations can contribute their added value in terms of energy.

3.5 Lessons Learned

The studies conducted helped boosting technical knowledge and defined all necessary parameters for taking good investment decisions.

Nevertheless, the absence of a standard and regulatory framework led the technical inspectors to demand experimental technical assessments before giving their authorisation for execution work.

The most favourable use involves utilising geothermal energy to improve the energy efficiency of the underground train station for an initial period and to determine the actual potential of the resource, before using it to benefit an eco-friendly mixed development to be built around the GPE train station.

DONNÉES DE PROJET	PROJECT DATA
<p>Région Paris</p> <p>Client Société du Grand Paris (SGP)</p> <p>Conception, supervision du site et gestion globale de la construction</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les lignes 15, 16 et 17 ont été découpées en sept tronçons faisant chacun l'objet d'un contrat de maîtrise d'œuvre spécifique pour les infrastructures • Les quatre sites de maintenance font chacun l'objet d'un contrat de maîtrise d'œuvre • La maîtrise d'œuvre du système de transport est unique pour l'ensemble des trois lignes • Un maître d'œuvre est chargé du matériel roulant et des automatismes de conduite • Pour piloter et coordonner ces multiples contrats de maîtrise d'œuvre, la SGP s'appuie sur un AMO général pour les Infrastructures et sur un AMO Systèmes <p>Exécution L'allotissement de la construction est le suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • des lots de travaux préparatoires • des lots de génie civil (tunnels, viaducs, gros œuvre des gares et des puits) • des lots d'aménagement des gares et des ouvrages annexes en tous corps d'état • des macro-lots pour chacun des sites de maintenance • des lots systèmes transverses à plusieurs tronçons ou plusieurs lignes <p>Principales informations : Période de construction : 2016–2030 Début des opérations : 2024 pour la ligne 15 sud Frais de construction : 35 milliards d'euros HT y compris provisions</p> <p>Longueur : 125 km pour les lignes 15, 16 et 17</p> <p>Section transversale excavée : 76 m²</p> <p>Éléments spéciaux : 49 gares dont 41 interconnectées avec au moins une ligne de métro, RER ou Transilien Region</p>	<p>Region Paris</p> <p>Client Société du Grand Paris (SGP)</p> <p>Design, site supervision and overall construction management</p> <ul style="list-style-type: none"> • lines 15, 16 and 17 were split into seven sections, each the subject of a specific Engineering, Procurement and Contract management (EPCM) • The four maintenance sites are each subject to a EPCM contract • There is a single transport system EPCM contract set-up for all three lines • An EPCM firm is in charge of rolling stock and automated driving systems • To steer and coordinate these multiple EPCM contracts, the SGP is using a general project management assistant for infrastructure and a project management assistant for systems. <p>Execution The allocation of the construction is as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> • preparatory work lots • civil engineering lots (tunnels, viaducts, major station and shaft works) • lots for train station finishings • macro-lots for each of the maintenance sites • transverse system lots across multiple sections or lines <p>Key data</p> <p>Construction period: 2016–2030 Start of operations: 2024 for line 15 south Construction costs: 35 billion euro before tax including provisions</p> <p>Length: 125 km for lines 15, 16 and 17</p> <p>Excavated cross section: 76 m²</p> <p>Special features 49 stations, of which 41 connect to at least one metro, RER or Transilien line</p>

Martin Aeberli, MSc Erdw. ETH, Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf/CH

Erkenntnisse aus dem Vortrieb des Eppenbergtunnels

Einblicke in den Vortrieb mit einer Mixschildtunnelbohrmaschine

Der Vierspurausbau zwischen Olten und Aarau ist ein wichtiger Baustein, um den Bahnverkehr im Mittelland und in der ganzen Schweiz zu erweitern. Der zweisepurige Eppenbergtunnel mit einer Länge von 3114 Meter zwischen Gretzenbach und Wöschnau stellt dabei besondere Anforderungen an die bergmännische Bauweise. Der Tunnel wurde von Osten nach Westen mit einer Mixschildtunnelbohrmaschine vorangetrieben.

Findings from the Eppenbergtunnel TBM Drive

Insights into Tunnelling with a Mixshield Tunnel Boring Machine

The expansion to four rail tracks between Olten and Aarau is playing an important part in expanding rail traffic in the Swiss Plateau and throughout Switzerland. The twin-track, 3,114 m long Eppenbergtunnel between Gretzenbach and Wöschnau represents a particular challenge for the tunnellers. The tunnel was excavated from east to west using a Mixshield tunnel boring machine.

1 Geologie des Eppenbergs

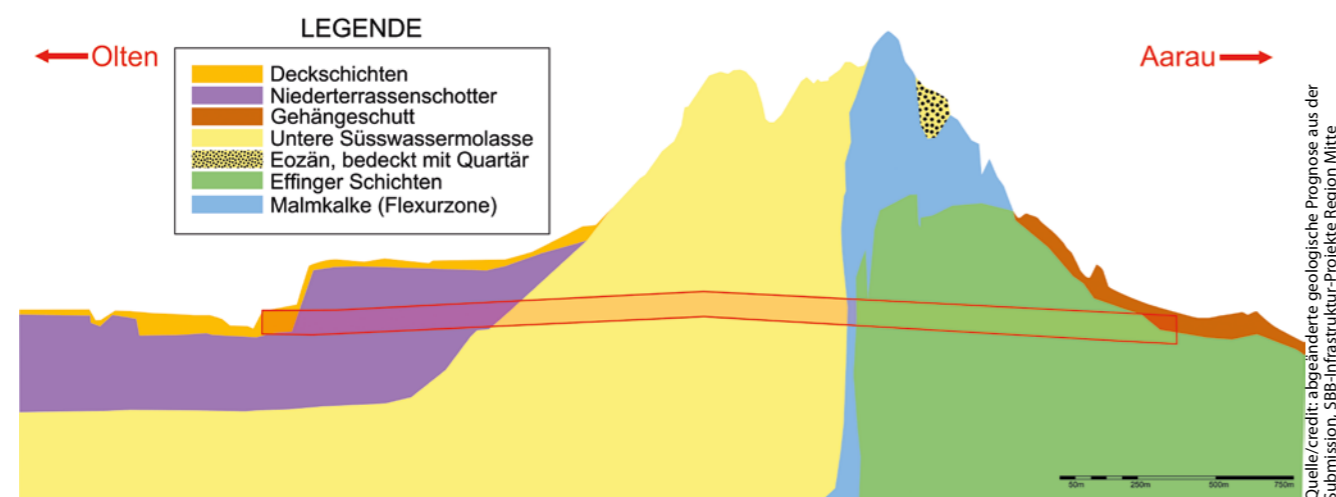
In Vortriebsrichtung wurden von Osten nach Westen folgenden geologischen Formationen erwartet (siehe Bild 1).

Effinger Schichten: mergelige bis mergelkalkige Abfolge bis hin zu Wechsellagerung von Mergel und Kalken aus dem späten Oxfordien.

1 The Geology of the Eppenbergtunnel

Along the direction of excavation from the east to the west, the following geological formations were expected (see Fig. 1).

The Effinger beds: marly to marly-calcareous sequences up to alternating sequences of marl and limestones from the late Oxfordian.



1 Vereinfachtes geologisches Längsprofil
Simplified, lengthwise geological profile

Retour d'expérience de la construction du tunnel d'Eppenbergtunnel

Creusement au moyen d'un tunnelier à bouclier mixte

Dans le cadre du développement du réseau ferroviaire dans la région d'Olten-Aarau, les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) ont dû prévoir la construction d'un tunnel à deux voies de 3114 mètres de long traversant l'Eppenbergtunnel. La quasi-totalité de la section souterraine a été creusée au moyen d'un tunnelier à bouclier mixte d'un diamètre d'excavation d'env. 128 m². Après la traversée de roches dures, il a fallu adapter la machine à une géologie meuble. Durant la réalisation de la section initiale par voûte-parapluie, des prises de vue géologiques tridimensionnelles ont permis de définir des possibilités d'optimisation en termes de sécurisation et de méthodes de creusement.

Le conoscenze ricavate dall'avanzamento della galleria dell'Eppenbergtunnel

Impressioni sull'avanzamento con una fresa meccanica a piena sezione mista scudata

Le Ferrovie Federali Svizzere (FFS) stanno potenziando la propria rete ferroviaria nella regione Olten-Aarau. Di questi lavori fa parte una galleria a doppio binario di 3114 metri attraverso l'Eppenbergtunnel. Per l'intero tratto montano, lo scavo è stato effettuato con una fresa meccanica a piena sezione mista scudata con una sezione trasversale di circa 128 m². Dopo un tratto di roccia dura, l'avanzamento è dovuto essere adeguato a un ambiente di roccia incoerente. Durante la realizzazione del tratto iniziale degli infilaggi, gli intensi rilevamenti geologici tridimensionali hanno svelato opportunità di ottimizzazione rispetto alle misure di sicurezza e al tipo di avanzamento.

Untere Süswassermolasse: Wechsellagerung von Mergeln, Kalkmergeln, Silt- und Sandsteinen.

Lower freshwater molasse: alternating sequences of marls, limestone marls, silt and sandstones.

Niederterrassenschotter: Lockergestein aus einer Deckschicht aus tonigem Silt auf saubereren sandigen Kiesen.

Low terrace gravel: loose stone from a covering layer of clayey silts on clean sandy gravels.

1.1 Vortriebsmethode

Der Grossteil des bergmännischen Vortriebs wurde mit einer Mixschildtunnelbohrmaschine aufgeföhrt. Die Querschnittsfläche betrug rund 128 m². Die Effinger Schichten und die untere Süswassermolasse wurden im Trockenmodus durchörtet. Vor dem Übergang in den Niederterrassenschotter wurde mittels Bohrpöhlen eine standfeste Zone errichtet, die den sicheren Umbau der Tunnelbohrmaschine vom Trockenmodus zum Nassmodus ermöglichte.

1.1 The Tunnelling Method

Most of the excavation was done with a Mixshield tunnel boring machine with a cross-section of about 128 m². The Effinger beds and the lower freshwater molasse strata were cut through in dry mode. Before the transition to the low terrace gravel, bored piles were used to create a stable zone, enabling the tunnel boring machine to be safely converted from dry mode to slurry mode.

2 Rohrschirmstartstrecke

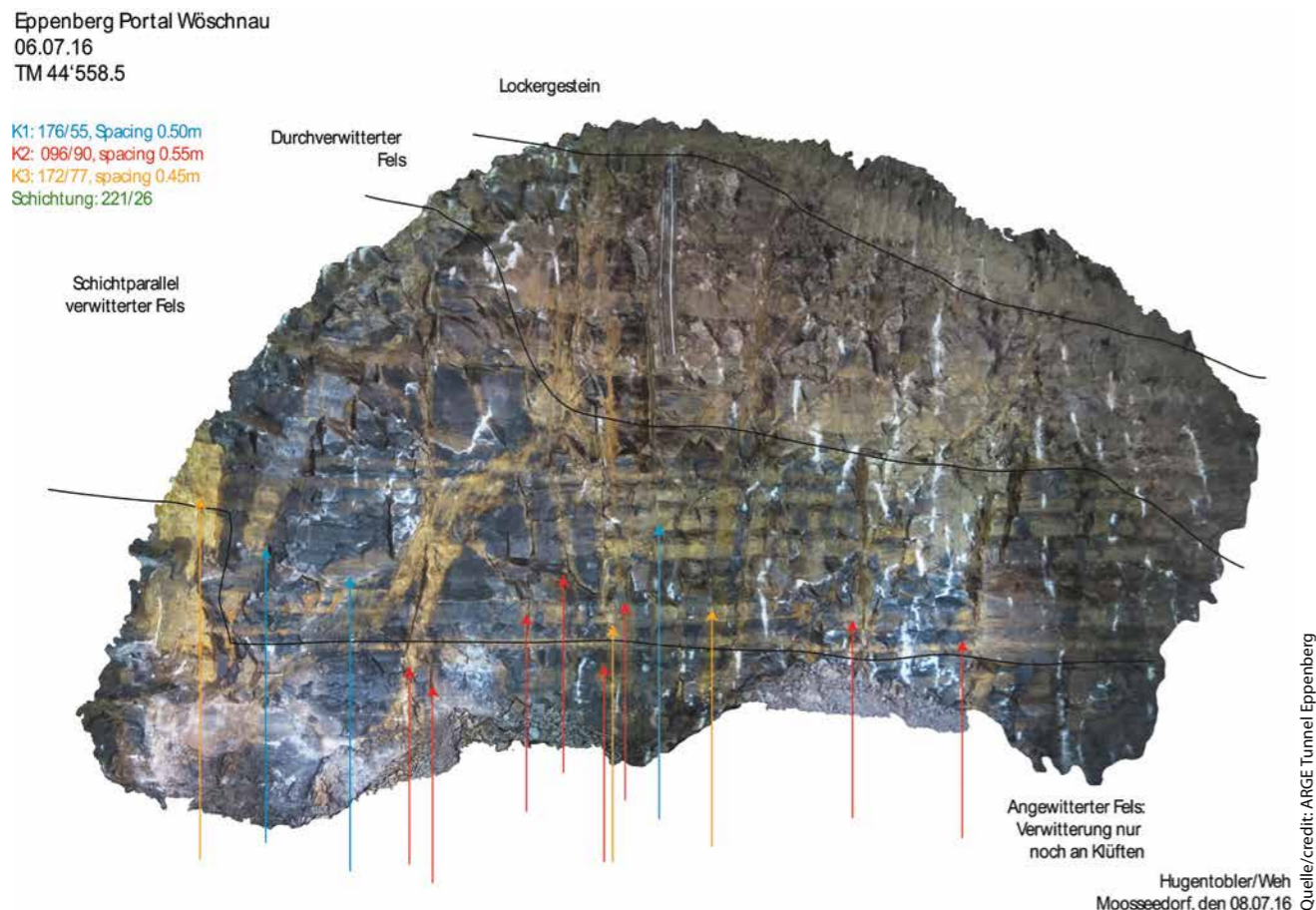
Bevor die Tunnelbohrmaschine in die Trockenstrecke (Hartgesteinsvortrieb) starten konnte, musste eine Rohrschirmstrecke erstellt werden. Laut Plan sollte diese Strecke eine Länge von insgesamt 80 m aufweisen, aufgeteilt in acht Rohrschirm-Etappen. Die Rohre wiesen eine Länge von 13 m auf mit einem Durchmesser von 139,7 mm und einer Wandstärke von 8,0 mm. Die Etappen wurden mit einer Überlappung von 3 m geplant und realisiert.

2 The Pipe Roofed Starting Section

Before the tunnel boring machine could start in the dry section (hard rock tunnelling), a pipe roofing section had to be produced. According to the plan, this section was to have a total length of 80 m, subdivided into eight pipe roofing sections. The pipes used were 13 m long, had a diameter of 139.7 mm with a wall thickness of 8 mm. The sections were planned and then implemented with an overlap of 3 m.

Bei der geologischen Erkundung dieser Startstrecke wurde ein heterogenes Verwitterungsmuster erkannt. Es konnte eine graduelle Abnahme der Verwitterung mit zunehmender Tiefe beobachtet werden (siehe Bild 2). Die Schichtfolge einer typischen Ortsbrust begann oberflächennah mit Lockergestein, gefolgt von durchverwittertem Fels,

A heterogeneous weathering pattern was found during the geological investigations of this starting section. A gradual reduction in the weathering could be seen as the depth increased (see Fig. 2). The sequence of strata for a typical work face started close to the surface with loose stone, followed by fully weathered rock, parallel strata of fully weathered and partially weathered rock at the level of the



2 Geologische Auswertung der Verwitterungsstrukturen an der Ortsbrust
Geological evaluation of the weathering structures at the work face

schichtparallel verwittertem Fels und angewittertem Fels auf dem Niveau der zukünftigen Sohle, wobei bei letzterem Schichtpaket die Verwitterung ausschliesslich entlang von Klüften zu finden war.

2.1 Geologische Erkundungen und Gefahrenbilder

Zahlreiche Kernbohrungen ermöglichten eine detaillierte geologische Prognose, die entgegen der ursprünglichen Annahme ein früheres Auftreffen in einen festeren Fels vorhersagte. Zusätzlich wurden anhand von überlappenden Fotoaufnahmen regelmässig dreidimensionale Modelle der Ortsbrust erstellt. Computergestützt konnten Klufflächen erkannt und Kluffamilien zugeordnet sowie persistente Verwitterungsflächen räumlich verfolgt werden. Einzelne Ortsbrustaufnahmen konnten räumlich verknüpft dargestellt werden (siehe Bild 3). Dies vereinfachte es, Strukturen über verschiedene Ortsbrustaufnahmen zu korrelieren, und veranschaulichte die geologischen Gegebenheiten.

2.2 Reduktion der Strecke

Die detaillierten Erkundungen und Analysen bestärkten die Hypothese, wonach das Gebirge nach einer kürzeren Distanz vom Portal eine grössere Standfestigkeit aufweist als prognostiziert. Daraufhin wurde eine Reduktion der Rohr-

future tunnel invert, whereby the last collection of layers was only weathered along fractures.

2.1 Geological Investigations and Danger Patterns

The drilling of numerous cores enabled a detailed geological forecast, which, contrary to the original assumption, predicted that firmer rock would be encountered earlier on. Also, using overlapping photos, three-dimensional models of the work face were regularly produced. With computer support, the fracture surfaces could be detected and assigned to fracture families as well as spatially tracking persistent weathered surfaces. Individual photos of the work face could be shown spatially linked together (see Fig. 3). This made it easier to correlate structures via various photos of the work face, clearly presenting the geological circumstances.

2.2 Shortening of the Section

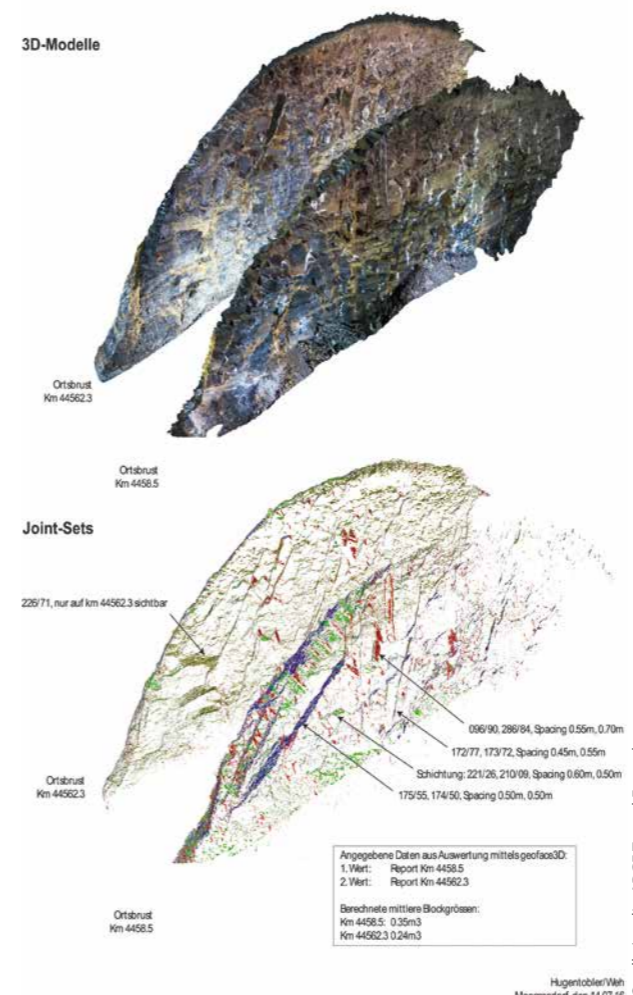
The detailed investigations and analyses reinforced the hypothesis that, after a shorter distance than predicted from the portal, the rock is more stable than predicted. It was thus decided to shorten the pipe roofing section. The originally planned eight pipe roofing sections were thus shortened to six sections. This meant shortening the pipe roofing section by 20 m. This approach meant that the rock stabilisation concept had to be changed.

schirmstrecke beschlossen. Die ursprünglich geplanten acht Rohrschirm-Etappen wurden auf sechs Etappen gekürzt. Dies bedeutete eine Reduktion der Rohrschirmstrecke um 20 Meter. Dieses Vorgehen setzte jedoch eine Änderung des Felsicherungskonzeptes voraus.

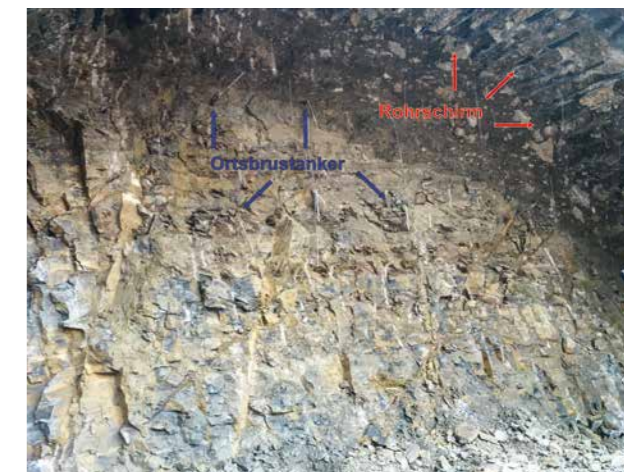
2.3 Angepasste Sicherungsmassnahmen

Anhand der wahrscheinlichsten geologischen Gefährdungsbilder konnten massgeschneiderte Sicherungsmassnahmen evaluiert werden. Um das bodennahe Lockergestein zu verfestigen und somit die Stabilität im Gewölbereich zu gewährleisten, wurden Bohrungen von der Oberfläche aus bis in den durchverwitterten Fels abgeteuf. Damit die Standfestigkeit gewährleistet war, wurden die Löcher mit zementösem Injektionsgut verpresst. Dies ersetzte weitestgehend die tragende Wirkung des geplanten Rohrschirmes. Um die Ortsbrust gegen herausfallende Felsblöcke zu schützen, wurden Brustanker versetzt, welche ein Ablösen entlang der Verwitterungsflächen verhinderten (siehe Bild 4).

Eppenbergtunnel Portal Wöschnau Ortsbrustaufnahmen am Ende Rohrschirmstrecke



3 Geologische Auswertung anhand dreidimensionaler Modelle
Geological evaluation using three-dimensional models



4 Ortsbrust mit Sicherungsmassnahmen und Rohrschirm in der Firste
Work face with supporting measures and a pipe umbrella in the crown

2.3 Modified Stabilisation Measures

From the most likely geological danger patterns, tailor-made stabilisation measures could be evaluated. To strengthen the loose rock close to the floor and thus ensure the stability in the vault area, boreholes were drilled from the surface into the fully weathered rock. To guarantee the stability, grout was injected through the holes into the ground. This largely replaced the load-bearing effect of the planned pipe umbrella. To protect the tunnel work face from falling boulders, face bolts were installed to prevent rock from detaching along the weathered surfaces (see Fig. 4).

3 Cutting Through the Flexure Zone

Between the Effinger beds and the lower freshwater molasse, in the vicinity of Eppenbergtunnel there is a flexure zone of marly limestone, which had been subject to heavy tectonic pressures. The collections of layers were fractured into a variety of lumps. According to the advance geological exploration, vertical strata of marly limestone were to be expected with a higher unconfined compressive strength.

3.1 Difficulties in the Conveying System

The first signs of the flexure were blocks which broke out of the tunnel face and caused problems on the conveyor belt, particularly at the conveyor belt's transfer points. The conveyor system had to be stopped several times to manually remove these blocks. Some blocks also caused cuts in the conveyor belt, which resulted in additional standstill periods while mucking out (see Fig. 5).

3.2 Blockages in the Cutterhead

In the flexure, the number and the size of these blocks increased further and led to blockages of the cutterhead's openings. The blockage of these openings increased the amount of waste material in the cutting chamber. This impaired the required pressure of the cutterhead against the face and the contact between the disc cutters and the rock,



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenberg

5 Defekt an Förderbandgurte während der Durchörterung der Flexurzone
Fault on the conveyor belt while cutting through the flexure zone

3 Durchörterung der Flexurzone

Zwischen den Effinger Schichten und der unteren Süßwassermolasse existiert in der Umgebung des Eppenbergs eine Flexurzone aus Malmkalken, die tektonisch stark überprägt wurde. Die Schichtpakete sind in diverse Schollen zerbrochen. Nach den geologischen Vorerkundungen musste mit steilstehenden Malmkalkbänken mit höheren einaxialen Druckfestigkeiten gerechnet werden.

3.1 Erschwernisse im Fördersystem

Erste Anzeichen für die Flexur waren Blöcke, die aus der Ortsbrust brachen und auf dem Förderband, speziell bei den Förderbandübergaben, Probleme bereiteten. Mehrmals musste das Fördersystem gestoppt werden, um die Blöcke manuell zu entfernen. Des Weiteren verursachten einige Blöcke Risse im Förderband, welche zusätzliche Stillstände beim Schuttern hervorriefen (siehe Bild 5).

thus making the tunnel boring machine (TBM) harder to control, as individual thrust cylinders could no longer exert the required pressure on the disc cutters. Due to the impairments to the control caused by this, the TBM sometimes deviated from the planned tunnel excavation axis (see Fig. 6). When excessive deviations occurred, the blockages had to be manually removed from the cutterhead openings to recover the required control over the TBM.

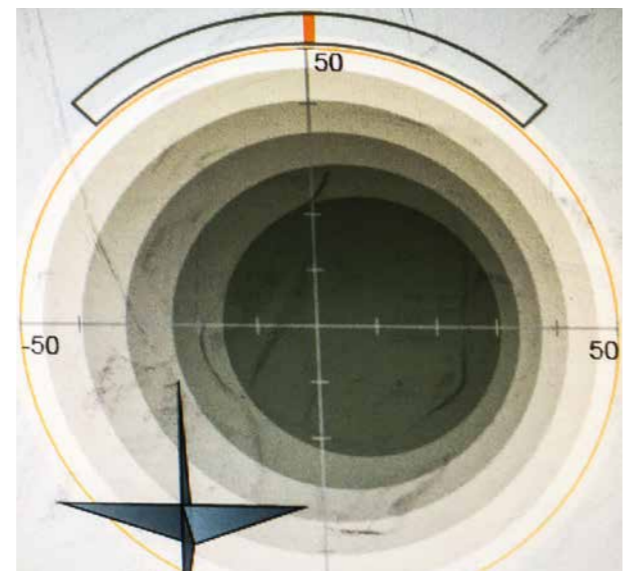
4 Wear of the Disc Cutters

In the Effinger beds the wear of the disc cutters remained within the forecast range. In the flexure zone the discs were subject to significantly more stress. Particularly the siliceous nodules (see Fig. 7) and the one-sided load from the blocks which broke out have an impact. As, in comparison to the Effinger beds and the lower freshwater molasse, the tunnel was only cut through the flexure zone for a short section, the effects on the overall wear were low.

A somewhat higher wear was expected in the lower freshwater molasse, as sandstone strata had to be cut through. The total fraction of minerals with a scratch hardness of 7 or more had been predicted for the Effinger beds and the lower freshwater molasse to a similar extent.

4.1 The Proportion of Quartz in the Sandstones of the Lower Freshwater Molasse

In some layers of sandstone, the proportion of quartz increased markedly. The zone around tunnel metre 1,150 was particularly striking (see Fig. 8). On more close examination of the excavated material on the temporary dump at Wöschnau, slightly increased proportions of sandstone and thus quartz could be observed. To analyse the proportion



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenberg

6 Anzeige im Steuerstand zur Lage und Ausrichtung der TBM in Bezug auf die theoretische Bohrachse
Display on the control panel showing the position and alignment of the TBM relative to the theoretical bore axis

3.2 Verklemmungen im Schneidrad

In der Flexur nahmen die Anzahl sowie die Dimension dieser Blöcke noch zu und führten zu einem Blockieren der Öffnungen im Schneidrad. Durch das Blockieren der Öffnungen stieg der Anteil an Abraum in der Abbaukammer. Hierdurch wurde das Anpressen bzw. der Kontakt zwischen Schneidrol-

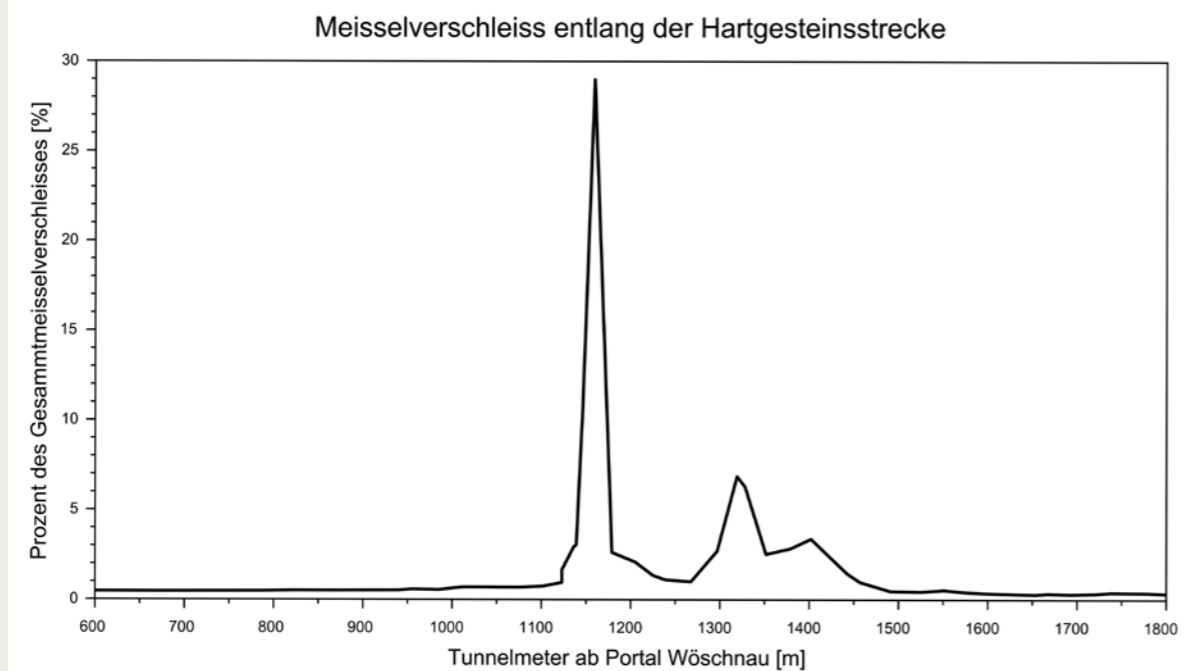
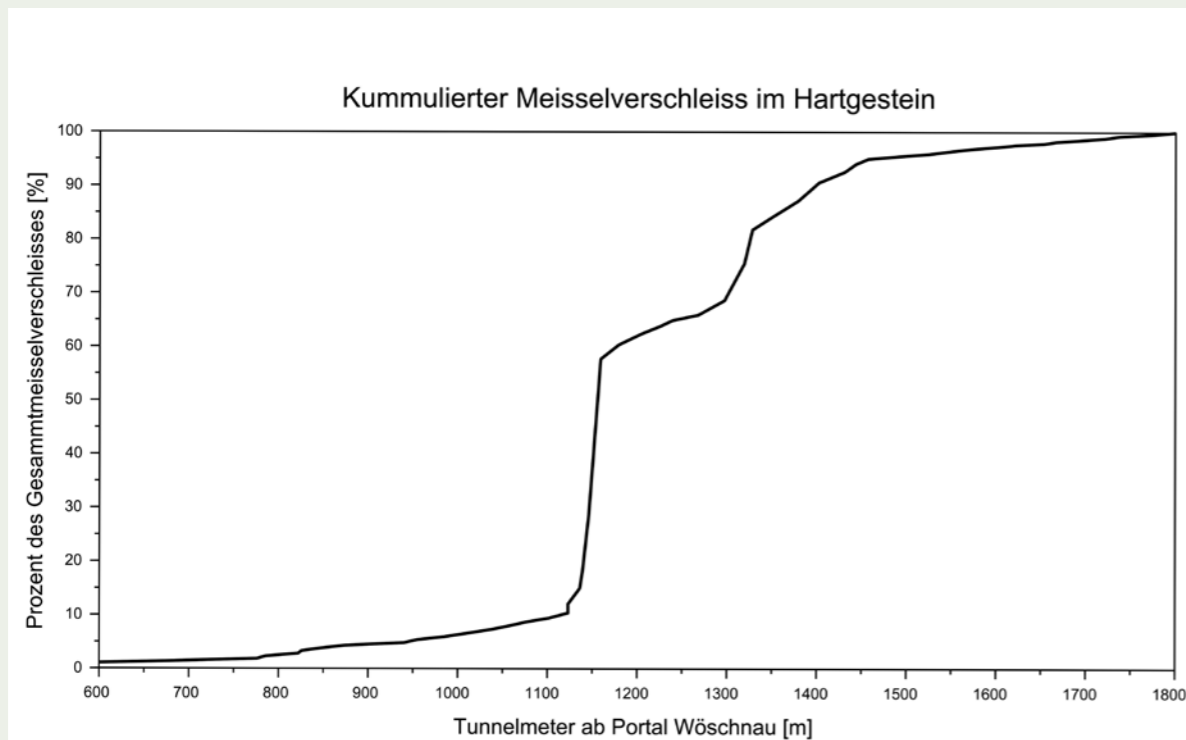
of quartz, cores were drilled from various strata of the lower freshwater molasse. Using the Riedvelt method in external laboratories, quartz levels of up to 58% were measured.

As it turned out, the wear correlated to the flow of underground water into the tunnel. The quartz powder produced



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenberg

7 Oben: Silexknollen in der Ortsbrust. Unten: Silexknollen, entnommen vom Förderband
Top: siliceous nodules in the work face. Bottom: siliceous nodules taken from the conveyor belt



8 Oben: kumulierter Meisselverschleiss. Unten: Meisselverschleiss entlang der Hartgesteinstrecke
Top: accumulated disc cutter wear. Bottom: disc cutter wear along the hard rock section

Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenbergtunnel

len und Gebirge durch die Vorschubzylinder erschwert und beeinträchtigte somit die Steuerbarkeit der TBM, da einzelne Vorschub-Zylinder nicht mehr den erwünschten Anpressdruck der Schneidrollen erzielten. Aufgrund der dadurch beeinträchtigten Steuerbarkeit bewegte sich die Tunnelbohrmaschine zeitweise aus der geplanten Tunnelachse (siehe Bild 6). Wenn zu grosse Abweichungen auftraten, musste das Schneidrad von Hand vom Ausbruchmaterial befreit werden, um wieder die gewünschte Kontrolle über die Tunnelbohrmaschine zu erlangen.

4 Verschleiss an Schneidrollen

In den Effinger Schichten hielt sich der Verschleiss an den Schneidrollen im Bereich der Prognosen. In der Flexurzone wurden die Disken deutlich mehr beansprucht. Speziell die Silexknollen (siehe Bild 7) und die einseitige Belastung durch die herausgebrochenen Blöcke machten sich bemerkbar. Da der Tunnel die Flexurzone im Vergleich zu den Effinger Schichten und der unteren Süswassermolasse nur in einer kurzen Strecke schnitt, waren die Auswirkungen auf den Gesamtverschleiss allerdings gering.

In der unteren Süswassermolasse wurde ein etwas höherer Verschleiss erwartet, da Sandsteinschichten durchörtet werden mussten. Der Gesamtanteil an Mineralien mit einer Ritzhärte von 7 oder grösser wurde für die Effinger Schichten und die untere Süswassermolasse in ähnlicher Grössenordnung prognostiziert.

4.1 Quarzanteil in den Sandsteinen der unteren Süswassermolasse

In einigen Sandsteinschichten nahm der Quarzgehalt aber markant zu. Besonders augenfällig war die Zone um Tunnelmeter 1150 (siehe Bild 8). Bei genaueren Betrachtungen des Austraggutes auf der Zwischendeponie Wöschnau konnten leicht erhöhte Sandstein- und damit Quarzanteile erkannt werden. Um den Quarzanteil zu analysieren, wurden Bohrkern aus verschiedenen Schichten der unteren Süswassermolasse genommen. Mit der Riedvelt-Methode wurden in externen Laboren Quarzgehalte bis zu 58% gemessen.

Wie sich herausstellte, korrelierte der Verschleiss mit den Bergwasserzuflüssen im Tunnel. Das ausgebrochene Quarzmehl vermischte sich mit dem Wasser zu einer abrasiven Paste, welche sich im unteren Bereich des Schneidrades festsetzte. Diese Kombination von Wasser und hohem Quarzgehalt verursachte den grössten Verschleiss an den Werkzeugen.

4.2 Verbesserung durch Hardox-Auftrag

Um die Schneidrollen zu verstärken und somit dem drohenden Verschleiss entgegenzuwirken, wurden auf den Schneidrollen Hardox-Kappen aufgeschweisst (siehe Bild 9). Diese Massnahme sollte dazu führen, dass die abrasive Paste aus Gesteinsmehl und Wasser die Schneidringe nicht so schnell angreifen konnte.



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenbergtunnel

9 Oben: Verschleiss an Schneidrollen. Unten: verstärkte Schneidrollen

Top: wear on the disc cutters. Bottom: reinforced disc cutters

at the work face mixed with the water to form an abrasive paste which then adhered to the lower area of the cutterhead. This combination of water and high quartz levels caused the most wear of the tools.

4.2 Improvement by Adding Hardox Steel

To reinforce the disc cutters and thus counteract the threatened wear, Hardox caps were welded onto them (see Fig. 9). This measure was intended to prevent the abrasive paste of rock flour and water wearing the disc cutter rings so quickly.

In the zone around tunnel metre 1,320 (see Fig. 8) the combination of sandstone strata together with the ingress of groundwater was again encountered. Thanks to the reinforced disc cutters, the wear could be reduced allowing the tools to be used for significantly longer periods.

5 Brief Summary of the Starting Chamber and of Tunnelling Through Hard Rock

Displaying the geology in three dimensions can make it easier to understand complex relationships and thus facilitate tailor-made solutions, such as the shortening of the pipe roofing section by 25%.

As the unblocking by hand of the cutterhead showed when tunnelling through the flexure zone, even the most modern machinery cannot completely replace manual work in the construction of tunnels.

As far as wear is concerned, it is not just the proportion of minerals with a high abrasiveness which is decisive, but in

In der Zone um Tunnelmeter 1320 (siehe Bild 8) wurde erneut die Kombination von Sandsteinlagen in Verbindung mit eindringendem Bergwasser angetroffen. Dank der verstärkten Schneidrollen konnte der Verschleiss verringert und damit eine deutlich längere Standzeit erzielt werden.

5 Kurzfazit zur Startröhre und zum Hartgesteinsvortrieb

Eine dreidimensionale Visualisierung der Geologie kann komplexe Zusammenhänge verständlicher veranschaulichen und somit massgeschneiderte Lösungen fördern, wie eine Reduktion der Rohrschirmstrecke um 25%.

Wie das händische Befreien des Schneidrades bei der Durchörterung der Flexurzone zeigt, kann auch modernste Maschinenteknik die Handarbeit im Tunnelbau nicht vollständig ersetzen.

Für den Verschleiss ist nicht alleine der Anteil der Mineralien mit grosser Ritzhärte ausschlaggebend, sondern insbesondere auch die Kombination mit Bergwasser, welches sich zusammen mit dem Quarzmehl zu einer besonders abrasiven Paste vermischt.

6 Übergang vom festen Fels ins Lockergestein

Der Lockergesteinsvortrieb unterscheidet sich in diversen Aspekten vom Hartgesteinsvortrieb. Dementsprechend verändern sich die Anforderungen an die Tunnelbohrmaschine. Das Schneidrad muss den Fels nicht mehr brechen, im Gegenzug muss die Ortsbrust besser gestützt werden. Dies wird mit einer Bentonitsuspension bewerkstelligt, welche mit Hilfe eines Luftpolsters in der Arbeitskammer dauernd dem lokal nötigen Stützdruck angepasst wird. Da im Lockergesteinsvortrieb somit in der Arbeits- und Abbaukammer mehr Druck herrscht als im Tunnel, müssen der vorderste Teil der Maschine sowie die Tübbinge dicht sein, um einen Druckabfall zu verhindern.

6.1 Umbau im Gebirge

Der Umbau einer Maschine dieser Grösse nimmt einige Zeit in Anspruch und erfordert eine standfeste Ortsbrust. Deshalb wurden Bohrpfähle von der Oberfläche aus erstellt, um einen sicheren Bereich für die Arbeiten zu schaffen (siehe Bild 10). Mit dieser Sicherungsmassnahme konnten die Modifikationen an der Maschine planmässig vorgenommen werden.

6.2 Materialtransport

Auch der Materialtransport muss für den Lockergesteinsvortrieb umgestaltet werden. Zusätzlich zum Abtransport des Abbaumaterials muss über eine Förderleitung Bentonitsuspension von der Separationsanlage (siehe Bild 11) bis in die Abbaukammer gepumpt werden. Das Abbaumaterial wird mit der Suspension in der Förderleitung zur Separationsanlage gepumpt, welche über ein mehrstufiges Verfahren die Feststoffe grösser 30 µm von der Suspension trennt.



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenbergtunnel

10 Erstellen der Bohrpfahlwand für den Umbau der TBM unter Tage
Making the bored pile wall to convert the TBM underground

particular, the combination with groundwater, which mixes with the quartz powder to form an especially abrasive paste.

6 The Transition from Solid Rock to Loose Rock

Cutting a tunnel through loose rock differs in a number of ways from tunnelling through solid rock. The requirements made of the tunnel boring machines thus change accordingly. The cutterhead no longer has to break the rock, but on the other hand, the tunnel face has to be better supported. This is done by supplying a bentonite suspension which, with the help of an air cushion in the working chamber, is continuously adjusted to the locally required supporting pressure. As when tunnelling through loose rock there is a higher pressure in the working and cutting chambers than in the tunnel, the front part of the machine as well as the lining segments must be properly sealed to prevent a loss of pressure.

6.1 Converting the TBM within the Rock

It does take some time to convert a machine of this size inside the tunnel and for this a stable tunnel work face is required. This is why bored piles were drilled from the surface, to create a safe working area (see Fig. 10). With these supporting measures, the machine could be modified as planned.

6.2 Transport of the Muck

The muck transport also had to be rearranged for tunnelling through loose rock. In addition to the removal of the excavated material, a bentonite suspension had to be pumped via a pipeline from the separation system (see Fig. 11) up to the cutting chamber. The excavated material is pumped together with the suspension in the pipeline to the separation system which then uses a multi-stage process to separate out solid material which is larger than 30 µm from the suspension.

7 Zusätzliche Komplexität durch den Suspensionskreislauf

Damit ein sicherer Vortrieb gewährleistet werden kann, muss die Abbaukammer immer mit hinreichend Suspension (quantitativ und qualitativ) versorgt sein. Dies erweitert die Komplexität des Gesamtsystems. Die geografische Trennung von Separationsanlage und Vortriebsmannschaft erschwert die Koordination zusätzlich. Die Steuerung der Pumpen des Suspensionskreislaufs erfolgt vom Steuerstand der Tunnelbohrmaschine aus. Sämtliche Komponenten der Separationsanlage werden aber vor Ort gesteuert. Im ganzen System von der Abbaukammer bis nach der Abtrennung der Feststoffe ist kein Puffer vorhanden. Falls die Menge an Abbaumaterial zu stark anwächst und die Separationsanlage an ihre Grenzen zu kommen droht, muss der Kreislauf und damit auch die Vortriebsgeschwindigkeit der Tunnelbohrmaschine gedrosselt werden. Deshalb ist eine ständige Kommunikation zwischen den Bedienern der Anlagen zwingend notwendig.

7 Additional Complexity Due to the Circulation of the Suspension

To ensure that safe tunnelling can be guaranteed, the cutting chamber must always be supplied with sufficient suspension (with the right quality and quantity). This enlarges the complexity of the overall system. The differing locations of the separation system and the tunnelling team, makes the coordination even more difficult. The pumps circulating the suspension are controlled from the tunnel boring machine's control panel. All of the parts of the separation system are however controlled locally at the plant. In the entire system from the extraction chamber until after the separation of the solid materials, there is no buffer available. If the amount of excavated material increases too far and the separation system threatens to hit its limits, then the circulation and thus also the speed of advance of the tunnel boring machine have to be slowed down. This is why constant communication is needed between the TBM operators and the operators of the slurry system.



Quelle/credit: ARGE Tunnel Eppenbergtunnel

11 Separationsanlage im Aufbau
The separation plant being set up

Da es keine Möglichkeit gibt, während des Vortriebs auf der Tunnelbohrmaschine die Ortsbrust oder das Ausbruchmaterial zu besichtigen, können nur über die Messinstrumente Rückschlüsse gewonnen werden.

7.1 Thixotropie

Die Anforderungen an die Bentonitsuspension sind vielfältig, teilweise diametral. In der Abbaukammer muss sie die Stabilität der Ortsbrust gewährleisten und gleichzeitig das Gebirge abdichten. In der Förder- bzw. Speiseleitung wird eine Schmierfunktion angestrebt, welche die Abrasion klein halten soll. Stark vereinfacht soll die Suspension möglichst gut fließen, solange sie im Kreislauf zirkuliert oder ins Gebirge gepresst wird. Sobald sie im Gebirge oder in der Abbaukammer zur Ruhe kommt, soll die Fließgrenze ansteigen, um die gewünschte Stütz- bzw. Abdichtfunktion zu entfalten. Diese Thixotropie, d. h. die Eigenschaft eines geringen Verformungswiderstands in Bewegung und einer Erhöhung des Verformungswiderstands bei Stillstand, ist vollständig reversibel. Die thixotrope Eigenschaft von Bentonitsuspension ist von vielen Faktoren abhängig, wie Bentonitkonzentration, Temperatur, Chemismus, wobei das Verhältnis von Natriumionen zu Kalziumionen eine wichtige Grösse ist. Eine permanente Überprüfung der Suspensionsparameter ist unerlässlich.

7.2 Druckluftestiege

Trotz massiv geringerer Verschleiss gegenüber der Trockenvortriebsstrecke mussten auch in der Nassvortriebsstrecke, vor allem in der Übergangzone, Werkzeuge am Schneidrad gewechselt werden. Um zu verhindern, dass bei einer Absenkung der Suspension ihre stützende Wirkung auf die Ortsbrust verloren ging, wurde der Stützdruck zeitweilig mit Luftdruck erzeugt. Dies stellte höhere Anforderungen an die abdichtende Wirkung der Bentonitsuspension im Gebirge. Ebenfalls hoch waren die Anforderungen an die Gesundheit der Arbeiter, welche unter Überdruck die Werkzeugwechsel am Schneidrad vornahmen. Um die Gesundheit der betreffenden Arbeiter zu gewährleisten, waren strenge Vorschriften, Zeitfenster und Notfallvorkehrungen einzuhalten.

8 Kurzfazit zum Lockergesteinsvortrieb

Die Suspensionsqualität hat einen erheblichen Einfluss auf die Vortriebsleistung und muss ständig kontrolliert und reguliert werden. Eine permanente, klare Kommunikation zwischen Tunnelbohrmaschine und Separationsanlage ist unerlässlich. Eine Vorstellung von der Beschaffenheit des anstehenden Gebirges kann nur anhand der Auswertung der Maschinendaten und der Beschaffenheit der Suspension gewonnen werden.

While tunnelling is in progress there is no possibility on the TBM of inspecting the tunnel face or the excavated material, so conclusions can only be drawn from the monitoring and measuring equipment.

7.1 Thixotropy

The requirements on the bentonite suspension are varied and some are contradictory. In the cutting chamber, the stability of the tunnel face must be ensured and at the same time the rock must be sealed off (waterproofed). In transport pipework and in the supply lines, a lubrication function is desirable to reduce the abrasion. Heavily simplified, the suspension should flow as well as possible, so that it circulates through the system or is pressed into the rock. As soon as it comes to rest in the rock or in the cutting chamber, its flow limit should increase so that it can provide the required supporting or sealing function. This thixotropy i.e. the property of having low resistance to deformation while in motion and the increase of resistance to deformation while at a standstill, is completely reversible. The thixotropic property of a bentonite suspension depends upon many factors, such as the concentration of bentonite, temperature, chemical composition, whereby the ratio of sodium ions to calcium ions is an important parameter. It is vital to constantly monitor the suspension parameters.

7.2 Air Lock Chambers

Despite much lower wear in comparison to the dry tunnelling sections, even in the wet tunnelling sections, and especially in the transition zones, tools have to be changed on the cutterhead. To prevent the lowering of the suspension level at the face causing a loss of support, the supporting pressure was occasionally created with compressed air. This presented higher requirements on the sealing (waterproofing) effect of the bentonite suspension on the rock. The requirements were also high on the protection of the workers' health, who had to replace the tools on the cutterhead under a high air pressure. To protect the affected workers' health, strict regulations, time windows and emergency precautions had to be maintained.

8 Brief Summary on Tunnelling Through Loose Rock

The quality of the suspension has a significant effect on the tunnelling or advance rate and has to be constantly checked and adjusted. Constant, clear communication between the tunnel boring machine and the separation plant is vital. An impression of the nature of the coming rock can only be gained by evaluating the machine's data and the nature of the suspension.

PROJEKTDATEN

Region

Olten–Aarau

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

Bauherrin: Schweizerische Bundesbahnen SBB

Planung und Bauleitung

EIG Rapid, bestehend aus ILF Beratende Ingenieure AG, Aegerter & Bosshardt AG, ACS-Partner AG, SIGNON Schweiz AG

Ausführung der Untertagarbeiten

ARGE Tunnel Eppenbergtunnel, bestehend aus Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf, Schweiz, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt am Main, Deutschland

Kenndaten

Bauzeit:

4,5 Jahre

(Apr. 2015–Okt. 2019, ohne Bahntechnik)

Inbetriebnahme:

Herbst 2020, Fahrplanwechsel Dez. 2020

Baukosten Tunnel:

274 Mio. Schweizer Franken (Rohbau)

Gesamtlänge:

3,1 km Tunnel (davon 2,6 km bergmännisch)

Ausbruchquerschnitt:

128 m²

Besondere Merkmale

Mixschildmaschine mit Funktion für Trockenvortrieb (Effinger Schichten und untere Süswassermolasse) und Nassvortrieb (Niederterrassenschotter)

PROJECT DATA

Region

Kanton Bern, Jura

Client, project management & senior construction management

Client: Schweizerische Bundesbahnen SBB

Planning and site management

IG Rapid, consisting of ILF Beratende Ingenieure AG, Aegerter & Bosshardt AG, ACS-Partner AG, SIGNON Schweiz AG

Execution of the underground work

ARGE Tunnel Eppenbergtunnel, consisting of Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf, Switzerland, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt am Main, Germany

Key data

Construction period:

4.5 years

(Apr 2015 to Oct 2019, without railway infrastructure)

Commissioning:

Autumn 2020, new railway timetable Dec 2020

Tunnel construction costs:

274 million Swiss francs (construction work)

Total length:

3.1 km tunnel (of which 2.6 km mined)

Excavation cross-section:

128 m²

Special features

Mixshield machine with a function for dry tunnelling (Effinger beds and lower freshwater molasse) and wet tunnelling (low terrace gravel)

Daniel Spring, Dipl. Bauingenieur ETH/SIA, Leiter Infrastruktur, Regionalverkehr Bern-Solothurn AG, Worblaufen/CH

Ausbau RBS-Bahnhof Bern

Projektentwicklung bis heute und Herausforderungen aus Sicht des Bauherrn

Der Hauptbahnhof Bern ist der zweitgrösste Bahnhof der Schweiz. Er wird täglich von über 250 000 Bahnreisenden genutzt. Ungefähr ein Viertel der Passagiere benutzen dabei den RBS-Tiefbahnhof, dessen Leistungsfähigkeit erreicht ist. Im Rahmen des Gesamtprojekts «Zukunft Bahnhof Bern» (ZBB) wird ein neuer Tiefbahnhof für den Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) gebaut.

RBS Bern Station Expansion

Project Development To Date and Challenges from the Client's Perspective

Bern central station is the second largest station in Switzerland. It is used daily by over 250,000 rail travellers. Around a quarter of the passengers use the RBS underground station, which is now at capacity. A new underground station is being built for Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) as a component of the Zukunft Bahnhof Bern (ZBB) turnkey project.

1 Einleitung

1.1 Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)

Der RBS ist Teil des gesamtschweizerischen öV-Systems und der S-Bahn Bern. Er transportiert auf vier Bahnlinien und 21 Buslinien jährlich über 26 Millionen Fahrgäste (Bild 1). Er hat die Rechtsform einer Aktiengesellschaft und beschäftigt rund 440 Mitarbeitende. Der RBS zählt zu den am stärksten frequentierten Privatbahnen der Schweiz.

1.2 Bau des bestehenden unterirdischen RBS-Bahnhofs in Bern

Der bestehende RBS-Bahnhof in Bern feierte 2015 sein 50-jähriges Jubiläum. In den 1950er-Jahren als innovatives Zukunftsprojekt für täglich rund 16 000 Fahrgäste geplant, wurde er als erster Schweizer U-Bahnhof 1965 eröffnet (Bild 2).

Beim bestehenden RBS-Tiefbahnhof handelt es sich um einen Kopfbahnhof mit vier Gleisen, erschlossen durch den knapp 1,3 km langen Schanzentunnel. Bahnhof und Tunnel entstanden parallel zum damaligen Neubau des SBB-Bahnhofs von 1959 bis Ende 1964 (Bild 3). Wegen wasserübersättigter Silteinbrüche im Tunnel mussten die Bauarbeiten in der Nähe der künftigen Endstation Bern von Ende November 1961 bis im Januar 1963 unterbrochen und das Projekt abgeändert werden. Nach Überprüfung diverser Bauhilfsmassnahmen wie Injektionen und Gefrierverfahren entschied man sich für eine Trasseabsenkung. Der RBS hat in diesem Bereich mit 45‰ die grösste Steigung in seinem Bahnnetz.

1 Introduction

1.1 Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)

RBS is part of the Swiss national public transport system and S-Bahn Bern. It transports more than 26 million passengers annually on four rail routes and 21 bus routes (Fig. 1). Its legal status is that of a public limited company and it employs around 440 people. RBS is one of Switzerland's most heavily used private railways.

1.2 Construction of the Existing Underground RBS Station in Bern

In 2015, the existing RBS station in Bern celebrated its 50th anniversary. Designed as an innovative, futuristic project for around 16,000 passengers a day in the 1950s, it became the first underground Swiss station when it opened in 1965 (Fig. 2).

The existing RBS underground station is a terminus station with four tracks, accessed through the almost 1.3 km long Schanzentunnel. The station and tunnel were built parallel to the SBB station new build between 1959 and the end of 1964 (Fig. 3). Due to saturated silt ingress into the tunnel, construction work in the vicinity of the future terminus in Bern had to be interrupted from the end of November 1961 to January 1963 and the project revised. After reviewing various auxiliary construction measures such as grouting and freezing methods, it was decided to lower the track level. In this area, RBS has the greatest gradient in its rail network at 45‰.

Extension de la gare RBS de Berne

État d'avancement du projet et défis posés à la maîtrise d'ouvrage

L'actuelle gare RBS de Berne a été ouverte en 1965. Elle était conçue pour env. 16 000 voyageurs par jour. Aujourd'hui, jusqu'à 60 000 personnes l'utilisent quotidiennement. La construction de la nouvelle gare RBS permettra d'adapter la capacité aux besoins actuels et à l'évolution prévue. La nouvelle gare RBS à quatre voies sera située sous les quais 2 à 7 de la gare CFF. Elle comprend deux grandes cavernes souterraines de deux voies chacune et un quai central de 12 m de large. Les coûts de construction de cette nouvelle gare s'élèvent à env. 614 millions de francs (± 10%).

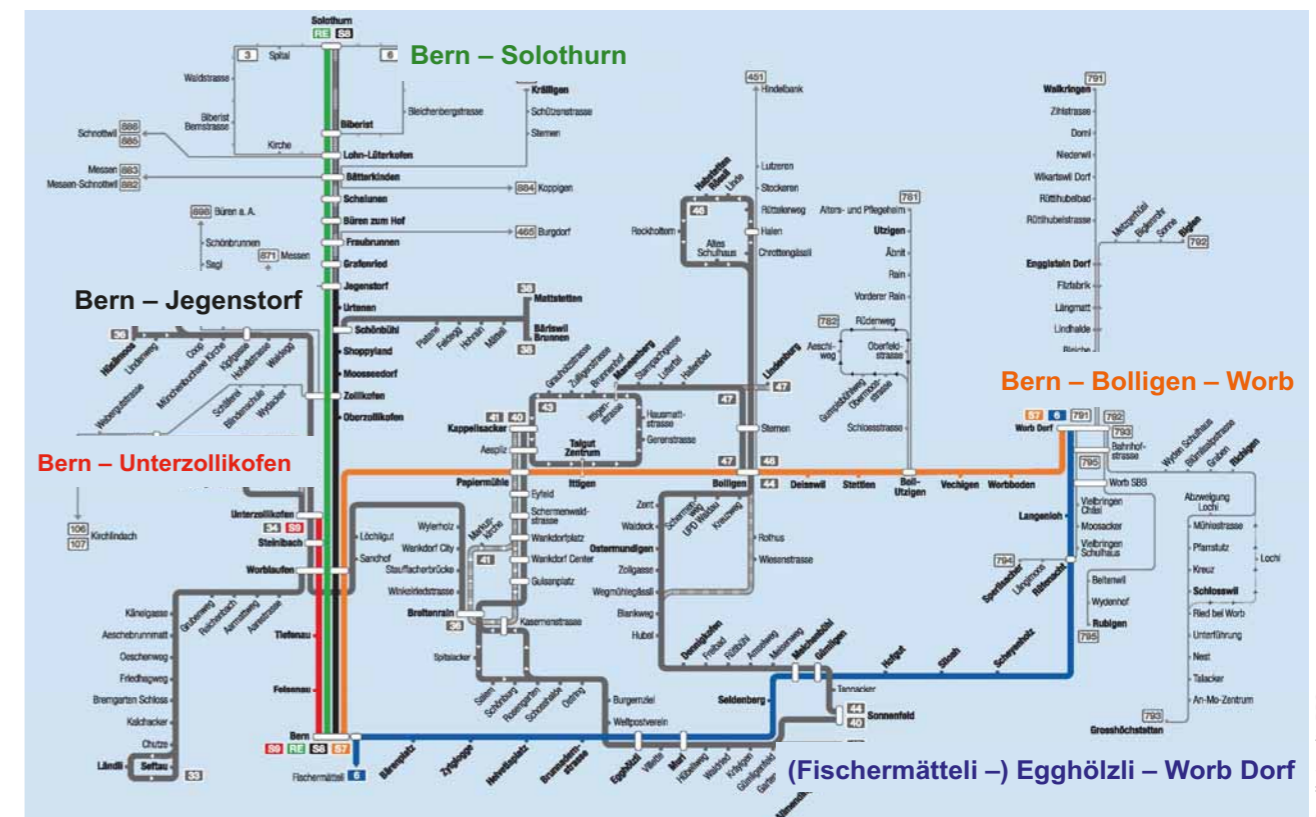
Ampliamento della stazione RBS di Berna

Sviluppo del progetto fino a oggi e sfide dal punto di vista del committente della costruzione

La stazione RBS di Berna è stata costruita nel 1965. Concepita per circa 16 000 passeggeri al giorno, è oggi usata da picchi di 60 000 passeggeri al giorno. Con la costruzione della nuova stazione RBS, la capacità verrà adeguata alle esigenze attuali e allo sviluppo previsto. La nuova stazione RBS a quattro binari si troverà sotto i binari da 2 a 7 della stazione FFS. È costituita da due grandi caverne sotterranee con due binari ciascuna e da un marciapiede centrale largo 12 m. I costi per la nuova stazione RBS saranno di circa 614 milioni di franchi (± 10%).

Die damalige Eröffnung des Bahnhofs bildete die Grundlage für den Erfolg des heutigen RBS und leitete eine beispielhafte Entwicklung ein. Im Dezember 1967 wurde der Bahnhof von 14 000 Reisenden genutzt. Im Dezember 1974, nach der Einführung der Linie S7 Bern-Worb, waren es schon 23 200. Heute sind es an Spitzentagen über 60 000 Fahrgäste – in einem

At that time, the station opening formed the basis for the success of today's RBS and initiated an exemplary development phase. In December 1967 the station was used by 14,000 travellers. In December 1974, following the introduction of the S7 Bern-Worb line, this had already risen to 23,200. Today, at peak periods, it is more than 60,000 passen-



1 Das Liniennetz des RBS
RBS route network

Quelle/credit: RBS



Quelle/Credit: RBS

2 Eröffnung im Jahr 1965 für 12 000 Fahrgäste pro Tag
Opening in 1965 for 12,000 passengers per day

Bahnhof, der ursprünglich für 16 000 Leute gebaut worden war. 60 000 Passagiere pro Tag – das sind Werte, wie sie grosse Bahnhöfe wie etwa Luzern oder Lausanne aufweisen (Bild 4).

1.3 Warum der Ausbau nötig ist

Der RBS-Bahnhof Bern ist heute überlastet und hat seine Kapazitätsgrenze erreicht. Das heisst, der RBS kann weder den Fahrplan weiter verdichten noch mit längeren Zügen fahren. Die Perrons im heutigen RBS-Bahnhof sind zu kurz, zu schmal und lediglich vom Kopfende her erschlossen. Die Fahrgäste kommen sich schnell in die Quere; Gedränge und Wartezeiten sind in den Hauptverkehrszeiten häufig. Nehmen die Frequenzen noch weiter zu, wird dieser Zustand immer häufiger eintreten und kann zu einem Sicherheitsrisiko werden. In den 1990er-Jahren hat der RBS ein «Perron-Bewirtschaftungssystem» eingeführt: In speziellen, linien-spezifischen Warteräumen werden die in Bern einsteigenden Fahrgäste vor dem Bahnsteig so lange zurückgehalten, bis die ankommenden Fahrgäste ausgestiegen sind und den Perron verlassen haben (Bild 4). Mit dieser zeitlichen Trennung der Fahrgastströme konnte der Fussgängerverkehr beschleunigt und die Sicherheit auf den schmalen Bahnsteigen verbessert werden. Wengleich sich die Warteräume ausgesprochen gut bewährt haben und heute nicht nur in den Hauptverkehrszeiten unverzichtbar sind, war von Beginn an klar, dass dieser Ansatz keine definitive Lösung der Kalamitäten sein konnte. Dies wegen der engen räumlichen Verhältnisse der Wartebereiche, der bahnbetrieblichen Leistungsfähigkeit des Bahnhofs sowie der engen Interaktion zwischen Bahnbetrieb und Fahrgastwechsel. Prognosen sagen zudem voraus, dass die Nachfrage im öffentlichen Verkehr bis 2030 um 50% steigen wird. Dies aufgrund der Mobilitäts- und Siedlungsentwicklung und der weiteren Zunahme von Arbeitsplätzen in der Agglomeration Bern.

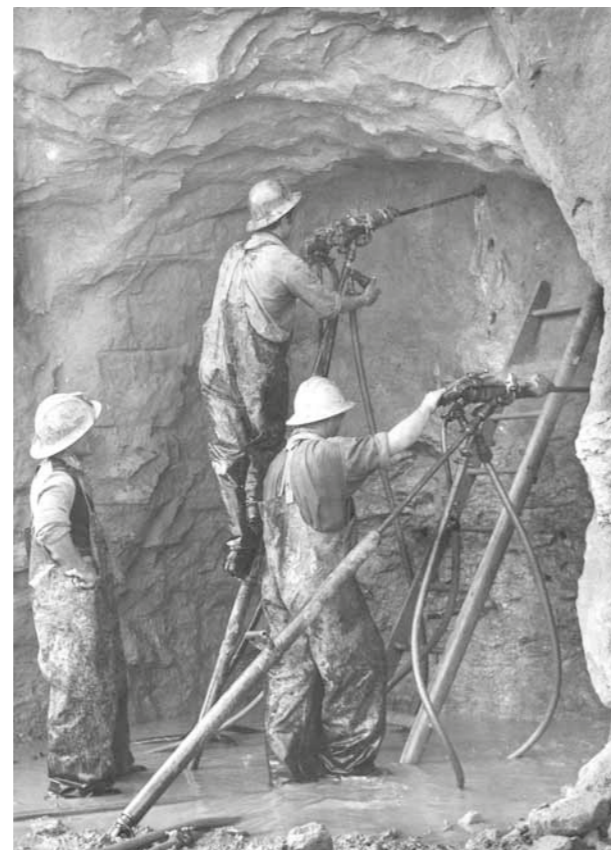
1.4 Planungsprozess

Bereits 1993 wurde im Masterplan Bahnhof Bern ein RBS-Tiefbahnhof als Bestvariante festgehalten (in leicht anderer Ausrichtung). 2007 wurde der Ausbau des Bahnhofs Bern in das Gesamtkonzept «Agglomerationsverkehr und Siedlung der

gers – in a station originally built for 16,000 people. 60,000 passengers per day – these are figures otherwise only seen in large stations such as Lucerne or Lausanne (Fig. 4).

1.3 Why the Expansion is Necessary

Today, the RBS Bern station is overloaded and has reached capacity. This means that RBS can neither refine its timetable further nor use longer trains. The platforms in today's RBS station are too short, too narrow and only accessible from the terminus end. Passengers get in each other's way quickly; crowding and waiting times are common during rush hours. If these rates continue to increase, this condition will occur more frequently and may become a safety hazard. During the 1990s, RBS introduced a platform management system: in special, line-specific waiting rooms, passengers boarding in Bern are kept back from the front of platform until the arriving passengers disembark and leave the platform (Fig. 4). With this temporal separation of passenger flows, pedestrian traffic was accelerated and safety on the narrow platforms improved. Although the waiting rooms have proven to be extremely effective and are now indispensable not only during the rush hour, it was clear from the outset that this approach could not be a definitive solution to the chaos. This is due to the cramped conditions in the waiting areas, the operational efficiency of the station in terms of rail traffic and the close interaction between rail operations and passenger changes. In



Quelle/Credit: RBS

3 Die ersten 6 m Tunnelvortrieb (Herbst 1959)
The first 6 m of tunnelling (autumn 1959)

Region Bern» eingebettet und der dringende Handlungsbedarf im Bahnhof Bern bestätigt. 2008 folgten Machbarkeitsstudien, und es wurde eine Lösung mit zwei Tiefbahnhöfen SBB und RBS präsentiert. Aufgrund diverser Expertengutachten erfolgte eine nochmalige Öffnung des Variantenfächers. Zwischen 2009 und 2011 wurden über 20 verschiedene Varianten und Untervarianten für den Bahnhofausbau in einem zweistufigen Verfahren untersucht. Die Detailbewertung erfolgte mittels 18 verschiedener Indikatoren zu den Themen Verkehr, Siedlung, Sicherheit, Umwelt, Kosten und Realisierbarkeit. Der Entscheid für das Gesamtvorhaben «Zukunft Bahnhof Bern» wurde 2011 gefällt: Die Lösung ist ein schrittweiser Ausbau des gesamten Bahnhofs Bern: zuerst der Ausbau des RBS (noch zwei Varianten zu prüfen) und der Ausbau der Publikumsanlagen SBB und später eine seitliche Erweiterung der SBB-Gleisanlagen. 2012 erfolgte der definitive Variantenentscheid für einen neuen RBS-Tiefbahnhof. Dieser Entscheid bestätigte also die Bestlösung für den RBS, welche bereits 1993 im Masterplan festgehalten worden war. Von Sommer 2015 bis Sommer 2017 erfolgte das ordentliche Plangenehmigungsverfahren und im Juli 2017 der Baustart für den neuen RBS-Bahnhof Bern und der neuen SBB-Publikumsanlagen ist auf den Zeithorizont 2025 geplant.

1.5 RBS-Ausbau ist Bestandteil des Gesamtprojekts «Zukunft Bahnhof Bern» (ZBB)

Bern ist der zweitgrösste Bahnhof der Schweiz. Im in- und ausländischen Bahnverkehr spielt er eine zentrale Rolle. Heute stösst er betrieblich und räumlich an seine Grenzen. Damit er auch in Zukunft seine Funktionen erfüllt und als Drehscheibe dient, wird der Bahnhof Bern ausgebaut. Der Ausbau des Bahnhofs Bern erfolgt in zwei Schritten. Bis zum Jahr 2025 realisieren SBB, RBS und die Stadt Bern folgende Projekte (Bild 5):

- neuer RBS-Bahnhof: Der RBS erstellt unterhalb der bestehenden Gleise 2 bis 7 des SBB-Bahnhofs einen neuen Tiefbahnhof mit vier Gleisen.
- neue Unterführung mit neuen Zugängen im SBB-Bahnhof: Die SBB baut westlich der bisherigen Bahnhofunterführung eine zweite unterirdische Passage, die sogenannte Unterführung Mitte mit Zugängen von der Länggasse und vom Bubenbergplatz her. Abgestimmt auf den Ausbau des Bahnhofs wird die Stadt Bern bis 2025 den Verkehr im Bahnhofumfeld neu organisieren und gestalten. Damit sollen die stark wachsenden Passantenströme rasch und sicher vom und zum Bahnhof geführt und Verbesserungen für den Tram- und Busverkehr sowie den Fuss- und den Veloverkehr erzielt werden.

Im zweiten Ausbauschritt plant die SBB, den Bahnhof Bern seitlich zu erweitern. Vorgesehen sind vier zusätzliche Gleise unter der Grosse Schanze. Damit kann das Angebot im Fern- und Regionalverkehr weiter ausgebaut werden. Diese Erweiterung wird im Rahmen des Strategischen Entwicklungsprogramms Bahninfrastruktur (STEP) erfolgen und zwischen dem Bundesamt für Verkehr (BAV), den betroffenen Kantonen und Bahnen abgestimmt.



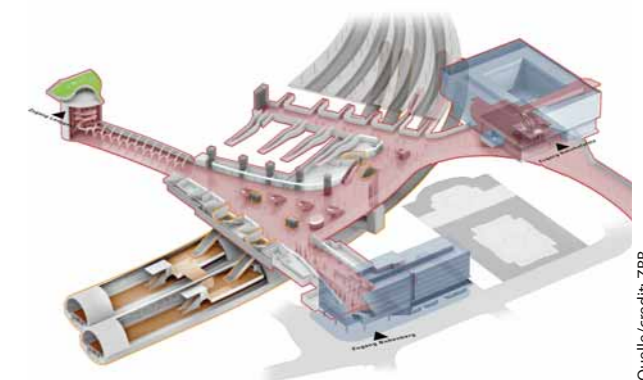
Quelle/Credit: RBS

4 Morgenspitze im bestehenden Bahnhof
Morning peak in the existing station

addition, forecasts predict that public transport demand will increase by 50% by 2030 as a result of mobility and housing developments and the further increase in jobs in the Bern conurbation.

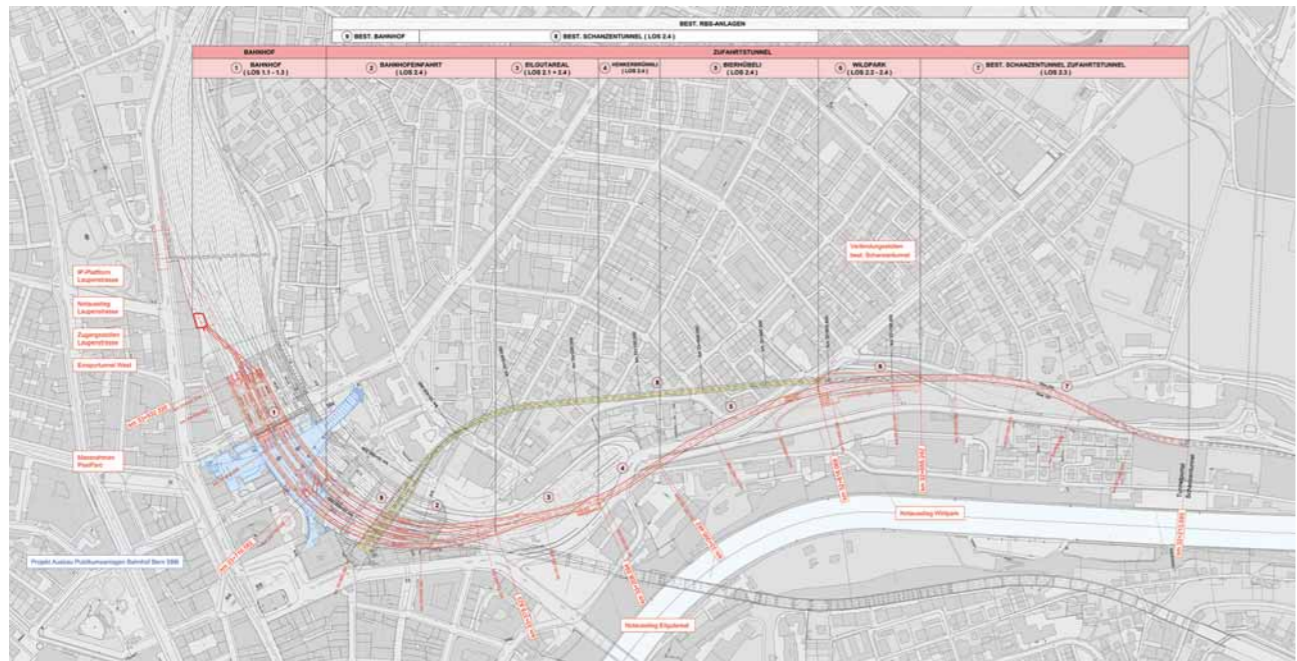
1.4 Planning Process

As early as 1993, an RBS underground station was stipulated as the best option in the Bern station master plan (with a slightly different orientation). In 2007, the Bern station expansion was incorporated in the overall Conurbation traffic and settlement in the Bern region concept and the urgent need for action at Bern station confirmed. Feasibility studies followed in 2008 and a solution using two underground stations, SBB and RBS, was presented. Based on various expert reports, the range of options was reopened. Between 2009 and 2011, more than 20 different station expansion options and sub-options were examined in a two-stage process. The detailed evaluation was carried out by means of 18 different indicators covering the topics of traffic, settlements, safety, the environment, costs and feasibility. The decision for the turnkey project Zukunft Bahnhof Bern was taken in 2011: the solution represents a step-by-step expansion to



Quelle/Credit: ZBB

5 ZBB: SBB-Passage und RBS-Tiefbahnhof
ZBB: SBB passage and RBS underground station



6 Gesamtübersicht mit Abschnitten
Overview with sections

Die Kosten des ersten Ausbauschnitts des Projekts «Zukunft Bahnhof Bern» (bis 2025) belaufen sich auf:

- 614 Mio. Franken (±10%; Anteil Bund 450 Mio., Anteil Kanton Bern 164 Mio.) für den neuen RBS-Bahnhof;
- 360 Mio. Franken (±10%; Anteil Bund 121 Mio., Anteil Kanton Bern und Stadt Bern 239 Mio.) für den Ausbau der Publikumsanlagen SBB (als Agglomerationsprojekt mitfinanziert über den Infrastrukturfonds).

Beim heutigen Planungsstand werden die Kosten der Verkehrsmassnahmen der Stadt Bern auf maximal 93 Mio. Franken geschätzt.

2 Projektbeschreibung Ausbau RBS-Bahnhof Bern

2.1 Gesamtübersicht

Beim neuen RBS-Bahnhof wird es sich – analog zum heute bestehenden RBS-Bahnhof – ebenfalls um einen Tiefbahnhof handeln. Dieser kommt unterhalb der südlichen Gleise des SBB-Bahnhofs unter den Gleisen 2 bis 7 zu liegen. Der Bahnhof besteht aus zwei Bahnhofskavernen von jeweils ungefähr 200 m Länge und rund 20 m Breite. Jede Kaverne beinhaltet zwei Gleise mit einem 12 m breiten Mittelperron. In beiden Kavernen sind Verteilebenen über den Perronebenen angeordnet, welche durch Querstollen verbunden sind. Von den Verteilebenen führen gesamthaft vier Zugänge in die ebenfalls neu entstehende Unterführung Mitte der SBB. Die Bahnhofskavernen werden einseitig von Osten her durch einen Zufahrtstunnel erschlossen. Dieser wird dereinst vom Zufahrtstunnel des bestehenden Bahnhofs, dem Schanzentunnel, abzweigen. Kurz vor der Einfahrt in den neuen Tiefbahnhof unterteilt sich der neue zweigleisige Zufahrtstunnel in vier Einzeltunneln. Diese führen unter dem SBB-Gleisfeld hin-

the entire Bern station. First, the RBS installation expansion (two more options to be examined) and upgrading of the SBB public facilities, and later a lateral extension of the SBB installations. In 2012, the final decision fell in favour of the new RBS underground station option. This decision thus confirmed the best solution for the RBS, which had already been stipulated in 1993 in the master plan. The proper planning permission procedure followed from summer 2015 until summer 2017 and in July 2017 construction of the new RBS Bern station and the new SBB public facilities is planned for around 2025.

1.5 RBS Expansion Forms Part of the Zukunft Bahnhof Bern (ZBB) Entire Project

Bern is the second largest station in Switzerland. It plays a central role in both international and domestic rail transport. Today, it has reached its operational and spatial capacity. To ensure that it continues to fulfil its functions and serve as a hub in the future, Bern station is being upgraded. The Bern station expansion is in two stages. By 2025, SBB, RBS and the City of Bern will implement the following projects (Fig. 5):

- New RBS station: RBS will build a new underground station with four lines below the existing SBB station lines 2 to 7.
- New underpass with new access points in the SBB station: SBB will build a second underground passage west of the current station underpass, the so-called Unterführung Mitte, with access from Länggasse and Bubenberplatz. The City of Bern will be reorganising and redesigning the traffic flow in the station environment by 2025, in line with station expansion. The aim is to quickly and safely transfer



7 Visualisierung Perronebene
Platform level visualisation

durch und münden schliesslich in die beiden Kavernen. Das Projekt teilt sich in neun verschiedene Abschnitte auf (Bild 6):

- Abschnitt 1: Bahnhof
- Abschnitt 2: Bahnhofeinfahrt
- Abschnitt 3: Eilgutareal
- Abschnitt 4: Henkerbrännli
- Abschnitt 5: Bierhübeli
- Abschnitt 6: Hirschenpark
- Abschnitt 7: bestehender Schanzentunnel (Zufahrtstunnel)
- Abschnitt 8: bestehender Schanzentunnel (Ausserbetriebnahme)
- Abschnitt 9: bestehender RBS-Bahnhof (Ausserbetriebnahme)

2.2 Geologie

Die geologischen Verhältnisse im Projektperimeter bestehen im Wesentlichen aus einer Felsunterlage, den sogenannten Gümnenen-Schichten der Unteren Süsswassermolasse. Diese Felsunterlage bildet im Bereich der Grossen Schanze eine Felskuppe. Daher fällt die Felsoberfläche dieser Molassekuppe gegen Süden unregelmässig und gegen Westen relativ steil ab. Westseitig der Schanzenbrücke (Strassenver-



8 Visualisierung Verteilebene
Distribution level visualisation

the fast-growing pedestrian flow from and to the station, and to improve tram and bus transport as well as pedestrian and bicycle traffic.

In the second phase of expansion, SBB plans to expand Bern station laterally. Here, four additional lines are planned beneath Grossen Schanze. This will allow long-distance and regional transport to be further expanded. This extension will be carried out as part of the Rail Infrastructure Strategic Development Programme (STEP) and coordinated between the Federal Office of Transport (BAV), the affected cantons and railway companies.

The costs for the first stage in the Zukunft Bahnhof Bern expansion project (until 2025) amount to:

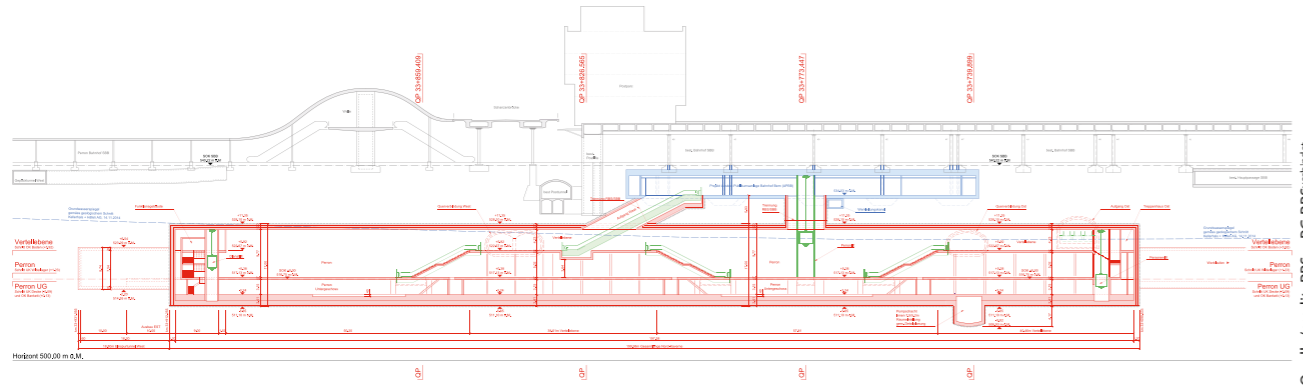
- 614 million Swiss francs (±10%; 450 million federal government share, 164 million Canton Bern share) for the new RBS station;
- 360 million Swiss francs (±10%; 121 million federal government share, 239 million Canton Bern share) for the SBB public facilities upgrade (co-funded through the infrastructure fund as a conurbation project).
- At the current state of planning, the costs of the City of Bern traffic measures are estimated at a maximum of 93 million francs.

2 RBS Bern Station Expansion Project Description

2.1 Overview

The new RBS station will also be an underground station – analogous to the existing RBS station. It will come to rest beneath the southern tracks of the SBB station, beneath lines 2 to 7. The station comprises two station caverns each approximately 200 m long and around 20 m wide. Each cavern contains two lines with a 12 m wide central platform. In both caverns, distribution levels are arranged above the platform levels, connected by transverse tunnels. From the distribution levels, a total of four entrances will lead to the new underpass at the centre of the SBB. The station caverns are unilaterally accessed by an access tunnel from the east. This will branch off from the access tunnel to the existing station, the Schanzentunnel. Shortly before entering the new underground station, the new double-track access tunnel is divided into four individual tunnels. These pass beneath the SBB track area and finally open into the two caverns. The project is divided into nine different sections (Fig. 6):

- Section 1: Station
- Section 2: Station entrance
- Section 3: Eilgutareal
- Section 4: Henkerbrännli
- Section 5: Bierhübeli
- Section 6: Hirschenpark
- Section 7: Existing Schanzentunnel (access tunnel)
- Section 8: Existing Schanzentunnel (decommissioning)
- Section 9: Existing RBS station (decommissioning)



9 Längsschnitt Abschnitt Bahnhof
Station longitudinal section

bindung Länggasse) liegt die Felsoberfläche demnach relativ tief. Die Gümnenen-Schichten umfassen vorwiegend Sandsteine und fein geschichtete Wechsellagerungen von Sandsteinen, Feinsandsteinen, Siltsteinen und Mergeln. Die Schichtung ist mehrheitlich flach. Die vertikale und laterale Ausdehnung der Schichten kann aber beträchtlich variieren. Darüber liegen unterschiedliche Lockergesteine. Diese setzen sich aus glazialen Ablagerungen zusammen.

2.3 Abschnitt 1 – Bahnhof

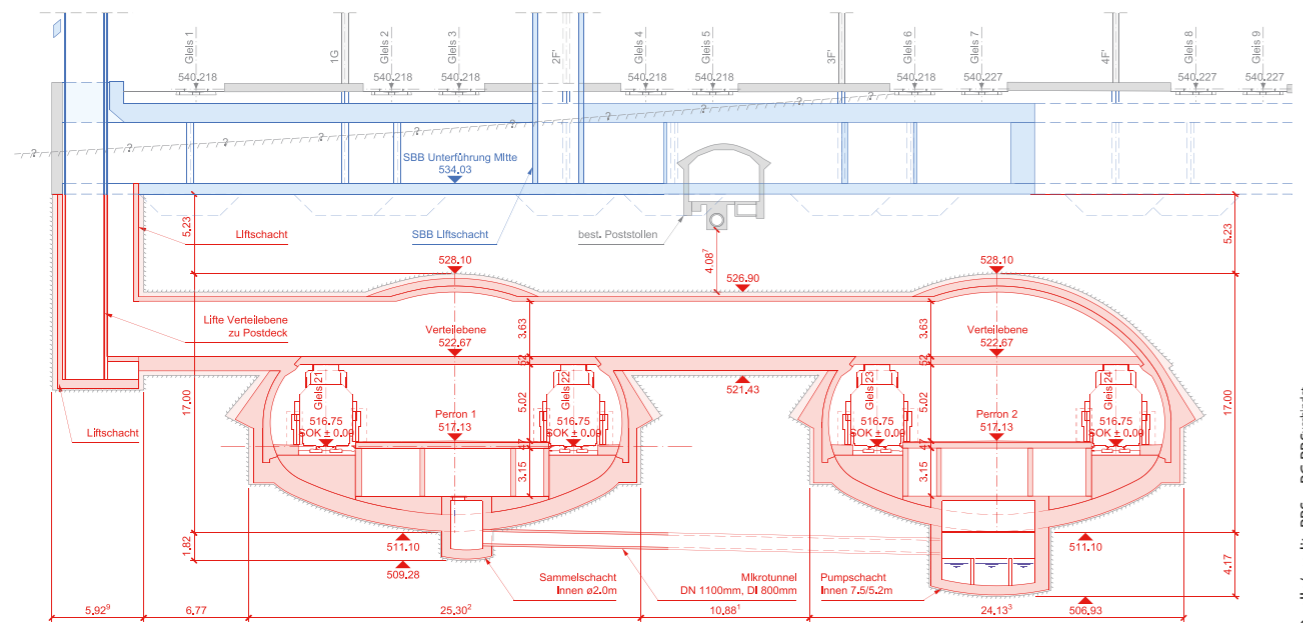
Der Bahnhof besteht aus zwei Kavernen mit je einem 12 m breiten Mittelperron. Die Kavernen sind im Grundriss leicht gekrümmt und so platziert, dass einerseits die Lasten aus den darüber liegenden Infrastrukturanlagen möglichst symmetrisch auf die Grosskavernen einwirken und andererseits ein möglichst grosser Abstand zwischen den beiden Hohlräumen entsteht. In beiden Kavernen sind Verteilebenen über den Perronebenen angeordnet, welche eine Verbindung der beiden Bahnhofskavernen mittels Querstollen erlauben (Bild 7

2.2 Geology

The geological conditions in the project area consist essentially of bedrock, known as the Gümnenen-Schichten (layers) of the lower freshwater molasses. This bedrock forms a rocky outcrop in the region of Grosse Schanze. The rock surface of this molasse outcrop falls irregularly towards the south and relatively steeply towards the west. To the west of Schanzenbrücke (road link to Länggasse), the surface is therefore relatively deep. The Gümnenen layers comprise mainly sandstones and finely layered alternating deposits of sandstones, fine sandstones, siltstones and marls. Stratification is generally flat. However, the vertical and lateral extent of the beds can vary considerably. They are overlain by a variety of unconsolidated rocks, predominantly comprising glacial deposits.

2.3 Section 1 – Station

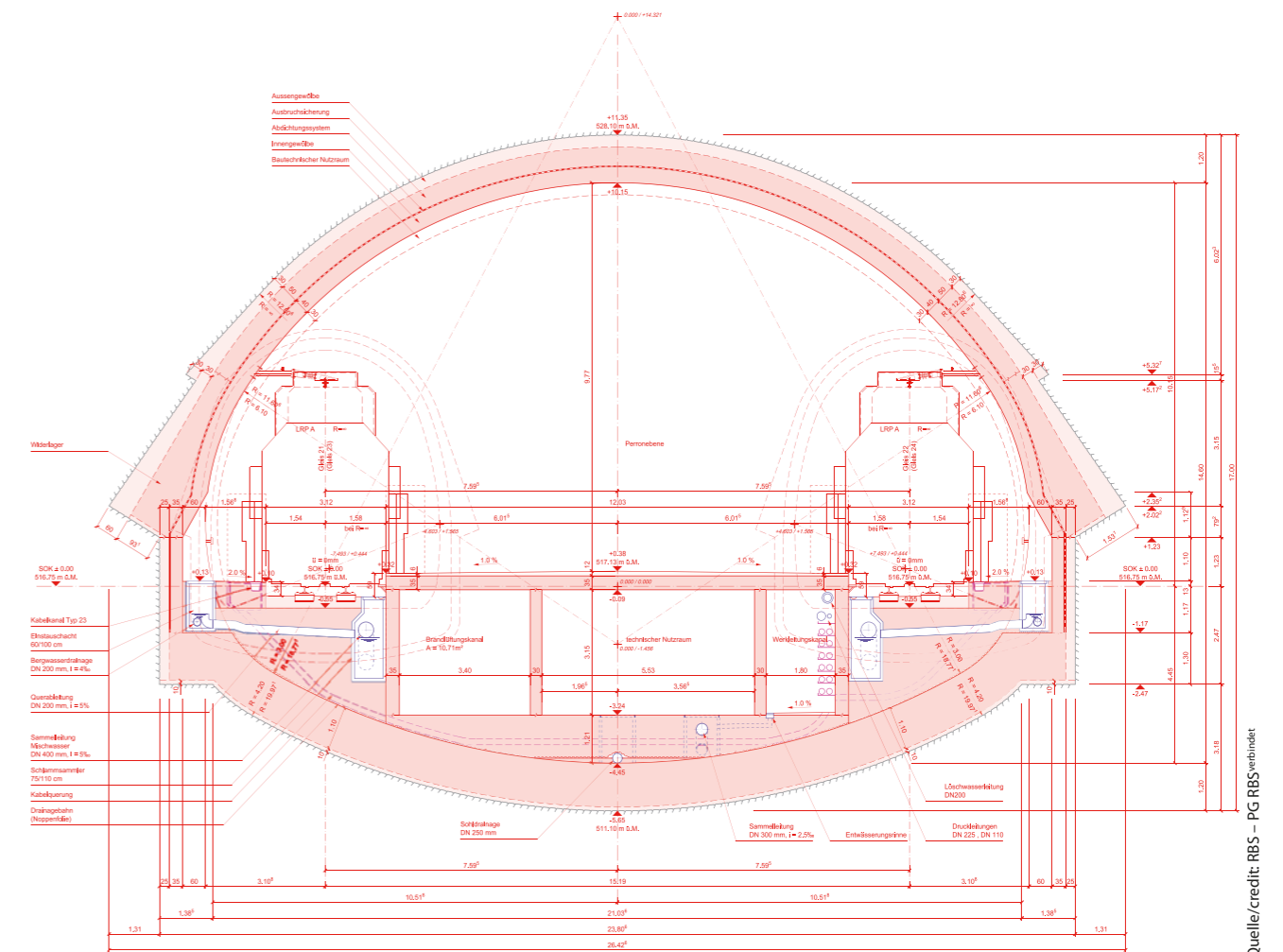
The station consists of two caverns each with a 12 m wide central platform. In plan, the caverns are slightly curved and



10 Querprofil Bahnhofbereich
Station area cross profile

und 8). Von den Verteilebenen führen pro Kaverne zwei Aufgangsstollen in die Passagenebene SBB. Von den Perrons führt je eine Liftverbindung direkt in die Passagenebene SBB. Am östlichen Ende der Südkaverne führt eine weitere Stollenverbindung zu einem Liftschacht, welcher die Verteilebene mit der Passage SBB verbindet und weiter hinauf auf das sogenannte Postdeck führt und die Postautostation erschliesst. Die Perrons in den Bahnhofskavernen liegen ungefähr 23 m unter den SBB-Gleisen. Die Niveaudifferenz zur Passagenebene beträgt ungefähr 17 m (Bild 9 und 10). Die Höhenlage des Bahnhofs ergibt sich primär aus einer statisch erforderlichen Felsüberdeckung zwischen den Kavernengewölben und den darüber liegenden Fundamenten, die sehr hohe Lasten in den Baugrund einleiten. Dabei war zur Verkürzung der Umsteigezeiten der Bahnbenutzer eine möglichst hohe Lage der Gleisanlagen anzustreben. Die Kavernen (Bild 11) werden in Teilquerschnitten ausgebrochen (in der Höhe unterteilte Paarmantelstollen, Kalotte, Kern, Strosse, Sohle). Die Ausbruchssicherung besteht aus bewehrtem Spritzbeton mit Felsankern und Gitterbögen je nach Erfordernis. In Bereichen mit hohen Lasten und geringeren Baugrundfestigkeiten ist der Einsatz von Zusatzmassnahmen geplant (Mikropfähle unter Kalotte

located such that, on the one hand, the loads imposed by the infrastructure above act as symmetrically as possible on the large caverns and, on the other hand, the greatest possible distance between the two cavities results. In both caverns, distribution levels are arranged above the platform levels, allowing the two station caverns to be connected by means of cross passage (Fig. 7 and 8). From the distribution levels, two tunnels per cavern lead to the SBB plaza level. A lift connection leads directly to the SBB plaza level from the platforms. At the eastern end of the south cavern, another gallery link leads to a lift shaft, which connects the distribution level with the SBB passage and continues up to the so-called Postdeck, where it links to the mail car station. The station cavern platforms are approximately 23 m below the SBB tracks. The elevation difference to the plaza level is approximately 17 m (Fig. 9 and 10). The station elevation results primarily from a structurally required rock cover between the cavern vaults and the overlying foundations, which introduce very high loads into the ground. Here, the aim was to achieve as high a position as possible for the railway installations to shorten the railway user transfer times. The caverns (Fig. 11) are excavated in sections (subdivided by height into



11 Normalprofil Abschnitt Bahnhof
Station section standard profile

tenwiderlager). Im Anschluss an die Ausbruch- und Sicherungsarbeiten erfolgen die Abdichtungs- und Betonarbeiten zur Verkleidung der Kavernen.

2.4 Abschnitt 2: Bahnhoefeinfahrt

Die Bahnhoefeinfahrt stellt die Verzweigung vom Doppelspurtunnel in die Bahnhoefkavernen Nord und Süd dar. Dabei laufen die Gleise, vom Bahnhof her kommend, in Richtung Worblaufen kontinuierlich zusammen. Aus den vier Einspur-tunneln werden zunächst die mittleren Röhren zu einem Doppelspurtunnel zusammengefasst, und schliesslich wird aufgrund der geringen Gleisabstände auf den letzten 20 m in Richtung Eilgut ein Brillenprofil erforderlich. Die Tunnel der Bahnhoefeinfahrt werden vom Eilgut her aufgefahen. Der Ausbruch erfolgt als maschinenunterstützter Vortrieb im Fels im Kalottenausbruch. Da teils nachbrüchiges Gebirgsverhalten zu erwarten ist, erfolgt die Ausbruchsicherung deshalb systematisch mittels Stahlleinbau und Spritzbeton als flächiges Stützmittel. Im Bereich der Unterquerung des bestehenden RBS-Bahnhofs ist eine vorausseilende Sicherung mittels Rohrschirm als Bauhilfsmassnahme vorgesehen (Bild 12).

2.5 Abschnitt 3: Eilgutareal

Der Bereich des Abschnitts 3 wird in der Deckelbauweise erstellt, damit der Bahnbetrieb im Gleisbereich der sich dort befindenden Abstellanlage nicht oder nur teilweise beeinträchtigt werden muss. Das Bauwerk erstreckt sich über eine Länge von etwa 150 m und eine Breite von knapp 12 m.

Auf Bohrpfehlen wird der Deckel im Rahmen der Deckelbauweise gelagert; aufgrund der maximal möglichen Gleissper-rungen der Abstellanlage muss er in drei Etappen erstellt werden. Der Aushub unter dem Deckel erfolgt vom angren-zenden Zugangsschacht her. Im ersten und zweiten Unterge-schoss sind jeweils Stellplätze für Dienstfahrzeuge von RBS/SBB vorgesehen. Im dritten Untergeschoss werden Räume für bahntechnische Anlagen platziert. Im vierten Unterge-schoss kommen die RBS-Gleisanlagen zu liegen (Bild 13).

side-wall gallery, top heading, core, bench, invert). Excava-tion stabilisation consists of reinforced shotcrete with rock anchors and lattice girders if required. In regions subject to high loads and with lower ground strength, the use of ad-ditional measures is planned (micropiles under top heading abutment). Following the excavation and stabilisation work, the waterproofing and concreting works are carried out to face the caverns.

2.4 Section 2: Station Entrance

The station entrance represents the branch of the twin-track tunnel into the north and south station caverns. Here, the tracks leading from the station converge continuously in the direction of Worblaufen. Of the four single-track tunnels, the centre tunnels are combined to form a twin-track tunnel and finally, due to the short track distances on the last 20 m in the direction of the Eilgutareal, a ocular profile is required. The sta-tion entrances are excavated from the direction of the Eilgutareal. Excavation is executed as machine-assisted tunnelling in top heading rock excavation. Since unconsolidated rock is anticipated in places, excavation stabilisation is performed systematically using steel and shotcrete as a widespread support. In the region of the existing RBS station underpass, precautionary stabilisation by means of a pipe roofing is provided as an auxiliary construction measure (Fig. 12).

2.5 Section 3: Eilgutareal

Section 3 is built using the top-down method, meaning that railway operations in the sidings area located there are not impaired or are only partially affected. The structure extends over a length of approximately 150 m and a width of approxi-mately 12 m.

The roof is supported on bored piles as part of the top-down method; construction follows in three stages due to the maximum possible track possessions in the sidings. Excava-tion beneath the roof is from the neighbouring access shaft. Parking spaces for RBS/SBB service vehicles are planned for

2.6 Abschnitt 4: Henkerbrännli

Der Lockergesteinsabschnitt Henkerbrännli erstreckt sich über eine Länge von ungefähr 113 m. Der doppelspurige Tunnel weist einen maximalen Ausbruchquerschnitt von ungefähr 119 m² sowie eine geringe Firstüberlagerung von gut 10 m auf. Daraus resultierend sind als Bauhilfsmassnahmen ein doppelter, ausinjizierter Rohrschirm, vorausseilende Drainagebohrungen sowie eine systematische Ortsbrustsi-cherung mittels GFK-Ankern vorgesehen. Das Vortriebsver-fahren sieht einen Kalottenvortrieb vor (Bild 14).

2.7 Abschnitt 5: Bierhübeli

Die Länge des Abschnitts Bierhübeli beträgt ungefähr 280 m, und der Tunnel weist dieselben Abmessungen bzw. das gleiche Vortriebskonzept wie der Abschnitt Henkerbrännli auf. Der Tunnel Bierhübeli wird vom Hirschenpark her im Kalottenvor-trieb mittels eines maschinenunterstützten Vortriebs im Fels vorgetrieben. Im Abschnitt mit abnehmender Felsüberdeckung erfolgt die Umstellung auf den Lockergesteinsvortrieb mit dop-peltem Rohrschirm bis zum Zugangsschacht Eilgutareal.

2.8 Abschnitt 6: Hirschenpark

Der Abschnitt 6 Hirschenpark beinhaltet die Einbindung des bestehenden zweigleisigen Schanzentunnels in den neuen, ebenfalls zweigleisigen Zufahrtstunnel Richtung RBS-Tiefbahnhof. Die Einbindung wird in offener Bauweise unter Bahnbetrieb erstellt. Neben der Baugrube und dem Rückbau des bestehenden Schanzentunnels beinhaltet dieser Ab-schnitt ausser dem Tagbautunnel auch den erforderlichen Notausstieg mit technischen Räumen (Bild 15).

2.9 Abschnitt 7: bestehender Schanzentunnel (Zufahrtstunnel)

Dieser Bereich des bestehenden Schanzentunnels wird für den Bahnbetrieb weiter genutzt. In seiner Form besteht der Schanzentunnel aus leicht unterschiedlich ausgebildeten Nor-malprofilen mit seitlichen Ge-wölbefundationen und einer Sohlenplatte. Beim Tunnel-Eingangsbereich verläuft der Tunnel über eine Strecke von ungefähr 130 m in einem Tag-bautunnel, dessen Tragstruktur bereits 2011 saniert worden ist. Durch den Neubau von beidseitigen Banketten sowie die Anordnung von Perso-nenschutzrisen werden die Fluchtwege verbessert und die Sicherheit im bergmännischen Abschnitt erhöht. Für die Abführung des am Gewölbe anfallenden Wassers wird beid-seitig entlang des Gewölbefuses eine offene Rinne geführt. Ungefähr alle 50 m werden die Rinnen in einen Schacht ent-

each of the first and second basement levels. Rooms for technical railway facilities are located on the third basement level. The RBS track installations are located on the fourth basement level (Fig. 13).

2.6 Section 4: Henkerbrännli

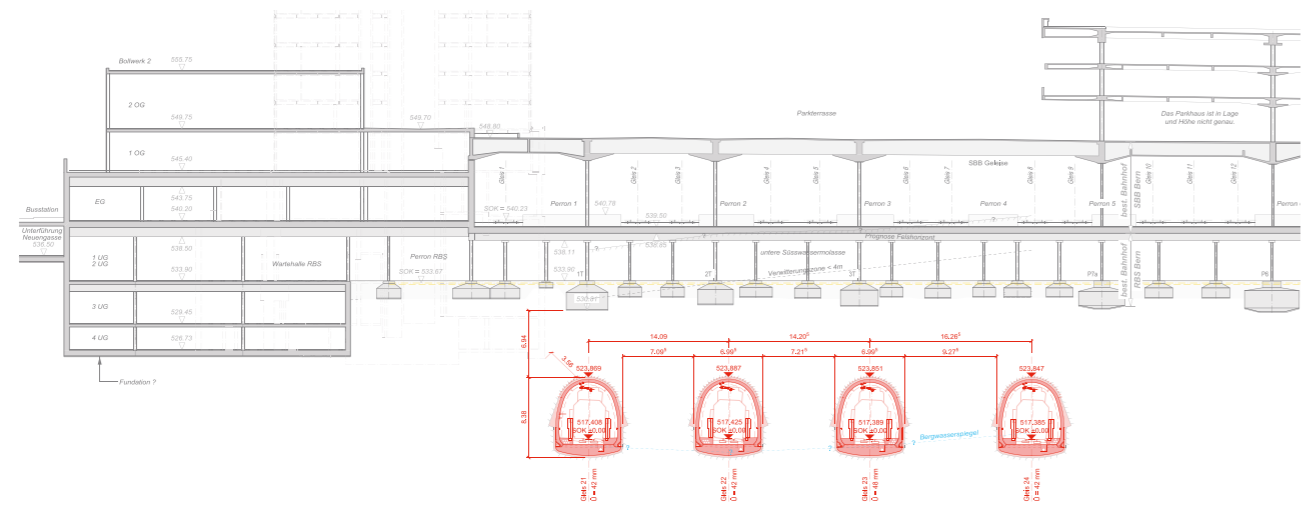
The Henkerbrännli unconsolidated rock section extends over a length of about 113 m. The twin-track tunnel has a maximum excavation cross section of approximately 119 m² and a low roof cover of around 10 m. As a result, a double, grouted pipe umbrella, anticipatory drainage bores, as well as a systematic local face protection by means of GRP an-chors (glass-fibre reinforced plastics), are provided as auxi-lary construction measures. The planned tunnelling method is by crown heading (Fig. 14).

2.7 Section 5: Bierhübeli

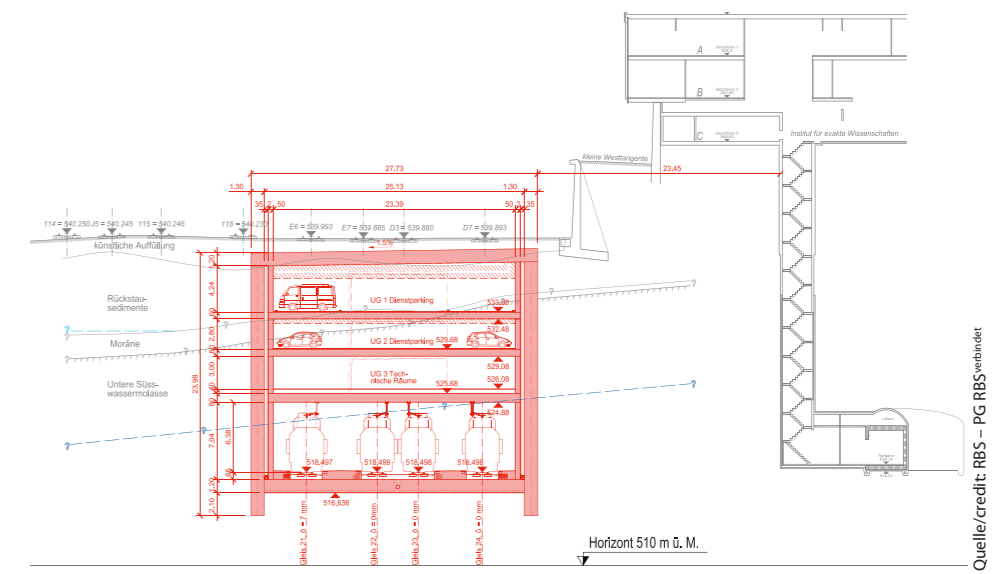
The Bierhübeli section is approximately 280 m long, and the tunnel has the same dimensions and uses the same tunnelling concept as the Henkerbrännli section. The Bier-hübeli tunnel is driven from Hirschenpark using top head-ing by means of machine-supported driving in the rock. The changeover to unconsolidated rock tunnelling with double pipe umbrella in the section with decreasing rock cover takes place prior to the Eilgutareal access shaft.

2.8 Section 6: Hirschenpark

Section 6 Hirschenpark includes integration of the existing twin-track Schanzentunnel into the new RBS underground station access tunnel, which is also twin-track. This will be done using the cut-and-cover method while maintaining track operations. In addition to the excavation and dis-man-tling of the existing Schanzentunnel, this section also includes the necessary emergency exit with engineering services rooms, in addition to the cut-and-cover tunnel (Fig. 15).



12 Querprofil Abschnitt Bahnhoefeinfahrt
Station access section cross profile



13 Querprofil Abschnitt Eilgutareal
Eilgutareal section cross profile

wässert. Diese Schächte sind in den Personenschutznischen angeordnet und werden mit einer Querableitung unter den Gleisen hindurch in die Sammelleitung entwässert (Bild 16).

2.10 Abschnitt 8: bestehender Schanzentunnel (Ausserbetriebnahme)

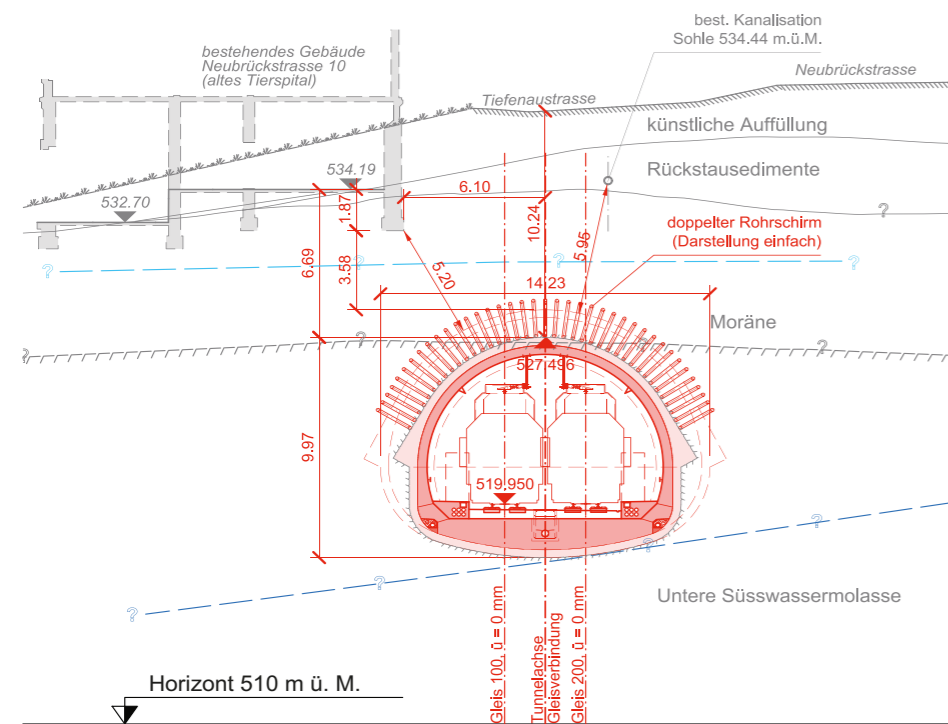
Der bestehende Schanzentunnel im Abschnitt 8 wird nach der Eröffnung des neuen Bahnhofs nicht mehr weiterbetrieben. Die gesamte Bahntechnik (Schienen, Schwellen, Fahrleitungen, Signale, elektrische Anlagen etc.) wird rückgebaut. Der Schotter wird im Tunnel belassen. Der RBS wird den Tunnel weiterhin unterhalten.

2.11 Abschnitt 9: bestehender RBS-Bahnhof (Ausserbetriebnahme)

Alle bahntechnischen Anlagen (inkl. der Gleise), der Schotteroberbau, der Schalterbereich und die Zutrittsschleusen werden nach der Fertigstellung des neuen Bahnhofs zurückgebaut. Anschliessend wird der bestehende RBS-Bahnhof in seiner Rohform der Baurechtgeberin SBB übergeben. Die Planung sowie Umsetzung der späteren Nutzung des bestehenden RBS-Bahnhofs ist zurzeit noch offen.

3 Herausforderungen aus Sicht des Bauherrn

Der Ausbau des RBS-Bahnhofs Bern ist ein komplexes Projekt in einem sensiblen innerstädtischen Umfeld. Die aufgezeigten Abschnitte sind praktisch alle einzigartig mit unterschiedlichen Baumethoden und Querschnitten. Es handelt sich nicht wie bei einem üblichen Tunnelprojekt um eine klassische Linienbaustelle mit standardisierten Abläufen,



14 Querprofil Henkerbrünnli
Henkerbrünnli cross profile

2.9 Section 7: Existing Schanzentunnel (Access Tunnel)

This area of the existing Schanzentunnel will continue to be used for rail operations. In its current form, the Schanzentunnel consists of slightly differently shaped standard profiles with lateral vault foundations and a foundation slab. In the tunnel entrance area, it runs for a distance of approximately 130 m in a cut-and-cover tunnel, the support structure of which was refurbished in 2011. The construction of walkways on both sides as well as the installation of passenger protection recesses improves the escape routes and increases safety in the tunnelled section. An open channel runs along both sides at the base of the vault to remove water from the vault. The channels drain into shafts approximately every 50 m. These shafts are located in the passenger protection recesses and are drained by transverse drainage beneath the tracks into the collecting pipe (Fig. 16).

2.10 Section 8: Existing Schanzentunnel (Decommissioning)

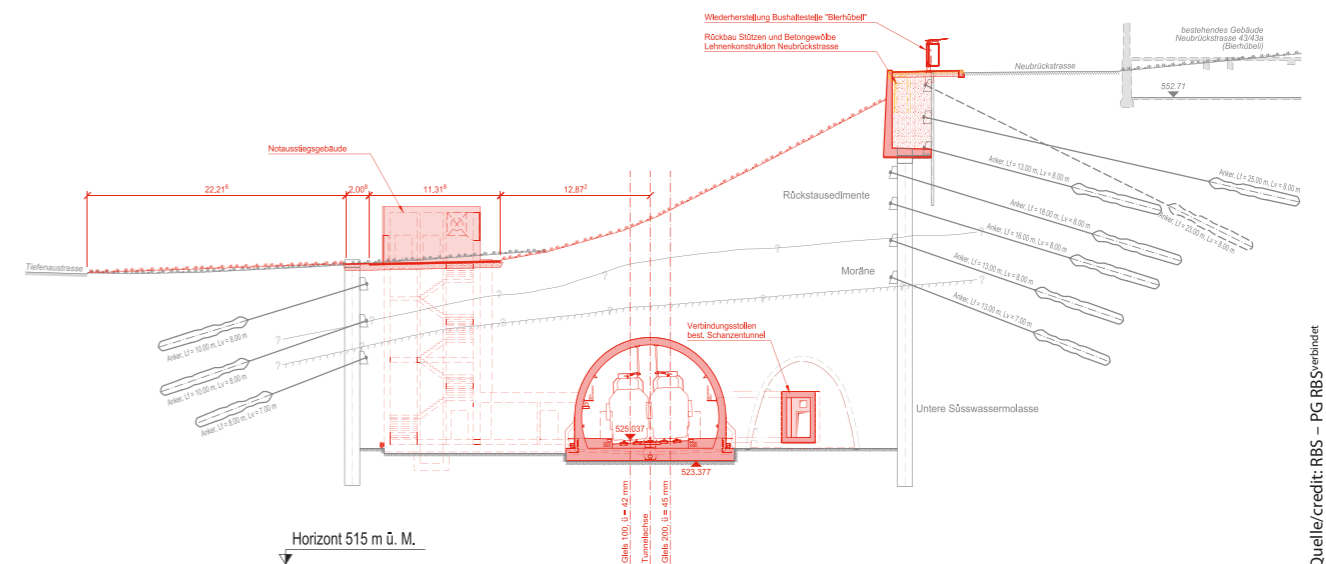
The existing Schanzentunnel in Section 8 will discontinue operation once the new station has opened. The entire railway technology (rails, sleepers, catenaries, signals, electrical systems, etc.) will be dismantled. The ballast will be left in the tunnel. RBS will continue to maintain the tunnel.

2.11 Section 9: Existing RBS Station (Decommissioning)

All railway facilities (including the tracks), the ballast beds, the counter area and the access locks will be dismantled after completion of the new station. The existing RBS station will then be handed over in its shell form to the building owner SBB. Planning and implementation of any subsequent use of the existing RBS station remains undecided.

3 Challenges from the Client's Perspective

The RBS Bern station expansion is a complex project in a sensitive urban environment. The sections discussed here are virtually all unique, with different construction methods and cross sections. In contrast to a conventional tunnel project, it is dissimilar to a traditional linear site with standardised processes, but instead comprises a variety of different sections demanding specific construction methods and a variety of auxiliary construction meas-



15 Querprofil Baugrube Hirschenpark inkl. Notausstieg
Hirschenpark excavation including emergency exit cross profile

sondern um eine Vielzahl von Abschnitten mit spezifischen Bauverfahren mit unterschiedlichen Bauhilfsmassnahmen und auch Angriffsorten. Die Herausforderung besteht darin, die technischen und zeitlichen Abhängigkeiten der einzelnen Abschnitte zu erkennen und stets auch zu kontrollieren.

Eine der grössten Herausforderung stellt zudem die innerstädtische Lage dar. Geeignete Flächen für Installationen sowie Transportrouten für die Logistik in der dicht überbauten und genutzten Stadt zu finden, ist eine herausfordernde Aufgabe. Die Installationsplätze und Verkehrsrouten dürfen einerseits den Unternehmer nicht allzu sehr einschränken und müssen andererseits für die lokale Umgebung einigermaßen verträglich sein. Zu beachten ist auch, dass die Bauzeit mit rund zehn Jahren für die Betroffenen sehr lange ist.

Im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens sind 26 Einsprachen eingegangen, die sich nicht gegen das Projekt an sich richten, sondern ausschliesslich auf die Auswirkungen während der Bauphase beziehen (insbesondere Baustellenverkehr, Baustelleninstallationen und Baulärm). Als eine öffentlich finanzierte Unternehmung müssen wirtschaftlich günstige und allgemein vertretbare Lösungen angestrebt werden.

Die Baustellenlogistik muss mit dem Stadtverkehr abgestimmt und stadtverträglich abgewickelt werden. Dabei sind die lokalen Gegebenheiten, aber auch andere Baustellen zu berücksichtigen. Dies gelingt nur, wenn die Verkehrsflüsse und Massnahmen mit den entsprechenden Behörden frühzeitig geplant und während der Ausführung entsprechend kontrolliert und überwacht werden. Auch die Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs ist eine nicht zu unterschätzende Aufgabe, denn der Bahnhof Bern ist betrieblich sowohl auf Seite SBB wie auch auf Seite RBS sehr stark ausgelastet, und erforderliche Gleissperrungen sind frühzeitig zu planen und abzustimmen. Die SBB ist mit den Installationen für die Zugangsschächte bei

ures and attack types. The challenge is to recognise and constantly control the technical and temporal relationships between the individual sections.

In addition, one of the greatest challenges is the inner-city location. Finding suitable areas for installations and transportation routes for logistics in the densely built and busy city is a challenging task. On the one hand, the installation sites and traffic routes may not excessively restrict the contractor and, on the other hand, they must be reasonably compatible with the local environment. We should also remain aware that the construction period, at around ten years, is very long for those affected.

Twenty-six objections have been received as part of the planning permission process, which are not directed against the project itself, but exclusively at the impacts during the construction phase (in particular site traffic, site installations and construction noise). As a publicly funded venture, economically viable and generally acceptable solutions must be sought.

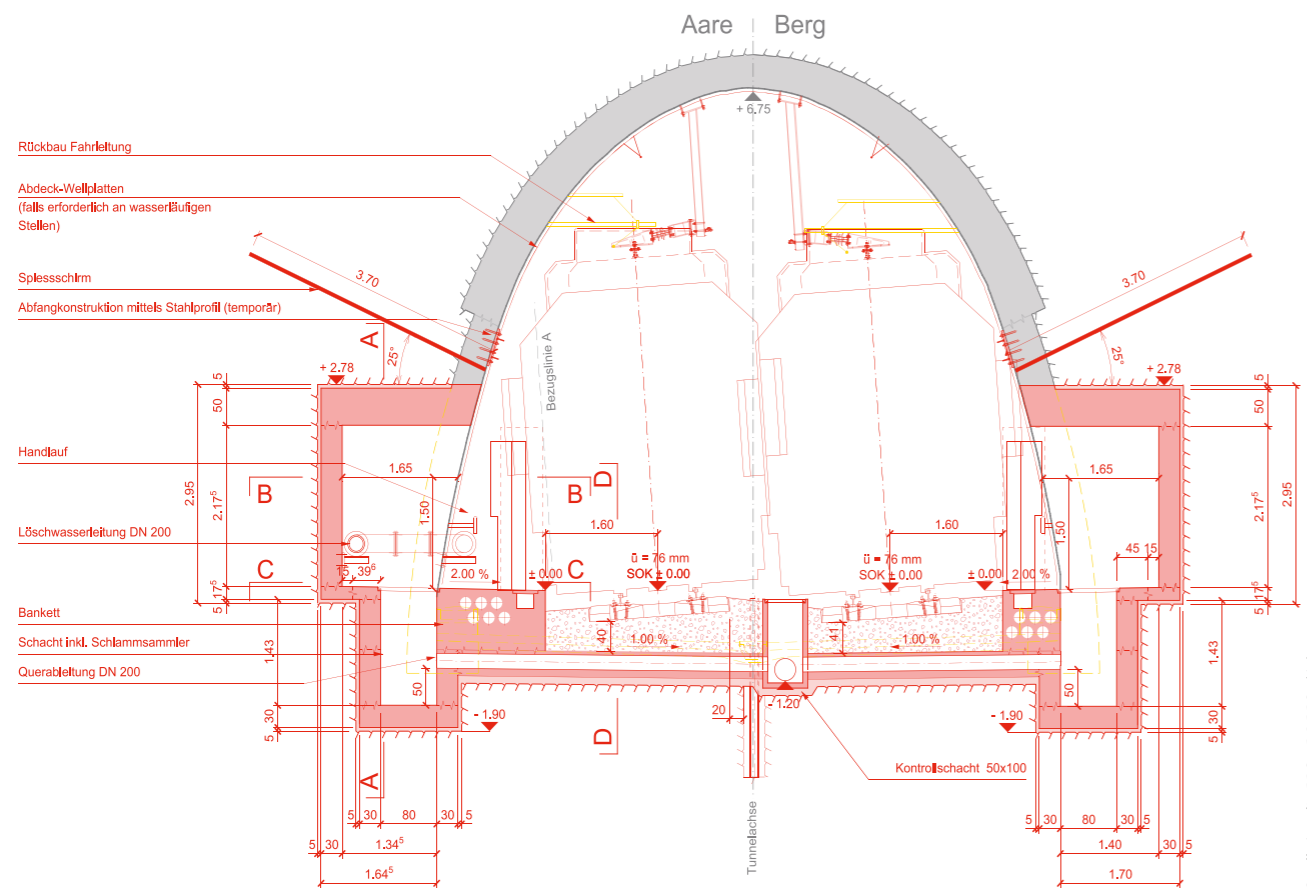
Site logistics must be coordinated with city traffic and be compatible with city life. Here, the local situation must be considered, but also other construction sites. This can only be achieved if the traffic flows and measures are planned in good time with the relevant authorities and monitored accordingly during execution. Maintaining railway operations is also a task that should not be underestimated, as Bern station is very heavily utilised by both the SBB and RBS, and any track possessions necessary must be planned and coordinated well in advance. SBB is affected by the installations for the access shafts at the Eilgutareal sidings and on the tracks at Laupenstrasse. For RBS, the vault reinforcement works in the Schanzentunnel, the excavation at Hirschenpark and the logistics of the PostParc

der Abstellanlage Eilgutareal und im Gleisfeld bei der Laupenstrasse betroffen. Beim RBS tangieren die Arbeiten für die Gewölbeverstärkung im Schanzentunnel, die Baugrube im Hirschenpark sowie die Logistik der PostParc-Unterfangung den Betrieb. Besonders zu beachten ist die Inbetriebnahmephase mit der Umschwenkung vom bestehenden Betrieb in die neu erstellten Bahnhofskavernen. Ein Bahnbetriebsersatz mit Bussen kann nur in der nicht so stark frequentierten Ferienzeit erfolgen und muss früh eingeplant sein.

Der RBS hat ein Gesamtplanermandat für die Planung ab Bauprojekt bis und mit Inbetriebnahme (exkl. Oberbauleitung) an die Planergemeinschaft RBSverbindet (Basler & Hofmann AG, Emch+Berger AG, B+S AG, Theo Hotz Partner AG mit Subplaner Kellerhals+Haefeli AG, Amstein+Walthert AG, HBI Haerter AG, hr. wehrle projektmanagement und Reflexion AG) vergeben. Die ausgeschriebenen Leistungen beinhalten die Planer- und Bauleistungen der Projektphasen 32 bis 53 (Bauprojekt, Bewilligungsverfahren/Auflageprojekt, Ausschreibung, Ausführungsprojekt, Ausführung exkl. Oberbauleitung, Inbetriebnahme und Abschluss) entsprechend SIA 103. Im Mandat sind die Fachgebiete Tunnelbau, Spezialtiefbau, Geotechnik, Geologie, Hydrogeologie, Tragkonstruktionen, Innenausbau Bahnhofsanlagen, Ver- und Entsorgung, Rolltreppen/Lifte, Gebäudetechnik HLKS, Gebäudetechnik und Elektro NS enthalten.

underpinning all impact on operations. Particular attention should be paid to the commissioning phase with the changeover from existing operations to the newly built station caverns. Rail replacement with buses can only be achieved in the less busy holiday season and must be scheduled early.

RBS has concluded a master plan agreement for planning from the construction project phase up to and including commissioning (excluding contract management) with Planergemeinschaft RBSverbindet (Basler & Hofmann AG, Emch+Berger AG, B+S AG, Theo Hotz Partner AG including sub-planners Kellerhals+Haefeli AG, Amstein+Walthert AG, HBI Haerter AG, hr. wehrle projektmanagement and Reflexion AG). The tendered services include the project phases 32 to 53 planning and construction management services (construction project, licensing procedure/consultation project, call for tenders, execution project, execution excluding contract management, commissioning and completion) in accordance with SIA 103. The agreement includes tunnelling, special civil engineering, geotechnical engineering, geology, hydrogeology, supporting structures, interior station finishing, utilities, escalators/elevators, HVACS building services, building services and electrical NS.



16 Querprofil bestehender Schanzentunnel
Existing Schanzentunnel cross profile

4 Schlusswort

Der Ausbau des RBS-Bahnhofs Bern ist mit seiner Komplexität und den oben beschriebenen Herausforderungen einmalig in der Geschichte des RBS. Einzelne fachliche Themen dieses spannenden Jahrhundertprojekts werden bestimmt in einem zukünftigen Tunnelkongress noch genauer aufgezeigt und vorgestellt.

4 Closing Remarks

In view of its complexity and the challenges described above, the RBS Bern station expansion is unique in the history of RBS. Specific technical aspects of this exciting project of the century will be described and presented in more detail in a future tunnel congress.

PROJEKTDATEN	
Region	Bern
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung	Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)
Planung und Bauleitung	Planergemeinschaft RBSverbindet: Basler & Hofmann AG, Emch+Berger AG, B+S AG und Theo Hotz Partner AG mit Subplaner: Kellerhals+Haefeli AG, Amstein+Walthert AG, HBI Haerter AG, hr. wehrle projektmanagement und Reflexion AG
Ausführung	2017–2027
Kenndaten	
Bauzeit	10 Jahre
Inbetriebnahme	2025
Baukosten	614 Mio. Schweizer Franken (Anteil Bund 450 Mio., Anteil Kanton Bern 164 Mio.)
Bahnhofskavernen	zwei St. à 200 m Länge und 330 m ² Querschnittsfläche
Tunnellängen	Einspurttunnel 4 × 330 m, Aufweitungsbauwerk 170 m, Doppelspurttunnel 390 m, Tagbau 160 m, Sanierung bestehender Tunnel 400 m
Besondere Merkmale	Viergleisiger Tiefbahnhof unterhalb des bestehenden SBB-Bahnhofs Bern. Perronebene rund 17 m unter der SBB-Passage bzw. 23 m unter den Gleisen. Beschränkte Platzverhältnisse für die Bauarbeiten im innerstädtischen Bereich. Baustelleneinrichtungen auf insgesamt vier Installationsplätzen, teilweise auf aufgeständerten Plattformen oder innerhalb von Gleisfeldern. Realisierung erfolgt unter ständigem Bahnbetrieb. Bis zu 30 m tiefe Baugruben und ein Angriffsschacht als Angriffsstellen für den Untertagbau. Aufwendige Bauhilfsmassnahmen aus dem bestehenden, unterirdischen Poststollensystem zur Sicherung der Fundationen des neu erstellten Reiterbaus des PostParcs als Vorbereitung für den Ausbruch der Bahnhofskavernen. Untertagbau (MUF) in Abhängigkeit von den Tunnelquerschnittsgrößen mehrheitlich in Teilquerschnitten, Ausbruchsicherung mit Spritzbeton und mit Bauhilfsmassnahmen.

PROJECT DATA	
Region	Bern
Client, project and contract management	Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)
Planning and site management	Planergemeinschaft RBSverbindet: Basler & Hofmann AG, Emch+Berger AG, B+S AG and Theo Hotz Partner AG with sub-planners: Kellerhals+Haefeli AG, Amstein+Walthert AG, HBI Haerter AG, hr. wehrle projektmanagement and Reflexion AG
Excavation	2017–2027
Fact file	
Construction period	10 years
Commissioning	2025
Construction costs	614 million Swiss francs (450 million federal government share, 164 million Canton Bern share)
Station caverns	two stations 200 m long and 330 m ² cross-section
Tunnel lengths	single-track tunnel 4 × 330 m, widening structure 170 m, twin-track tunnel 390 m, cut-and-cover 160 m, refurbishment of existing tunnel 400 m
Special features	Four-track underground station beneath the existing SBB Bern station. Platform level around 17 m below SBB passage and 23 m below the tracks. Cramped conditions for construction works in an urban environment. Site facilities across a total of four installation zones, partly on elevated platforms or in track areas. Execution during continued rail operations. Up to 30 m deep excavations and an attack shaft as attack point for underground construction. Elaborate auxiliary construction measures from the existing underground mail tunnel system to stabilise the foundations of the newly built overhead PostParc structure in preparation for excavating the station caverns. Underground construction (MUF) mainly in sub-cross-sections, excavation stabilisation using shotcrete and auxiliary construction measures, as a function of the tunnel cross-sections.

Oliver Erzinger, Dipl. Bau-Ing. ETH, Implenia Schweiz AG, Wallisellen/CH

Neuer Doppelspurtunnel Bözberg

Erfahrungen aus dem Lockergesteins- und Felsvortrieb

Der neue, 2,7 km lange SBB-Bözberg-Doppelspurtunnel verläuft in der heterogenen Geologie des Juras. Im südlichen Teil musste eine längere Lockergesteinszone konventionell mittels Rohrschirm und Teilausbruch vorgetrieben werden. Parallel dazu wurde die Schild-TBM montiert und anschliessend der Hauptvortrieb im Fels damit durchgeführt. Der Vortrieb konnte dank guter Planung, intensiver Arbeitsvorbereitung und erfahrener Personal erfolgreich und termingerecht abgeschlossen werden.

The New Bözberg Twin-Track Tunnel

Experiences of Tunnelling Through Loose Rock and Bedrock

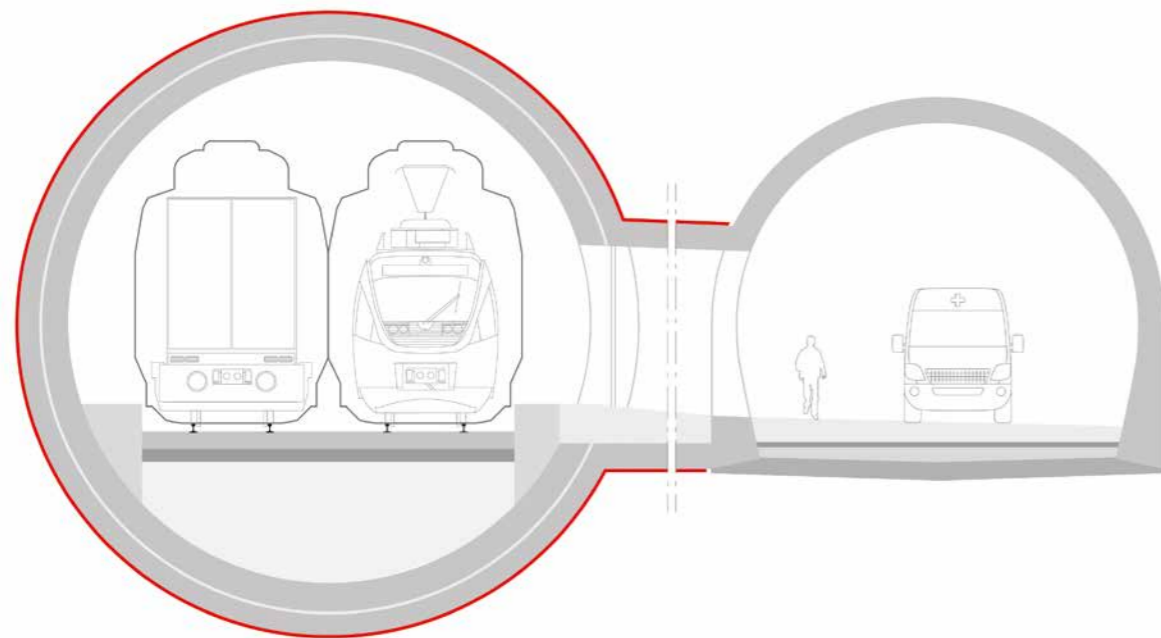
The new 2.7 km long SBB Bözberg twin-track tunnel runs through the heterogeneous geology of the Jura. In the southern section, a long section of loose rock had to be tunnelled using pipe roofing and partial excavation in a conventional method. At the same time, the shield TBM was assembled and the main bedrock excavation performed using it. Thanks to good planning, intensive preparation and experienced personnel, tunnelling was completed successfully and on time.

1 Einleitung

Die SBB realisiert im Auftrag des Bundes bis 2020 den 4-m-Korridor auf der Gotthard-Achse. Somit können dereinst auch LKW-Sattelaufleger mit einer Eckhöhe von 4 m auf der Bahn transportiert werden. Der bestehende zweispurige Bözbergertunnel von 1875 ist nicht 4-m-tauglich. Deshalb wird

1 Introduction

SBB has been commissioned by the state to create the 4 metre corridor on the Gotthard axis by 2020. One day, this will allow truck semi-trailers with a height of 4 m to be transported on the track. The existing Bözberg twin-track tunnel from 1875 is not suitable for 4 m. Accordingly, a new twin-



1 Schematisches Querprofil neuer und bestehender Bözbergertunnel
Schematic cross profile of new and existing Bözberg tunnels

Quelle/credit: SBB

Nouveau tunnel à deux voies du Bözberg

Retour d'expérience d'un avancement en terrain meuble et en roche

Long de 2,7 km, le nouveau tunnel CFF à deux voies du Bözberg, qui fait partie du corridor de 4 mètres sur l'axe du Saint-Gothard, remplace l'ancien tunnel datant de 1875, lequel sera transformé en galeries de service et de secours. Le tracé du tunnel s'inscrit dans le terrain géologique hétérogène du Jura. Dans la partie sud, l'avancement à travers une zone de terrain meuble assez longue a dû s'effectuer de manière conventionnelle au moyen d'une voûte parapluie et d'une excavation partielle. En parallèle, un bouclier mécanisé a été monté afin de procéder à l'avancement principal dans la roche. Il a fallu traverser en l'occurrence plusieurs zones faillées. Grâce à une bonne planification, une préparation intense des travaux en amont, ainsi qu'un personnel expérimenté, l'avancement a pu être mené à bien dans les délais impartis.

Nuova galleria a doppio binario del Bözberg

Esperienze dall'avanzamento nella roccia incoerente e nella roccia

La nuova galleria a doppio binario del Bözberg della FFS, lunga 2,7 km, è parte integrante del corridoio di 4 metri sull'asse del San Gottardo e sostituisce la vecchia galleria del 1875, trasformata in galleria di servizio e salvataggio. La galleria attraversa la geologia eterogenea del Giura. Nella parte meridionale, una lunga zona di roccia incoerente è dovuta essere affrontata convenzionalmente tramite scudo cilindrico e scavo parziale. Parallelamente a ciò, la TMB scudata è stata montata e usata per effettuare successivamente l'avanzamento principale nella roccia. È stato necessario attraversare numerose zone critiche. L'avanzamento – grazie a una buona progettazione, a un'accurata preparazione dei lavori e al personale esperto – è potuto essere concluso con successo e puntualmente.

parallel dazu eine neue Doppelspurröhre gebaut. Der alte Tunnel wird als Dienst- und Rettungsstollen umgenutzt und mit fünf Querverbindungen am neuen Tunnel angeschlossen (siehe Bild 1). Der 2,7 km lange Bözbergertunnel liegt im Kanton Aargau und verläuft in der anspruchsvollen Geologie im Übergang des Schweizer Falten- zum Tafeljura (siehe Bild 2). Baubeginn war im März 2016.

track tunnel is being built in parallel. The old tunnel will be converted into a service and rescue tunnel and connected to the new tunnel with five cross passages (see Fig. 1). The 2.7 km long Bözberg tunnel is in the canton of Aargau and passes through the challenging geology in the transition from the Swiss Fold Jura to the Table Jura (see Fig. 2). Construction began in March 2016.

Die Ausführung des neuen Tunnels wurde erstmals im Modell Generalunternehmer Plus (GU+) von der SBB vergeben und die Implenia Schweiz AG damit beauftragt. Der Auftrag umfasst sämtliche Bauleistungen bis zur Inbetriebnahme sowie die Planung des Ausführungsprojekts.

The execution of the new tunnel was firstly put out to tender in the SBB's general contractor plus (GC+) model and Implenia Schweiz AG was awarded the contract. The order encompasses all building works through to commissioning and planning the execution project.

Das Projekt Bözbergertunnel wurde anlässlich des letztjährigen STC (2017) erläutert. Aus diesem Grunde wird in diesem Artikel auf eine weitere Darstellung der Projektdetails verzichtet.

The Bözberg tunnel project was presented at last year's STC (2017). Accordingly, this article will not go into further details of the project.

2 Organisation Unternehmer GU+

Bereits während der Angebotsphase wurde die Ingenieurgesellschaft (IG Bözberg plus) intensiv involviert, um die Offerte optimiert auszuarbeiten. Nach Vertragsabschluss mit der SBB wurde die Ingenieurgesellschaft als Subunternehmer der Implenia Schweiz AG beauftragt.

2 Contractor GC+ Organisation

There was intense involvement from the engineering association (ES Bözberg plus) as early as the quotation phase, in order to develop the bid as well as possible. Once the contract was agreed with SBB, the engineering association was commissioned by Implenia Schweiz AG as a sub-contractor.

3 Lockergesteinsvortrieb

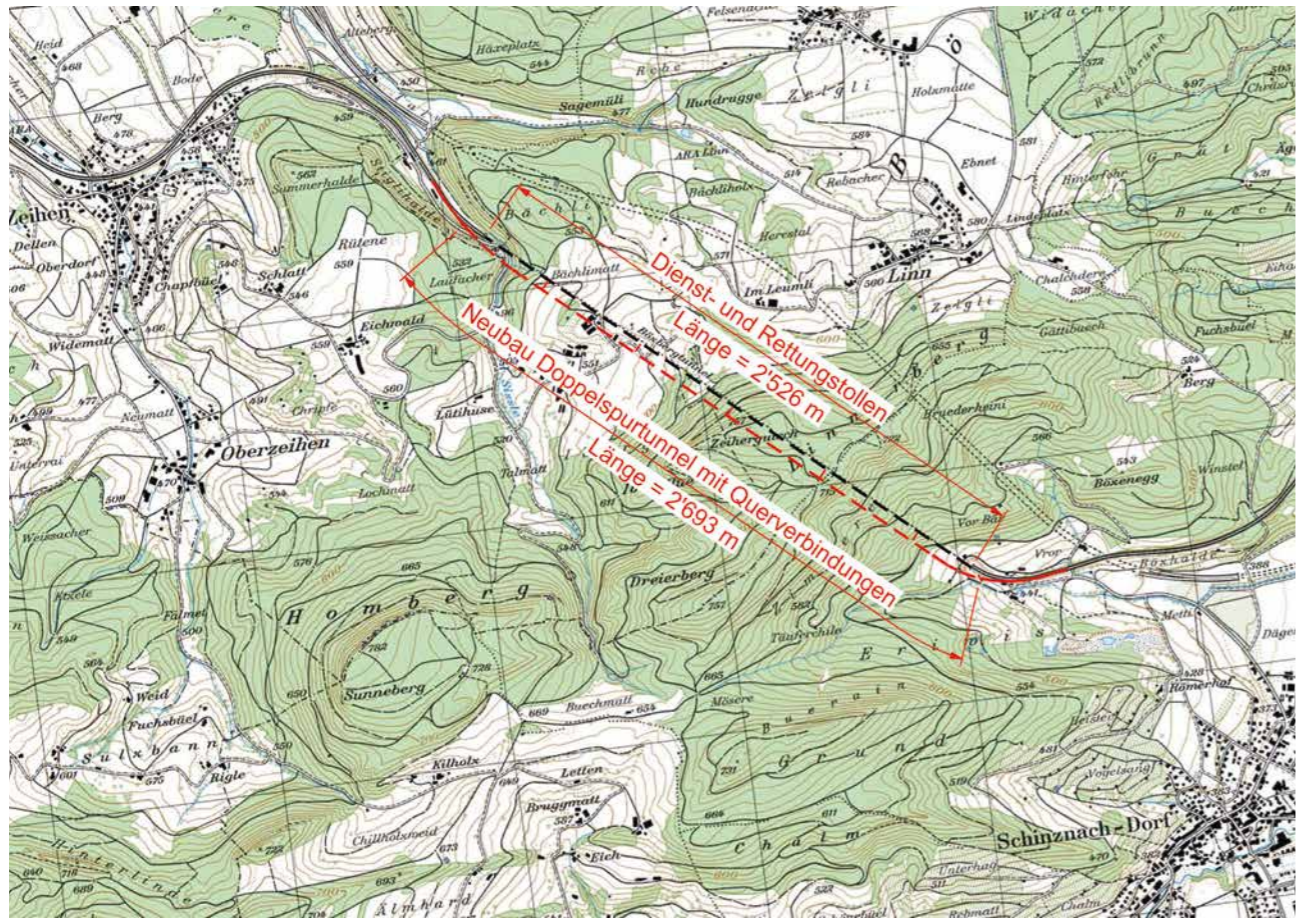
3.1 MUL-Projekt

Der neue Bözbergertunnel wurde von der Seite Schinznach-Dorf her ausgebrochen. Gemäss Projekt waren auf den ers-

3 Loose Rock Tunnelling

3.1 MAL Project

The new Bözberg tunnel was excavated from the Schinznach-Dorf end. According to the project, the first



2 Situationsdarstellung Bözbergtunnel
Bözberg tunnel situation

ten 108 m Lockergestein und Fels mit lockergesteinsähnlichen Eigenschaften zu durchdringen. Dieser Abschnitt wurde als maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL) in Teilausbrüchen (Kalotte/Strosse) vorgetrieben. Als Bauhilfsmassnahme wurden neun Rohrschirmetappen mit 12 m Länge und Brustanker geplant. Aufgrund der geringen Überdeckung im Portalbereich war bei den ersten zwei Etappen ein doppelter Rohrschirm mit total 105 Rohren erforderlich (Rohrspezifikation: ROR 159/10 mm; L = 16 m; vier Injektionsventile pro Lfm.). Zur Stabilisierung der Ortsbrust wurden pro Etappe bis zu 76 Stück Selbstbohranker vorgesehen (Ankerspezifikation: IBO R38-420; L = 19 m). Die Sicherung bestand aus netzbewehrtem Spritzbeton und Gitterträgern (siehe Bild 3).

3.2 Vorauserkundung

Parallel zu den Arbeiten des MUL-Vortriebs wurden von der Oberfläche aus vertikale und schräge Erkundungsbohrungen erstellt, um einerseits den Startpunkt der TBM zu verifizieren und andererseits das Quellpotenzial des Gipskeupers zu ermitteln. Dabei zeigte sich, dass der Anstieg des Felshorizontes (Gipskeuper und Dolomit) deutlich flacher verläuft als prognostiziert. Folglich musste der Lockergesteinsabschnitt um fünf Rohrschirmetappen auf eine Gesamtlänge von 174 m verlängert werden (siehe Bild 4).

108 m of loose stone and bedrock with qualities similar to that of loose stone had to be excavated through. Machine assisted tunnelling in loose rock (MAL) was used to tunnel this section in partial excavations (top heading/bench). As an auxiliary construction measure, nine 12 m long pipe umbrella stages with face bolts were planned. Due to reduced coverage in the portal area, a double pipe umbrella with a total of 105 pipes was required for the first two stages (pipe specification: ROR 159/10 mm; L = 16 m; four injection valves per linear metre). In order to stabilise the face, up to 76 self-drilling anchors were planned per stage (anchor specification: IBO R38-420; L = 19 m). The stabilisation consisted of mesh-reinforced sprayed concrete and lattice girders (see Fig. 3).

3.2 Advance Probing

At the same time as the MAL tunnelling work was taking place, vertical and diagonal probe drilling from the surface took place in order to verify the TBM starting point and to determine the swelling potential of the gypsum Keuper. This showed that the rise in the bedrock level (gypsum Keuper and dolomite) was much flatter than predicted. Consequently, the loose rock section had to be extended by five pipe umbrellas to a total length of 174 m (see Fig. 4).

3.3 Bauausführung

3.3.1 Spezialmassnahmen Vortriebstart

Beim Abteufen des Voreinschnittes in Schinznach-Dorf wurden unerwartet grosse Wassermengen (40 bis 50 l/min) in der Portalwand angetroffen. Dabei handelte es sich um einen Quellstrang, welcher nicht wie prognostiziert im Bereich der Bohrpfehlwand zum Vorschein kam und dadurch auch nicht vor den Vortriebsarbeiten gefasst werden konnte. Um die ungünstigen Einflüsse des Wassers auf den Vortrieb zu minimieren, wurden folgende Massnahmen durchgeführt:

- vertikaler Drainagefächer in der Ecke Bohrpfehl- zu Portalwand (16 St. perforierte Selbstbohranker R38 L = 12 m)
- perforierte Rohrschirmrohre als Drainage oberhalb des Rohrschirms (4 St. DN 159/10 L = 16 m)
- Drainagerohre in der Ortsbrust (8 St. DN 159/10 L = 16 m)
- Erweiterung des Rohrschirms bis zur Kalottensohle (4 St. DN 159/10 L = 16 m)
- Unterteilung der Kalotte in fünf Teilausbrüche für die ersten Rohrschirmetappen

3.3.2 Kalottenvortrieb

Die Vortriebsarbeiten liefen im Dreischichtbetrieb während fünf Tagen pro Woche. Der Rohrschirm wurde mit einem zweiarmigen Bohrjumbo mit Rohrmanipulator erstellt (siehe

3.3 Execution of Construction Works

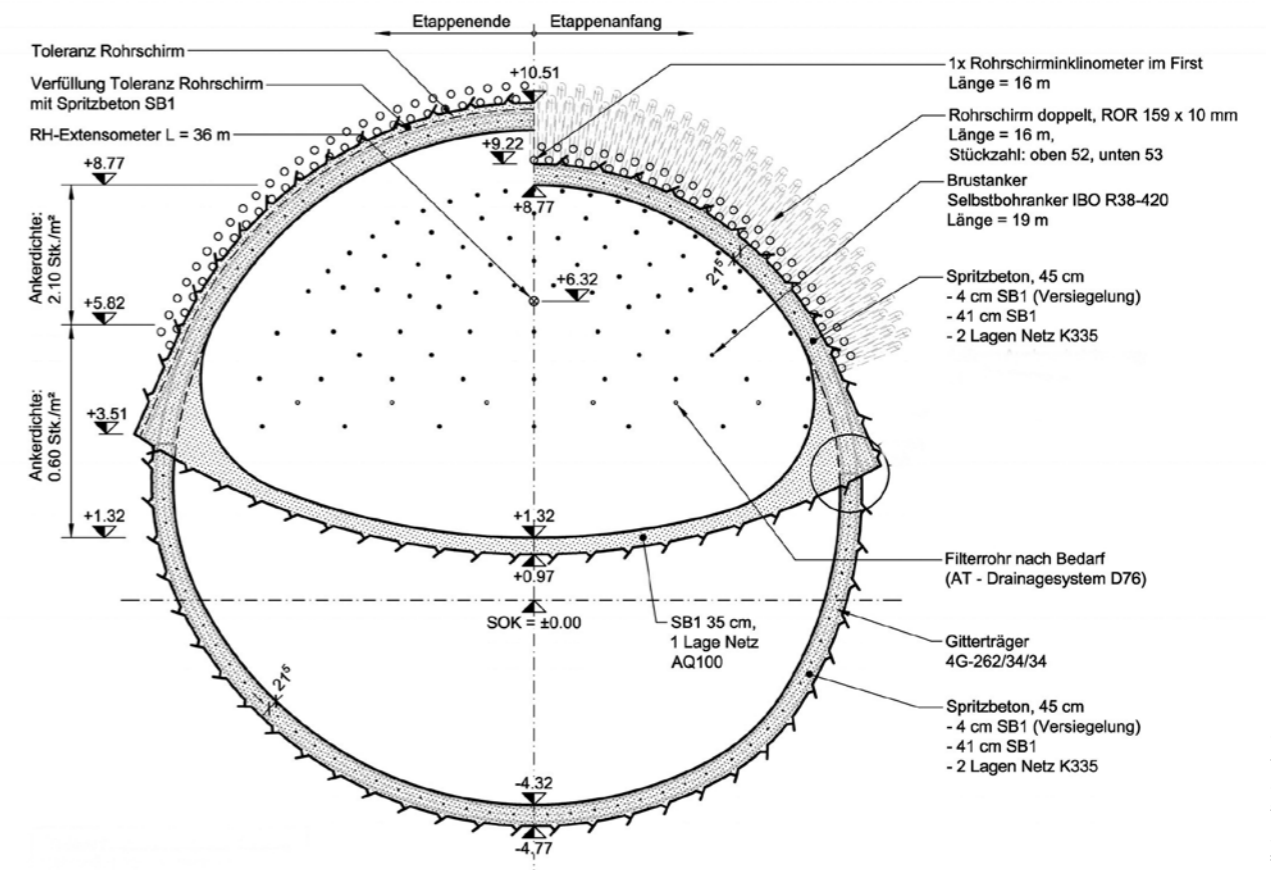
3.3.1 Special Excavation Start-up Measures

Unexpectedly large quantities of water (40 to 50 l/min) were encountered in the portal wall when sinking the pre-cut in Schinznach-Dorf. This was due to a spring run which did not appear in the bored pile wall as expected and was therefore unable to be collected before the excavation works. To minimise the negative effects of the water on excavation, the following measures were taken:

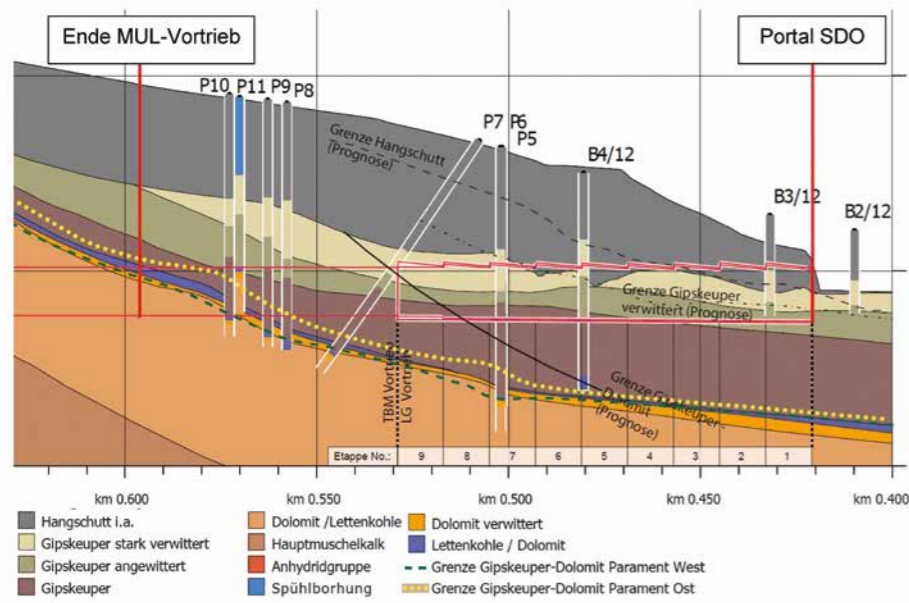
- vertical drainage compartments in the bored pile wall to portal wall corner (16 × perforated self-drilling anchors R38 L = 12 m)
- perforated umbrella pipes as drainage above the pipe umbrella (4 × DN 159/10 L = 16 m)
- drainage pipes in the face (8 × DN 159/10 L = 16 m)
- extension of the pipe umbrella to the top heading base (4 × DN 159/10 L = 16 m)
- division of the top heading into five partial excavations for the initial pipe umbrella stages

3.3.2 Top Heading Excavation

Excavation works took place in three-shift operation five days per week. The pipe umbrella was created with a two-boom drilling jumbo with a pipe handler (see Fig. 5). The pipes were filled with grout from an injection unit at the



3 Querschnittplan Ausbruchsisicherung
Excavation stabilisation cross section plan



4 Geologisches Längsprofil Lockergesteinsabschnitt
Geological longitudinal profile for loose rock section

Bild 5). Die Rohre wurden ab einer Injektionszentrale, welche beim Portal aufgebaut war, zementös verfüllt. Der Injektionszement wurde direkt ab Silo dosiert. Die Brustanker wurden im Anschluss an die Bohrarbeiten des Rohrschirms mit demselben Bohrerjumbo versetzt. Der Ausbruch erfolgte mit einem Tunnelbagger in Abschlügen von 1,2 bis 2,4 m je nach Geologie. Nach jedem Abschlag wurde die ganze Sicherung, bestehend aus zweilagig netzbewehrtem Spritzbeton (D = 45 cm), Gitterbogen und einem Kalottensohlgewölbe, nachgezogen. Durchschnittlich wurden für eine 12 m lange Etappe sieben Arbeitstage für den Ausbruch inklusive der Bauhilfsmassnahmen benötigt.

3.3.3 Strossenvortrieb

Der Ausbruch der Strosse und Sohle erfolgte in doppelt so langen Abschlügen wie in der Kalotte. Das provisorische Kalottensohlgewölbe wurde dabei abgebrochen, der Gitterbogen zum Ringschluss ergänzt und mit zwei Lagen netzbewehrtem Spritzbeton gesichert (siehe Bild 6). Da beim Strossenabbau der Felsanteil mit steigendem Tunnelmeter zunahm, kam ein zweiter Bagger auf der Kalottensohle zum Einsatz, um die Vortriebsleistung zu erhöhen.

3.3.4 Umstellung Bauablauf

Aufgrund der Verlängerung des MUL-Vortriebs um 66 m konnte der Kalottenvortrieb nicht vor dem geplanten Montagebeginn der TBM abgeschlossen werden. Die grosse Rampe für den Zugang auf das Kalottensohniveau im Voreinschnitt verunmöglichte den Bau der Schildwiege und damit den Start der TBM-Montage. In Absprache mit dem Bauherrn wurde der Bauablauf geändert. Der Kalottenvortrieb wurde unterbrochen und auf den ersten 60 m der Ausbruch der Strosse vorgezogen, damit die Rampe in den Tunnel verlegt werden konnte. Durch diese Umstellung konnte die TBM-Montage plangemäss im Januar 2017 starten.

portal. The injection grout was dispensed directly from the silo. The face bolts were moved with the same drilling jumbo after drilling work on the pipe umbrella. The excavation was completed with a tunnel excavator in rounds of 1.2 to 2.4 m depending on geology. After each round, the entire stabilisation, consisting of double-layer mesh-reinforced sprayed concrete (D = 45 cm), lattice girders and a top heading invert, was drawn along. An average of seven working days was required for excavation including auxiliary construction measures for a 12 m long section.

3.3.3 Bench Excavation

The bench and base excavation took place in rounds double the length of those for the top heading. The provisional top heading invert was excavated, the lattice girder was added for ring closure and stabilised with two layers of mesh-reinforced sprayed concrete (see Fig. 6). As the amount of bedrock increased along with the number of tunnel metres in bench excavation, a second excavator was used on the top heading invert to increase excavation output.

3.3.4 Change to Construction Workflow

As MAL excavation was extended by 66 m, top heading excavation could not be completed before TBM assembly was due to start. The large ramp for access to the top heading invert level in the pre-cut made it impossible to build the shield cradle and therefore to begin TBM assembly. The construction process was altered in consultation with the client. Top heading excavation was interrupted and on the first 60 m the bench excavation was brought forward so that the ramp could be moved into the tunnel. This change allowed TBM assembly to begin in January 2017 as planned.

3.4 Metrological Monitoring

Loose rock excavation was monitored using the following measurement systems:

- automatic convergence measurements above ground (15 profiles at 5 measuring points)
- manual convergence measurements below ground (15 profiles at 5 measuring points)
- precision levelling in structures beneath the tunnel (total of 30 measuring points)
- horizontal inclinometer in pipe umbrella for the first nine stages; the maximum settlement of the pipe at the first umbrella (Tm 421 to Tm 436) was 12 mm (see Fig. 7).
- reverse head extensometer in the face for the first 36 m
- visual inspections in the existing Bözberg tunnel



5 Bohren Rohrschirm
Pipe roofing

3.4 Messtechnische Überwachung

Der Lockergesteinsvortrieb wurde durch folgende Messsysteme überwacht:

- automatische Konvergenzmessungen über Tag (15 Profile à 5 Messpunkte)
- manuelle Konvergenzmessungen unter Tag (15 Profile à 5 Messpunkte)
- Präzisionsnivellement bei den Gebäuden über dem Tunnel (total 30 Messpunkte)
- Horizontalinclinometer im Rohrschirm bei den ersten neun Etappen; die maximale Setzung des Rohrs beim ersten Schirm (Tm 421 bis Tm 436) betrug 12 mm (siehe Bild 7).
- Reverse-Head-Extensometer in der Ortsbrust auf den ersten 36 m
- visuelle Kontrollen im bestehenden Bözbergtunnel

3.5 Erkenntnisse

Dank der zusätzlichen geologischen Vorauserkundung konnte gerade noch rechtzeitig das Ausführungsprojekt ergänzt sowie der Bauablauf angepasst werden und somit Mehrkosten infolge Wartezeiten bei der TBM-Montage vermieden werden. Die Bauhilfs- und Sicherungsmassnahmen konnten flexibel auf jede Etappe je nach Geologie abgestimmt und optimiert werden. So kam es weder zu Niederbrüchen

3.5 Lessons to Be Learned

Thanks to the additional geological exploration, it was possible to extend the execution project and adapt the construction process in good time and therefore to avoid additional costs due to waiting times for TBM assembly. The auxiliary construction and supporting measures could be flexibly adapted and optimised based on the geology for each stage. This meant that collapses and instability of the face were avoided. The convergence above and below ground was in line with the predicted values taking into account the actual geology. The use of high-performance excavation equipment and experienced excavation staff resulted in a high excavation output. The 174 m were excavated in seven months. As the Design-Build contract schedule also planned for seven months for the projected length of 108 m, the extension of the MAL section did not lead to a delay in construction.

4 Bedrock Excavation with Single-Shield TBM

4.1 TBM Project

Due to the extremely variable geology, excavation using a single-shield TBM (bore diameter 12.36 m, outer segment diameter 12.08 m) was planned. The experience of building the nearby road tunnel, which was also driven with a TBM-S in the 1990 s, was also taken into consideration in planning.



6 Einbau Sicherung Strosse und Sohle
Bench and floor stabilisation installation

noch zu Ortsbrustinstabilitäten. Die Konvergenzen über und unter Tag entsprachen den prognostizierten Werten unter Berücksichtigung der effektiven Geologie. Durch den Einsatz von leistungsstarken Vortriebsgeräten und erfahrem Vortriebspersonal resultierte eine hohe Vortriebsleistung. Die 174 m konnten in sieben Monaten ausgebrochen werden. Da im Werkvertragsprogramm ebenfalls sieben Monate für die prognostizierte Länge von 108 m berücksichtigt wurden, entstand keine Bauzeitverzögerung durch die Verlängerung des MUL-Abschnitts.

4 Felsvortrieb mit Einfachschild-TBM

4.1 TBM-Projekt

Aufgrund der stark wechselhaften Geologie wurde der Ausbruch mit einer Einfachschild-TBM (Bohrdurchmesser 12,36 m, Tübbingdurchmesser aussen 12,08 m) geplant. Die Erfahrungen aus dem Bau des nahegelegenen Strassentunnels, der in den 90er-Jahren ebenfalls mit einer TBM-S aufgeföhrt wurde, flossen bei der Planung ebenfalls mit ein.

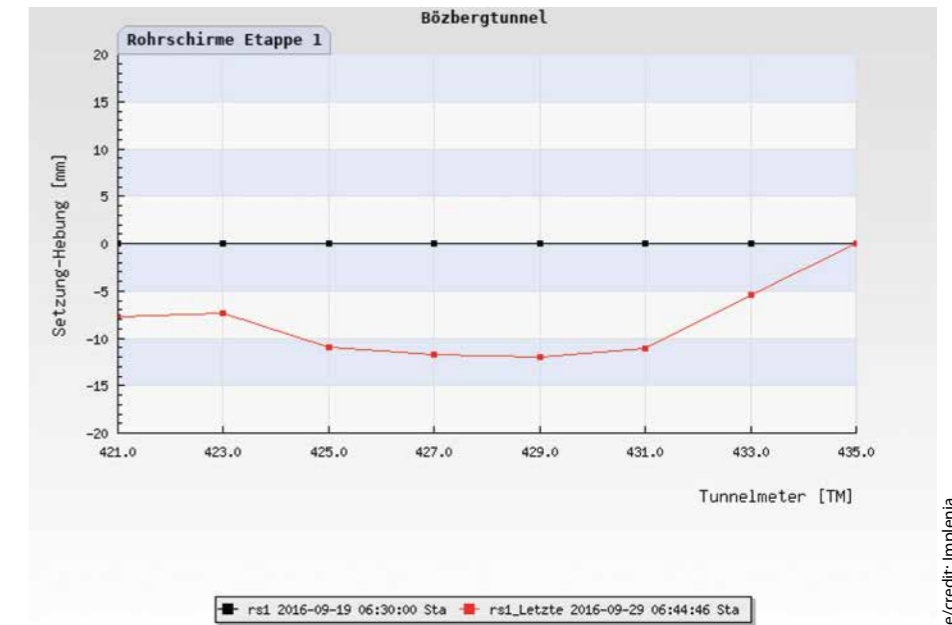
Der Ausbau auf der TBM-Strecke erfolgte mittels 2 m breiten ungedichteten Tübbingringen. Ein Ring bestand aus fünf Tübbing mit in der Sohle liegendem Schlussstein. Die räumliche Kurve wurde nicht mit Verdrehen der Ringe, sondern mittels unterschiedlicher Ringtypen gebaut. Um die

The TBM tunnel lining was done using 2 m wide unsealed segments. One ring consisted of five segments with a keystone in the floor. The spatial curve was not created by turning the ring, but using different ring types. To absorb the given swelling pressures, rings with different reinforcement content were used. A total of eleven different types of rings were used. In the thermal spa protection zone (the first 230 m of TBM excavation), a double-shell is used. The segments therein have a constant thickness of 30 cm. The rest of the section is only double-layer in the vault and single-layer in the floor. Floor segments 60 cm thick were placed. The annular gap was filled with grout in the base and pea gravel in the vault (270° to 300°). In the thermal spa zone, to prevent water circulation, the pea gravel was subsequently filled with grout and two isolation rings consisting of 90 radial injection bores (D = 3 m) were created.

4.2 TBM and Logistics Design

A great deal of attention was paid to TBM and logistics planning in advance. When designing the cutterhead, the heterogeneous geology with soft claystones and hard limestones was taken into account. The TBM cutterhead had a disc cutter distance of 100 mm and 16 buckets. The ergonomic design of the individual workstations on the TBM was also prioritised. This included, for example, access to workspaces via stairs instead of ladders, ideal working heights and clearly laid-out workstations. The entire system was designed for a

vorgegebenen Quelldrücke aufzunehmen, wurden Ringe mit verschiedenem Bewehrungsgehalt vorgesehen. Total kamen elf verschiedene Ringtypen zum Einsatz. In der Thermenschutzzone (auf den ersten 230 m TBM-Vortrieb) ist der Ausbau zweischalig. Dabei weisen die Tübbinge eine konstante Stärke von 30 cm auf. Die restliche Strecke ist nur im Gewölbe zweischalig und in der Sohle einschalig. Es wurden 60 cm starke Sohl-tübbinge verbaut. Der Ringspalt wurde in der Sohle mit Mörtel und im Gewölbe (270° bis 300°) mit Perlkies verfüllt. Zur Verhinderung der Wasserlängszirkulation wurde im Thermenschutzbereich der Perlkies nachträglich mit Mörtel verfüllt und zwei Abschottungsringe, bestehend aus 90 radialen Injektionsbohrungen (T = 3 m), erstellt.



7 Messergebnisse Horizontalinklinometer RS-Etappe 1
Horizontal inclinometer measurement findings, pipe umbrella stage 1

4.2 Konzipierung TBM und Logistik

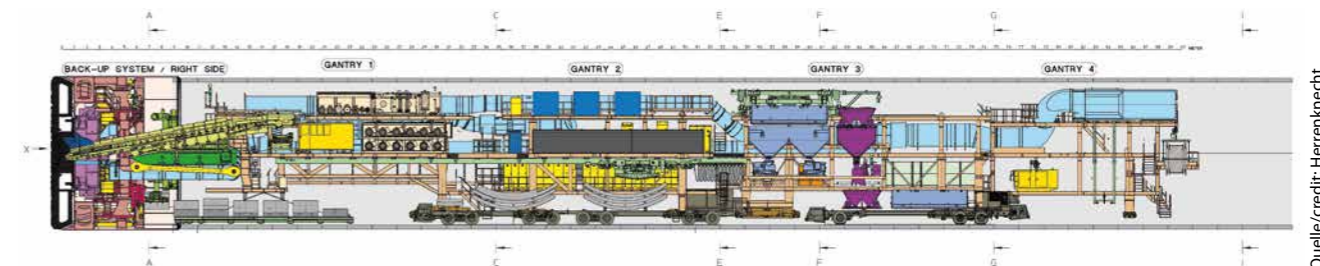
Der Planung der TBM und der Logistik wurde im Vorfeld grosse Beachtung geschenkt. Beim Design des Bohrkopfs wurde die heterogene Geologie mit weichen Tonsteinen und harten Kalksteinen berücksichtigt. Der Bohrkopf der TBM wies einen Schneidrollenabstand von 100 mm und 16 Räumerkannalen auf. Grosser Wert wurde auch auf die Ergonomie der einzelnen Arbeitsplätze auf der TBM gelegt. Dies beinhaltete beispielsweise die Zugänge zu den Arbeitsstellen über Treppen anstelle Leitern, ideale Arbeitshöhen und übersichtliche Arbeitsplätze. Das ganze System wurde auf eine maximale Vortriebsgeschwindigkeit von 100 mm/min und eine Ringbauzeit von 15 Minuten ausgelegt. Die Versorgung der TBM mit Tübbing und dem Material für die Ringspaltverfüllung erfolgte mit pneugebundenen Spezialfahrzeugen (siehe Bild 8). Das Ausbruchmaterial wurde mittels Förderband (1500 t/h) bis zum Zwischenlager transportiert. Die erste Bandsektion führte von der TBM bis zur Übergabe beim Portal (Lmax = 2,7 km). Der zweite Abschnitt bis ins Zwischenlager war 1,7 km lang.

maximum propulsion speed of 100 mm/min and a ring build time of 15 minutes. Special vehicles running on rubber-tyres were used to supply the TBM with segments and material for annular gap filling (see Fig. 8). The excavated material was transported to the interim storage via a conveyor belt (1,500 t/h). The first belt section led from the TBM to the portal supply (Lmax = 2.7 km). The second section leading to the interim storage was 1.7 km long.

4.3 Execution of Construction Works

4.3.1 Assembly and TBM Shunting

The tunnel boring machine was assembled in the pre-cut at the same time as the loose rock excavation. The shield machine was assembled on a specially built cradle and the backup was placed on prefabricated concrete elements (see Fig. 9). As soon as the MAL excavation was completed, a shunting track reinforced with plastic fibres was concreted. This was used to move the assembled TBM to the starting point, with the help of the controllable cradle (see Fig. 10). The prefabricated elements under the chassis of the backup gantries were constantly pre-assembled.



8 Längsschnitt der TBM
TBM longitudinal section



9 Flugaufnahme fertig montierte TBM
Aerial view of assembled TBM

4.3 Bauausführung

4.3.1 Montage und Verschub

Die Montage der Tunnelbohrmaschine erfolgte im Voreinschnitt parallel zu den Arbeiten des Lockergesteinvortriebs. Die Schildmaschine wurde auf einer speziell gefertigten Verschubeinheit zusammgebaut und die Nachläufer auf vorgefertigte Betonelemente gestellt (siehe Bild 9). Unmittelbar nach dem Abschluss des MUL-Vortriebs wurde im Tunnel eine kunststofffaserbewehrte Verschubbahn betoniert. Darauf wurde mithilfe der steuerbaren Verschubeinheit die fertig zusammengebaute TBM zum Startpunkt bewegt (siehe Bild 10). Die Fertigelemente unter den Fahrwerken des Nachläufers wurden dabei laufend vorgebaut.

4.3.2 Vortrieb

Mitte Juni 2018 startete der TBM-Vortrieb. An fünf Tagen pro Woche erfolgte in der Früh- und Spätschicht der Vortrieb und in der Nachtschicht jeweils die Wartung und der Unterhalt. Nach einigen technischen Problemen mit der TBM in der Startphase konnten schon bald gute Vortriebsleistungen erreicht werden. Die drei prognostizierten Störzonen und zwei Bruchzonen konnten problemlos durchfahren werden. Das befürchtete Absinken der TBM von der Sollage wurde durch die gute Steuerbarkeit der TBM verhindert.

Für den Vortrieb in der quellfähigen Anhydritstrecke wurden folgende besonderen Massnahmen getroffen, um ein Verklemmen des Schildes zu verhindern:

- Unterhalt der Maschine zur Vermeidung von Stillständen
- Kontrolle der Rollenmeissel auf Verschleiss und Drehbarkeit
- Vorhalten von Überschnittmeisseln (Bohradiusvergrösserung um 5 cm)

4.3.2 Excavation

TBM excavation began in mid-June 2018. Excavation took place during the early and late shifts five days a week. Maintenance and upkeep took place during the night shift. After some technical issues with the TBM in the start phase, it soon became possible to achieve good excavation output. It was possible to pass through the three predicted fault zones and two fracture zones without incident. The feared subsidence of the TBM from the intended position was prevented by easy manoeuvrability of the TBM.

For excavation in the swelling anhydrite section, the following special measures were taken to avoid the shield becoming stuck:

- machine upkeep to avoid downtime
- monitoring the back loading cutters for wear and rotatability
- provision of copy-cutters (increase in drilling radius of 5 cm)
- provision of pre-swollen bentonite for shield lubrication
- authorisation for constant operation (24/7)
- no cutterhead waters pray
- reduction in service water

Excavation in the anhydrite zone took place without incident with favourable excavation outputs.

The face was most unstable on the 250 m long opalinus clay section. This became evident from the blocks, sometimes up to 60 cm long, which ended up on the conveyor belt, leading to issues with conveyor belt supply. The advancing face also meant that at times there would suddenly be too much excavated or collapsed material on the conveyor belt, caus-

- Vorhalten von vorgequollenem Bentonit zur Schildschmierung
- Bewilligung für Durchlaufbetrieb
- keine Bohrkopfbedüsung
- Reduktion des Betriebswassers

Der Vortrieb in der Anhydritzone verlief problemlos mit ansprechenden Vortriebsleistungen.

Auf dem 250 m langen Opalinustonabschnitt war die Ortsbrust meist instabil. Dies äusserte sich darin, dass teils bis zu 60 cm lange Blöcke aufs Förderband gelangten, welche zu Problemen bei den Förderbandübergaben führten. Weiter bewirkte die vorausseilende Ortsbrust auch, dass teils schlagartig zu viel Ausbruch- respektive Niederbruchmaterial auf dem Förderband lag und dieses dadurch stoppte (siehe Bild 11). Mit der Reduktion der Anzahl Bohrkopfumdrehungen von 3 auf 1,5 pro Minute konnte diesem Problem mit Leistungseinbussen begegnet werden.

In der Süswassermolasse und im Kalk konnten Tagesbestleistungen von 40 m/AT mehrmals erreicht werden. Dadurch wurde das Ziel, den Vortrieb der 2437 m innerhalb von fünfeneinhalb Monaten abzuschliessen, erreicht. Auf die Vorauserkundung mit Sondierbohrungen wurde gänzlich verzichtet.

4.3.3 Massnahmen Durchschlag

Beim Portal Effingen verläuft der Tunnel schleifend in einer steilen Böschung unmittelbar neben der bestehenden Bahnlinie. Wegen der minimalen Felsüberdeckung von nur einem Meter auf den letzten Vortriebsmetern waren Zusatzmassnahmen erforderlich, um beim Durchschlag die Stammlinie der SBB nicht zu gefährden. Ohne Massnahmen bestand das Risiko von abrollenden Steinen, einer Hanginstabilität und

ing it to stop (see Fig. 11). Reducing the number of cutterhead rotations from 3 to 1.5 per minute helped deal with this problem with loss of performance.

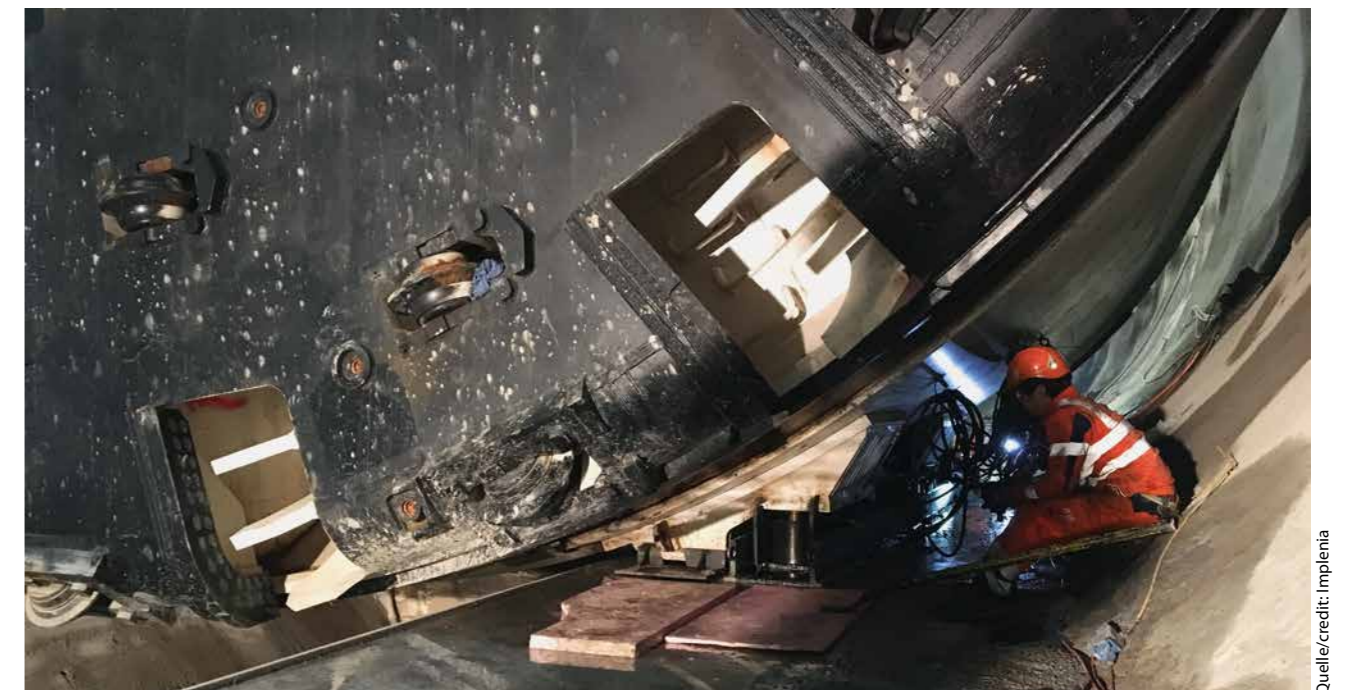
In the freshwater molasse and limestone, it was possible to reach daily best output of 40 m/WD on multiple occasions. The target of excavating 2,437 m within five and a half months was achieved accordingly. Ground exploration through probe drilling was dispensed with entirely.

4.3.3 Breakthrough Measures

At the Effingen portal, the tunnel runs on a steep slope right next to the existing railway line. Due to the minimal bedrock cover of just one metre in the last excavation metres, additional measures were required to avoid putting the SBB main line at risk during breakthrough. If no measures were taken, there was a risk of rolling stones, slope instability and blocks blocking the cutterhead. As a result, a triple pipe umbrella was drilled and large perforation of the portal wall took place (see Fig. 12). The entire breakthrough area in Effingen was also subject to intensive metrological monitoring with four horizontal inclinometers and points at the surface. Responsibilities and processes were clearly governed using incident management. These measures ensured that the Bözberg tunnel cut through successfully on 29 November 2017 (see Fig. 13).

4.4 Lessons to Be Learned

The intensive TBM and logistics planning phase paid off. As a result, the entire system, after a brief start-up phase, worked reliably and well in the different geological zones. The cutterhead design proved itself. Even at full excavation output, the material flow on the conveyor belt was consistent. The use of experienced excavation staff also made a significant contribution to the success. Due to the short excavation lengths,



10 Verschub der TBM
TBM shunting

der Blockierung des Bohrkopfs durch Blöcke. Folglich wurde ein dreifacher Rohrschirm gebohrt sowie eine Grossperforation der Portalwand durchgeführt (siehe Bild 12). Weiter wurde der ganze Durchschlagsbereich in Effingen mit vier Horizontalinklinometern und Punkten an der Oberfläche messtechnisch intensiv überwacht. Mittels Ereignismanagement wurden die Zuständigkeiten und Abläufe klar geregelt. Mit diesen Massnahmen gelang der sichere Durchstich des Bözbergtunnels am 29.11.2017 (siehe Bild 13).

4.4 Erkenntnisse

Die intensive Planungsphase der TBM und der Logistik hat sich auszahlt. So funktionierte das ganze System, nach einer kurzen Startphase, in den verschiedenen geologischen Zonen zuverlässig und gut. Das Bohrkopfdesign bewährte sich. Auch bei voller Vortriebsleistung war der Materialfluss auf dem Förderband gleichmässig. Ein wichtiger Erfolgsfaktor war auch der Einsatz von erfahrenem Vortriebspersonal. Wegen der kurzen Vortriebslänge war dies für den Erfolg des Projekts entscheidend.

5 Stand der Arbeiten und Ausblick

Parallel zur Demontage der TBM erfolgen seit Januar 2018 der Ausbruch der fünf Querschläge sowie die Sohlauffüllung mit aufbereitetem Ausbruchmaterial. Mitte Mai 2018 starten die Betonarbeiten des Innengewölbes und der beiden Portalbauwerke. Ebenfalls im Mai beginnt die einjährige Phase des Abtransportes des Ausbruchmaterials per Bahn. Täglich werden drei Züge abgefertigt und zur Enddeponie geführt.



11 Überfülltes Maschinenband
Overloaded machine belt

this was crucial to the success of the project.

5 Current Works Status and Outlook

Alongside the dismantling of the TBM, the excavation of the five cross passages and the filling of the invert with processed excavated material has been under way since January 2018. In mid-May 2018, concreting work will begin on the inner vault and both portal structures. The one-year phase of transporting excavated material away from the site by rail shall also begin in May. Every day, three trains are dispatched and sent to the landfill.



12 Bohren Dreifach-Rohrschirm Effingen
Triple pipe umbrella drilling at Effingen



13 Durchschlagsfoto mit Baustellenpersonal
Breakthrough photo with construction site staff

Im Frühjahr 2019 sollen die Betonarbeiten abgeschlossen sein, und der Einbau der Fahrbahn und Bahntechnik kann starten.

Die Inbetriebnahme des neuen Bözbergtunnels ist für den Fahrplanwechsel im Dezember 2020 vorgesehen. Anschliessend wird der alte Bahntunnel zum Dienst- und Rettungstollen umgebaut. Der Abschluss sämtlicher Arbeiten ist im Jahr 2022 geplant.

Concreting work should be complete in spring 2019. Track and rail technology installation can then begin.

The new Bözberg tunnel is planned for commissioning in time for the timetable change in December 2020. The old track tunnel will then be converted into a service and rescue tunnel. All works are planned for completion in 2022.

PROJEKTDATEN

Region Schznach-Dorf, Kanton Aargau	
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung SBB-Infrastruktur	
Planung und Bauleitung Implenia Schweiz AG (IG Bözberg Plus)	
Ausführung Implenia Schweiz AG (GU+)	
Kenndaten	
Bauzeit:	2016–2022
Inbetriebnahme:	Dezember 2020
Baukosten Tunnel:	145 Mio. Schweizer Franken
Gesamtlänge Berggröhre:	2,7 km
Ausbruchquerschnitt:	100 m ²
Besondere Merkmale Tunnelbau in quellfähigem Gebirge	

PROJECT DATA

Region Schznach-Dorf, Canton of Aargau	
Client, project and contract management SBB Infrastructure	
Planning and site management Implenia Schweiz AG (IG Bözberg Plus)	
Excavation Implenia Schweiz AG (GC+)	
Fact file	
Construction period:	2016–2022
Commissioning:	December 2020
Tunnel shell construction costs:	145 million Swiss francs
Total length:	2.7 km
Excavation cross-section:	100 m ²
Special features Tunnel construction in swelling mountain rock	

Fabrizio Paolo Di Paola, CEO and technical director at Metro C, Rome/IT
 Eliano Romani, engineering department manager at Metro C, Rome/IT

Underground Line C in Rome: The Downtown Section

Line C is the third line of Rome Metro which will run under the city from the south-eastern to the north-western area, for a total length of 25.6 km and 30 stations. Metro C is the general contractor, led by Astaldi, which is managing the construction of Line C in all its phases: from the design to archaeological surveys, and from the building of tunnels, stations and trains to commissioning. The contract amounts to 3,000,000,000 euros.

1 Introduction

Line C is Rome's third metro line. Once completed, it will cross the city from the north-west to the south-east, for a total length of 25.6 km and 30 stations, almost doubling the extent of the currently existing underground network. It is also the first fully automated underground line in Rome. The 30 trains provided by Metro C are driverless with automated platform doors which increase station safety and improve service quality.

The activities started in 2006 with archaeological surveys and the final design. At present, there are 21 stations and 18 km of line in operation. The first section, between Monte Compatri/Pantano and Parco di Centocelle (15 stations and 12.5 km of metro line), was opened to the public in November 2014; the second section, from Parco di Centocelle to Lodi (six stations and 5.4 km of line), was opened in June 2015. San Giovanni station, which will connect the new Line C to the existing Line A, is going to be opened in early 2018. Two more stations, Amba Aradam and Fori Imperiali, are currently under construction along the T3 section.

Deposito di Graniti is an area of about 220,000 m² and is used to house the complete rolling stock fleet of Line C



1 [a] Line C train and [b] the automated platform doors

and to carry out maintenance operations. At present, Metro C has provided 13 trains, with the possibility of increasing the number to a maximum of 46 trains. In this area, there is also the head office of operations, which is responsible for remote train steering and control.

2 Construction Methods

Stations and shafts are excavated using the cut-and-cover method to reduce side work dimensions and construction time. This method starts with perimeter diaphragm wall excavations and develops with slab construction underpinning the diaphragm walls during excavation up to the foundation slab. The natural soil supports the slab during concrete casting. The internal walls are implemented from the bottom up at the end of the excavation to waterproof the station.

For the construction of the tunnels presently operating – about 19.5 km – the general contractor used four EPB TBMs (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines) whose cutterhead diameter is 6.70 m and the precast lining wall thickness is 30 cm. The internal diameter of the final section is 5.80 m and it includes a single track.

Metro-Linie C in Rom – Bau des Streckenabschnitts im Stadtkern

Für den Bau der Linie C der Metropolitana di Roma bis zur Station San Giovanni mussten angesichts der hohen Bebauungsdichte und der unterirdischen Versorgungsleitungen sowie zur Lösung verschiedener Probleme geologischer bzw. geotechnischer, archäologischer und territorialer Art geeignete Bauverfahren angewandt werden. Der Streckenabschnitt T3 der Linie C befindet sich derzeit im Bau und wird unterhalb des historischen Stadtkerns von Rom verlaufen. Dieses Areal zeichnet sich durch eine hohe Dichte an historischen Bauwerken aus, die sich über und unter der Erde befinden und Teil des UNESCO-Weltkulturerbes sind.

Ligne C du métro de Rome : section centre-ville

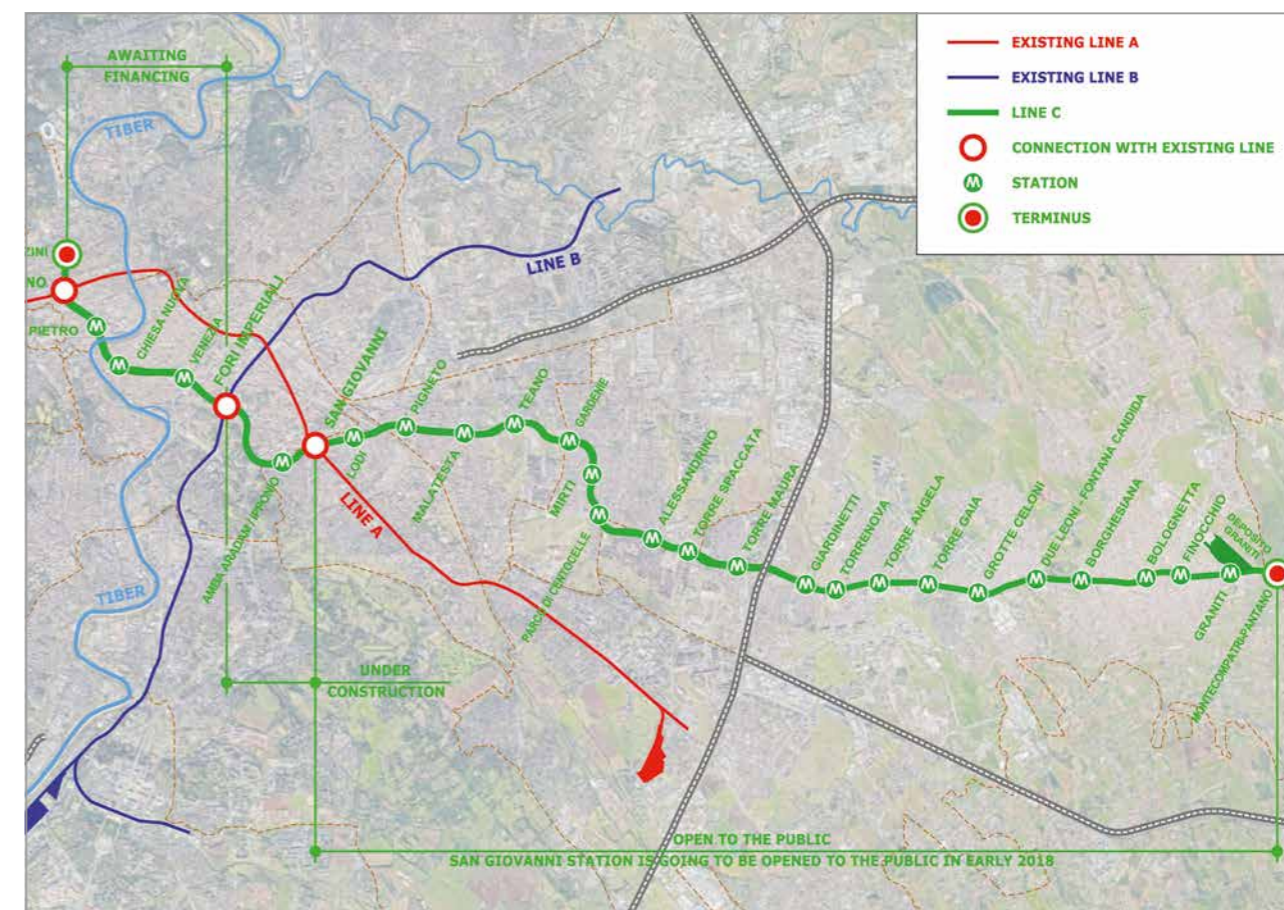
Pour répondre aux problèmes d'ordre géologique/géotechnique, archéologique et territorial rencontrés dans le cadre de la construction de la ligne C du métro de Rome, ainsi qu'à la forte concentration d'immeubles et à la densité des infrastructures souterraines, il a fallu recourir à des techniques de construction adaptées pour la station San Giovanni. La section T3 de la ligne C en construction passe sous le centre historique de Rome – une zone à forte concentration de monuments et bâtiments archéologiques classés au patrimoine mondial de l'UNESCO, présents en surface et en sous-sol.

La Linea C della Metropolitana di Roma: la tratta del centro storico

Nell'ambito della realizzazione della Linea C della Metropolitana di Roma, la stazione San Giovanni ha richiesto l'adozione di tecniche realizzative atte a rispondere alle problematiche presenti di carattere geologico-geotecnico, archeologico e territoriale, con un'alta densità di edifici e sottoservizi. La Tratta T3 è attualmente in costruzione e sottotraverserà il centro storico della città di Roma, un'area caratterizzata dalla presenza di monumenti e costruzioni antiche al di sopra e al di sotto del piano campagna, dichiarati patrimonio mondiale dell'UNESCO.

About 1.5 km of the tunnels presently operating were implemented with the traditional open-face method. It has been used to realise tunnels with a transversal section bigger than

the final transversal section of TBM tunnels used for Metro C line or to excavate a link between the two TBM tunnels. This link allows trains to proceed straight or to the other tunnel.



2 Layout of Line C



3 An interesting view of the Deposito di Graniti area

3 San Giovanni Station

One of many areas that required adopting building techniques suitable to problems of a geological/geotechnical, archaeological and territorial nature, and that feature a high density of buildings and underground utilities, is certainly the San Giovanni station, an interchange between Line C and Line A.

The station is situated in the difficult urban setting of the Appio-Latino neighbourhood, and extends along Via La Spezia next to the San Giovanni station of the Rome Underground's Line A.

The station structure is rectangular, 140 m in length and 22 m wide, and it reaches a depth of 35 m below ground level. It consists of seven horizontal structures, and shares a

border with the existing Line A station to allow for passenger movements.

The geological/geotechnical units encountered here are a transition from the volcanic units of the eastern periphery of the city towards the fluvial or marine units of the historic centre of Rome (the Tiber's ancient riverbed). The design choices regarding this station's construction were strongly constrained not only by the pre-existing structures and the geological/geotechnical landscape, but also by what emerged during the archaeological surveys performed once work had begun: an unexpected presence of archaeological layers distributed in a landfill down to depths of between 14 and 18 m, with a water table level at about 8 m below ground level.



4 The two TBMs used for tunnel excavation and TBM handling



5 Tunnels excavated with the traditional open-face method

Following the results of the archaeological surveys carried out before building the station's perimeter diaphragm walls and executing jet grouting of the bottom plug, the archaeological superintendent of the municipality of Rome imposed the following construction constraints:

1. Impossibility of performing consolidations from ground level without prior archaeological excavation;
2. Need to carry out all the excavations by archaeological procedure down to «virgin» ground.

These obligations required a revision of the Line C design in the historic centre of Rome, starting from San Giovanni station, to safeguard the archaeologically sensitive strata.

For the part of the line that runs from San Giovanni to Malatesta, the archaeological findings required a plan-altimetric variation of the Line C alignment starting from the Lodi station, deepening the line tunnels beneath the archaeological strata and digging tunnels with the traditional open-face method to pass beneath the existing station, abandoning the level left available in the design from the 1970 s, on the slab above the Line A platform.

The study of the new execution phases – strongly constrained by the archaeology and influenced by the desire of not wanting to lose the benefits of the top-down method, with the descending slabs functioning as a strut to support the perimeter partitions, led to defining the following succession in construction which, for each slab, calls for:

1. Excavation using the archaeological method down to about 1.00 m beneath the slab's intrados;
2. Execution of perimeter concrete edging resting upon pockets made in the diaphragm and hung on the covering slab using Dywidag bars;
3. Deepening the excavation using the archaeological method by an additional 2.00 m;
4. Implementing the slab with self-bearing pre-fabricated structures, and completing this phase with subsequent casting.

By eliminating the excavation at the face typical of the top-down method with slabs cast against the earth, these

phases allow the excavation to be deepened by horizontal levels, thus preserving the ancient structures.

During the excavation of San Giovanni station, the general contractor found about 40,000 archaeological structures within an archaeological excavation of 50,000 m³. The most important finding was a big reservoir dating from the late Roman age that was found about 15 m below ground level.

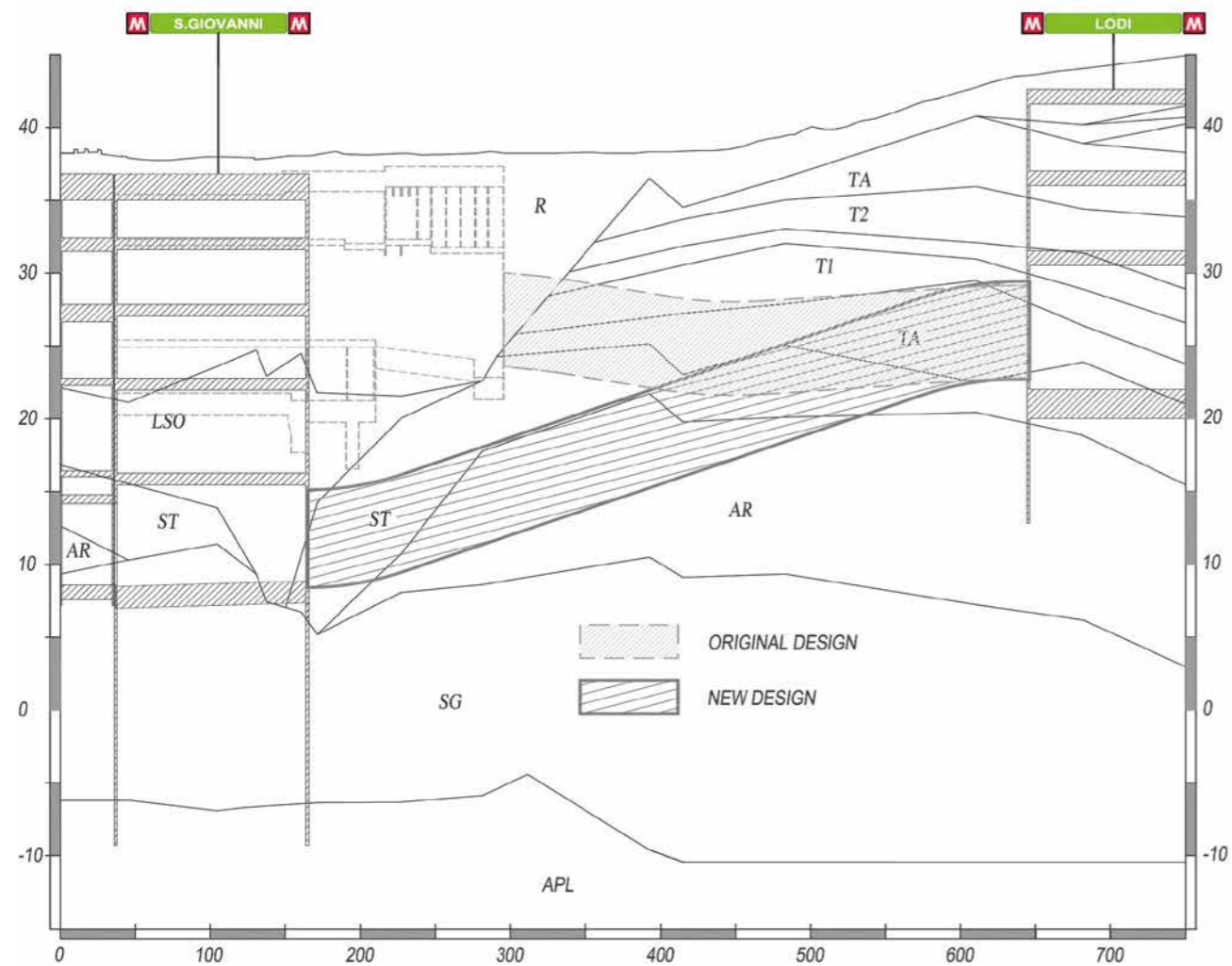
At the end of the archaeological excavation, the Archaeological Ministerial Office had Metro C change the design of San Giovanni to safeguard the archaeological findings. Thus, the general contractor designed a new architectural layout, and San Giovanni station became the first archaeological station in Italy. Some archaeological findings were placed on the first and the second levels of the station so that passengers will be able to see them when going to the platform.

Line C tunnels run under the existing San Giovanni Line A station. These tunnels are each 40 m in length and they were excavated by means of the traditional NAT method using a variety of consolidation techniques, including chemical and cement injections and artificial ground freezing.

Because the new tunnels are directly underneath the platform level of the Line A station, which remains fully op-



6 The interchange with the existing Line A



7 Geotechnical profile – comparison between the original design and the new design

erational during the Line C works, a temporary structure was designed and installed to support the rails during ground freezing activities and tunnel excavation. Also, a real-time monitoring system was installed to control soil temperature during excavation, the behaviour of the structures of the existing station and the new rail support system.

The tunnel excavation is inside two different geological layers from the Pleistocene epoch; the top of the tunnels is inside clayey silts and the bottom is in fluvial deposit composed of gravels and sands. The hydraulic head above the tunnel top is approximately 10 m. In order to install the ground-freezing equipment, it was necessary first to reduce the ground permeability with grout injections and



8 The construction of an internal slab in the San Giovanni station



9 [a] A view of the big reservoir from the late Roman age and [b] ancient walls

then to implement controlled drilling by using a special drilling system known as TDDT (Trevi Directional Drilling Technology).

The particular complexity of the design geometries required the use of a mixed system employing nitrogen in the initial phases of freezing, to reduce the time required to form ice wall by having to treat significant volumes of ground, and brine in the maintenance phase, to control the growth of the ice wall with time and thus reducing the deformation induced on the existing slab of Line A, and save on costs.

To heed the design's geometry and inter-axes over the entire length, the drilling operations were guided using the TDDT system, which consisted of an electromagnetic guide for drilling. The average temperature of the freeze body was -10°C and the thickness of the freeze body around each tunnel was about 80 cm at the sidewalls and approximately 3 m in the invert.

Another particular aspect of the interaction with the existing structure was the foundation piles' interference with the track section of Line C. The problem was solved by re-profiling the foundation piles: once the permanent lining of the tunnels was complete, this was followed by diamond wire vertical cuts from top to bottom. In order to restore the continuity of the piles' reinforcement, steel bands welded to the piles' reinforcement, as well as a protection casing, were installed.

4 The Safeguarding of Monuments and a Methodological Approach

The Line C T3 section is characterised by the presence of historic buildings and monuments of great value, including the Colosseum, the Aurelian Walls and Basilica of Maxentius. The historic centre of Rome is a UNESCO World Heritage site and, in order to safeguard all the monuments, Metro C convened a special scientific technical committee (STC) which includes world-famous professors.

The aim of this committee was to ensure the use of high-quality research methods and to analyse potential inter-



10 Some internal views of San Giovanni station: the first archaeological station in Italy



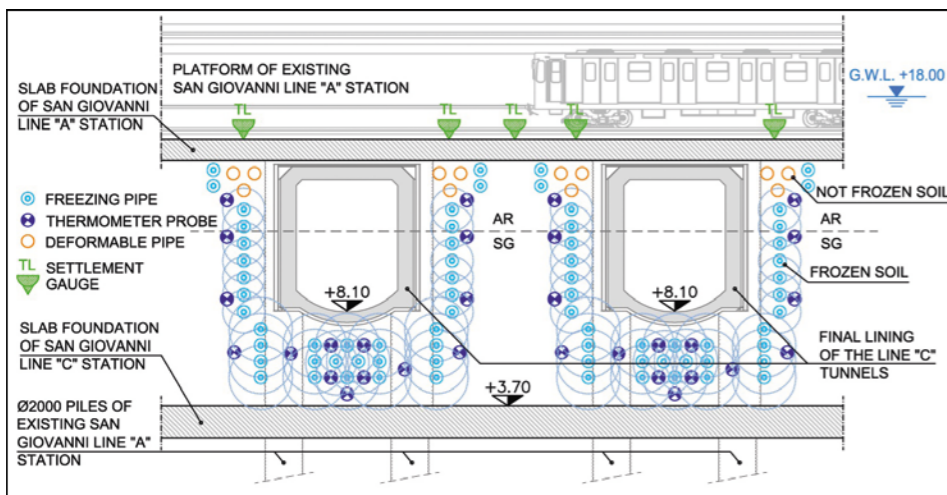
11 Cross section of Line C tunnels passing beneath the existing Line A station

actions between the new line and the historic monuments. The committee coordinated and supervised the activities of specialist working groups. The five work teams – consisting of university professors and specialists – operate in the following fields: geology, geotechnical engineering, restoration and preservation, structural engineering and monitoring systems.

The interaction studies, carried out by the team over two years, defined a methodological approach that can be roughly divided into three important steps:

- Preliminary studies that consist of a historical study and identification of the construction stages; identification of the type, the materials and the geometry of the foundations; identification of the material characteristics and of the building technologies; structural and crack pattern survey; and a geometrical survey;
- Interaction analyses, which consist of level 1 and level 2 geotechnical analyses and a structural analysis;
- Drawing up of guidelines for the design of the most appropriate geotechnical and structural protection measures and the monitoring system.

The aim of the interaction studies is to evaluate the possible effects on the historical buildings induced by the settlement



12 Cross section with artificial ground-freezing geometry



13 [a] Freezing pipes and [b] tunnel excavation

generated by tunnelling and deep excavations. The expected damage evaluation was carried out with reference to the classification of damage by Burland (1995), based on the combination of the computed horizontal tensile strain and deflection ratio.

In the first stage, simplified analyses were performed using the semi-empirical method and neglecting the building stiffness and weight. The resulting settlement was applied by the structural engineering group to a 3D linear elastic or non-linear finite element model of the structure under examination. Based on the results of the geotechnical and structural evaluations, the study was ended if the damage was considered negligible, or continued to a higher level of complexity (level 2 analyses).

In the second stage, the interaction between the tunnels and the historical buildings was studied through full soil structure interaction analyses, performed in both 2D or 3D conditions, accounting for the stiffness and weight of existing buildings and considering possible long-term effects.



14 [a] The re-profiling foundation piles and [b] the permanent lining

The computed settlement was applied again to the structural model and damage was re-evaluated, independently, by both groups. Depending on the computed results, either damage was considered acceptable or prospective remedial techniques had to be designed.

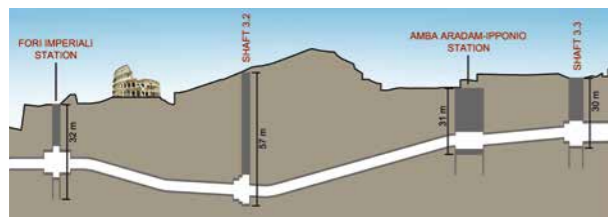
The remedial measures were geotechnical or structural. The geotechnical active measures consisted of compensation grouting injections, whereas the geotechnical passive measures were cross walls. The structural active measures were bars or steel ropes, and the structural passive measures were temporary supports.

The interaction analyses with the mechanised excavation of the line tunnel were carried out both with a design volume loss ratio of 0.5% and, as a conservative estimate, with a ground loss ratio of double that (1%). In the case of tunnels excavated using the traditional method, the analyses were carried out with a design ground loss ratio of 2% and a conservative estimate of 4%.

The T3 section of the tunnels is going to be excavated by two EPB TBMs at a depth of 30 m for 60 m. The first stretch of the T3 section drilled using a TBM will run under the Aurelian Walls at Porta Metronia, while the other end will run along



15 A view of the Fori Imperiali station construction site



16 Longitudinal profile of the T3 section

Via dei Fori Imperiali, very close to the Colosseum and the Basilica of Maxentius. The latter is an interesting example to illustrate the methodological approach adopted in the interaction studies.

5 The Basilica of Maxentius: a Case History

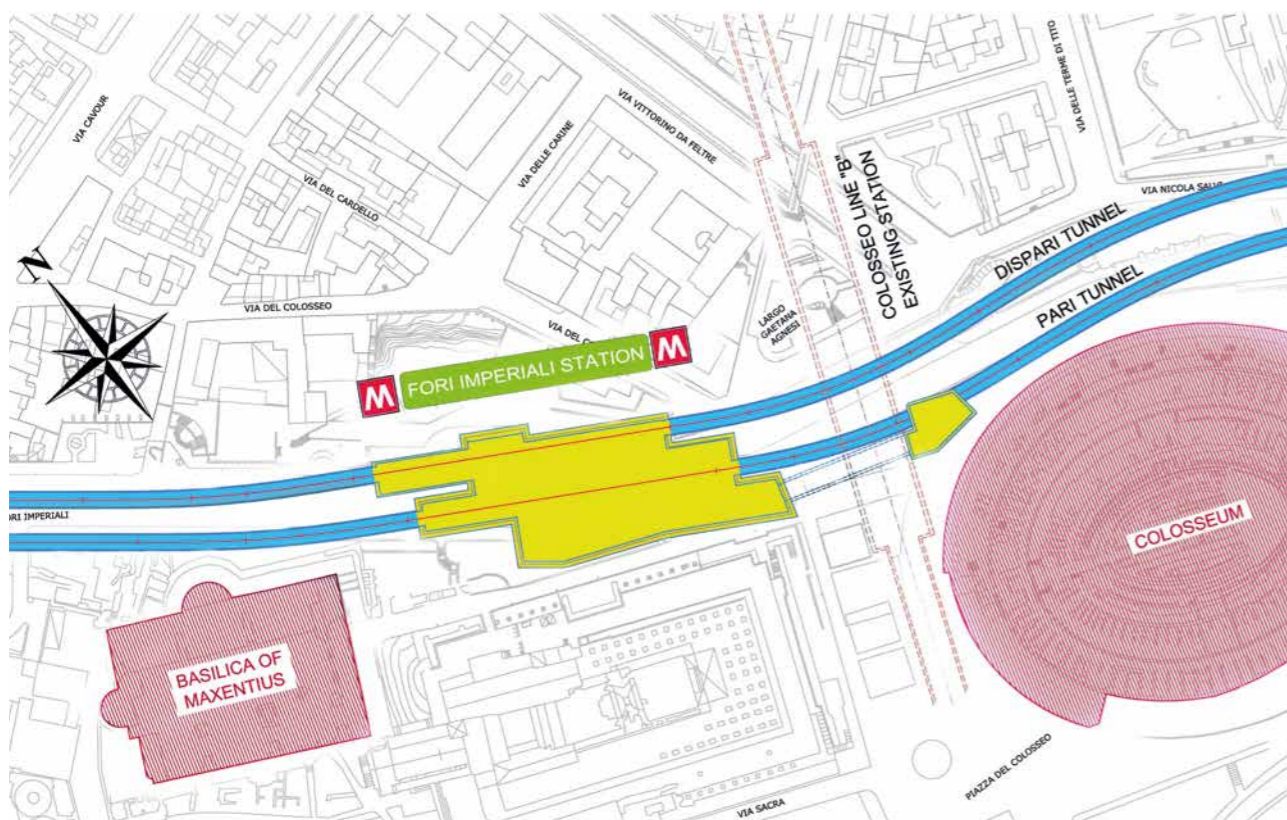
The Basilica of Maxentius is situated along Via dei Fori Imperiali in position between the Fori Imperiali and Venezia station. In the examined area, the route of Line C is straight and external, sub-parallel to the longitudinal axis of the structure. The foundation level of the Basilica is 27 m above sea level whereas that of Via dei Fori Imperiali, under which runs the gallery nearest to the monument, is variable (between 22.5 and 23.5 m above sea level). The difference in level between the Basilica and Via dei Fori Imperiali is supported by the ancient Roman wall which bears the weight of the Velian Hill, which was excavated for the opening of Via dei Fori Imperiali (Fig. 17). The foundations are of a continuous type with a variable width of 4.0 to 6.0 m and a level

variable between 23.0 m above sea level (Colosseum-side pylon) and 13 m above sea level (Carinae-side pylon).

The Basilica of Maxentius is a particularly heavy structure, with significant contact stress transferred to the soil by the foundations that consist of a simple extension of the bearing walls, with very limited widening. The preliminary studies examined the structural failures and subsequent historical reinforcements, the geometrical survey, the structural and crack pattern survey, the material characteristics and the construction technologies with test investigations.

The study of the interaction between the line galleries and the monument was carried out through the level 2 numerical analyses performed in bi-dimensional and tri-dimensional conditions. The numeric interaction analyses have pointed out that the settlement induced by the implementation of the galleries is characterised by maximum absolute and differential settlement values higher than those obtained in the free-field conditions implemented in the level 1 numeric analyses because of the elevating actions conveyed by the foundation system.

The tri-dimensional structure soil interaction analyses provide results consistent with those of the bi-dimensional analyses. For the central transverse wall – Carinae side – the subsidence value induced by the passage of the TBMs with a volume loss ratio of 0.5% is negligible, less than 2.0 mm. Instead, higher values were obtained for the central trans-



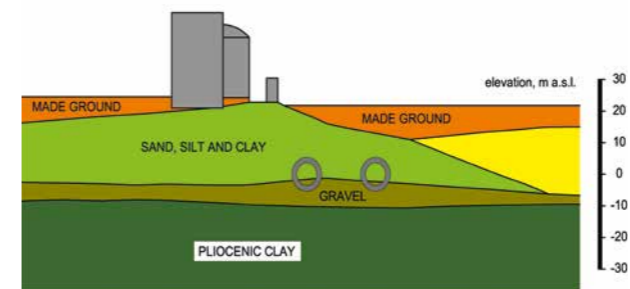
17 The interaction between tunnels and the historic centre of Rome



18 [a] An external and [b] an internal view of the Basilica of Maxentius

verse wall –Colosseum side – with a maximum displacement of 3.5 mm, and for the transverse wall –Colosseum side – with a maximum displacement of 4.8 mm.

The structural analyses were carried out with two 3D FEM models: materials with linear elastic behaviour and materials with non-linear behaviour. The non-linear model, which



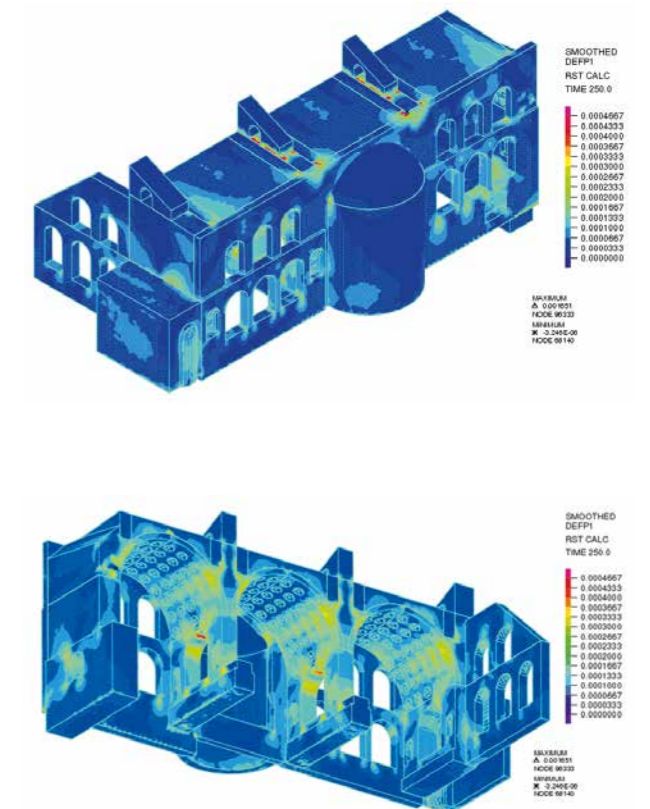
19 A geological section with the TBM tunnels near the Basilica

certainly provides more dependable results than the linear elastic one, shows that the strain on the transverse walls after the application of the settlements does not appear to significantly change. The variation of the stress in the vaults from the present condition to that after the intervention of the subsidence is almost unperceivable. The strain of the apse is altered by the imposed settlement. The most relevant perturbation is concentrated in the reinforced concrete dome, near the facade facing Via dei Fori Imperiali and on the Colosseum side with tensile stresses of 3 MPa. The evolution of the tensional state in the longitudinal wall with triple-lancet windows shows a small perturbation with an increase in traction, generally already present under its own weight, in the keystones of some triple-lancet windows. The deformation analysis provides a reliable picture of the perturbation induced by the settlement imposed on the structure. Under its own weight, the maximum strain value amounts to about $3E-4$, neglecting very localised and few representative effects. With the imposed subsidence, we get to a maximum deformation value of the same order of magnitude, so we can conclude that the disturbance caused is negligible based on the design hypotheses (Fig. 19). Before the construction of the tunnels, according to Burland's classification, the structure is already in a state of slight damage, although the works do not further worsen the damage category.

One of the most interesting aspects of the non-linear analysis is the numerical simulation of crack development. First of all, we can see a good correspondence between the crack localisation in the model and that presently shown in the Basilica.

The conclusions of the analyses carried out by the structural and geotechnical engineering working groups and the present static conditions of the monument have led to the STC suggesting that the opportunity be taken to make localised, definitive interventions to safeguard the structure with the aim of reducing the barrel vault's thrusts.

The design of the structural reinforcements comprises the restoration of the brick facings with the use of fibres and structural injections and a post tensioning system with some longitudinal and transverse Dywidag bars to reinforce the structure.



20 The result of the 3D structural models



21 An internal view with the permanent structural reinforcements highlighted in red



22 View of the shaft 3.3 worksite

6 Tunnels between Shaft 3.3 and San Giovanni Station

The connection tunnels between shaft 3.3 and the existing San Giovanni station – each about 150 m – will be excavated according to the traditional method after the transit of the shielded TBM with a diameter 3,000 mm; this will be done for both the tracks of the future line tunnel (Fig. 6).



23 [a] The micro TBM and [b] a view of the implemented micro tunnel

The micro tunnel will be excavated from shaft 3.3 through an appropriate jacking structure erected on a provisional reinforced concrete slab. After mechanised excavation, the consolidation will be executed from inside the micro tunnel by radial injections perpendicular to the excavation for the purposes of widening.

The soil consolidation treatments are considered necessary in order to reduce the permeability of sandy, gravely formations (SG) crossed through during tunnel excavation – in particular at the position of the bench and of the invert – and to improve the soil's mechanical characteristics.

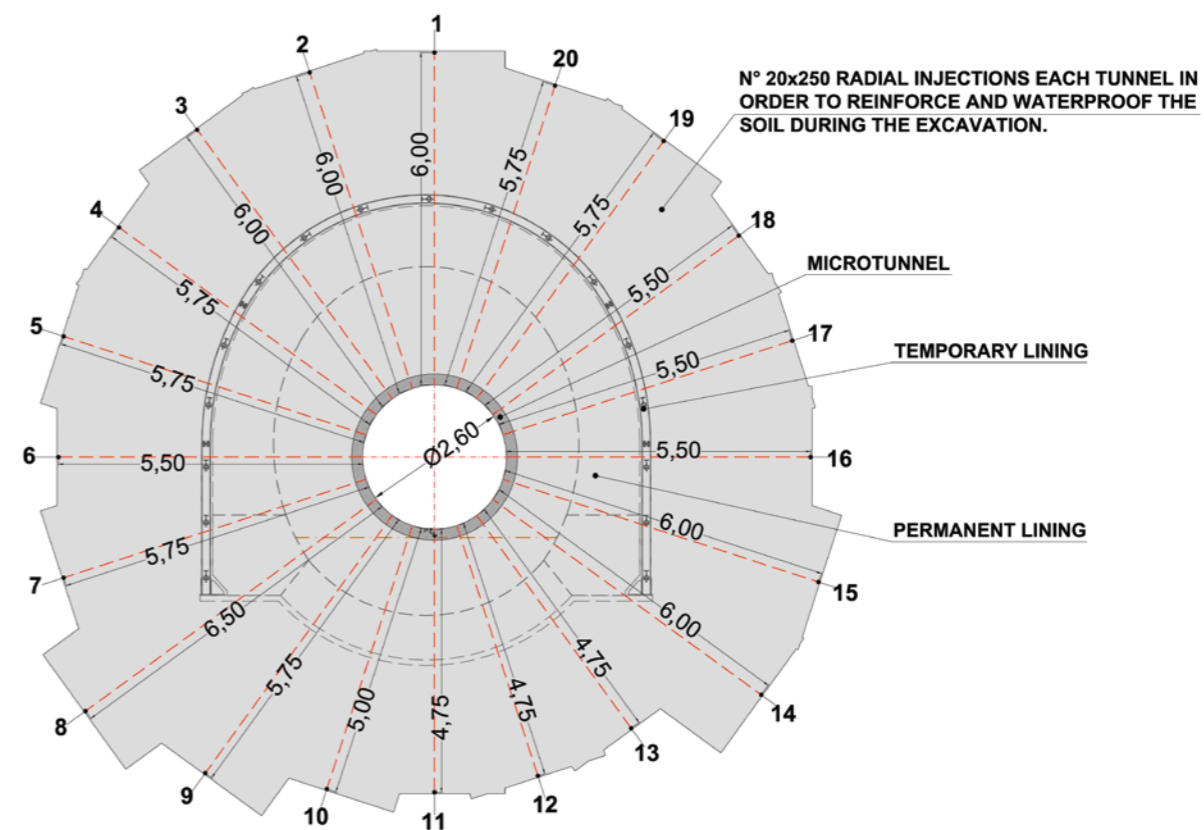
More precisely, such activity entails the execution of a series of radial injections of chemical and cement grout having some specific characteristics – such as micro-cement with a fineness (Blaine) >8,500 cm²/g – to be verified on the basis of the results of field trials about to be completed in the area adjacent to Via Sannio. At the end of the soil treatment activities, the widening of the section will start from shaft 3.3.

The tunnel widening has to be executed as a full-section excavation, with metal-pipe fore poling around the tunnel shaft and a provisional lining consisting of metal ribs and shotcrete.

The works are characterised by the reduced bending radius of the layout and the recovery of the TBM, which will take place in the tunnel rather than in the arrival shaft (San Giovanni station).

References

- [1] Metro C Rome Line C – Artificial ground freezing application for the underpass existing metro station San Giovanni Line A
A. Bertero, F. Cribari, A. Tanzi, S. Fancello, T. Gondolini, F. Giannelli, M. Lodico, M. D'angelo, E. Romani
ICGE 2016: 18th International Conference on Geotechnical Engineering September 2016, San Francisco, USA



24 BA typical transverse tunnel section between shaft 3.3 and San Giovanni station

- [2] Artificial ground freezing: case studies technological development and fundamental research G.M.B. Viggiani, F. Casini, A. Bertero, F. Cribari, F. Giannelli, E. Romani
XXIV TORINO GEOTECHNICAL CONFERENCE DESIGN, CONSTRUCTION & CONTROLS OF SOIL IMPROVEMENT SYSTEMS February 2016, Torino, Italy
- [3] Rome's Line C: design and construction of tunnels under passing the Line A station with ground freezing
F. Giannelli, E. Romani, G. Di Mucci, R. Sorge, A. Bertero, F. Cribari
XIII International Conference entitled "Underground Construction Prague 2016"
May 2016, Prague, Czech Republic
- [4] Construction of Line C San Giovanni station in Rome
E. Romani, N. Miniero
VIII International Symposium on "Geotechnical aspects of underground construction in soft ground"
May 2013, Naples, Italy
- [5] Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation
Burland J.B.
1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan, 1995



25 Grouting execution

Maria Elena Parisi, Geology Responsible, TELT SAS, Turin/IT
Lorenzo Brino, Design Director, TELT SAS, Turin/IT
Alain Chabert, France Deputy General Director, Bourget du Lac/F

Il Tunnel di Base del Moncenisio: bilancio del test di scavo con fresa nel Cunicolo Esplorativo de La Maddalena di Chiomonte

L'opera preliminare

Il Cunicolo Esplorativo de La Maddalena fa parte delle opere geognostiche della Sezione Transfrontaliera della Nuova Linea ferroviaria Torino-Lione. I dati prodotti dallo scavo del Cunicolo Esplorativo hanno permesso di affinare il quadro conoscitivo progettuale del Tunnel di Base del Moncenisio in vista della fase costruttiva dell'opera principale.

The Moncenisio Base Tunnel: Results of the Excavation Test Using a Tunnel Boring Machine (TBM) in the Maddalena di Chiomonte Exploratory Tunnel

The Preliminary Work

The Maddalena Exploratory Tunnel forms part of the exploration works for the Cross-Border Section of the New Turin-Lyon Railway Line. The data generated based on the excavation of the exploratory tunnel helped to refine the knowledge as a foundation for the Moncenisio Base Tunnel project in the lead up to the construction phase of the main work.

1 Introduzione

La Sezione Transfrontaliera, partendo da ovest, è costituita dall'attraversamento del settore all'aperto di Saint Jean de Maurienne, dal Tunnel di Base di 57,5 km che attraversa le Alpi Occidentali, dall'attraversamento all'aperto della Piana di Susa, dal Tunnel d'Interconnessione e dall'ingresso nella stazione di Bussoleno (vedi fig. 1).

Il Tunnel di Base attraverserà tratte di natura e qualità geotecnica e geomeccanica eterogenee, nelle quali si incontreranno terreni sciolti (depositi alluvionali e depositi glaciali), rocce con diverse competenze (scisti arenacei/scisti ricchi in carbone), rocce evolutive (anidriti, gessi), rocce molto resistenti (micascisti, gneiss, ecc.) o molto abrasive (quartziti) e strutture duttili e fragili [1]. Per indagare l'ammasso roccioso alla quota del futuro tunnel ferroviario, oltre a 65 km di sondaggi e 260 km di indagini geofisiche, sono state realizzate delle opere preliminari impegnative, in particolare

1 Introduction

The Cross-Border Section, from west to east, crosses the open Saint Jean de Maurienne sector, the 57.5 km Base Tunnel through the Western Alps, the open Piana di Susa, the Interconnection Tunnel and the entrance into the Bussoleno station (Fig. 1).

The Base Tunnel will cross sections of a heterogeneous geotechnical and geomechanical nature and quality in which it will encounter loose ground (alluvial and glacial deposits), rocks of differing competence (arenaceous schist/coal-rich schist), evaporite rocks (anhydrites, gypsum), very hard rocks (mica schist, gneiss, etc.) or extremely abrasive rocks (quartzite) and ductile and brittle structures [1]. To study the rock mass at the level of the future railway tunnel, in addition to 65 km of exploration drilling and 260 km of geophysics research, challenging preliminary works have been carried out, in particular three declines in France with a total length of 9 km [2] and a

Der Basistunnel des Moncenisio: Ergebnis des mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) ausgeführten Bohrversuchs im Erkundungsstollen des Bergs Maddalena von Chiomonte

Die Vorarbeit

TELT ist der öffentliche Förderer für den Bau einer grenzüberschreitenden neuen Linie von Turin nach Lyon (NLTL), die auch den 57,5 km langen Moncenisio-Basistunnel einschließt. Die Gründung von TELT erfolgte im Jahr 2015 nach der Ratifizierung des französisch-italienischen Abkommens von 2015. Das Ziel von TELT ist es, die Arbeitsausführung zu koordinieren und später den Streckenbetrieb zu gewährleisten. Die NLTL ist ein Teil des Mittelmeerkorridors und umfasst zwischen Sevilla und Budapest 3000 km Eisenbahnstrecke. Dieser Korridor gehört zum TEN-V-Netz und besteht aus neun Achsen. 28 Länder (vor dem Brexit) streben durch diese Verbesserung ihres Transportnetzes eine stufenweise und wechselseitige Integration an.

Le tunnel de base du Mont-Cenis: bilan du test de creusement par tunnelier dans la galerie de reconnaissance La Maddalena à Chiomonte

L'ouvrage préliminaire

TELT est le promoteur public chargé de la réalisation de la section transfrontalière de la nouvelle liaison Lyon-Turin (NLTL), qui comprend, entre autres, le tunnel de base du Mont-Cenis de 57,5 km. TELT a été fondée en 2015 à la suite de la ratification de l'accord de 2015 entre la France et l'Italie dans l'objectif de coordonner les travaux et d'assurer ensuite la gestion de la ligne ferroviaire. La NLTL fait partie du « corridor méditerranéen »: 3000 km de voies ferrées entre Séville et Budapest. Ce corridor fait partie du réseau RTE-T, avec neuf axes et 28 pays impliqués (avant la Brexit) qui aspirent à une intégration progressive et réciproque grâce à l'amélioration du réseau de transports.

tre discenderie in Francia per una lunghezza complessiva di 9 km [2] e un Cunicolo Esplorativo in Italia, da ovest ad est:

- la discenderia «Saint Martin la Porte» della lunghezza di 2'329 m
- la discenderia «La Praz» della lunghezza di 2'480 m;
- la discenderia «Villarodin Bourget/Modane» della lunghezza di 4'036 m
- il Cunicolo Esplorativo «La Maddalena» della lunghezza di 7'020 m

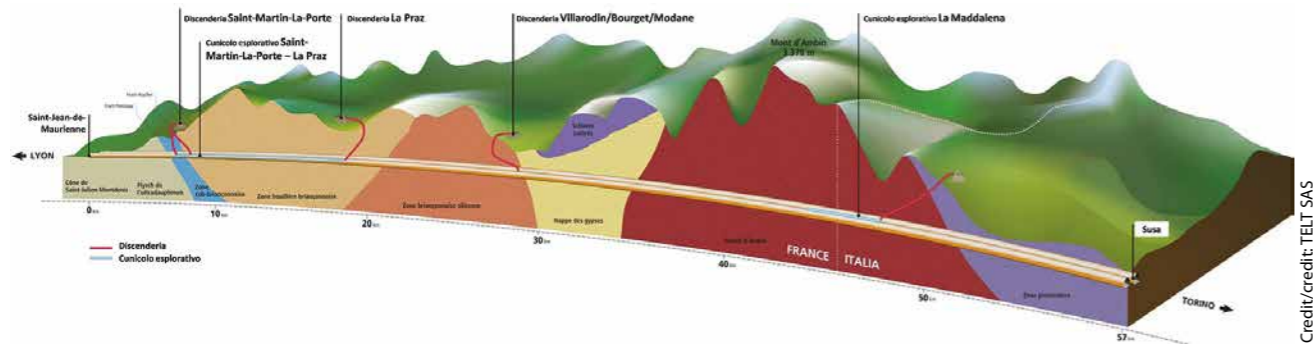
circular exploratory tunnel in Italy, from west to east:

- the "Saint Martin la Porte" decline, 2,329 m long
- the "La Praz" decline, 2,480 m long
- the "Villarodin Bourget/Modane" decline, 4,036 m long
- the "La Maddalena" tunnel, 7,020 m long

In 2015, construction began on the first underground structure along the line of the Base Tunnel, at the Saint Martin La Porte 4 site, where the main structures included the construction of an additional 1,800 m decline (completed) and the exploration tunnel between Saint Martin La Porte and La Praz, 8.8 km long, with the same cross-section as the south tunnel of the future base tunnel, the boring of which began in the summer of 2016 and is currently in progress (see Fig. 2).



1 La sezione transfrontaliera della Nuova Linea Torino Lione
The cross-border cross-section of the New Turin-Lyon Line



2 Sezione geologica schematica del Tunnel di Base del Moncenisio e opere
Geological cross-section diagram of the Moncenisio Base Tunnel and exploration works

di 1'800 m (terminata) e della galleria geognostica tra Saint Martin La Porte e La Praz di 8.8 km in asse e con sezione della canna sud del futuro tunnel di base, il cui scavo con la fresa è iniziato nell'estate 2016 ed è attualmente in corso (vedi fig. 2).

L'imbocco del Cunicolo Esplorativo si trova in località La Maddalena nel Comune di Chiomonte (Torino, Italia) a quota 670 m s.l.m. Il cunicolo è caratterizzato da una lunghezza pari a 7'020 m, per la maggior parte in territorio italiano. Dopo 3'500 m di cunicolo realizzato, il tracciato si è immerso in asse tra le due canne del futuro Tunnel di Base per proseguire in posizione più elevata (vedi fig. 3).

Gli obiettivi del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena erano legati alla necessità di approfondire le conoscenze relative alle caratteristiche e al comportamento dello scavo meccanizzato del Massiccio d'Ambin prima dello scavo delle gallerie del Tunnel di Base. Inoltre, durante i lavori principali, il cunicolo sarà utilizzato come punto di attacco intermedio per

The entrance to the exploratory tunnel is in La Maddalena in the comune of Chiomonte (Turin, Italy) at an altitude of 670 m above sea level. The tunnel is 7,020 m long, with the majority of it lying in Italy. After 3,050 m of tunnel excavation, its path entered the alignment of the two Base Tunnels and follows the alignment between the two tunnels at a higher position (see fig. 3).

The goals of the La Maddalena Exploratory Tunnel were to find out more about the characteristics and the mechanical excavation behaviour of the Ambin Massif prior to excavation of the Base Tunnels. In addition, during the main works, the exploratory tunnel will be used as an intermediate connection point for some of the secondary works and during the operational stage as an emergency and maintenance tunnel.

2 The Exploratory Tunnel Site

The entrance to the tunnel is located under the "Clarea" viaduct on the A32 Turin-Fréjus motorway. Given the morpho-



3 In giallo il Cunicolo Esplorativo de La Maddalena realizzato
In yellow the Maddalena Exploratory Tunnel

alcune opere accessorie e in fase di esercizio come galleria di soccorso e manutenzione.

2 Il Cantiere del Cunicolo Esplorativo

L'imbocco del cunicolo è situato sotto il viadotto «Clarea» dell'Autostrada A32 Torino-Frejus. Data la conformazione morfologica dei luoghi e la presenza delle pile del viadotto, tutta l'area di cantiere per realizzare il cunicolo è stata allestita su una superficie ridotta e terrazzata, in cui sono stati necessari alcuni interventi di sbancamento protetto dei versanti (vedi fig. 4).

Vista la funzione principale «geognostica» del cunicolo, la modalità di scavo prescelta è stata quella di una fresa meccanica a piena sezione (TBM) di tipo «aperto», che permettesse l'osservazione diretta dell'ammasso roccioso scavato (vedi fig. 5).

La realizzazione del cunicolo è iniziata a gennaio 2013, eseguendo lo scavo fino alla progressiva metrica 198 con tecniche tradizionali per attraversare i depositi fluvioglaciali e gli orizzonti di scollamento tra il substrato roccioso e le coperture mesozoiche. Raggiunto il basamento cristallino del Complesso d'Ambin, a novembre dello stesso anno è iniziato lo scavo con TBM arrivando, il 20.02.2017, alla progressiva metrica 7'020 dopo aver attraversato lunghi tratti con coperture di circa 2'000 m (copertura massima 2'012 m).

La sezione trasversale del cunicolo differisce in funzione delle modalità di scavo adottate: a «ferro di cavallo» per la tratta scavata con tecnologie tradizionali, circolare (diametro di scavo di 6.30 m) per la tratta scavata con TBM.



4 Le principali componenti del cantiere de La Maddalena
The main parts of the Maddalena site

logical arrangement of the location and the presence of the viaduct pillars, the whole site area for the construction of the tunnel has been laid out on a small surface area with terracing, in which some earthworks have been necessary to support the site (see Fig. 4).

Given the importance of the function of the exploration tunnel, the excavation method selected was a mechanical full-face excavation using an open gripper type tunnel boring machine (TBM), allowing for direct observation of the rock while being excavated (see Fig. 5).

Construction of the tunnel began in January 2013, using conventional excavation methods as far as chainage 198 to cross the fluvial-glacial deposits and the detachment zone between the rocky substrate and the mesozoic cover. When arriving at the crystalline basement of the Ambin complex, in November of the same year excavation began with the TBM



5 Gea, la TBM del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena
Gea, the TBM for the Maddalena Exploratory Tunnel



6 Area di cantiere, sulla sinistra il sito di deposito terrazzato
Site areas, on the left the terraced deposition site

L'andamento plano-altimetrico del cunicolo è complesso in funzione della posizione dell'imbocco e della necessità di raggiungere il «sito di sicurezza di Clarea» secondo quanto previsto dal Progetto Definitivo del Tunnel di Base: dopo il primo tratto in salita, per il drenaggio delle acque per gravità, lo scavo è avvenuto in discesa per raggiungere la quota minima e infine risalire fino alla progressiva conclusiva, richiedendo la presenza di una sola stazione di pompaggio e di rilancio per consentire il recapito delle acque al depuratore.

Durante la fase dello scavo, oltre ad un esteso monitoraggio ambientale, sono stati eseguiti rilievi geologici, idrogeologici e geomeccanici, sondaggi, prove in situ e di laboratorio, monitoraggi geofisici, monitoraggi tensionali e deformativi. Il complesso quadro dei dati geognostici prodotti in corso d'opera si riassume attraverso l'elenco delle indagini e dei monitoraggi realizzati (vedi tab. 1, tab. 2).

I materiali provenienti dallo scavo delle opere di cantierizzazione, dell'imbocco e del cunicolo sono stati posti a deposito definitivo direttamente all'interno del cantiere, in un'area appositamente predisposta (vedi fig. 6). Questa scelta, effettuata a livello del Progetto Definitivo, ha consentito la minimizzazione degli impatti ambientali azzerando il trasporto di circa 330'000 m³ di terre e rocce da scavo.

2.1 Lo scavo in tradizionale del Cunicolo Esplorativo

La prima tratta del cunicolo fino alla progressiva metrica 198 è stata realizzata con metodo di scavo tradizionale, a piena sezione, con martello demolitore montato su escavatore cingolato. I sostegni utilizzati hanno compreso centine e calcestruzzo spruzzato, pre-sostegni e pre-consolidamenti quali infilaggi metallici al contorno di scavo ed elementi in vetroresina al fronte. Infine è stato realizzato un rivestimento definitivo in calcestruzzo gettato in opera.

reaching, on 20 February 2017 chainage 7,020 after having crossed through long sections with an overburden of up to 2,000 m (maximum cover 2,012 m).

The cross section of the tunnel differs according to the tunnelling method used: "horseshoe profile" for the section dug using conventional tunnelling methods, circular (cutterhead diameter 6.3 m) for the section excavated using the TBM.

The altimetric profile of the tunnel route is complex due to the position

of the entrance and the need to reach the "Clarea safety site" according to the requirements for the final design of the Base Tunnel: after the first uphill section, to drain water by gravity, the excavation continued downhill to reach the lowest altitude and then going back uphill as far as the end point, requiring only one pumping and booster station for transporting the water to the treatment plant.

During the excavation, in addition to extensive environmental monitoring, geological, hydrological and geomechanical measurements were taken, along with surveys, field and laboratory tests, geophysical monitoring and stress and deformation monitoring. The complex overview of the exploration data produced during the works is summarised in the list of surveys and monitoring carried out (see Table 1, Table 2).

The materials from the excavation of the site set-up works, the tunnel entrance and the tunnel were permanently disposed of within the construction site, in a specially designated area (see Fig. 6). This choice, made in the Final Design, allowed the environmental impact to be minimised, eliminating the transportation of around 330,000 m³ of excavated earth and rocks.

2.1 Traditional Excavation of the Exploratory Tunnel

The first section of the tunnel up to metre 198 was excavated using a conventional tunnelling method, full face, with a hydraulic jack attached to the boom of an excavator. The reinforcement methods used included ring arches and shotcrete, pre-supports and pre-consolidation such as anchors and fibreglass bolts in the face. Lastly, a final cast-in-place concrete lining was applied.

The excavation crossed the quaternary cover and the meta-sediments of the mesozoic cover. In particular, in the first

Quadro del monitoraggio tecnico realizzato	Scavo tradiz.	Scavo con TBM	Totale
Tipologia di indagini	n°	n°	n°
Prove di laboratorio in roccia			
Prove di resistenza, velocità onde soniche, sezioni sottili, prove di identificazione	14	471	485
Geofisica cross-hole, tomografia, sismica a paramento			
Cross-hole Vp/Vs, tomografia		11	11
Sismica a paramento			in continuo
Prove geomeccaniche in galleria			
Prova dilatometrica, con martinetto piatto, di permeabilità (tipo Lugeon)		19	19
Prove geomeccaniche in nicchia			
Coppia di prove di carico su piastra, prove di taglio in situ, misura stato tensionale tipo CSIRO, fratturazione idraulica, prove di compressione monoassiale		44	44
Altre Indagini in avanzamento			
Rilievi geologici dei paramenti			in continuo
Rilievi geo-strutturali	23	509	532
Sondaggi in avanzamento a distruzione con controllo parametri di avanzamento			
Sondaggi carotati			

Tabella 1 Tipologie di indagini realizzate

Table 1 Types of surveys performed

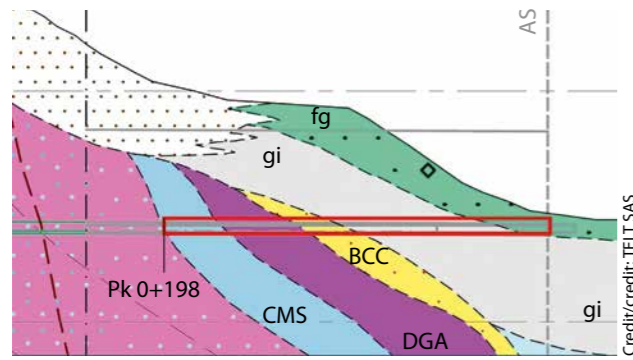
Lo scavo ha attraversato le coperture quaternarie e i metasedimenti della Copertura mesozoica. In particolare nei primi 120 m, si sono intercettati i depositi sciolti, rappresentati da depositi glaciali (gi) e fluvioglaciali (fg); successivamente si sono incontrati litotipi di diversa natura rappresentati dalle carnioli, afferenti agli orizzonti tettonici di scollamento (BCC), dolomie e marmi dolomitici, verosimilmente afferenti

120 m, loose deposits were encountered, represented by glacial (gi) and fluvial-glacial (fg) deposits; then different lithotypes were found represented by carniola rocks, relating to the tectonic detachment zone (BCC), dolostone and Dolomitic marble, most likely relating to the Gad tectonic unit (DGA) and mica schists and carbonate schists, most likely relating to a strip of the Ambin mesozoic cover (CMS) (see Fig. 7) [3].

Quadro del monitoraggio tecnico realizzato	Stazione strumentata
Tipologia di monitoraggio	n°
Tratto scavato in tradizionale da pk 0+000 a pk 0+198	
Deformazione arco rovescio – Straingauge su calcestruzzo	1
Deformazione rivestimento prima fase – Straingauge su centina, stazioni di convergenza topografica	1+18
Deformazione rivestimento definitivo – Straingauge su calcestruzzo	1
Tratto scavato con TBM da pk 0+198 a pk 7+020	
Deformazione del Cavo – Stazioni di convergenza topografica (tipo C-F), stazioni strumentate estensimetri e piezometro (tipo B-F) e Stress meter	124+3+1
Interazione ammasso roccioso-sostegni – Estensimetri a barre (tipo A1-F)	3
Deformazione sostegni – Barrette estensimetriche e celle di cario (tipo A2-F)	9
Plasticizzazione del cavo tramite tomografia sismica a rifrazione a paramento	In continuo
Rock-Burst – Monitoraggio microsismico da pk 2+400	In continuo
Acquisizione dati idrogeologici – Monitoraggio delle portate	In continuo
Acquisizione dati idrogeologici – Analisi chimiche delle acque drenate	22
Monitoraggio delle venute d'acqua in galleria	18
Gradinete geotermico (stazioni mobili e fisse) e temperatura delle acque di infiltrazione	132

Tabella 2 Tipologie di attività di monitoraggio realizzate

Table 2 Types of monitoring activity carried out



7 Profilo geologico "as built" in asse al Cunicolo de La Maddalena (in rosso il tratto scavato con metodo tradizionale)

The "as built" geological profile along the Maddalena Tunnel (in red the section dug using traditional methods)

all'Unità tettonica del Gad (DGA) e micascisti e scisti carbonatici, verosimilmente riconducibili a un lembo di copertura mesozoica dell'Ambin (CMS) (vedi fig. 7) [3].

Lo scavo di questo settore non ha comportato particolari problemi sia in termini geotecnici/geomeccanici che idrogeologici.

2.2 Lo scavo meccanizzato del Cunicolo Esplorativo

A seguire dalla progressiva metrica 198, lo scavo del cunicolo è avvenuto con TBM di tipo aperto Robbins (modello «H.P. Hard Rock TBM»). La fresa, battezzata Gea, è un modello Robbins, tipo «Main Beam», con diametro della testa fresante di 6.30 m, con 43 taglienti di diametro 17", con 7 motori da 315 kW, con massima capacità di spinta di 13'600 kN, potenza alla testa di 2'205 kW, una coppia di gripper per ancorare la TBM al contorno della galleria durante lo scavo, un sistema di nastri per il trasporto dello smarino e con un peso complessivo (TBM inclusi i 16 carri del back-up) di 350 t.

La TBM è costituita sostanzialmente da una prima parte per le operazioni di scavo, spinta ed ancoraggio e da una seconda costituente il sistema di back-up, dove sono installate tutte le attrezzature adibite al funzionamento dell'intera macchina.

L'avanzamento della TBM è stato accompagnato dall'avanzamento dei sistemi logistici necessari per il suo funzionamento nonché del sistema di trasporto dello smarino in galleria (nastro trasportatore), del sistema di ventilazione e dei binari, lungo i quali – tramite locomotori e vagoni – avviene la movimentazione del personale e dei materiali [4].

La configurazione della macchina permette di distinguere le seguenti attività lavorative:

- scavo con testa fresante;
- smarino con nastro convogliatore;
- posa pre-rivestimento con erettore;
- posa dei binari e relativi supporti;
- manutenzione.

The excavation of this section did not involve particular problems in geotechnical/geomechanical and hydrogeological terms.

2.2 Mechanised Excavation of the Exploratory Tunnel

After metre 198, the tunnel was excavated using an open type Robbins TBM (type: "High Performance Hard Rock TBM"). The tunnel boring machine, named Gea, is a "Main Beam" design, with a cutterhead diameter of 6.3 m, equipped with 43 × 17-inch disc cutters and 7 × 315 kW drive motors, a maximum thrust capacity of 13,600 kN, installed cutterhead power of 2,205 kW, a gripper system consisting of two gripper pads to be pushed on the side walls to stabilise and steer the machine during excavation and a belt conveyor system to transport the muck. The TBM including 16× back-up decks, has a total weight of 350 t.

The first main part of the machine is the TBM for cutting the rock, pushing the machine forward and securing the geology with anchors. The second part of the machine is the back-up, on which all of the equipment used for the operation and function of the entire machine are installed.

As the TBM progresses, so do all the logistical systems required for its operation as well as the tunnel muck transport system (conveyor belt), the ventilation system and the rail tracks to allow, the use of locomotives and wagons to transport the staff and materials [4].

The configuration of the machine allows for the following working areas to be identified:

- excavation with cutterhead;
- muck removal with conveyor belt;
- installation of lining with erector;
- laying of rail lines and related base;
- maintenance.

According to the geomechanical characteristics and the excavation behaviour of the rock masses crossed, different types of supports were put in place: from simple bolting (Swellex type bolts) to ring beams (single or double, half-round or full-round) at variable intervals. In general, given the good quality of the rock, no shotcrete was used.

2.3 Geology

As forecast, the route of the majority of the La Maddalena Exploratory Tunnel crossed the Ambin Massif, formed, in sequence from the outer most part, of the lithotypes of the Ambin Complex and in the central part rocks from the Clarea Complex. In particular, it crossed the aplite gneiss of the Ambin Complex (AMC) (from metre 198 to 1,148), then a transition zone (AMD) represented by albite gneiss moving into quartz mica schist (1,148–1,350) and lastly a Clarea mica schist area and the gneiss of the Clarea Complex (CL) from 1,350 m until the end of the excavation at 7,020 m (see Fig. 8). This last type will involve around 13 km of the base tunnel.

In funzione delle caratteristiche geomeccaniche e del comportamento allo scavo degli ammassi attraversati, sono stati posti in opera sostegni diversi: da semplice bullonatura (bulloni tipo Swellex) a centine metalliche (singole o doppie, a sezione parziale o completa: «full round») a passo variabile. In generale, data la buona qualità dell'ammasso, non è stato posto in opera calcestruzzo spruzzato.

2.3 Geologia

Come da previsioni, il tracciato del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena ha attraversato per la maggioranza del suo sviluppo il Massiccio d'Ambin, costituito in successione nella parte più esterna dai litotipi del Complesso di Ambin e nella parte centrale dalle rocce corrispondenti al Complesso di Clarea. In particolare sono stati attraversati gli gneiss aplitici del Complesso d'Ambin (AMC) (dalla progressiva metrica 198 a 1'148), poi una zona di transizione (AMD) rappresentata da gneiss albitici passanti a micascisti quarzosi (1'148–1'350) e infine i micascisti di Clarea e gli gneiss minuti del Complesso di Clarea (CL) dalla progressiva 1'350 fino a fine scavo, 7'020 m (vedi fig. 8). Questi ultimi interesseranno circa 13 km del tunnel di base.

All'interno degli gneiss aplitici (AMC) del Complesso di Ambin, nella fascia di contatto con le coperture sovrastanti, tra le progressive metriche 198 e 265, sono state riscontrate concentrazioni alte di arsenico naturale. La natura di tale concentrazione è verosimilmente legata a fenomeni idrotermali concentratisi lungo il contatto tra le coperture e gli gneiss aplitici. Il materiale, meno di 3'000 m³, è stato trasportato in specifiche discariche e trattato come rifiuto.

Il contatto tra il Complesso di transizione e il Complesso d'Ambin è risultato essere di tipo tettonico duttile, mentre il passaggio tra il Complesso di Ambin e quello di Clarea è caratterizzato da una zona con intensa fratturazione.

Si segnala inoltre che, durante lo scavo del cunicolo, non sono state incontrate o attraversate lenti di metabasiti, se-

Within the aplite gneiss (AMC) of the Ambin Complex, in the layer in contact with the overlying cover, between metres 198 and 265, concentrations of natural arsenic were found. The nature of this concentration is most likely linked to hydrothermal phenomena concentrated along the interface between the cover and the aplite gneiss. The material, less than 3,000 m³, was transported to specific disposal sites and treated as waste.

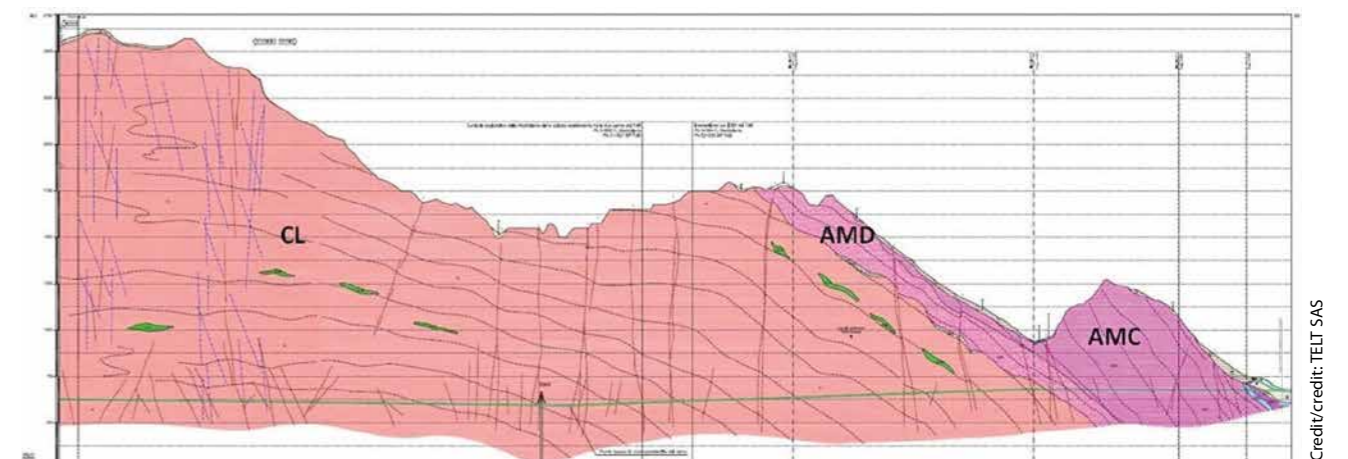
The contact between the transition Complex and the Ambin Complex turned out to be the ductile tectonic type whilst the transition between the Ambin and Clarea Complexes was characterised by an area of intense fracturing.

It is further noted that, during the excavation of the tunnel, no metabasite lenses were found or crossed as reported in literature and in some instances discovered in outcrops on the surface between the lithotypes of the Clarea Complex.

From a structural point of view, the excavation revealed a substantially homogeneous nature. With the Ambin Complex, the schistosity shows a more marked inclination whilst towards the interior of the massif, in the Clarea Complex, it tends to be positioned with angles close to horizontal. With regards to the sets of discontinuities (joints and fractures), an average number of five to six families recur with a certain frequency generally arranged along systems NE-SW and NW-SE and in some cases N-S. The most pervasive families are almost always set on the pre-existing schistosity [5].

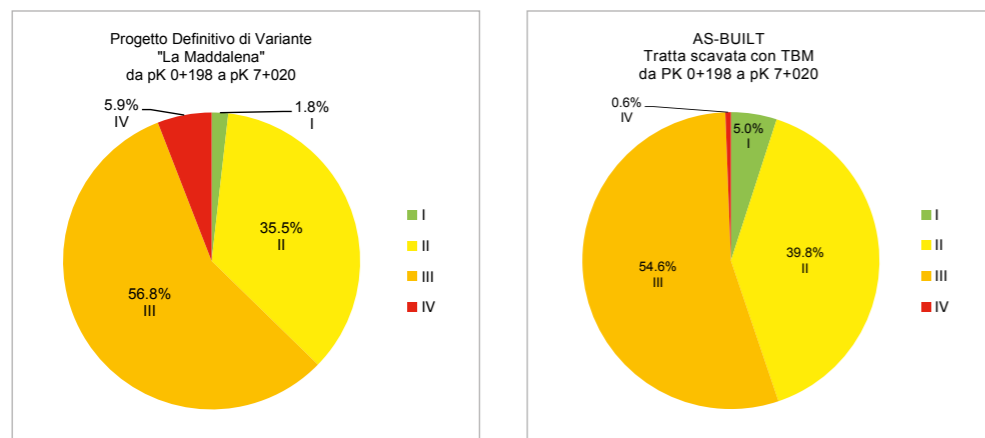
With regards to the sets of faults, these also, as with the joints, seem to be set on the pre-existing schistosity, especially in the Ambin Complex, where they are aligned with average planes of 120/45.

In general, all of the faults crossed can be classified as minor faults, with a maximum thickness of a few decimetres (with the exception of a single tectonic structure with a thickness



8 Profilo geologico "as built" in asse al Cunicolo de La Maddalena nel tratto scavato in TBM (linea verde)

The "as built" geological profile along the Maddalena Tunnel for the section dug using the TBM (green line)



9 Confronto tra la qualità della roccia prevista e quella rilevata a consuntivo, classi RMR (Bieniawski, 1989)
Comparison between the expected rock quality and the actual quality surveyed, RMR ratings (Bieniawski, 1989)

gnalate in letteratura e in taluni casi rinvenute in affioramenti in superficie entro i litotipi del Complesso di Clarea.

Dal punto di vista strutturale, lo scavo ha messo in evidenza una sostanziale omogeneità. All'interno del Complesso di Ambin, la scistosità presenta un'inclinazione più accentuata, mentre verso l'interno del massiccio, nel Complesso di Clarea, tende a orientarsi con angoli prossimi all'orizzontale. Per quanto riguarda i sistemi di discontinuità (giunti e fratture), ricorrono con una certa frequenza un numero medio di 5-6 famiglie in genere disposte secondo sistemi NE-SW e NW-SE e in taluni casi N-S. Le famiglie più pervasive sono quasi sempre impostate sulla scistosità preesistente [5].

Per quanto riguarda i sistemi di faglie, anch'essi, in taluni casi, come per i sistemi di giunti, sembrano impostarsi sulla scistosità preesistente, in particolar modo nel Complesso di Ambin, ove risultano orientate con giaciture medie 120/45.

In generale tutte le faglie attraversate sono classificabili in faglie minori, di spessori massimi decimetrici (ad esclusione di una sola struttura tettonica di spessore metrico a Pk 1+150 al contatto tra gli AMC e gli AMD). Generalmente queste strutture sembrano sviluppare principalmente roccia di faglia costituita da cataclaste e solo limitatamente gouge argilloso.

Dal punto di vista geomeccanico il settore di galleria scavato in TBM ha evidenziato una qualità dell'ammasso roccioso variabile tra discreto e ottimo [6]. Mettendo a confronto la qualità della roccia prevista e quella rilevata, la roccia attraversata è stata migliore, principalmente di classe II-III di Bieniawski (vedi fig. 9).

3 Il bilancio delle attività di scavo

Il ritorno di esperienza dello scavo del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena costituisce la principale fonte di dati di nuova acquisizione attraverso i quali è stato possibile esegui-

with that surveyed, the rock traversed was better, mainly Bieniawski rating II-III (see Fig. 9).

3 Results of the Excavation Work

The learnings from the excavations at the La Maddalena Tunnel constitute the main source of newly acquired data which can be used to enhance the Reference Geological Model for the Moncenisio Base Tunnel.

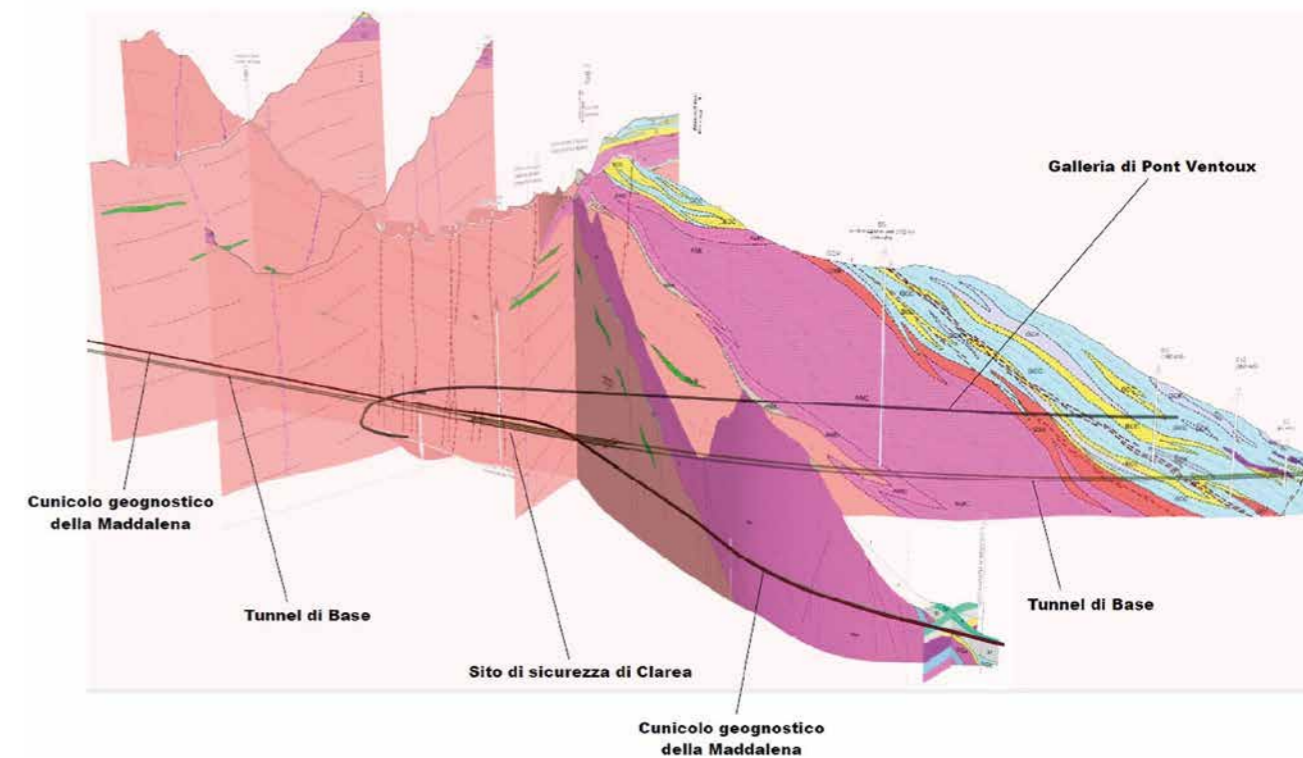
Analysis of all of the information acquired, including through numerous surveys and monitoring inside the tunnel, has allowed the updating and enhancing of the knowledge base of the Ambrin Massif rock mass, with particular regard to the Ambrin and Clarea Complexes, increasing the reliability of predictions, supporting the refinement of the Reference Geological Model for the construction of the Base Tunnel (see Fig. 10). The data collected – aimed at understanding the response of the rock mass to mechanical excavation, finding out about hydrogeological and geothermal conditions in a setting featuring high levels of cover, defining the geomechanical properties of the rocks, categorising the excavated material for its use – can be applied to around 8 km of the Base Tunnel (two tunnels).

Among the most interesting results is the fact that, from a geomechanical and hydrogeological point of view, good conditions were encountered without major issues and moderate ingress of water.

In particular, for the water intercepted by the excavations, comparing the data recorded in the tunnel with the forecasts, the total flow recorded in the tunnel (around 90 l/s) is less than 40% of the forecast minimum (150 l/s). In addition, the type of water encountered was more "diffuse" than "focussed" with the expected flows of 25 to 50 l/s not being observed. The maximum value for the focussed flow (stabilised) was around metre 5,120 to 5,140 at approximately 5 to 6 l/s. Again, in the section beneath the Clarea stream

measuring of few metres at kilometre point 1+150 at the interface between the AMC and the AMD). In general, these structures tend to develop mainly fault rocks consisting of cataclaste and, to a limited extent, clay gouge.

In geomechanical terms, the section of the tunnel dug with the TBM showed the quality of the rock mass to vary between average and excellent [6]. Comparing the expected rock quality



10 Ricostruzione geologica 3D delle opere nel settore Tunnel di Base – Sito di Clarea – Maddalena
Geological 3D reconstruction of the works in the Base Tunnel section – Clarea Site – Maddalena

re l'integrazione del Modello Geologico di Riferimento del Tunnel di Base del Moncenisio.

L'analisi dell'insieme delle informazioni acquisite anche attraverso le numerose indagini e monitoraggi realizzati all'interno della galleria, ha permesso di aggiornare e migliorare il quadro conoscitivo relativo all'ammasso roccioso del Massiccio d'Ambin, con particolare riguardo al Complesso di Ambin e al Complesso di Clarea, aumentando il grado di affidabilità delle previsioni, a supporto dell'affinamento del Modello Geologico di Riferimento per la realizzazione del Tunnel di Base (vedi fig. 10). I dati raccolti – diretti a conoscere la risposta allo scavo meccanizzato dell'ammasso roccioso, a scoprire le condizioni idrogeologiche e geotermiche di un contesto caratterizzato da elevate coperture, a definire le caratteristiche geomeccaniche delle rocce, a qualificare il materiale di scavo per il suo utilizzo – possono essere applicati su circa 8 km del Tunnel di Base (due tubi).

Tra i risultati più interessanti vi sono l'aver riscontrato dal punto di vista geomeccanico e idrogeologico delle generali buone condizioni senza grosse criticità e venute d'acqua di modesta entità.

In particolare, per le acque intercettate dallo scavo, mettendo a confronto i dati registrati nel cunicolo con quelli di previsione, si constata che la portata totale registrata nel cunicolo (circa 90 l/s) è inferiore del 40% rispetto al minimo previsto (150 l/s). Inoltre, la tipologia delle acque incontrate

(metre 1,400-1,440, depth 245 m) in which heavy seepage was feared, no water ingress was found.

The absence of interference between the surface level water points and the excavation works along the route of the future base tunnel was noted, confirming the predictions made in the Final Design.

From comparison of what was actually observed during the works and the predictions, from a geological and structural point of view the general dome structure of the massif was confirmed as was the main schistosity the average orientation of which is in a NE-SW direction, with the greater inclination in the Ambin Complex and the lowest angle of the lithotypes in the Clarea Complex in the innermost part of the massif.

For the behaviour of the excavations under deep cover (up to 2,000 m), systematic phenomena of brittle fracture have been observed through stress release, increasing volume through dilation but without a significant release of kinetic energy and therefore no significant projecting of blocks ("bulking without ejection") due to the existence of pervasive fractures and the generally sub-horizontal schistosity of the mass. In relation to the brittle fracture phenomena, only one event of higher intensity was noted at metre 4,200 (see Fig. 11) which involved 10 to 12 m of excavation: intense fragmentation in the roof, breakage along pre-existing discontinuities (with carbonate filling), schistosity and new surfaces. In general terms, conditions were largely undisturbed and overall stable.



Credit/credit: TELT SAS

11 Evento di rottura fragile verificatosi alla progressiva metrica 4'200 circa.
Brittle fracture event which occurred at approx. metre 4,200

è stata più «diffusa» che «puntuale» e i contributi previsti di 25–50 l/s non sono stati osservati. Il valore massimo relativo alla portata puntuale (stabilizzata) è intorno alla progressiva metrica 5'120–5'140 con circa 5-6 l/s. Ancora, il tratto di sotto-ataversamento del torrente Clarea (progressiva metrica 1'400–1'440, copertura di 245 m), in cui si temevano forti infiltrazioni, non ha evidenziato venute di acqua [7].

È stata anche verificata l'assenza di interferenza tra i punti d'acqua in superficie e lo scavo dell'opera lungo la direttrice del futuro tunnel di base, a conferma delle previsioni fatte in sede di Progetto Definitivo.

Dal confronto tra quanto effettivamente riscontrato in corso d'opera e quanto previsto, dal punto di vista geologico e strutturale è confermata la generale struttura a duomo del massiccio e l'andamento della scistosità principale la cui orientazione media è di direzione NE-SW, con maggiore inclinazione nel Complesso di Ambin e più a basso angolo nei litotipi del Complesso di Clarea, nella parte più interna del massiccio.

Per il comportamento dello scavo sotto le alte coperture (raggiunti i 2'000 m di copertura), sono stati osservati fenomeni sistematici di rottura fragile per effetto dei rilasci

Another significant behaviour was the modest convergence of the rock mass after excavation.

With regard to the fracturing bundles present in the surface of the sector at the national border, the excavation of the final part of the tunnel meant it could be established that these structures, very well defined and recurring in the Col Clapier sector, at a depth of 2,000 m, are under-represented and have different characteristics to those on the surface.

The high temperatures of the rock mass achieved are in line with expectations beneath deep cover and the temperatures of the modest ingress of water are generally in balance with the rock temperature except for a limited section (3,500–4,000) in which, in the presence of a positive thermal anomaly, the water did not follow the trend of the rock.

In relation to the excavation materials for the La Maddalena Tunnel (aplite gneiss and Clarea mica schist), a probing campaign was carried out to verify the suitability of the materials for the production of concrete aggregates with the aim of optimising the value recovery coefficient compared with that put forward in the prior design phase (Final Design).

tensionali, con aumento di volume per dilatanza, ma senza significativo rilascio di energia cinetica e quindi senza importanti proiezioni di blocchi («bulking without ejection») dovuti sia all'esistenza di fratture pervasive sia alla scistosità generalmente sub-orizzontale dell'ammasso. Relativamente ai fenomeni di rottura fragile, si segnala un solo evento di maggiore intensità alla progressiva metrica 4'200, che ha interessato circa 10–12 m di scavo: intensa frammentazione in calotta, rotture lungo discontinuità preesistenti (con riempiimenti carbonatici), scistosità e nuove superfici. Ai paramenti generali condizioni poco disturbate e nel complesso stabili (vedi fig. 11).

Altro comportamento significativo sono state le modeste convergenze dell'ammasso dopo lo scavo.

Per quanto riguarda i fasci di fratturazione presenti in superficie nel settore del confine di stato, lo scavo dell'ultima parte del cunicolo ha permesso di stabilire che tali strutture, molto ben definite e ricorrenti nel settore del Col Clapier, alla profondità di 2'000 m sono poco rappresentate e comunque con caratteristiche diverse rispetto a quelle in superficie.

Le alte temperature dell'ammasso roccioso raggiunte sono in linea con le attese sotto le alte coperture e le temperature delle modeste venute d'acqua generalmente in equilibrio con la roccia, tranne che per un delimitato settore (3'500–4'000) in cui, in presenza di un'anomalia termica positiva, le acque non hanno seguito il trend della roccia.

Relativamente ai materiali di scavo del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena (gneiss aplitici e micascisti di Clarea), è stata eseguita una campagna di indagini al fine di verificare l'idoneità dei materiali per la produzione di aggregati da calcestruzzo con l'obiettivo di ottimizzare i coefficienti di valorizzazione rispetto a quelli proposti nella fase progettuale precedente (Progetto Definitivo).

Lo studio sui materiali condotto tramite prove di vagliatura in cantiere, prove di caratterizzazione geotecnica degli aggregati e di qualità per calcestruzzo, ha portato a concludere che il coefficiente di valorizzazione potrebbe passare da 0.50 a 0.65 implicando un aumento della disponibilità di aggregati che potrebbe arrivare a 1'100'000 t. Per quanto siano ovviamente fondamentali le caratteristiche intrinseche dei materiali per un'opportuna valorizzazione dello stesso, la tipologia della testa fresante della TBM, la preparazione degli aggregati al fine di ottenere una forma e una granulometria conformi, il confezionamento del calcestruzzo secondo formulazioni specifiche risultano essere altrettanto importanti per una buona politica di valorizzazione della risorsa naturale [8].

Alla luce dei dati osservati si può ragionevolmente osservare che è confermato in linea generale, ad esclusione di limitate situazioni locali, quanto previsto nel Progetto Definitivo, e, con particolare riguardo agli aspetti geomeccanici

The materials study conducted through site screening tests, geotechnical characterisation tests of the aggregates and concrete quality tests, led to the conclusion that the value recovery coefficient could increase from 0.50 to 0.65, meaning an increase in availability of aggregates which could reach up to 1,100,000 t. As the intrinsic properties of the materials are obviously fundamental to recover suitable value from them, the type of TBM drill head, the preparation of the aggregates in order to achieve compliant shape and granulometry, the packaging of the concrete according to specific formulations, are equally important for a good value recovery policy for the natural resource [8].

In light of the data observed, it can be reasonably considered that in general, with the exception of limited local situations, the contents of the Final Design are confirmed and, with particular regard to the geomechanical and hydrogeological aspects, the actual conditions are better than the forecasts.

4 Conclusions

The information acquired during the excavation of the tunnel provided further information for the knowledge base of the environmental, geological, geological-structural, geomechanical and hydrogeological aspects and allowed the Reference Geological Model of the Moncenisio Base Tunnel to be updated for the section covered, increasing the reliability of forecasts.

Whilst on one hand the conditions encountered have proven to be more reassuring than previously expected, on the other hand they have revealed that a small section of excavated material contains high levels of natural arsenic, meaning the material will have to be handled differently from the Final Design. The direct consequence of this discovery, in revision of the reference design, has involved making provision for the quantity of material – relating to the same part of the tunnel where this material was encountered – which will, most probably, have to be managed as waste, around 1%. Meanwhile, 40% of the excavation material, thanks to the tests carried out on the material from the La Maddalena Exploratory Tunnel, can be used to make concrete, eliminating the deficit which had been estimated in the Final Design.

References

- [1] L. Brino, N. Monin, A. Farinetti, Lyon-Turin new railway link – Excavation of a long and deep tunnel under rock-burst conditions, AITES-ITA 2011 World Tunnel Congress, Helsinki, 21-26 maggio 2011, pp. 76–85
- [2] L. Brino, N. Monin, C. Fournier, M. Bufalini, Nuova Linea Torino-Lione – Ritorni d'esperienza, Congresso Internazionale Società Italiana Gallerie – Gallerie e spazio sotterraneo nello sviluppo dell'Europa, Bologna, 17–19 ottobre 2013, pp. 595-604, Pàtron Editore

e idrogeologici, le reali condizioni sono risultate essere migliori delle previsioni.

4 Conclusioni

Le informazioni acquisite nel corso dello scavo del cunicolo hanno permesso di approfondire il quadro delle conoscenze degli aspetti ambientali, geologici, geologico-strutturali, geomeccanici e idrogeologici e di aggiornare il Modello Geologico di Riferimento del Tunnel di Base del Moncenisio per il tratto in ricoprimento, aumentandone il grado di affidabilità previsionale.

Se da un lato le reali condizioni attraversate sono risultate essere più confortanti di quelle sinora previste, dall'altro lo scavo ha consentito di «scoprire» che un piccolo tratto di materiale scavato è caratterizzato da valori di arsenico naturale elevati, comportando una diversa gestione del materiale rispetto al progetto. La diretta conseguenza di questo ritrovamento, nella revisione del Progetto di riferimento, è stata di prevedere – in corrispondenza dello stesso settore in cui il cunicolo ha incontrato questo materiale – la quantità di materiale che molto probabilmente dovrà essere gestito come rifiuto, circa l'1%. Mentre il 40% del materiale di scavo, grazie ai test eseguiti sul materiale proveniente dal Cunicolo Esplorativo de La Maddalena, potrà essere impiegato per la fabbricazione del calcestruzzo, azzerando il deficit che nel Progetto Definitivo era stato stimato.

- [3] M.E. Parisi, A. Farinetti, P. Gilli, L. Brino, First results from the excavation of the Lyon-Turin Maddalena exploratory tunnel, AITES-ITA 2015 World Tunnel Congress, Dubrovnik, 22-28 maggio 2015
- [4] A. Rispoli, A.M. Ferrero, M. Cardu, L. Brino, A. Farinetti, Hard rock TBM performance: preliminary study based on an exploratory tunnel in the Alps, EUROCK 2016, ISRM International Symposium «Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to the Future», Cappadocia, Turkey, 29-31 agosto 2016, pp. 469-474, Taylor & Francis Group, London
- [5] M.E. Parisi, L. Brino, P. Gilli, E. Fornari, G. Martinotti, S. Lo Russo, La Maddalena exploratory tunnel, Geomechanics and Tunnelling, Base Tunnels, Vol.10, n.3, giugno 2017, pp. 265-274, Ernst & Sohn Berlino
- [6] Fornari E., Gilli P., Rolando M., Sorlini A. (2014), «Some unusual aspects in the Construction Management of La Maddalena Exploratory Adit in Italy for the Turin-Lyon HSR project», AITES-ITA 2014 World Tunnel Congress, Foz do Iguaçu, Brazil, 9-15 May 2014.
- [7] M.E. Parisi, L. Marini, G. Martinotti, L. Brino, P. Gilli, La circulation hydrique dans le Massif d'Ambin : retour d'expérience de la galerie de reconnaissance de la Maddalena, Congrès International AFTES 2017, Paris, 13-15 novembre 2017
- [8] Burdin J. (2016) – Materiali di scavo provenienti dalla galleria della Maddalena, Prove di Qualità per aggregati e per calcestruzzo.

DATI CHIAVE DEL PROGETTO

Regione	
Italia, Piemonte, Torino, Comune di Chiomonte	
Cliente	
Tunnel Euralpin Lyon Turin sas (Telt)	
Progettazione, direzione locale dei lavori e direzione generale dei lavori	
Italferr come progettazione definitiva, Geodata-Systra e Geodata-Telt sas	
Esecuzione dei lavori	
Venaus Scarl	
Dati chiave	
Tempi di costruzione	gennaio 2013 – febbraio 2017
Avvio lavori	lavori preliminari e propedeutici aprile 2012
Costi di costruzione	circa 170 milioni di euro inclusi i costi dell'ordine pubblico
Lunghezza di scavo	7'020 m
Sezione trasversale scavata	30 m ²
Particolarità	
<ul style="list-style-type: none"> • La TBM è arrivata alle massime coperture, 2'012 m di copertura alla progressiva 6'800 • È stato esplorato per più di 6'500 m il Massiccio d'Ambin, di cui 900 m con coperture di oltre 1'900 m, molto prossime alla massima copertura di circa 2'000 m • I lavori di scavo complessivi della Nuova Linea Torino Lione ammontano in totale a 160 km e sono pari alla NLTL (57,5 km per ciascuno dei due tubi del tunnel e la restante parte costituita dalle discenderie e dai bypass di sicurezza, uno ogni 330 m) 	

PROJECT DATA

Region	
Italy, Piedmonte, Turin, Chiomonte comune	
Client	
Tunnel Euralpin Lyon Turin SAS (TELT)	
Design, site supervision and overall construction management	
Italferr for the final design, Geodata-Systra and Geodata-TELT SAS	
Execution	
Venaus Scarl	
Key data	
Construction period	January 2013 – February 2017
Start of operations	Preliminary and preparatory works, April 2012
Construction costs	approx. 170 million euros, including public order costs
Length	7,020 m
Excavated cross section	30 m ²
Special features	
<ul style="list-style-type: none"> • The TBM reached the maximum cover, 2,012 m of cover at metre 6,800 • The Ambin Massive was explored for more than 6,500 m, of which 900 m with a cover of more than 1,900 m, close to the maximum cover of around 2,000 m • The full excavation works of the New Turin Lyon Line total 160 km, equal to the NLTL (57.5 km for each of the two bores of the tunnel and the remainder made up of the shafts and the safety bypasses, each 330 m) 	

Jürgen Ganzmann, Dipl. Bauing. FH, Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH
Uwe Holstein, Dipl.-Ing. TU Freiberg, AF Toscano AG, Chur/CH

Neubau Albulatunnel II

Erneuerung des Herzstückes der Albualinie

Die Albualinie ist die wichtigste Bahnverbindung in das Oberengadin. Der 1903 eröffnete Albulatunnel ist das Herzstück der Strecke. Aufgrund seines schlechten baulichen Zustands und zur Erhöhung der Sicherheit beschloss die Rhätische Bahn (RhB), einen neuen Tunnel zu bauen. Die Arbeiten begannen 2014, im Sommer 2015 starteten die Tunnelvortriebe. Ab 2021 soll der neue Albulatunnel II betrieben werden.

Construction of New Albula Tunnel II

Renewing the Heart of the Albula Line

The Albula Line is the most important rail link to the Upper Engadine region. The Albula Tunnel, which opened in 1903, is the heart of the section. Due to its poor structural conditions and with the aim of improving safety, Rhaetian Railway (RhB) decided to build a new tunnel. Works began in 2014. Tunnel excavations began in summer 2015. The new Albula Tunnel II is planned to be operational from 2021.

1 Einleitung

Die im Jahre 1903 eröffnete Bahnlinie von Thusis bis nach St. Moritz ist eine Meisterleistung der Ingenieurkunst. Die gesamte Strecke ist 62 km lang. Sie führt über 144 Brücken und durch 42 Tunnel. Der auf über 1800 m ü.M. gelegene Albulatunnel ist mit 5864 m der längste und am höchsten gelegene Tunnel auf der Strecke, die insgesamt über 1000 Höhenmeter überwindet. Die Bauzeit für die gesamte Strecke betrug lediglich fünf Jahre. 2008 wurde die Strecke in das UNESCO-Weltkulturerbe aufgenommen.

Im Laufe der Jahre fügten die Witterung und die tiefen Temperaturen im Winter dem Bauwerk, insbesondere der Spritzbetonschale, dem Natursteinmauerwerk und der Ent-



1 Schäden im bestehenden Albulatunnel
Damage in the existing Albula Tunnel

1 Introduction

The railway line from Thusis to St. Moritz, which opened in 1903, is a masterpiece of engineering. The entire section is 62 km long. It crosses 144 bridges and passes through 42 tunnels. The 5,864 m long Albula Tunnel, at over 1,800 m above sea level, is the longest and highest tunnel on the section, which surmounts a difference in altitude of more than 1,000 metres. The entire section took only five years to build. In 2008, the section became a UNESCO World Heritage Site.

Over the years, weather conditions and low temperatures in winter caused severe damage to the structure, particularly the SCL, the natural stone masonry and the draining system (Fig. 1). After the condition of the tunnel was assessed in 2006, RhB decided on integral renovation of Albula Tunnel. The aim is to create a structure meeting today's safety, operating and environmental requirements. The new Albula Tunnel II will be built 30 m aside from the old tunnel and connected to the Albula Tunnel I via twelve cross passages. The existing tunnel will then be repaired and used as a rescue tunnel. The train stations in Preda and Spinas will be adapted for passengers with disabilities and platform facilities will be enhanced accordingly. In Preda, a pedestrian underpass and a new track for operating the toboggan trail will be build.

2 Preliminary Works

Before the actual tunnelling could begin, various probes and preparatory works were required between 2012 and 2015.

Construction du tunnel de l'Albula II

Remplacement de l'élément central de la ligne de l'Albula

Le tunnel de l'Albula II à voie unique de 5860 m sera réalisé à 30 m du tunnel existant. Après la mise en service du nouveau tunnel, l'ancien tunnel de l'Albula sera remis en état puis utilisé comme tunnel de sécurité. Les deux tubes seront reliés entre eux par douze galeries transversales. Les gares de Preda et Spinas seront aménagées afin de permettre l'accès aux personnes handicapées, notamment avec la mise en place de nouveaux quais.

Les sections les plus délicates dans la construction du tunnel ont été achevées en automne 2017. La percée du nouveau tube est attendue pour l'été 2018.

wässerungsanlage, schwere Schäden zu (Bild 1). Nach einer Zustandserfassung im Jahre 2006 beschloss die RhB das Projekt der integralen Erneuerung des Albulatunnels. Ziel ist ein Bauwerk, das hinsichtlich Sicherheitstechnik, Betrieb und Umwelt den heutigen Ansprüchen gerecht wird. 30 m neben dem alten Bahntunnel wird der neue Albulatunnel II gebaut und über zwölf Querverbindungen mit dem Albulatunnel I verbunden. Danach wird der bestehende Tunnel instand gesetzt und als Sicherheitstunnel genutzt. Die Bahnhöfe in Preda und Spinas werden behindertengerecht ausgebaut und die Perronanlagen entsprechend ergänzt. In Preda werden eine Personenunterführung und ein neues Gleis für den Schlittelbahnbetrieb gebaut.

2 Vorarbeiten

Bevor mit dem eigentlichen Tunnelbau begonnen werden konnte, mussten von 2012 bis 2015 verschiedene Erkundungs- und Vorbereitungsarbeiten ausgeführt werden. Vom Albulatunnel I aus wurde eine in der Achse des neuen Tunnels liegende Kaverne aufgeföhren. Aus dieser Kaverne heraus wurde die Störzone Raibler-Rauwacke mit zwei 160 m langen preventergeschützten Kernbohrungen erkundet.

2014 und 2015 wurden die Installationsplätze erschlossen, Wasserversorgungs- und Entwässerungsanlagen gebaut, Baustromstationen errichtet und Zufahrtsstrassen ausgebaut. In Spinas wurde eine neue Bahnunterführung erstellt. In Preda mussten zwei denkmalgeschützte Gebäude verschoben sowie Materialverladeanlagen und Baubahnhöfe errichtet werden. Für das nicht verwertbare Ausbruchmaterial wurde auf der Seite Preda die Deponie Las Piazzettas erschlossen. Der Albulatunnel I wurde in den Portalbereichen sowie auf Höhe der neuen Querverbindungen saniert und

Nuova costruzione della galleria dell'Albula II

Rinnovamento della tratta principale della linea dell'Albula

La galleria dell'Albula II a binario unico, lunga 5860 m, verrà realizzata accanto alla galleria esistente a una distanza di 30 m. La vecchia galleria dell'Albula I, dopo la messa in funzione della galleria dell'Albula II, verrà riparata e utilizzata quale galleria di sicurezza. Entrambe le canne della galleria saranno collegate reciprocamente da dodici collegamenti trasversali. Le stazioni di Preda e Spinas saranno rese accessibili per i disabili e integrate con le relative banchine.

Entro l'autunno 2017 è stato possibile affrontare i tratti più impegnativi dal punto di vista della tecnica di costruzione delle gallerie. Il traforo della nuova canna della galleria è atteso per l'estate del 2018.

A cavern was excavated in the axis of the new tunnel from Albula Tunnel I. From this cavern, the Raibler-Rauwacke fault zone was probed using two 160 m long preventer-protected core drillings.

In 2014 and 2015, the installation areas were opened up, the water supply and draining systems were built, the construction site power stations were set up and the access roads were expanded. In Spinas, a new rail underpass was created. In Preda, two listed buildings had to be displaced and material loading facilities and construction railway stations had to be set up. The Las Piazzettas landfill was opened up at the Preda end for excavation material which could not be reused. The Albula Tunnel I was renovated in the portal areas and in the surroundings of the new cross passages and the junction areas of the cross passages were excavated. A process and fire-fighting water pipe was laid in the existing tunnel to supply the construction site with water.

3 Albula Tunnel II

The new Albula Tunnel will be 5,860 m long and runs parallel at a centre distance of 30 m to the existing Albula Tunnel I. The tunnel rises by 1% from Preda to the peak in the centre of the tunnel. Towards Spinas, it slopes downwards at a gradient of 0.2%.

The twelve new cross passages are arranged at intervals of approx. 450 m. Every third cross passage allows access for emergency vehicles (Fig. 2).

The construction site can be reached by road from March until early December. In that period, the works will be carried out constantly, 24 hours a day, seven days a week. From

die Einmündungsbereiche der Querverbindungen ausgebrochen. Zur Wasserversorgung der Baustellen wurde im bestehenden Tunnel eine Brauch- und Löschwasserleitung verlegt.

3 Albulatunnel II

Der neue Albulatunnel wird 5860 m lang und verläuft mit einem Achsabstand von 30 m parallel zum bestehenden Albulatunnel I. Der Tunnel steigt mit 1 % von Preda bis zum Hochpunkt in der Tunnelmitte, in Richtung Spinass weist er ein Gefälle von 0,2 % auf.

Die zwölf neuen Querverbindungen werden im Abstand von ca. 450 m angeordnet, jede dritte Querverbindung wird für Rettungsfahrzeuge befahrbar sein (Bild 2).

Jeweils von März bis Anfang Dezember kann die Baustelle über die Strasse erreicht werden. Dann werden die Arbeiten im Durchlaufbetrieb während 24 Stunden an sieben Tagen die Woche ausgeführt. Von Mitte Dezember bis Mitte März wird die Passstrasse zwischen Preda und Bergün gesperrt und touristisch als Schlittelbahn benützt. Gleichzeitig wird die Logistik der Baustelle durch die dann vorherrschenden klimatischen Bedingungen erheblich erschwert. Deshalb werden die Bauarbeiten im Winter eingestellt. Die Baustelle bleibt für Unterhaltsarbeiten und Kontrollgänge auch im Winter per Schiene erreichbar.

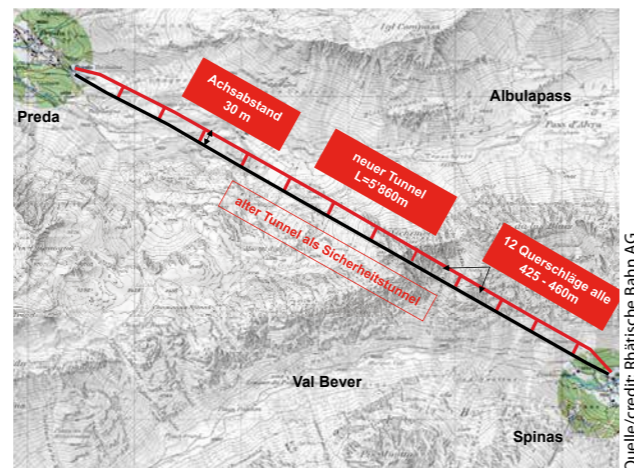
3.1 Installationen, Logistik

Im April 2015 wurde mit dem Aufbau der Installationen begonnen. Das Material wurde per Bahn nach Preda oder Spinass transportiert. Die Betonanlagen und einige für den Bahntransport zu grosse Installationen mussten mit Spezialtransporten über die Strasse angeliefert werden.

In Preda wurden die Baustellenbaracken, die Werkstatt, die Gewässerschutzanlage sowie die Unterkünfte für die Mannschaften errichtet. Der Aufbau und die Montage der insgesamt ca. 1600 m langen Förderbandanlagen vom



3 Förderbandanlagen Installationsplatz Preda
Preda conveyor belt system installation site



2 Gesamtübersicht
General overview

mid-December until mid-March, the pass road between Preda and Bergün will be closed and used as a toboggan run by tourists. At the same time, weather conditions will make construction site logistics considerably more difficult. Construction works will therefore be ceased during winter. The construction site remains accessible by rail for maintenance work and inspections in winter.

3.1 Installations, Logistics

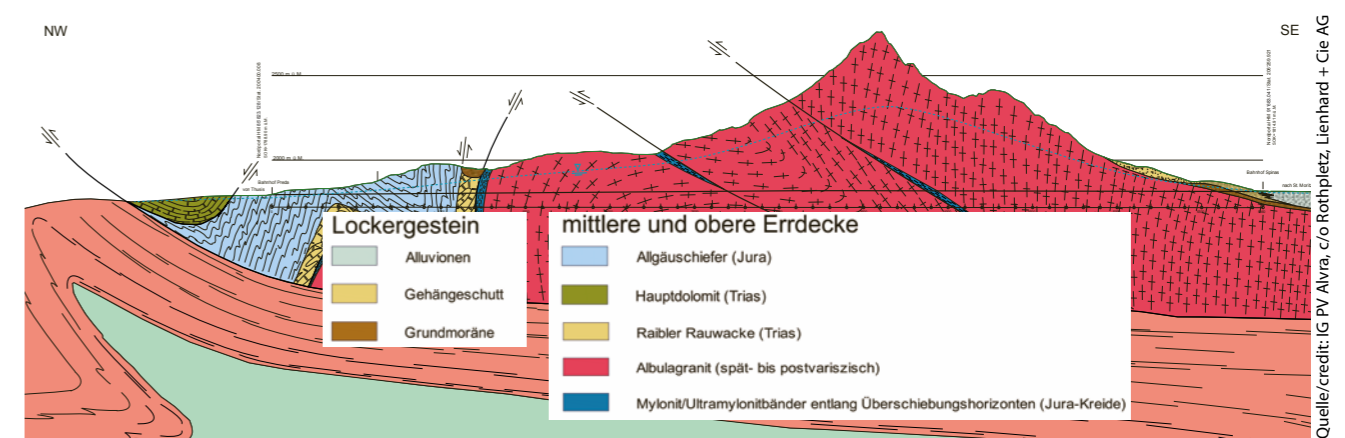
In April 2015, the development of the installations began. The material was transported to Preda or Spinass by rail. The concrete plants and some installations which were too large for transport by rail had to be delivered by road using special transport.

In Preda, the construction site barracks, the workshop, the water protection facility and the accommodation for the teams were set up. The development and installation of conveyor belt systems approximately 1,600 m long in total from the tunnel portal to the Las Piazzettas landfill were cost- and time-intensive. These works lasted approx. twelve months, in which around 1,500 m³ of concrete had to be processed for the foundations alone. Finally, the plant for the production of concrete aggregates & track ballast required to reuse the raw material was set up in Preda in 2016 (Fig. 3).

The installations in Spinass are less extensive. Here, site offices, a concrete facility, an intermediate storage area for concrete aggregates, a water protection facility and conveyor belt systems for excavated material were set up.

3.2 Geology

From Preda, the tunnel first of all passes through a section of around 1,120 m of Allgäu Schist. This is followed by the most difficult section of the tunnel from a construction standpoint, approx. 110 m long, in the Raibler-Rauwacke. The adjoining cavern, already created during probing, is in mylonite. The remaining section of around 1,500 m in the Preda drive up to the breakthrough point is



4 Geologisches Längensprofil
Geological longitudinal profile

Tunnelportal bis zur Deponie Las Piazzettas waren aufwendig und zeitintensiv. Diese Arbeiten dauerten ca. zwölf Monate, wobei allein für die Fundamente etwa 1500 m³ Beton verarbeitet werden mussten. Als Letztes wurde in Preda 2016 das Kieswerk zur Aufbereitung des Rohmaterials errichtet (Bild 3).

In Spinass sind die Installationen weniger umfangreich. Hier wurden Baustellenbüros, eine Betonanlage, ein Zwischenlager für Betonzuschlagstoffe, eine Gewässerschutzanlage sowie die Förderbandanlagen für das Ausbruchmaterial erstellt.

3.2 Geologie

Von Preda aus werden zunächst etwa 1120 m Allgäuschiefer durchfahren. Anschliessend folgt auf einer Länge von ca. 110 m der bautechnisch schwierigste Tunnelabschnitt in der Raibler-Rauwacke. Die sich daran anschliessende, bereits im Zuge der Erkundungsarbeiten erstellte Kaverne liegt im Mylonit. Die restliche Strecke von etwa 1500 m im Vortrieb Preda bis zum Durchschlagpunkt liegt im Albulagränit und wird lediglich durch eine kurze Zone von Myloniten bis Ultramyloniten unterbrochen.

Von Spinass aus durchquert der Tunnel zuerst auf einer Länge von 250 m Lockergestein, das zu ca. 50 % aus Bach- und Gehängeschutt und zu ca. 50 % aus einer relativ standfesten Grundmoräne besteht. Die restliche ca. 2800 m lange Strecke bis zum Durchschlagpunkt liegt im Albulagränit. Auch in diesem Bereich wird eine kurze Zone im Mylonit durchfahren (Bild 4).

3.3 Preda

3.3.1 Voreinschnitt Preda

Als Voraussetzung für den Tunnelvortrieb und als Baugrube für das neue Tunnelportal wurde zuerst der Voreinschnitt erstellt. Das neue Portal liegt aufgrund der Projektanforderungen unmittelbar neben dem bestehenden Tunnelportal. Aus diesem Grunde musste die Baugrube auf beiden Seiten mit Bohrpfehlen von 1000 mm respektive 800 mm Durch-

in Albulagränit und ist nur unterbrochen durch eine kurze Zone von Myloniten bis Ultramyloniten.

From Spinass, the tunnel first of all crosses a section of 250 m of soft ground, consisting of approx. 50 % stream and loose slope debris and approx. 50 % of relatively stable ground moraine. The remaining section of approx. 2,800 m up to the breakthrough point is in Albulagränit. The tunnel also passes through a short mylonite zone in this area too (Fig. 4).

3.3 Preda

3.3.1 Preda Pre-cut

As a prerequisite for the tunnel excavation and as a construction trench for the new tunnel portal, the pre-cut was created first of all. Due to project requirements, the new portal is right next to the existing tunnel portal. For that reason, the construction trench had to be secured on both sides with drilled piles of 1,000 mm and 800 mm diameter respectively. The drilled piles were embedded in the ground using crossbeams and strand anchors. Due to the proximity to the existing railway tunnel and in order not to impact track operations, the anchors were installed during the night (Fig. 5).



5 Voreinschnitt Preda
Preda pre-cut



6 Rohrschirm Preda
Preda pipe roof umbrella

messer gesichert werden. Die Bohrpfähle wurden mit Lon- garinen und Litzenankern im Baugrund verankert. Aufgrund der Nähe zum bestehenden Bahntunnel und um den Bahn- betrieb nicht zu beeinflussen, wurden die Anker in der Nacht eingebaut (Bild 5).

3.3.2 Vortrieb Preda

Am 17. August 2015 startete der Vortrieb. Wegen der gerin- gen Überdeckung wurden die ersten 37 m im Schutze von vier Rohrschirmetappen aufgeföhren und mit HEB-Bögen im Abstand von einem Meter sowie mit 20 cm netzarmiertem Spritzbeton gesichert (Bild 6).

Ab Tm 37 begann der Regelvortrieb im Allgäuschiefer. Der Ausbruchquerschnitt betrug 45 m². Das Projekt sah vor, etwa 20% dieses ca. 1100 m langen Abschnitts in den Sicherungsklassen 4 und 5 auszuberechnen und mit Gitterträ- gern, Sohlsprenger und einer 16 cm dicken netzarmierten Spritzbetonschale zu sichern. Die restlichen 80% Vortrieb im Allgäuschiefer sollten in den Sicherungsklassen 2 und 3 aus- gebrochen und mit netzarmiertem Spritzbeton und Ankern gesichert werden.

Das bereits beim Bau des ersten Albulatunnels beobach- tete nachbrüchige Verhalten des Gebirges zeigte sich auch beim Vortrieb des neuen Tunnels. Die Ausprägung war sehr wechselhaft und konnte sich innerhalb weniger Meter ändern. In Abschnitten, wo der Allgäuschiefer ver- wittert war, konnte das Gebirge im Baggervortrieb gelöst

3.3.2 Preda Drive

The drive began on 17 August 2015. Due to the low cover, the first 37 m were excavated under the protection of four pipe roofing umbrellas and secured with HEB arches at a distance of one metre and 20 cm mesh-reinforced shotcrete (Fig. 6).

From tm 37, regular driving began in the Allgäu Schist. The excavated cross-section was 45 m². According to the project, around 20% of this section around 1,100 m in length was to be excavated in stabilisation classes 4 and 5 and secured using lattice girders, invert props and a 16 cm thick mesh-reinforced shotcrete lining. The remaining 80% of the drive in the Allgäu Schist were to be excavated in stabilisation classes 2 and 3 and secured using mesh-reinforced shotcrete and anchors.

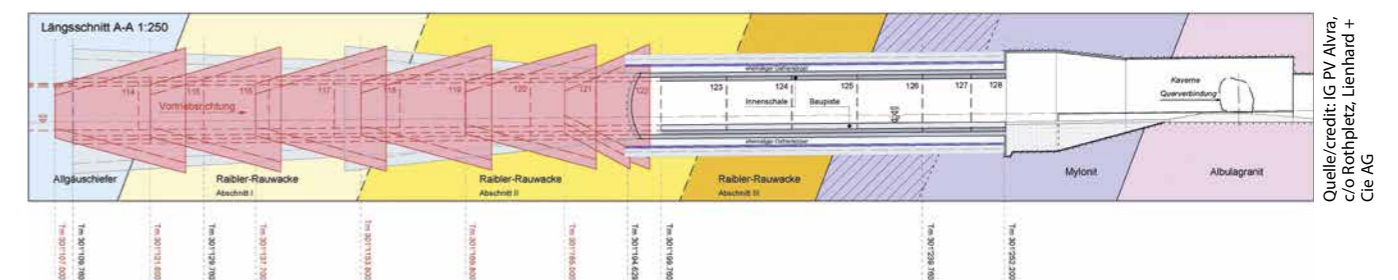
The loose behaviour of the mountain rock observed when building the first Albula Tunnel was also apparent in driving the new tunnel. The form was very inconsistent and could change within a few metres. In sections where the Allgäu Schist was weathered, the mountain rock could be loosened using excavators. The advance length for one round using an excavator was one metre (Fig. 7). Drill and blast was used for unweathered Allgäu Schist. However, the length of one round was a maximum of two metres due to the looseness of the mountain rock. From tm 880 to 1100, the tunnel had to pass through a jointed zone which was known from the construction of the first Albula Tunnel. In this section, a great deal of water ingress was expected and injection measures

werden. Die Abschlagslänge betrug beim Baggervortrieb einen Meter (Bild 7). Im unverwitterten Allgäuschiefer kam Sprengvortrieb zum Einsatz, die Abschlagslänge be- trug dabei wegen des nachbrüchigen Gebirges aber ma- ximal zwei Meter. Von Tm 880 bis Tm 1100 war eine vom Bau des ersten Albulatunnels her bekannte Kluftzone zu durchfahren. In diesem Abschnitt waren grosse Wasser- zutritte prognostiziert und Injektionsmassnahmen vorge- sehen. Wie der Vortrieb zeigte, haben sich die Verhältnisse in den vergangenen 120 Jahren durch den vorhandenen Tunnel massgeblich verändert. Das Gebirgswasser suchte sich andere Wege oder ist verschwunden, und so konnte auf die Injektionen verzichtet werden.

Insgesamt überwogen die ungünstigen bautechnischen Eigenschaften des Allgäuschiefers, was dazu führte, dass die Sicherungsklassen 2 und 3 nicht eingesetzt werden konnten. Die für den Allgäuschiefer vorgesehene Bauzeit wurde da- durch um ca. neuneneinhalb Monate überschritten.

Das vom Unternehmer erstellte Vortriebskonzept basierte auf pneugebundener Logistik und dem Ausbruchmaterial- abtransport mittels Tunnelförderband. Wegen des schmalen Tunnelprofils waren dafür alle 230 m Geräte- und Ausweich- nischen erforderlich. In diesen Nischen wurde jeweils der Vortreiber installiert, das Ausbruchmaterial auf eine Kanten- länge von 150 mm gebrochen und dem Tunnelförderband übergeben. Sobald die nächste Nische aufgefahren war, wurde der Vortreiber nachgezogen und das Tunnelband verlängert. Die zurückliegenden Nischen dienten dann als Auswechnischen.

Bei Tm 1100 erreichte der Vortrieb die Raibler-Rauwacke. Bau- technisch ist das der Bereich mit den anspruchsvollsten Ver- hältnissen im gesamten Tunnel. Aufgrund der Erkundungs- ergebnisse konnte die Raibler-Formation in drei Abschnitte unterteilt werden, die sich durch ihre bautechnischen Eigen- schaften wesentlich unterscheiden (Bild 8). Die beiden nörd- lichen Abschnitte I und II bestehen aus festem Zellendolomit mit kleineren karstartigen Hohlräumen. Im Abschnitt III sind die Hohlräume mit feinkörnigem, zerbrochenem Material ge- füllt, welches unter Wasserdruck von bis zu 0,5 MPa zum Teil als schwimmendes Gebirge ansteht. Genau hier kam es beim Bau des ersten Albulatunnels zu einem Schlammleinbruch, worauf der Vortrieb ein Jahr stillstand.



8 Konzept Vortrieb mit Injektionen Raibler-Rauwacke
Raibler-Rauwacke drive concept with injections



7 Vortrieb Allgäuschiefer
Allgäu Schist drive

were planned. As the drive showed, the existing tunnel had altered conditions significantly in the intervening 120 years. The groundwater sought other routes or had disappeared, meaning that injection was not required.

Overall, the unfavourable construction properties of the All- gäu Schist won out, meaning that stabilisation classes 2 and 3 could not be used. The planned duration of construction for the Allgäu Schist therefore ran over schedule by approx. nine and a half months.

The drive concept created by the contractor was based on rubber-tyred logistics and excavated material being taken away by means of a tunnel conveyor belt. Due to the narrow profile of the tunnel, equipment and passing niches were re- quired for this every 230 m. In these niches, a pre-crusher was installed, the excavated material broken on an edge length of 150 mm and passed onto the tunnel conveyor belt. Once the next niche was excavated, the pre-crusher was re- located to this new niche and the belt conveyor extended. The previous niches then served as passing areas.

At tm 1,100, the drive reached the Raibler-Rauwacke. From a construction standpoint, this is the area with the most de- manding conditions in the entire tunnel. The probing results allowed the Raibler formation to be divided into three sec- tions which differed significantly in terms of their construc-



Quelle/credit: Bauleitung Albulatunnel, c/o Pöyry Schweiz AG

9 Vortrieb Rauwacke
Rauwacke drive

Das Konzept des Bauherrn sah vor, dass der Abschnitt III von der Erkundungskaverne aus vorseilend gesichert wird. Dazu sollte die Störzone über eine Länge von 60 m von der Kaverne aus vollständig gefroren werden. Der Vortrieb durch den Gefrierkörper sollte anschliessend von Preda aus erfolgen. Zur Kompensation des im Allgäuschiefer eingetretenen zeitlichen Rückstands beschloss der Bauherr später, den Bauablauf umzustellen. Eine im Werkvertrag enthaltene Option wurde ausgelöst und der Abschnitt III im Schutze des Gefrierkörpers von der Erkundungskaverne aus aufgeföhren, gesichert und verkleidet. Über diese Massnahme wurde im vergangenen Jahr am Swiss Tunnel Congress berichtet.

Vom rechtzeitig fertig gestellten Abschnitt III aus konnten die Abschnitte I und II der Rauwacke über lange Bohrungen mit Zement injiziert werden. Dadurch wurde der Zellendolomit bereits vor Eintreffen des Hauptvortriebs verfestigt und zum Teil abgedichtet. Das Gebirge wurde in den Abschnitten I und II vom Vortrieb aus nochmals vorseilend injiziert und weiter verfestigt.

In der Rauwacke musste der Ausbruchquerschnitt auf 65 m² vergrössert werden, um die statisch notwendige 55 cm dicke Felssicherung und die 60 cm dicke Innenverkleidung einbauen zu können. Die Sicherung bestand in den Abschnitten I und II aus mit zwei Lagen Netzen

tion properties (Fig. 8). The two northern sections I and II consist of solid cellular dolomite with small karstic cavities. In section III, the cavities are filled with fine-grained broken material which partly appears as running ground under water pressure of up to 0.5 MPa. This is the exact point at which an inrush of mud occurred during construction of the first Albula Tunnel, halting the drive for a year.

According to the client's concept, section III was to be secured by the exploration cavern in advance. For this to occur, the fault zone should be completely frozen for a length of 60 m from the cavern. The excavation through the freeze-body should then be done from Preda. To compensate for the delay occurring in the Allgäu Schist, the contractor decided to change the construction process later. An option in the works agreement was triggered and section III was excavated, secured and clad under the protection of the frozen section from the probing cavern. The Swiss Tunnel Congress heard a report on this measure last year.

Once section III was completed in good time, sections I and II of the Rauwacke could be injected with cement through long drilled holes from that point. The cell dolomite was therefore solidified even before it was reached by the main drive and partly bonded. The mountain rock was again pre-grouted in sections I and II from the drive and solidified further.

K335 massiv armiertem Spritzbeton (Bild 9). Der Ausbruch erfolgte im Vollausschub mittels Baggervortrieb. Die Abschlagslänge betrug einen Meter. Auf den Einbau von Gitterträgern wurde verzichtet. Der zerklüftete Fels wurde im Firstbereich mit vermörtelten Spiessen gesichert. Die Spiesse hatten zwar wegen der fehlenden Gitterträger kein Auflager, erwiesen sich aber trotzdem als wirksames Sicherungsmittel. Das Vorgehen wurde nach intensiven Diskussionen gemeinsam mit dem Unternehmer optimiert und mit Erfolg ausgeführt. Die Raibler-Rauwacke konnte mit einer Vortriebsleistung von ca. 90 cm pro AT sicher bewältigt werden. Mit dem Durchschlag in die Erkundungskaverne am 17. Oktober 2017 war ein erster Meilenstein beim Neubau des Albulatunnels II erreicht.

Bevor der Vortrieb im Granit in Richtung Spinas wieder starten konnte, mussten die Installationen bis zur Kaverne nachgezogen und aufgebaut werden. Dabei änderte der Unternehmer seine Vortriebslogistik und installierte den Brecher fix in der Kaverne. Die Schutterung im Vortrieb erfolgte ab diesem Zeitpunkt mit einem Durchladebagger und drei zweiachsigen Tunneldumpfern. Mit diesem Konzept konnte auf den weiteren Einbau des Förderbandes verzichtet sowie die Ausweich- und Geräteschienen verkürzt ausgeführt werden. Am 7. November 2017 begann der Vortrieb im Albulagranit. Die Ausbruchfläche beträgt 35 m² und die Sicherung besteht aus 15 cm Stahlfaserspritzbeton mit Reibrohrankern. Wenn die Prognose zutrifft und die geplanten Leistungen erreicht werden, dann wird der Durchschlag zum Vortrieb Spinas Mitte August 2018 erfolgen.

3.4 Spinas

3.4.1 Voreinschnitt Spinas

Das neue bergmännische Portal ist gegenüber dem Portal des Albulatunnels II nur geringfügig zurückversetzt und liegt näher am Betriebsgleis als das Portal in Preda. Allerdings ist das alte Portalmauerwerk in Spinas so massiv ausgebildet, dass auf Bohrpfähle verzichtet werden konnte. Die Portalwand wurde nur mit Ankern gesichert (Bild 10).

3.4.2 Vortrieb Spinas

Der Vortrieb startete am 7. September 2015. Der Ausbruch im Lockergestein erfolgte im Schutze von 25 Rohrschirmstapfen mit je 10 m Länge. Zur Sicherung wurden im Abstand von einem Meter HEB-Träger mit Sohlspanner versetzt und mit 30 cm netzarmiertem Spritzbeton hinterfüllt. Schwierigkeiten beim Vortrieb bereiteten vor allem die im Bachschutt zahlreich angetroffenen grossen Felsblöcke. Die Ortsbrustsicherung aus Spritzbeton musste deshalb zum Teil mit Netzen ergänzt werden. Bei Bedarf wurde ein Brustkeil angeordnet, damit sich die Felsblöcke nicht selbstständig aus der Brust lösten. Im Schnitt konnte eine Rohrschirmstappe im Bachschutt in zehn Arbeitstagen erstellt werden, in der Grundmoräne in achteinhalb Arbeitstagen.

In the Rauwacke, the excavated cross-section had to be enlarged to 65 m² to be able to install the statically required 55 cm thick rock stabilisation and the 60 cm thick inner lining. The reinforcement in sections I and II was made of two layers of mesh of K335 massively reinforced shotcrete (Fig. 9). Complete excavation took place using excavators. The length of one round was one metre. No lattice girders were installed. The rugged rock was reinforced in the crown area with grout bolts. Due to the lack of lattice girders, the anchor bolts had no support, but proved to be effective stabilising tools nevertheless. The process was optimised in intensive discussions with the contractor and conducted successfully. The Raibler-Rauwacke was handled securely with an advance rate of approx. 90 cm per working day. The breakthrough into the exploration cavern on 17 October 2017 marked the first milestone in building the new Albula Tunnel II.

Before the drive could start again in the granite towards Spinas, the installations had to be drawn to the cavern and rebuilt. The contractor then changed his drive logistics and installed the crusher in the cavern. The cleaning process in the drive was then performed by a continuous loading excavator and three tunnel dump trucks. With this concept, no further installation of conveyor belts was required and it was possible to execute the evasion and equipment niches in a shorter way. On 7 November 2017, the drive began in the Albula granite. The excavation area was 35 m² and the stabilisation consisted of 15 cm steel fibre shotcrete with friction anchor bolts. If predictions are correct and the planned output is achieved, the breakthrough to the Spinas drive will take place in August 2018.

3.4 Spinas

3.4.1 Spinas Pre-cut

The new mined portal is only slightly set back from the Albula Tunnel II portal and is closer to the operating track than the portal in Preda. However, the old portal masonry in Spinas is so solid that drilling piles are not required. The portal wall was secured using only anchors (Fig. 10).



Quelle/credit: Bauleitung Albulatunnel, c/o Pöyry Schweiz AG

10 Portal Spinas
Spinas portal

Nach 250 m wurde der Albulagravit erreicht. Das Ausbruchprofil betrug wie beim Vortrieb im Granit in Preda ca. 35 m² und die Felsicherung bestand aus 15 cm Stahlfaserspritzbeton mit Reibrohrankern (Bild 11). Die Vortriebslogistik basiert auf dem Einsatz eines Tunnelförderbandes, so wie beim Vortrieb Preda im Allgäuschiefer. Auch im Vortrieb Spinas wird der Vorbrecher mit der Förderbandaufgabe in Gerätenischen installiert und regelmässig umgesetzt. Nach der Einarbeitungsphase konnten Vortriebsleistungen von durchschnittlich ca. 6 m je Tag erreicht werden. Das Vortriebsende wird mit dem Durchschlag voraussichtlich im August 2018 erreicht werden.

3.5 Innenverkleidung

Auf der Seite Preda wird der gesamte Tunnelabschnitt im Allgäuschiefer bis zum Tunnelmeter 1100 zweischalig ausgebaut. Das Innengewölbe aus Ortbeton weist eine Stärke von 30 cm auf, zudem wird eine Regenschirmabdichtung eingebaut. Das Sohlgewölbe wird auf der gesamten Länge bewehrt, das Innengewölbe hingegen nur in der Lockergesteinsstrecke. Das Sohl- und Innengewölbe der Raibler-Rauwacke wird bewehrt und aufgrund der hohen Gebirgsspannungen und Wasserdrücke 60 cm dick und mit einer Vollabdichtung versehen. Auf der Seite Spinas werden die ersten 300 m zweischalig verkleidet und mit einer Regenschirmabdichtung versehen. Das Innengewölbe wird aufgrund der Geometrie des Rohrschirmes zwischen 30 und 100 cm dick

3.4.2 Spinas Excavation

The excavation began on 7 September 2015. The breakthrough in the soft ground took place in the protection of 25 pipe roofing umbrellas, each 10 m long. As stabilisation, invert props were moved by HEB supports at a distance of one metre and filled with 30 cm of mesh-reinforced shotcrete. The large number of large rocks found, particularly in the stream debris, caused difficulties in the drive. The shotcrete stabiliser on the face therefore had to be partly enhanced by wire mesh. A face wedge was applied where necessary to ensure that rocks did not come loose from the face by themselves. On average, a pipe roofing umbrella could be created in the stream debris in ten working days and in ground moraine in eight and a half working days.

The Albula granite was reached after 250 m. The breakthrough profile was, as with the drive in granite in Preda, approx. 35 m² and the rock stabiliser was made from 15 cm steel fibre shotcrete with friction anchor bolts (Fig. 11). The drive logistics are based on the use of a tunnel conveyor belt, as in the Preda drive in the Allgäu Schist. The pre-crusher was installed with the belt conveyor remit in equipment niches and regularly implemented in the Spinas drive too. After an introductory phase, drive output of approx. 6 m per day on average was achieved. The drive is expected to end with the breakthrough in August 2018.



11 Sprengvortrieb Spinas
Spinas blasting

Quelle/credit: Bauleitung Albulatunnel, c/o Pöyry Schweiz AG



12 Deponie Las Piazzettas
Las Piazzettas landfill

Quelle/credit: Bauleitung Albulatunnel, c/o Pöyry Schweiz AG

sein. Das Sohlgewölbe wird ebenfalls durchgehend bewehrt, das Innengewölbe jedoch nur im Bereich der Lockergesteinsstrecke. Im Albulagravit wird der Tunnel einschalig ausgebaut und mit insgesamt 20 cm Spritzbeton, einschliesslich der Felsicherung, und einer Betonsohle ausgebaut.

4 Materialbewirtschaftung

Die Baustellenlogistik stellte eine besondere Herausforderung dar, weil spezielle Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Die Baustelle befindet sich in einem vom Tourismus geprägten, sensiblen Umfeld. Die Deponiekapazitäten in Preda sind beschränkt, in Spinas gibt es keine Möglichkeit zur Deponierung von Ausbruchmaterial. Massentransporte auf der Strasse sind zu vermeiden, und per Bahn stehen nur begrenzte Transportkapazitäten zur Verfügung. Deshalb soll das Tunnelausbruchmaterial durch Aufbereitung vor Ort grösstmöglich der Wiederverwertung zugeführt werden. Der gesamte Materialfluss auf der Baustelle muss über Förderbänder und mit der Bahn abgewickelt werden. In Preda wird das Ausbruchmaterial mit den Förderbändern direkt aus dem Tunnel bis auf das Zwischenlager nach Las Piazzettas abgeführt. Das Ausbruchmaterial aus dem Vortrieb Spinas wird mit Förderbändern aus dem Tunnel bis auf den Installationsplatz transportiert. Dort wird es über eine Unterflurabzugsgasse abgezogen und direkt auf Bahnwagen der RhB verladen.

Die RhB betreibt einen speziellen Materialtransportbetrieb und stellt dem Unternehmer den «Albulasprinter» genannten Zug zur Verfügung. Mit fünf Transportwagen werden je Umlauf 100 m³ Ausbruchmaterial von Spinas nach Preda befördert. Zudem gibt es einen Silowagen für den Transport

3.5 Inner Lining

At the Preda end, the entire tunnel section in the Allgäu Schist up to tunnel metre 1,100 is built with a double-shell lining. The inner vault made from in-situ concrete is 30 cm thick and an umbrella seal is also installed. The invert is reinforced over the entire section, while the inner vault is only reinforced in the section of loose stone. The Raibler-Rauwacke invert and inner vault are reinforced, 60 cm thick and equipped with a full seal due to the high mountain rock tensions and water pressures. At the Spinas end, the first 300 m are clad with a double lining and fitted with an umbrella seal. Depending on the geometry of the pipe roof seal, the inner vault will be 30 to 100 cm thick. The inverted arch is also reinforced throughout. The inner vault, however, is only reinforced in the section of loose rock. The tunnel is built with a single lining in the Albula granite and a total of 20 cm shotcrete, including the rock stabiliser, and a concreted invert.

4 Materials Handling

The construction site logistics were particularly challenging as certain boundary conditions must be taken into account. The construction site is situated in a sensitive environment affected by tourism. Landfill capacity in Preda is limited and in Spinas there are no options for dumping excavated material. Mass transport on the road is to be avoided and there are only limited transport capacities by rail. The tunnel excavation material should therefore be recycled as much as possible through treatment on site. The overall flow of materials on the site must take place via conveyor belts and by rail. In Preda, the excavated



13 Schotterverlad
Gravel load

Quelle/Credit: Bauleitung Albulatunnel, c/o Pöry Schweiz AG

material is directly taken away by the conveyor belts to the interim storage and then to Las Piazzettas. The excavated material from the Spinas drive is transported from the tunnel to the installation site using conveyor belts. It is then removed through an underfloor bunker and loaded directly onto the RhB carriages.

RhB operates a special material transportation system and provides the contractor with a train called the 'Albulasprinter'. 100 m³ of excavated material was taken from Spinas to Preda per rotation using five transport carriages. There is also a silo carriage for transporting concrete aggregates from Preda to Spinas. Excavated material is transported to Preda via eight rotations per day. There, the carriages are emptied in the unloading bunker and the excavated material is transported by conveyor belt to the disposal at the Las Piazzettas interim storage.

At the disposal site, the excavated material is stored separately on an interim basis according to the material classifications 1 to 4 set out in the standard SIA 199. Material classes 3 and 4 are taken away by the operators of the Las Piazzettas landfill and directly installed. Depending on the load, contaminated and uncontaminated materials are disposed of in separate areas (Fig. 12). Material classes 1 and 2 remain in the interim storage up until treatment in the Preda plant for the production of concrete aggregates & track ballast. Material class 1 takes precedence for treatment and is turned into railway ballast and concrete aggregates for tunnelling in the plant. The railway ballast is picked up directly from the plant four times a week and loaded onto RhB carriages by conveyor belts (Fig. 13) before being taken away, some of them being installed directly on other RhB construction sites. Material class 2 is not suitable for railway ballast and is turned into concrete aggregates. The concrete aggregates produced in the plant are either transported by conveyor belt to the concrete facility in Preda or loaded onto the 'Albulasprinter's silo carriage and transported to the concrete facility in Spinas.

5 Outlook

The breakthrough of both drives is expected in mid-August 2018. The conveyor belt systems are then stripped down and reinforcement is completed in the tunnel sections clad with single shells. An invert made of in-situ concrete will then be installed throughout this tunnel. A slab track will be built onto this later. In the sections to be clad in double-shell lining, the seal will be installed and the inner vault concreted. The walkways can then be created using prefabricated cable blocks. The completion of the tunnel structure and handover to the client and rail technology contractor are expected at the end of 2019. The installation sites will then be stripped down.

Once the railway equipment of the tunnel has been put in place and the railway stations have been adapted, the new Albula Tunnel II will enter operation in 2021. In 2022, to complete the full renovation, the old Albula Tunnel will be renovated and turned into a rescue tunnel.

der Betonzuschlagstoffe von Preda nach Spinas. Ausbruchmaterial wird in acht Umläufen pro Tag nach Preda überführt. Dort werden die Wagen in der Entladegasse entleert und das Ausbruchmaterial mit dem Förderband zum Abwurfplatz auf dem Zwischenlager Las Piazzettas transportiert.

Auf dem Abwurfplatz wird das Ausbruchmaterial getrennt nach den in der Norm SIA 199 definierten Materialklassen 1 bis 4 zwischengelagert. Die Materialklassen 3 und 4 werden durch den Betreiber der Deponie Las Piazzettas abtransportiert und direkt eingebaut. Je nach Belastung wird in getrennten Bereichen verschmutztes oder unverschmutztes Material deponiert (Bild 12). Die Materialklassen 1 und 2 verbleiben im Zwischenlager bis zur Aufbereitung im Kieswerk Preda. Die Materialklasse 1 wird vorrangig verarbeitet und im Kieswerk zu Bahnschotter und zu Betonzuschlagstoffen für den Tunnelbau aufbereitet. Der Bahnschotter wird viermal pro Woche vom Kieswerk direkt abgezogen und mit Förderbändern auf Bahnwagen der RhB verladen (Bild 13), abtransportiert und zum Teil direkt auf anderen Baustellen der RhB eingebaut. Die Materialklasse 2 ist nicht für Bahnschotter geeignet und wird zu Betonzuschlagstoffen aufbereitet. Die im Kieswerk produzierten Betonzuschlagstoffe werden entweder mit Förderbändern zur Betonanlage in Preda transportiert oder in die Silowagen des «Albulasprinters» verladen und zur Betonanlage nach Spinas befördert.

5 Ausblick

Der Durchschlag der beiden Vortriebe wird Mitte August 2018 erwartet. Anschliessend werden die Förderbandeinrichtungen zurückgebaut und in den einschalig verkleideten Tunnelabschnitten die Sicherung komplettiert. Danach folgt im gesamten Tunnel der Einbau einer Sohle aus Ort beton, auf welcher später eine Feste Fahrbahn aufgebaut wird. In den zweischalig zu verkleidenden Abschnitten wird die Abdichtung eingebaut und das Innengewölbe betoniert. Danach können die Bankette mit vorfabrizierten Kabelrohrblöcken erstellt werden. Die Fertigstellung des Tunnelrohbaus und die Übergabe an die Bauherrschaft respektive

den Unternehmer Bahntechnik sind Ende 2019 geplant. Abschliessend werden die Installationsplätze zurückgebaut.

Nach der bahntechnischen Ausrüstung des Tunnels und der Anpassung der Bahnhöfe wird der neue Albulatunnel II 2021 in Betrieb genommen. Zum Abschluss der integralen Erneuerung wird im Jahr 2022 der alte Albulatunnel saniert und zum Sicherheitstunnel umgebaut.

6 Erste Erfahrungen und Schlussfolgerungen

Aufgrund des an gleicher Stelle errichteten Albulatunnels I konnte auf eine detaillierte Dokumentation der Geologie und des Bauablaufs zurückgegriffen werden. Damit waren die Schlüsselstellen des Projekts bekannt. Die Kenntnisse vom Bau des ersten Albulatunnels wurden durch gezielte Erkundungen ergänzt. Das daraufhin erstellte Konzept zur Durchörterung der Raibler-Rauwacke war erfolgreich.

Die ursprünglich nur für die Erkundung der Rauwacke vorgesehene Kaverne wurde sowohl vom Bauherrn als auch vom Unternehmer genutzt, um den Bauablauf zu optimieren. Die Entscheidung des Bauherrn zur Umstellung des Bauablaufs und zur Durchführung eines kurzen Gegenvortriebs im bautechnisch schwierigsten Abschnitt der Rauwacke hat sich als richtig erwiesen. Verzögerungen, die beim Vortrieb im Allgäuschiefer in Kauf genommen werden mussten, wurden teilweise wieder kompensiert. Der Unternehmer nutzte die Kaverne zur Optimierung der Logistik beim Vortrieb im Albulagranit.

6 Initial Experiences and Conclusions

Thanks to the Albula Tunnel I build in the same location, the project was able to draw upon detailed documentation on geology and the construction process. The project's key points were therefore known. Knowledge of the construction of the first Albula Tunnel was enhanced by targeted probing. The subsequently created concept for the process of piercing the Raibler-Rauwacke was a success.

The cavern which was originally intended only for probing the Rauwacke was used by the client and contractors alike to optimise the construction process. The client's decision to change the construction process and carry out a short reverse drive in the section of the Rauwacke which proved most difficult from a construction standpoint was proven right. Delays which must occurred as a result of works in the Allgäu Schist were partly recompensated. The contractor used the cavern to optimise logistics for excavating in Albula granite.

Literatur/References

- [1] Swiss Tunnel Congress 2015, Ch. Florin presentation, Rhätische Bahn AG.
- [2] Swiss Tunnel Congress 2017, P. Zwicker presentation, Rothpletz, Lienhard + Cie AG.
- [3] New Albula Tunnel II construction plan, Rhätische Bahn AG, 2014 (unpublished).

PROJEKTDATEN	
Region	Schweiz, Kt. Graubünden
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung	Rhätische Bahn AG, Chur
Planung	Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Olten Gähler und Partner AG, Baden Straub AG, Chur
Bauleitung	Pöry Schweiz AG, Zürich AF Toscano AG, Chur
Ausführung Hauptlos Tunnelbau	ARGE Neubau Albulatunnel II, bestehend aus Porr Suisse AG, Walo Bertschinger AG und Società Italiana per Condotte d'acqua S.p.A.
Kenndaten	
Bauzeit:	7 Jahre
Inbetriebnahme:	2021
Baukosten	
Tunnelrohbau:	135 Mio. Schweizer Franken inkl. MwSt.
Gesamtlänge:	5860 m
Ausbruchquerschnitt:	ca. 40 m ²

PROJECT DATA	
Region	Switzerland, canton of Grisons
Client, project and senior construction management	Rhätische Bahn AG, Chur
Design	Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Olten Gähler & Partner AG, Baden Straub AG, Chur
Site management	Pöry Schweiz AG, Zürich AF Toscano AG, Chur
Execution of main lot tunnel construction	ARGE Neubau Albulatunnel II, comprised of Porr Suisse AG, Walo Bertschinger AG and Società Italiana per Condotte d'acqua S.p.A.
Factfile	
Construction period:	7 years
Commissioning:	2021
Construction costs for the tunnel structure:	135 million Swiss francs including VAT
Total length:	5,860 m
Excavated cross-section:	approx. 40 m ² on average

Raffaele Zurlo, Dr. Eng., BBT-SE, Bolzano/IT
 Stefano Fuoco, Dr. Eng., BBT-SE, Bolzano/IT
 David Marini, Dr. Eng., BBT-SE, Bolzano/IT

Open and Shielded TBM Excavation for BBT

First Experiences in Using TBM in Different Rock Mass Conditions Along the Brenner Base Tunnel

The Brenner Base Tunnel is the high-speed rail link between Italy and Austria. The tunnel is directly linked to the Innsbruck rail bypass and so the complete rail connection will be, at the end, more than 64 km. Due to its length, different excavation methods have been planned. This paper summarises the first experience acquired by using two types of TBMs in different rock masses.

1 Introduction

The Brenner Base Tunnel, 64 km long, will be excavated under an average cover between 900 to 1,000 m at the border of Italy and Austria. The maximum overburden is about 1,850 m. In total, more than 230 km of tunnels will be excavated.

To reduce the level of uncertainty, the service tunnel has been designed to be excavated in advance with respect to the excavation of the main tunnels. This allows use of the service tunnel as an exploratory tunnel. A consistent part of the service tunnel will be excavated using TBMs.

So far, the TBMs have excavated a total of about 20 km: 10.5 km using a double shield TBM and about 10 km using an open gripper TBM.

The double shield TBM excavated a very competent rock mass under overburdens varying from an average of 600 m

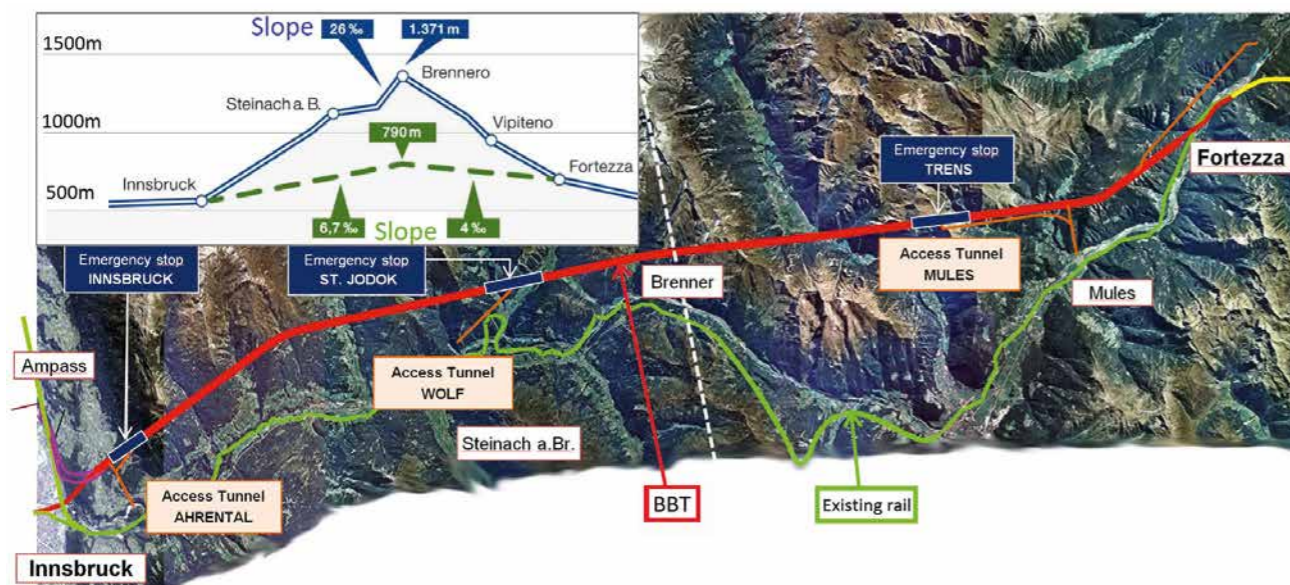
to 800 m and a maximum of 1,200 m. The open gripper TBM excavated schistose rock mass in rock mass conditions varying from not very good to poor, with overburdens varying on average from 700 m to 800 m and a maximum of 1,100 m.

Some important problems that occurred during the advancement are briefly described below with the remedial measures taken to reduce their impact on safety and production.

2 The Brenner Base Tunnel

2.1 Introduction

The current railway line mainly follows the route laid out in 1860. In order to climb to the top of the Brenner Pass, 1,371 m above sea level at the border of Italy and Austria, the tracks take a steep and twisting route with slopes that can reach 26‰ on the Austrian side. These aspects limit both train speed and maximum load capacity.



1 Planimetric and relief data for the existing line and the Brenner Base Tunnel (BBT)

Einsatz von offenen und Schild-TBM für den BBT

Bau des Brenner-Basistunnels liefert erste Erfahrungswerte aus dem Einsatz von TBM unter wechselnden geologischen Verhältnissen

Der Brenner-Basistunnel (BBT) ist ein unterirdisches Tunnelsystem unter dem Brennerpass. Es besteht aus zwei eingleisigen Haupttunnelröhren, einem Servicetunnel, Querschlägen alle 333 m sowie drei unterirdischen Multifunktionshaltestellen. Das Tunnelsystem des BBT umfasst insgesamt ca. 230 km. Rund 70% davon werden mithilfe von Tunnelbohrmaschinen (TBM) gebaut. Für die übrigen 30% kommen konventionelle Vortriebsverfahren zum Einsatz. Bis dato wurden knapp 20 km des Tunnelsystems durch TBM in unterschiedlichen geologischen Verhältnissen gebohrt. Diese ersten Erfahrungen liefern interessante Erkenntnisse in Bezug auf den Einsatz von TBM unter ähnlichen Einsatzbedingungen.

Excavation avec des tunneliers ouverts et à bouclier pour le TBB

Premiers retours d'expérience dans l'utilisation de tunneliers dans les différentes géologies rocheuses rencontrées sur le tracé du tunnel de base du Brenner

Le projet du tunnel de base du Brenner (TBB) consiste à réaliser un réseau souterrain comprenant deux tunnels jumeaux à une seule voie, un tunnel de service, des galeries transversales tous les 333 m, ainsi que trois stations souterraines multifonctions. Cela représente un réseau de tunnels total de 230 km dont env. 70% excavés au moyen de tunneliers (TBM) et les 30% restants par un mode conventionnel. Près de 20 km de tunnel ont été jusqu'ici excavés au moyen de tunneliers dans des conditions géologiques diverses. Ces premières expériences permettent de tirer des enseignements utiles sur la mise en œuvre de tunneliers dans des conditions similaires.

Scavo con TBM aperte e scudate per la BBT

Prime esperienze nell'uso delle TMB in diverse condizioni della massa rocciosa nel corso dell'allineamento della Galleria di base del Brennero

Il progetto della Galleria di base del Brennero (BBT) costituisce un sistema di strutture sotterranee che include due gallerie gemelle a binario singolo, una galleria di servizio, passaggi di collegamento ogni 333 m e tre stazioni sotterranee multifunzionali. In totale saranno scavati circa 230 km di gallerie. Circa il 70% dello scavo sarà realizzato usando delle frese meccanica a piena sezione (TBM). Il rimanente 30% sarà scavato con un sistema convenzionale. Finora sono stati scavati quasi 20 km di gallerie con delle TBM in diverse condizioni geologiche. Da queste prime esperienze è possibile trarre alcune interessanti conclusioni in merito all'uso delle TBM in condizioni analoghe.

The construction of the Brenner Base Tunnel takes place on the most critical part of the section, rectifying the slope and essentially creating a flat section with slopes that are reduced by an entire order of magnitude. Fig. 1 shows the difference in plan and relief between the current and the planned routes once the Brenner Base Tunnel is built.

2.2 Description of the Works

The Brenner Base Tunnel project (BBT) includes two twin single-track tunnels and a service tunnel placed 12 m below the main tunnels. For operational and safety reasons, the main tunnels are connected every 333 m with bypasses. The system also includes three underground multipurpose stations and connecting tunnels that link to the existing Innsbruck underground railway bypass. A number of both underground and above-ground structures complete the system. A general overview of the global system is shown in Fig. 2 [1].

The length of the main tunnels between the Fortezza (south) and Innsbruck (north) portals is just over 55 km. The total

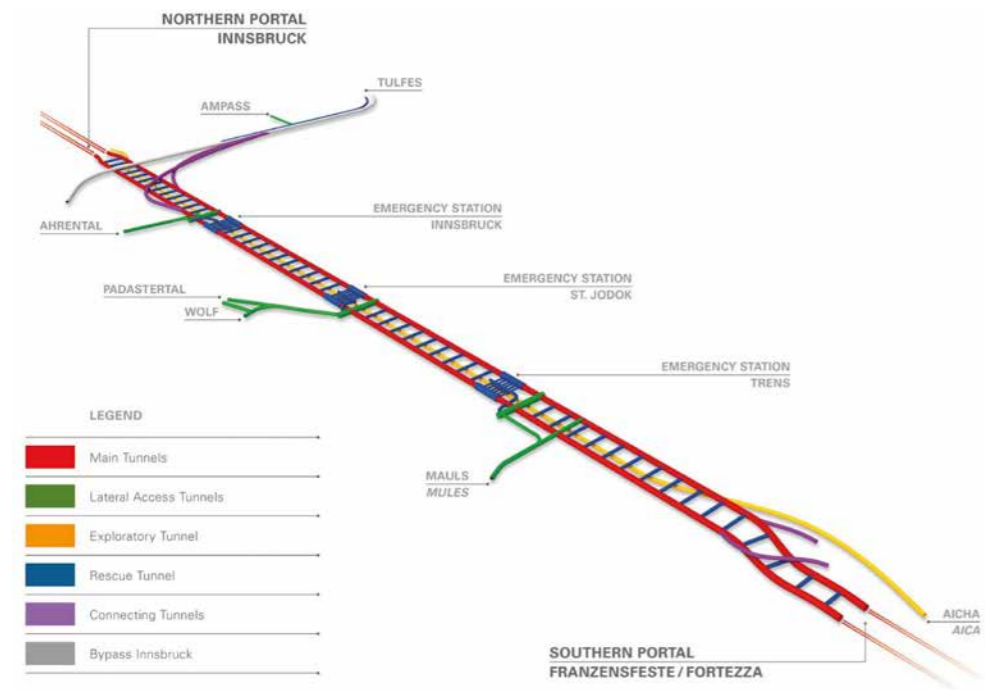
length of the tunnel, including the bypass tunnels, (from the Fortezza portal to the Tulfes portal) is over 64 km and will be the longest railway tunnel of the world when completed.

On the Italian side, the tunnels rise at a slope of 4.0‰ to the Italian–Austrian border. After the border, the average descending slope is around 6.7‰. The maximum cover is about 1,850 m. The average overburden ranges from about 1,000 m to about 1,200 m.

The excavation diameter of the main tunnels ranges from 9.7 m to 10.5 m depending on the local position. The service tunnel has an excavation diameter that ranges from 6.3 m to 6.6 m on the Italian side, and about 7.9 m on the Austrian side.

2.3 Expected Geological Conditions

The excavation will drive through all the geological formations that make up the eastern Alpine area. Most of these are metamorphic rocks. Added to these, important amounts of



2 General overview of the Brenner Base Tunnel

plutonic rock are also present. A summary of the expected rock sequences during the excavation is illustrated in Fig. 3.

The tunnel will cross the Periadriatic fault, which ideally represents the tectonic border between the European and African geological plates. As a consequence of heavy tectonic activity, this area is intensely fractured and the rock mass is characterised by very low mechanical properties.

The main properties of the intact rock belonging to the main geological formations encountered along the entire tunnel alignment are summarised in Table 1.

Lithology	Expected [%]	g [kN/m ³]	oci [MPa]	E [GPa]
Granite	12	26	89–131	29–34
Tonalite	2	27	45	20–31
Orthogneiss	2	28	115	50
Schists	41	27	50	40
Central gneiss	12	27	105	45
Phyllites	22	27	33	23
Various	9	23–27	Varying	Varying

Table 1 Geotechnical characteristics of the main geological formations along the tunnel (intact rock)

2.4 Excavation Methods

The length of the tunnels requires the use of technologies that guarantee high production volumes, as well as an organisation that can reduce any risk of delay in completing the infrastructure. For this reason, the excavation of the exploratory tunnel was planned to take place in advance

of the excavation of the main tunnels in order to acquire direct geological, hydrogeological and geotechnical information, thus acting as a prospection and exploratory tunnel.

So far, this strategy has proved excellent, especially when facing excavations through highly critical geotechnical areas, such as the above-mentioned Periadriatic fault.

In these areas, the exploratory tunnel was built by drill and blast or mechanical excavation (excavators with rippers, and hydraulic hammer

attachments), which allows increased adjustment of support measures based on the actual response of the rock mass to excavation [2].

A summary of excavation methods can be found in Fig. 4. About 30% will be excavated using drill and blast or mechanical equipment and the remaining 70% using TBMs.

2.5 State of the Works

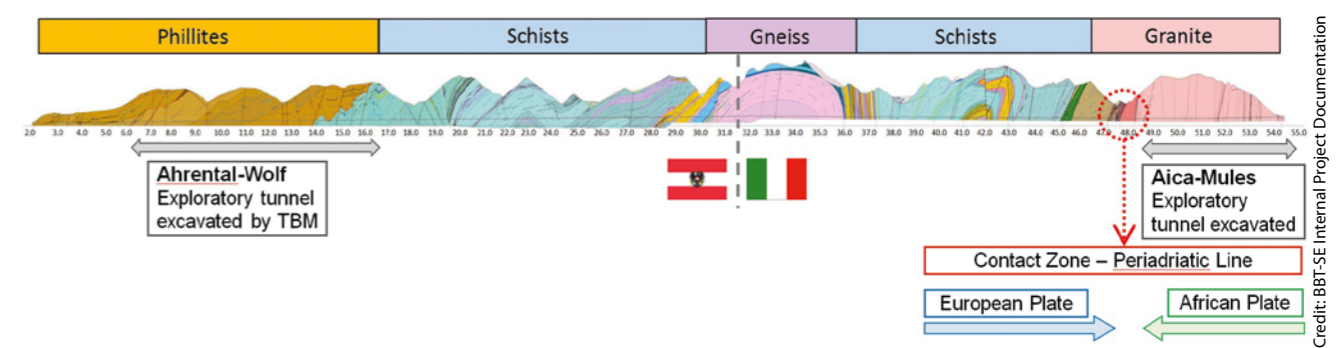
Of the 230 km that will be excavated in total, according to the project – and including main tunnels, smaller tunnels and logistics or service tunnels – about 62 km had been excavated by mid December of 2017, meaning a physical advancement of about 27% (Fig. 5).

3 Mechanised Excavations for the Brenner Base Tunnel

3.1 Introduction

To date, for the construction of the Brenner Base Tunnel, the TBM excavation method was used to build two major 10 km long sections of the exploratory tunnel – one in Austria and one in Italy.

In Italy (Aica–Mules construction lot), the exploratory tunnel section was entirely excavated through Brixner granite using a double shield TBM with a 6.3 m diameter. In Austria (Ahrental–Wolf construction lot), the excavation is still ongoing; the rock mass was characterised by the presence of Innsbruck quartz phyllite over a length of about 7 km and by schists for about 3.5 km. An open gripper TBM with a diameter of about 7.9 m is being used for excavation works.



3 Lithology sequence through which the Brenner Base Tunnel will be excavated

In both cases, difficulties occurred that had an impact on the production in terms of average daily excavation rates. These difficulties are linked to the characteristics of the rock mass being excavated, but also to the type of TBM used.

3.2 Ahrental–Wolf

The H33 Tulfes–Pfons construction lot includes the excavation of about 15 km of the exploratory tunnel in the section known as Ahrental–Wolf. To collect direct geological data, it was decided to use an open gripper TBM.

The section excavated to date was partly driven through Innsbruck quartz phyllite, and partly through the so-called Bündner schists (Fig. 3). The overburden here varies from 400 m to almost 1,200 m in the final section. No significant water inflows were registered in both geological formations crossed.

The quality of the rock mass ranged from mediocre to poor and in some sections – in fault and fold zones – the material was very loose and had no cohesion.

The rock mass rating (RMR) according to Bieniawski [3] in sections with mediocre rock mass quality was 50. In fault zones, the RMR was about 21 to 25.

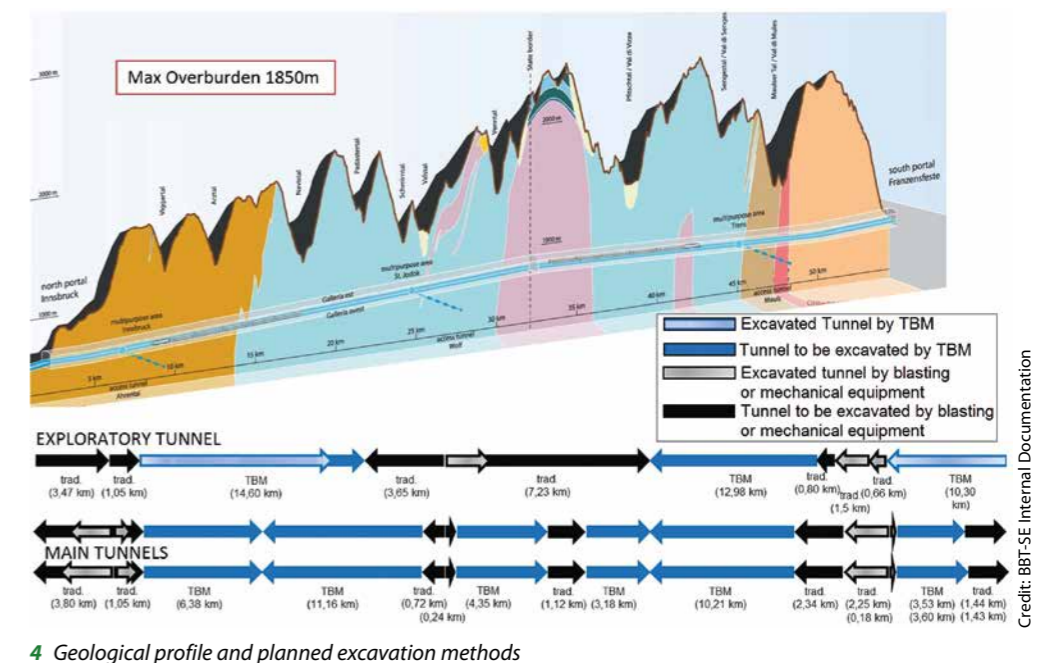
The presence of these significant fault zones impacted heavily on the excavation works. As shown in Fig. 6, during the excavation of the 10 km section completed to date, daily production ranged from 0 m to 62 m, whereas monthly production fluctuated from a minimum of about 17 m to a maximum of about 830 m (Fig. 7).

So far, the average daily production has been 11.6 m, as compared to the 13 m foreseen in the planning phase.

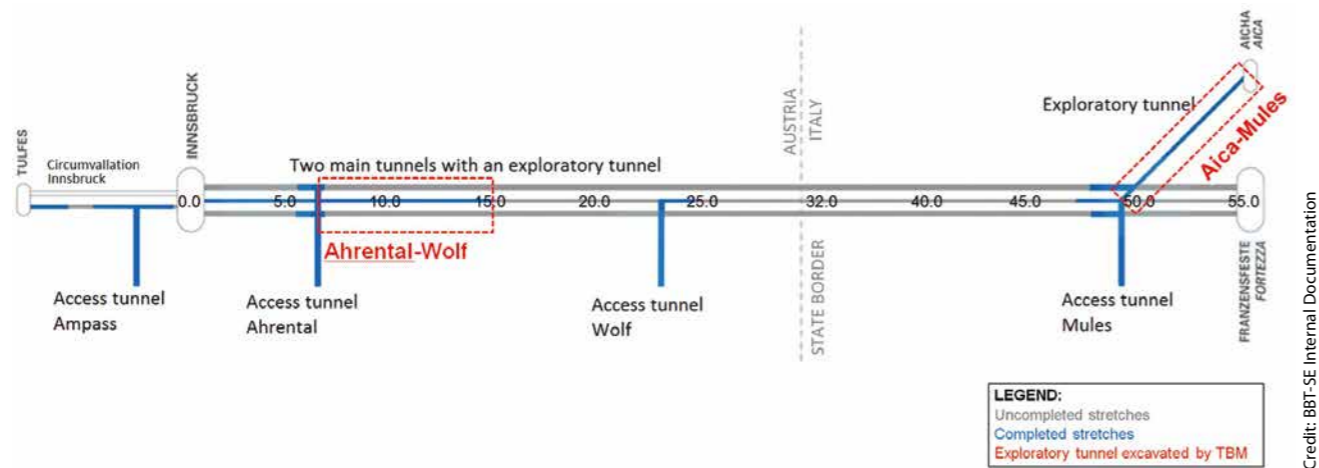
This difference was mainly caused by standstill periods required to solve the difficulties that had occurred due to local instability – in particular at the heading face – and due to analyses of the significant convergences that in some cases caused the tunnel invert to rise by more than 20 cm.

The analysis of Fig. 6 shows in particular that in the first 1,000 m (excavated in just over seven months) the average daily production amounted to about 4.9 m.

After this first section, production rose to daily average values more typical of class III rock mass. Nevertheless, the presence of very loose material with no cohesion strength, usually characterised by schistosity oriented almost horizontally with respect to the slope, has caused the aforementioned significant instabilities at the heading face, interrupted ordinary production cycles several times and led to standstill periods lasting several weeks in order to tackle these issues.



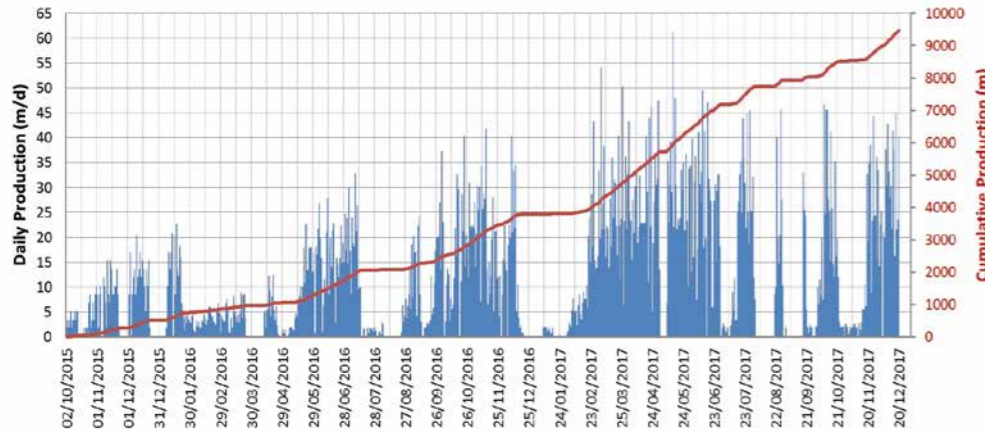
4 Geological profile and planned excavation methods



5 Progress of the works up to December 2017

To date, seven important standstill periods have been registered, amounting to a total of 31 weeks – where works had

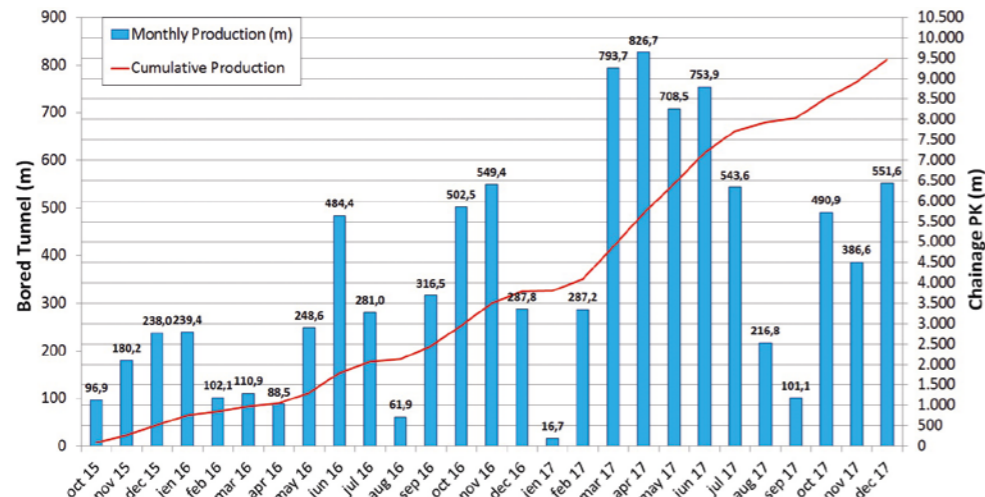
The problems that came up during the excavation phase originated from



6 Ahrental-Wolf exploratory tunnel: daily and cumulative advancement

to be totally suspended or daily production amounted to a few meters – out of 115 potential workweeks, which implies a production loss of 25%.

collapse of the rock mass, in some cases involving several hundred cubic meters of material (600 m³ to 700 m³). Typical examples of these occurrences can be seen in Fig. 8.



7 Ahrental-Wolf exploratory tunnel: monthly advancements

- Rock mass instability, in particular at the heading face and along the already excavated tunnel, though this area involved lower unstable volumes;
 - Convergence phenomena causing a significant rise of the tunnel invert or generating such loads on the outer shell of the tunnel lining that the structure became unstable.
- The instabilities at the excavation face became evident with the progressive

This kind of instability occurred suddenly without any warning in zones with completely loose rock mass and no cohesion strength. Other influencing factors are the type of TBM and cutterhead used and the (probably insufficient) monitoring of loading the excavated material onto the conveyor belt.

Such instability not only causes issues such as collapses, but also potentially dangerous conditions

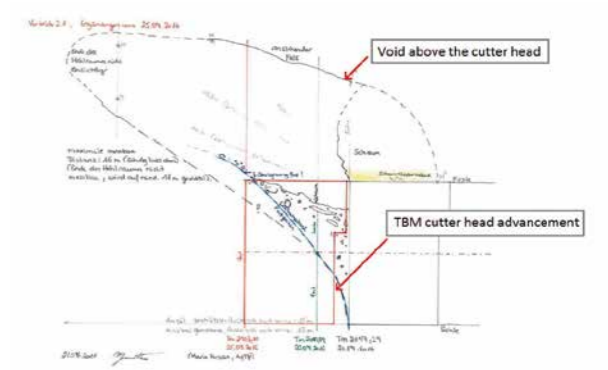
for the workers in the area of and behind the small front shield, which need to be remedied before continuing with excavation.

Besides instability issues at the face, significant convergences came up, causing the tunnel invert to rise, and in sections with a rigid support system, the rupture of the support due to overload (Fig. 9).

The following measures were taken to overcome the issues in terms of instability at the heading face:

- Halving the stroke from 1.7 m to 0.85 m;
- Installation of side-by-side UPN rib beams behind the anti-dust shield of the TBM and subsequent application of a shotcrete layer with a reinforcing mesh;
- Application of a 50 cm thick shotcrete layer behind the UPN rib beams at the top heading to create an arched shotcrete vault at the back end of the rib beams;
- Filling of residual volumes with cementitious mortars, or concrete or expanding resin to avoid further expansion of the cracks when excavation works would be resumed.

The rise of the tunnel invert made it impossible to install the prefabricated element intended as support for the future reinforced concrete base structure. In this case, after having



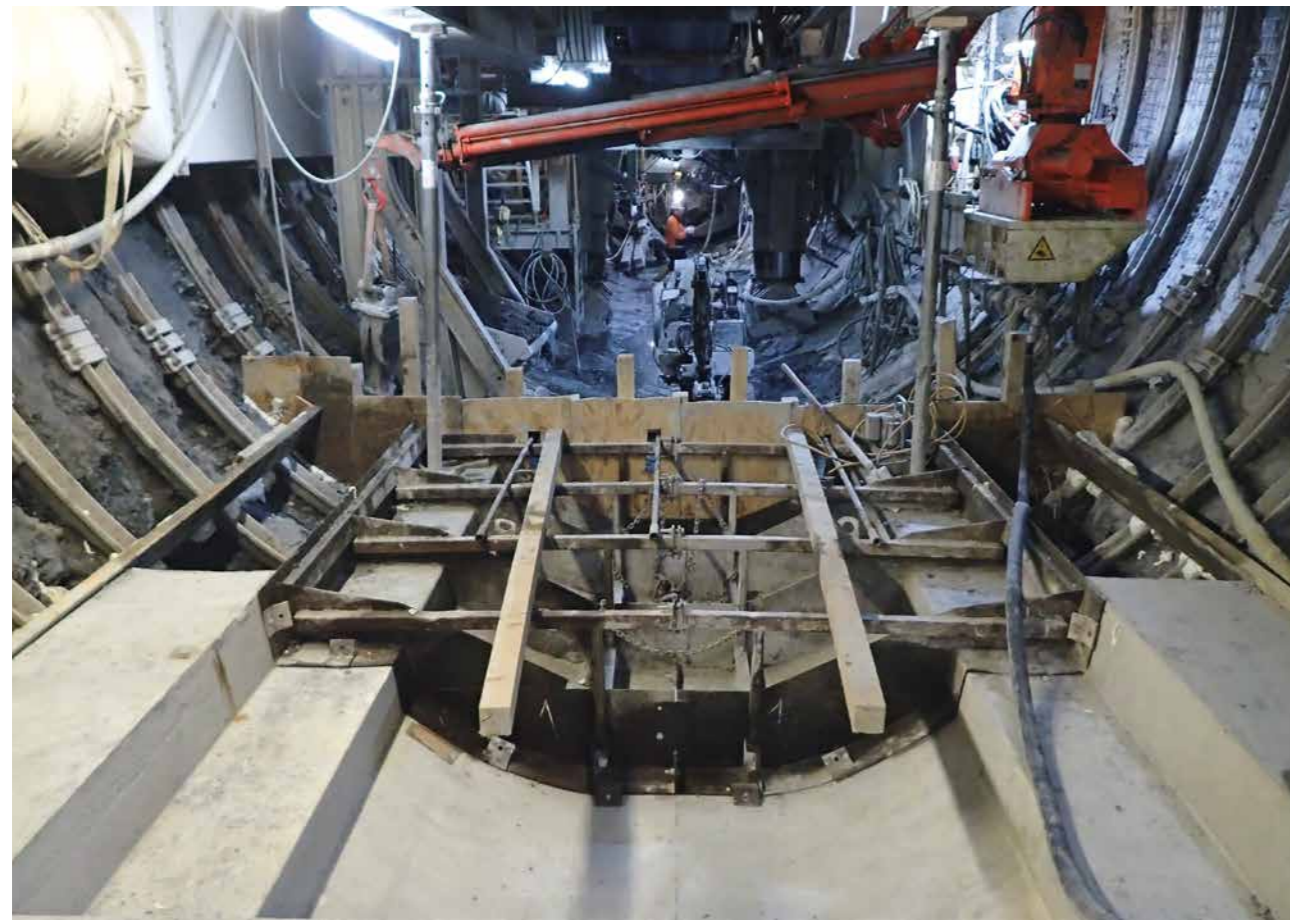
8 Scheme of a typical tunnel face instability

restored the geometrical conditions and consolidated the cavity, a reinforced concrete element serving as permanent tunnel invert was installed in the concerned sections (Fig. 10).

It follows that the whole process is heavily influenced by even the slightest variation in the rock mass structure. This inevitably has an impact on the project costs, which will also be influenced by the actual characteristics of the rock mass driven through during excavation, as well as by indirect costs due to an inadequate production rate as compared to the forecasts in the tendering phase.



9 Rupture of the support due to overload

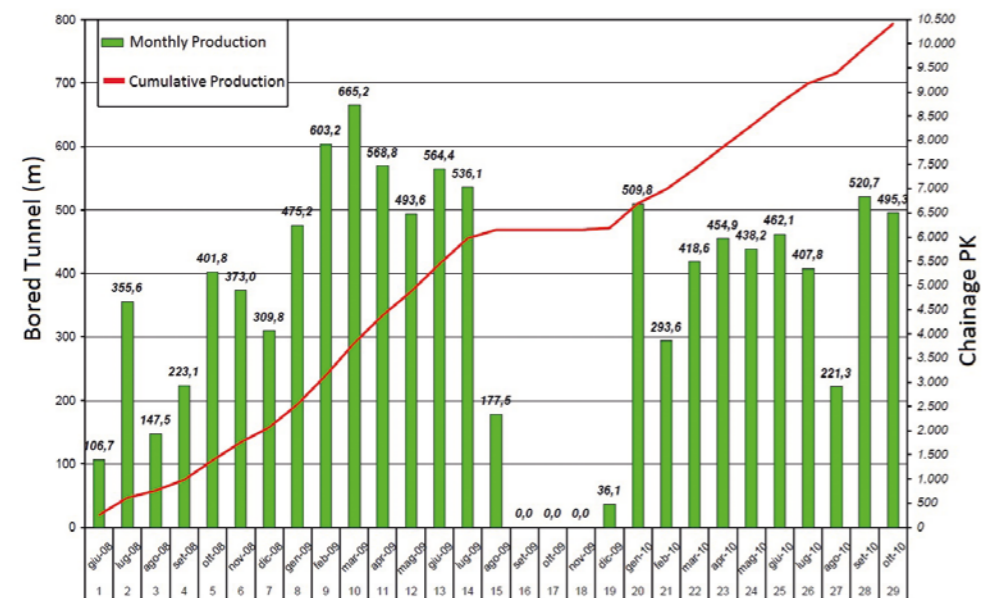


10 Cast-in-place invert, due to the impossibility of installing prefabricated elements

3.3 Aica–Mules

The exploratory tunnel from Aica to Mules was excavated through Brixner granite for about 10.5 km. The overburden in this section ranged from just over 100 m up to more than 1,200 m. This latter overburden remained almost the same in

the last 3 km of this tunnel section. To excavate the tunnel, a double shield TBM with a diameter of 6.3 m was used with the equipment to install 30 cm thick prefabricated tubbing rings that can function as both the first-phase temporary lining and the final lining.



11 Aica–Mules exploratory tunnel: monthly and cumulative productions

It should be noted that, although a reinforced concrete ring had to be installed, it was possible to set up excavation works in such a way as to preserve the function of the exploratory tunnel; that is, acquiring data on the rock mass characteristics needed to verify the decisions for the planning and the construction of the main tunnels.

For example, every 250 m an opening was left in the tunnel lining through which it was possible to identify the fracturing

classes and carry out radial drillings to extract drill cores of the rock mass matrix. Furthermore, using comparative analysis of the data provided by the TBM and that from prospection activities carried out through the apertures in the shield and the drilling head, it was possible to ascertain the fault zones along the route in terms of both the thickness and the characteristics of the de-structured rock mass.

In other words, the prospection purpose of the exploratory tunnel was ensured through targeted measures aimed at achieving this goal.

The monthly performance ranged from a bit more than 100 m during the initial learning period, which lasted approximately one month, up to a maximum of 665 m (Fig. 11).

The average daily production rate was slightly higher than 12 m/day all told, including the final lining that was installed during the excavation works.

The rock mass quality was good along the entire section. The estimated RMR ranged from 60 to 80. The rock mass quality dropped to 50 just in a few sections, and very sporadically to below 40.

In general, no particular issues arose during these excavation works due to the rock mass structure that influenced the TBM excavation. Total production, instead, was affected by individual yet significant events. In particular, the most important event that interrupted excavation works for approximately 20 weeks originated from a sub-parallel fault zone that was not detected from the TBM during the excavation and was not foreseen in the planning.

This fault contained degraded material a few meters thick, and was characterised by high water pressure. These two factors caused asymmetric loads on the tunnel lining; therefore, the lateral part of the lining broke (Fig. 12) and the stability of the TBM backup system was affected, to some extent, when the heading face reached a distance of more than 60 m from the breaking point. The concerned section was about 30 m long (Fig. 13).

Although the tunnel lining was damaged, the system never led to significantly hazardous situations for the workers.

There was also another issue that slowed production – namely, some rock bursts at the head-

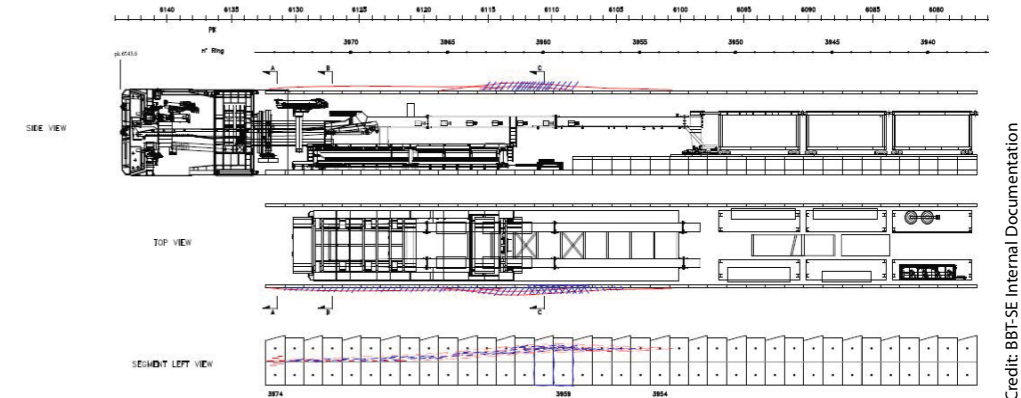


12 Aica–Mules exploratory tunnel: rupture of the segmented lining due to asymmetrical loads

ing face that blocked the drilling head and the shield of the TBM (chainage from about 7,000 to 7,500). These phenomena lasted approximately one month, during which the production dropped to 40% compared to the previous month.

In this case as well, the issue influenced only the progress of the works but never generated potentially hazardous conditions for the workers.

The following measures were taken to tackle the aforementioned issues:



13 Outline of the collapse of the segments



14 Placing of steel element in the collapsed zone

Credit: BBT-SE Internal Documentation

4 Final Considerations

In light of the practical experience acquired to date during the TBM excavation of 20 km of the exploratory/service tunnels with diameters ranging from 6.3 m (double shielded TBM) to 7.6 m (open gripper TBM), the following conclusions were reached:

- Excavation with an open gripper TBM is significantly influenced by the quality of rock mass;
- Even slight changes of the rock mass quality can lead to significant decreases in production as a result of the need to consolidate the cavity;
- The necessary measures to counteract instabilities in the cavity and at the heading face have to be carried out in precarious safety conditions;
- Safety conditions can be

precarious immediately before consolidation measures are taken; that is, between the cutterhead and the back end of the anterior dust shield, where instability phenomena can occur;

- To ensure the safety of workers when the rock mass is particularly unstable, the use of an open gripper TBM may require the installation of circular supports right behind the dust shield, which conceptually could be compared with a shielded TBM;
- In cases where a prefabricated element is foreseen as a base structure, containing measures aimed at controlling significant convergences at the tunnel invert might make it impossible to install the prefabricated element and require other, slower technical alternatives to construct the tunnel invert;
- The unknown aspects ascertained through the analysis of the actual rock mass conditions during excavation works inevitably imply uncertainties in terms of final project costs;
- As opposed to the open gripper TBM, a shielded TBM offers much steadier production, much less impacted by local variations of the rock mass quality;
- The installation of prefabricated elements inside the shield ensures the best safety conditions, even when it is necessary to carry out measures to restart the excavation after the TBM got stuck;

- Injection with expanding resins and replacing damaged tubing segments with new lining segments or steel plates, depending on the damaged zone (Fig. 14);
- Manually (by hand) removing material and drilling of short blast holes using a small amount of explosives to free the machine; this approach proved successful and the TBM was freed in a short time;
- Reducing the stroke to reduce the accumulation of energy around the cavity.

It should be pointed out that if the cutterhead gets stuck because of spalling of the rock mass as a reaction to a sudden energy release, this happens independent of the type of TBM.

Aside from the individual events that had an impact on construction activities, the excavation on the whole was carried out in a normal manner, almost independently from the (slight) variations of the local structure of the rock mass.

From the point of view of the principal, the regularity of excavation activities determines those costs that are not – or only slightly – influenced by the uncertainty linked to an imperfect knowledge of the rock mass characteristics, and thus leads to a reduction or total elimination of higher costs than foreseen in the planning phase.

- Careful planning can guarantee the implementation of efficient prospection activities, despite the tunnel lining being installed during TBM advancement;
- The higher regularity of excavation as compared to an open gripper TBM reduces uncertainties in terms of costs and thus protects the principal from potential extra claims (for extra costs) that were not foreseen in the planning phase;
- Major instability of the heading face and of the cavity near the shield can lead to significant standstills that decrease production; nevertheless, the measures that can be taken in such cases to free the TBM are carried out in better safety conditions as compared to the similar operations to be carried out with an open gripper TBM.

References

- [1] Zurlo R., Rea G., and Rocchia M. Galleria di Base del Brennero. Descrizione dell'opera ed avanzamento attraverso la faglia Periadriatica. Proceedings on the Italian Tunneling Society Congress. Bologna: 2013, p. 628–643.
- [2] Fuoco S., Zurlo R., Lanconelli M. Tunnel deformation limits and interaction with cavity support: The experience inside the exploratory tunnel of the Brenner Base Tunnel. Proceedings of World Tunneling Congress 2017. Bergen (Norway).
- [3] Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classification. New York: John Wiley and Sons (1989).
- [4] Grandori R., Bieniawski Z. T., Vizzino D., Lizzadro L., Romualdi P., Busillo A. Hard Rock Extreme Conditions In The First 10 km of TBM Driven Brenner Exploratory Tunnel, Proceedings of the rapid excavation and tunnelling conference. San Francisco: 2011, p. 667–685.

PROJECT DATA											
Region	Italy–Austria										
Client	BBT-SE Brenner BasisTunnel										
Design, Site Supervision and Overall Construction Management	<ul style="list-style-type: none"> • Aica–Mules. Design: RTP (Pasquali Rausa, S.I.N.C., SWS); site supervision: DLB (Spm Consulting, Quick, Ecoter, Concer and Partner); construction management: Brenner BasisTunnel BBT-SE • Ahrental–Wolf. Design: ARGE, Bernard-Gloconsult; site supervision: Pini and Partner; construction management: Brenner BasisTunnel BBT-SE 										
Excavation	<ul style="list-style-type: none"> • Aica–Mules. Pizzarotti, Condotte, S.E.L.I., Collini, Bilfinger Berger AG Niederlassung Tunnelbau, Alpine-Mayreder Bau GmbH, Jager Bau GmbH • Ahrental–Wolf. Strabag AG, Salini Impregilo 										
Key Data	<table> <tr> <td>Construction period:</td> <td>2008–2027</td> </tr> <tr> <td>Start of operations:</td> <td>2008</td> </tr> <tr> <td>Construction costs:</td> <td>8,384 million euro</td> </tr> <tr> <td>Length:</td> <td>64 km</td> </tr> <tr> <td>Excavated cross section:</td> <td>Average 80 m² in main tunnel</td> </tr> </table>	Construction period:	2008–2027	Start of operations:	2008	Construction costs:	8,384 million euro	Length:	64 km	Excavated cross section:	Average 80 m ² in main tunnel
Construction period:	2008–2027										
Start of operations:	2008										
Construction costs:	8,384 million euro										
Length:	64 km										
Excavated cross section:	Average 80 m ² in main tunnel										

SWISS TUNNEL KOLLOQUIUM 2018

Abdichtung und Entwässerung im Untertagbau Sealing and Drainage in Underground Construction

13. Juni 2018



FGU Fachgruppe für Untertagbau
GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains
GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo
STS Swiss Tunnelling Society

Balazs Fonyó, Dipl. Bau-Ing. ETH, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen/CH

Dichtigkeit von Tunnelbauwerken

Theorie und Praxis

Um die Tragsicherheit und Funktionstüchtigkeit eines Tunnels langfristig sicherstellen zu können, muss dieser dicht sein. Die Dichtigkeit ist die «Lebensversicherung» eines Tunnels, damit die Nutzungsdauer erreicht werden kann. Die Anforderungen an die Dichtigkeit werden in Abhängigkeit von der Bauwerksnutzung festgelegt. Wie dies in die Praxis umgesetzt wird, wird hier anhand aktueller Neubauprojekte dargestellt. Es wird auch gezeigt, welche Folgen ein undichter Tunnel und eine nicht funktionierende Drainage haben können.

Impermeability of Tunnels

Theory and Practice

In order to guarantee the structural safety and the serviceability of a tunnel in the long term, it must be watertight. The impermeability is the life insurance of a tunnel to be able to achieve its expected service life. The requirements of the watertightness are specified according to the use of the underground structure. How this concept is implemented in practice will be demonstrated by showing some new construction projects. The consequences of a leaking tunnel and dysfunctional drainage will also be shown.

Tunnel gehören zu den teuersten Infrastrukturbauten der Schweizer Nationalstrassen und müssen gleichzeitig den unterschiedlichsten Anforderungen genügen. Um die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit eines Tunnels langfristig sicherstellen zu können, muss dieser dicht sein. Die Dichtigkeit ist nicht etwa ein Komfortkriterium, sondern sozusagen die Lebensversicherung eines Tunnels, damit die geforderte Nutzungsdauer erreicht werden kann.

Tunnel sollen dicht sein. Da für die meisten Schäden am Bauwerk das Wasser verantwortlich ist, ist die Forderung nach einer adäquaten Dichtigkeit mehr als gerechtfertigt. Doch: Wie dicht sollen unsere Tunnel sein? Wie kann die geforderte Dichtigkeit erreicht werden? Was sind die Folgen eines undichten Tunnels? Sollen die Anforderungen für einen Neubau und die für einen bestehenden Tunnel unterschiedlich gehandhabt werden?

Eine weitere wichtige Forderung im Tunnelbau ist, dass das Bauwerk – nebst der Abdichtung – über eine dauernd funktionierende Entwässerung verfügen muss. Die Drainage ist somit die zweite «Lebensversicherung» eines Tunnels, zumindest beim Ableitkonzept, welches in den meisten Fällen zur Anwendung kommt.

SIA 197, Absatz 8.6.2.1: Es sind Massnahmen zu treffen, um die schädigenden Einflüsse des Wassers auf das Bauwerk

Tunnels are the most expensive infrastructure facilities of the Swiss Federal Roads and should simultaneously meet different requirements. In order to guarantee the structural safety and the serviceability of a tunnel in the long term, it must be watertight. The impermeability of a tunnel is not merely a comfort criterion, but is, in a manner of speaking, the life insurance of a tunnel to be able to achieve its expected service life.

Tunnels should be watertight. Because water is responsible for the majority of structural damage, the demand for an adequate degree of watertightness is more than justified. But how impermeable should a tunnel be? How can the required impermeability be achieved? What are the consequences of a leaking tunnel? Can the requirements be handled differently for a new construction and for an existing tunnel?

Another important requirement in tunnel engineering is – in addition to waterproofing – that the structure should have a permanently functioning drainage system. Thus, drainage is a tunnel's second life insurance, at least for the seepage concept, which is applied in most cases.

SIA 197, paragraph 8.6.2.1: Measures should be taken to prevent the damaging effects of water on the structure and prevent operating and safety equipment from being affected by dripping and splashing water or ice formation [1].

Étanchéité des tunnels

Théorie et pratique

Les tunnels comptent parmi les ouvrages les plus coûteux des routes nationales suisses et doivent respecter simultanément diverses exigences. La condition nécessaire pour pouvoir assurer la sécurité structurale et l'aptitude au service à long terme d'un tunnel est que celui-ci soit étanche. L'étanchéité n'est pas simplement un critère de confort, mais plutôt «l'assurance-vie» d'un tunnel permettant que la durée d'utilisation requise soit atteinte. L'autre «assurance-vie» est un système de drainage opérationnel à long terme – au moins avec le concept d'évacuation des eaux du massif, qui est le concept le plus fréquemment utilisé. Les exigences d'étanchéité sont déterminées en fonction de l'utilisation de l'ouvrage. Après la mise en évidence des prescriptions normatives y relatives, le rapport traite d'exemples pratiques. Il est montré à l'aide de projets actuels, comment l'étanchéité peut être planifiée et réalisée pour de nouvelles constructions. Les conséquences que peuvent avoir un tunnel non étanche et un système de drainage qui ne fonctionne pas sont illustrées avec deux exemples de tunnels routiers existants. Les mesures de réfection concernant ces deux exemples sont également présentées.

zu vermeiden und die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung sowie den Betrieb weder durch Tropf- und Spritzwasser noch durch Eisbildung zu beeinträchtigen [1].

Gewöhnlicher Beton ist bekanntlich nicht dicht. Wasser kann in die Luftporen und Risse des Betons eindringen und ihn schädigen. Welche schädigende Wirkung des «Wassers» ist uns am Beton bekannt? Einige Beispiele:

- Infolge der Reaktion des sulfathaltigen Wassers mit dem Beton bildet sich Ettringit, und es kommt zu einer Volumenvergrößerung, was wiederum zur Abplatzung und Zerstörung des Betons führt.
- Durch den Einsatz von Frosttaumitteln kommt auch Chlorid in den Beton. Ist dieser zum Beispiel bei einem Tagbautunnel bewehrt, so greift das Chlorid die Bewehrung an, und es steigt die Gefahr von Lochfrasskorrosion, aber auch die Gefahr von Betonabplatzungen durch den erhöhten Volumenbedarf des korrodierten Stahls.
- Ist der Beton regelmässig Feuchtigkeit und Nässe ausgesetzt, reagieren die Betonalkalien mit dem kieselsäurehaltigen Gestein in der sogenannten Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR). Dies führt zur Volumenvergrößerung und anschliessend zu Rissen und Abplatzungen. AAR wird auch Betonkrebs genannt.
- Wenn das im Beton vorhandene Wasser gefriert, vergrössern sich die Risse im Beton, was ebenfalls zu Abplatzungen führt.

Impermeabilità delle gallerie

Teoria e pratica

Le gallerie rientrano tra le opere infrastrutturali più costose delle Strade Nazionali svizzere e devono soddisfare contemporaneamente molteplici requisiti. Per poter garantire a lungo termine la sicurezza strutturale e la funzionalità di una galleria, è necessario che quest'ultima sia impermeabile. L'impermeabilità non è un criterio afferente al comfort, ma costituisce piuttosto la cosiddetta «assicurazione sulla vita» di una galleria, consentendo il raggiungimento della durata d'utilizzazione richiesta. L'altra «assicurazione sulla vita» è costituita da un drenaggio sempre funzionante, almeno nell'ambito del concetto di evacuazione delle acque, maggiormente in utilizzo nelle gallerie. I requisiti d'impermeabilità vengono determinati secondo l'utilizzo dell'opera. Dopo l'evidenziazione delle disposizioni normative, verranno affrontati alcuni esempi pratici. La realizzazione dell'impermeabilizzazione viene esposta attraverso progetti di nuove costruzioni. Partendo da due esempi di gallerie stradali esistenti, vengono mostrati quali sono le possibili conseguenze di una galleria non impermeabile e di un sistema di drenaggio non funzionante. Sono illustrate anche le misure di risanamento relative a tali esempi.

It is known that common concrete is not watertight. Water can intrude into the pores and cracks of the concrete and cause damage. What damaging effects of water on concrete do we know of? Here are some examples:

- Ettringite is formed as a result of water containing sulphates reacting with the concrete and an increase in volume occurring and therefore leading to spalling and the destruction of the concrete.
- The use of de-icing agents on roads means that chloride also enters the concrete. If the tunnel is made of steel-reinforced concrete, like a cut-and-cover tunnel, the chloride attacks the reinforcement and increases the risk of pitting corrosion. But there is also the risk of concrete spalling as a result of the increased volume of the corroded steel.
- If the concrete is regularly exposed to moisture and humidity, the concrete alkalis react with the siliceous rock in what is known as an alkali-aggregate reaction (AAR). This leads to volume increases and subsequently to cracks and spalling. AAR is also referred to as concrete cancer.
- If the water in the concrete freezes, the cracks in the concrete become bigger due to the volume increase of ice. This can lead to spalling as well.

1 Basics and Definitions

Technical rules, standards and reference manuals are compiled to ensure the state of the art and to make accessible



1 **Vorschriftshierarchie des ASTRA** [7]
ASTRA regulation hierarchy [7]

1 Grundlagen und Definitionen

In diesem Kapitel werden die relevanten normativen Vorgaben und Definitionen behandelt.

Technische Regeln, Normen und Fachhandbücher werden erstellt, damit der Stand der Technik festgehalten ist, die Qualitätsvorgaben des Bauherrn allgemein zugänglich sind und das Rad nicht jedes Mal neu erfunden werden muss. Bei der Erarbeitung solcher Vorschriften wird darauf geachtet, dass mit der Ausführungs- und Qualitätsvorgabe keine unnötige Einengung des Marktes einhergeht.

1.1 Schweizer Normen

Die Normen SIA 197 [1], SIA 197/1 [2], SIA 197/2 [3], SIA 198 [4], SIA 270 [5] und SIA 272 [6] enthalten die wichtigsten Vorschriften betreffend Dichtigkeit und Abdichtung von Tunneln.

1.2 Vorschriften des ASTRA

Das Fachhandbuch Tunnel/Geotechnik des ASTRA enthält ebenfalls Vorgaben zu Dichtigkeit und Abdichtungen [7]. Konkret zu beachten sind im Fachhandbuch die Merkblätter 24001-10500 Abdichtungen – Allgemeines, 24001-10501 Regenschirmabdichtung, 24001-10502 Vollabdichtung, 24001-10503 Dichtungsbahnen, 24001-10506 Abdichtung und Drainage von Nebenbauwerken, 24001-10601 Drainage- und Bergwasserleitung, 24001-10705 Befahrbare Querverbindungen, 24001-10706 Begehbare Querverbindungen und 24001-10707 Sicherheitsstollen, Fluchtstollen.

Während der Projektierung ist eine solche Lösung anzustreben, die sowohl den geltenden Normen als auch den ASTRA-Vorschriften entspricht. Da mehrere Regelwerke parallel nebeneinander existieren, kann es manchmal vorkommen, dass ein Widerspruch zwischen zwei Regelwerken vorliegt. Was ist in diesem Fall zu tun? Antwort: Die Priorisierung ist gemäss Vorschriftshierarchie vorzunehmen (Bild 1).

1.3 Abdichtung

Im Fachhandbuch Tunnel/Geotechnik, Merkblatt 24001-10500 Abdichtungen – Allgemeines, steht [7]: «Die Abdich-

the builder authority's quality specifications and not to reinvent the wheel every time. When developing these regulations, particular attention is therefore paid to the specifications not being too restrictive to the market – regarding execution and quality insurance.

1.1 Swiss Standards

The Swiss standards SIA 197 [1], SIA 197/1 [2], SIA 197/2 [3], SIA 198 [4], SIA 270 [5] and SIA 272 [6] contain the most important regulations with regard to the impermeability and sealing of tunnels.

1.2 ASTRA Regulations

The manual Tunnel/Geotechnik of the Federal Road Office (ASTRA) also contains impermeability and sealing specifications [7]. More specifically, the reference manual contains the technical sheets: 24001-10500 Tunnel sealing – General aspects, 24001-10501 Umbrella sealing, 24001-10502 Circular sealing, 24001-10503 Sealing Liners, 24001-10506 Sealing and drainage of ancillary structures, 24001-10601 Drainage and seepage pipes, 24001-10705 Vehicle-accessible cross-passages, 24001-10706 Walk-through cross-passages, and 24001-10707 Safety tunnels, escape tunnels.

During the project design, a solution corresponding to both the applicable standards and the ASTRA regulations should be aimed for. Because several technical regulations exist in parallel, it may occasionally be the case that two sets of regulations contradict each other. What should be done in this case? Answer: Define the order of priority following the regulations hierarchy (Figure 1).

1.3 Tunnel Sealing

In the manual Tunnel/Geotechnik, technical sheet 24001-10500 Tunnel sealing – General aspects, it says [7]: 'Tunnel sealing protects the tunnel interior from incoming groundwater and the supporting structure from possible chemical and physical actions coming from aggressive constituents in the water.'

The sealing system is the entirety of all coordinated subcomponents which facilitate the waterproofing function, and consists of a succession of coordinated layers with or without bonding to the substrate: concrete substrate – roughness compensation – priming coat, if necessary – seepage layer – sealing liners – protective layer. The sealing system may also include joint seals for connections/terminations, joints, penetrations as well as transitions, intersections and the possibility of grouting etc. [7].

1.4 Tunnel Sealing Concepts

The tunnel sealing concept should comply with the use of the structure and the hydrogeological, ecological and climatic conditions. Thermal and moisture protection is specified in analogy to the standard SIA 180 [6]. In principle, the following two sealing concepts are differentiated (Figure 2):

tung schützt den Tunnelinnenraum vor eindringendem Berg- und Grundwasser sowie die Tragkonstruktion vor möglichen chemischen und physikalischen Einwirkungen aus aggressiven Bestandteilen des Wassers.»

Das Abdichtungssystem ist die Gesamtheit aller aufeinander abgestimmten Teilkomponenten, welche die Funktion Abdichtung umfassen, und besteht aus einer Folge von aufeinander abgestimmten Schichten mit oder ohne Verbund zum Untergrund: Betonuntergrund, Rauigkeitsausgleich, allenfalls Grundierung, Drainageschicht, Dichtungsbahn, Schutzschicht. Zum Abdichtungssystem gehören mitunter die Fugenabdichtungen bei An-/Abschlüssen, Stössen, Durchdringungen sowie Übergänge, Kreuzungen und die Möglichkeit von Injektionen usw. [7].

1.4 Abdichtungskonzepte

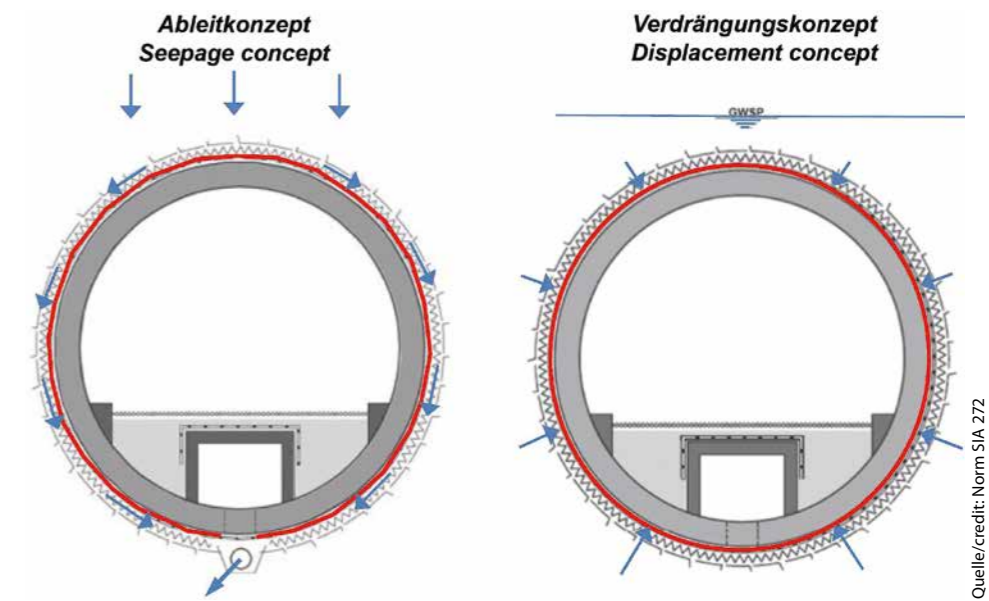
Das Abdichtungskonzept richtet sich nach der Bauwerksnutzung, den hydrogeologischen, ökologischen und klimatischen Bedingungen. Der Wärme- und Feuchteschutz ist analog zur Norm SIA 180 festzulegen [6]. Grundsätzlich werden die folgenden zwei Abdichtungskonzepte unterschieden (Bild 2):

Ableitkonzept

Das Abdichtungssystem wird als Teilabdichtung im Gewölbe, als sogenannte Regenschirmabdichtung, oder als rundum laufende Vollabdichtung gegen nicht drückendes Wasser ausgelegt, kombiniert mit einer dauerhaften Gewölbedrainage. Das Bergwasser wird durch die Drainageschicht drucklos zur Sickerleitung geführt und dort gefasst. Damit kein Druck auf den Tunnel entsteht, sind die Sickerleitungen möglichst tief im Querschnitt anzuordnen. Oft wird beidseits der Ulmen eine Sickerleitung vorgesehen. Die Tunnelentwässerung ist darauf auszulegen, dass sie dauerhaft funktionsfähig ist. Eine partielle Ableitung kann bei einer Gewölbedrainage entstehen, wenn das Bergwasser nicht flächenhaft, sondern mittels Halbschalen oder mittels Drainagebohrungen und Schlitzten gefasst und abgeleitet wird [1].

Verdrängungskonzept

Das anfallende Bergwasser wird nicht gefasst und abgeleitet, sondern verdrängt. Das Abdichtungssystem ist als rundum laufende Vollabdichtung druckhaltend [1]. Wasserdruckhaltende Vollabdichtungen müssen wegen ihrer Anfälligkeit über ein Leckwasser-Ableitsystem (LWA) als ergänzende Vorkehrung verfügen.



2 **Abdichtungskonzepte** [6]
Sealing concepts [6]

Water Seepage Concept

The sealing system is designed as a partial sealing of the vault, as a so-called umbrella sealing, or as a full circular sealing against non-pressurised water, combined with a permanent vault drainage system. The groundwater is drained behind the vault without pressure and collected in the seepage pipe. The pipe has to be situated as low as possible in the cross section to prevent water pressure on the tunnel wall. The seepage pipe is often installed on both sidewalls. Tunnel drainage should be designed with a permanent function. We speak of partial seepage if the vault is not drained on the whole surface, but by means of half-shells or drainage holes and slits [1].

Water Displacement Concept

The groundwater is not meant to be drained and collected, but displaced. The sealing system, as a full circumferential liner, is pressure-resistant [1]. Due to its susceptibility to leakage, the pressure-resistant circular tunnel sealing should have a water leakage drainage system as a supplementary precaution.

2 Impermeability

The impermeability class of the underground structure must be defined in the user agreement at the beginning of project design [7].

SIA 197, paragraph 8.6.2.4: The relevant building areas and the associated impermeability classes should be specified and noted in the drawings [1].

2.1 Impermeability Classes According to SIA 197 and SIA 272

The impermeability of an underground structure is divided into four classes in the standards SIA 197 and SIA 272

Dichtigkeitsklasse	Beschrieb
1	<i>Vollständig trocken</i> Keine Feuchtstellen an den trockenseitigen Bauwerksflächen zugelassen.
2	<i>Trocken bis leicht feucht</i> Einzelne Feuchtstellen zugelassen. Kein tropfendes Wasser an den trockenseitigen Bauwerksflächen zugelassen.
3	<i>Feucht</i> Örtlich begrenzte Feuchtstellen und einzelne Tropfstellen an den trockenseitigen Bauwerksflächen zugelassen.
4	<i>Feucht bis nass</i> Feucht- und Tropfstellen zugelassen.

Quelle Normen SIA 197 und SIA 272

3 Dichtigkeitsklassen nach SIA 197 [1] und SIA 272 [6]

2 Dichtigkeit

Die am Bauwerk angestrebten Dichtigkeitsklassen sind zu Beginn der Projektierung in der Nutzungsvereinbarung objektspezifisch festzuhalten [7].

SIA 197, Absatz 8.6.2.4: Die massgebenden Bauwerksflächen und die zugehörigen Dichtigkeitsklassen sind festzulegen und in den Plänen darzustellen [1].

2.1 Dichtigkeitsklassen nach SIA 197 und SIA 272

In der SIA 197 und der SIA 272 wird die Dichtigkeit in vier Klassen eingeteilt (Bild 3). Beachte: Die Bildung von Kondenswasser an der Tunnelwand kann mit der Festlegung von Dichtigkeitsklassen nicht verhindert werden und muss objektspezifisch beurteilt werden [1].

Impermeability class	Description
1	<i>Completely dry</i> No areas of moisture permitted on the dry side of the structural surface.
2	<i>Dry to slightly moist</i> Individual areas of moisture permitted. No dripping water permitted on the dry side of the structural surface.
3	<i>Moist</i> Localised areas of moisture and individual areas of dripping permitted on the dry side of the structural surface.
4	<i>Moist to wet</i> Areas of moisture and dripping permitted.

credit: Normen SIA 197 und SIA 272

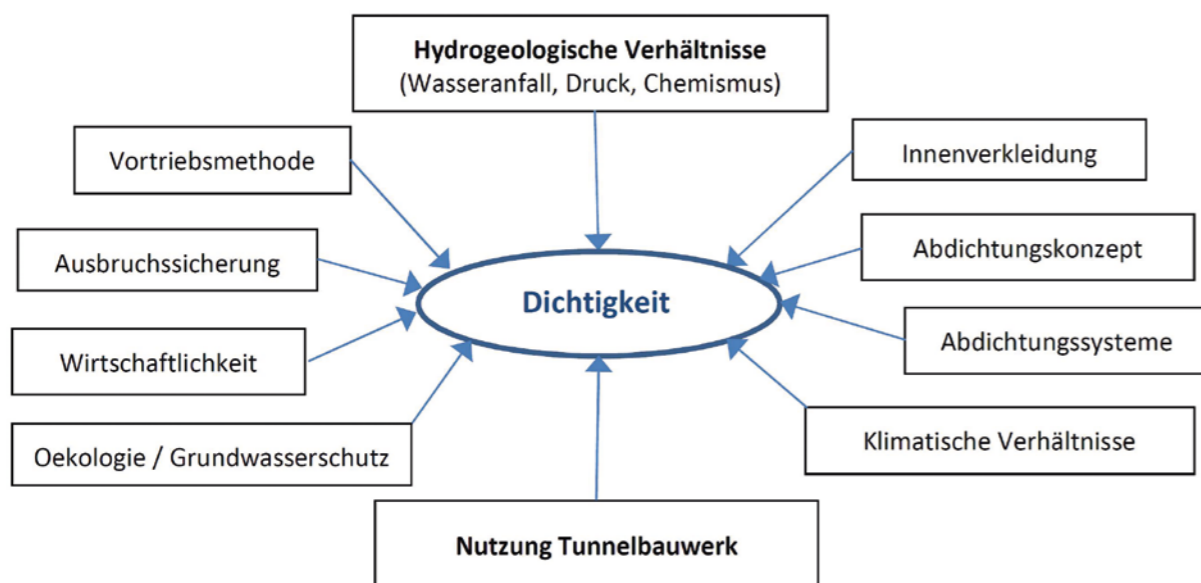
3 Impermeability classes compliant with SIA 197 [1] and SIA 272 [6]

(Figure 3). Note: The formation of condensation on the tunnel wall cannot be prevented by specifying impermeability classes and should be assessed specifically for each structure [1].

2.2 Influencing Factors

The use of the tunnel structure and hydrogeological conditions, the sealing concept, tunnelling method, excavation stabilisation, interior lining, tunnel sealing systems, ecological and economic aspects, among others, are factors that influence the impermeability of a tunnel (Figure 4).

The requirements of the impermeability should be specified based on the use of the structure. By differentiating between the uses of the structure and between the given ground-



4 Die Dichtigkeit beeinflussende Faktoren
Factors affecting impermeability

2.2 Einflussfaktoren

Die Nutzung des Tunnelbauwerks und die hydrogeologischen Verhältnisse, aber auch das Abdichtungskonzept, die Vortriebsmethode, die Ausbruchssicherung, die Innenverkleidung, die Abdichtungssysteme sowie ökologische und wirtschaftliche Aspekte sind unter anderem Faktoren, welche die Dichtigkeit beeinflussen (Bild 4).

Die Anforderungen an die Dichtigkeit sind in Abhängigkeit von der Bauwerksnutzung festzulegen. Die Unterscheidung der Bauwerksnutzung, aber auch die unterschiedlichen Bergwasserverhältnisse haben zur Folge, dass in derselben Tunnelanlage häufig unterschiedliche Dichtigkeitsklassen gefordert werden und damit auch unterschiedliche Abdichtungsmassnahmen zur Anwendung kommen.

Die hydrogeologischen Verhältnisse spielen eine entscheidende Rolle dafür, mit welchem Abdichtungskonzept und Abdichtungssystem die Dichtigkeit erreicht werden soll. Der saisonalen Schwankung der hydrogeologischen Verhältnisse ist bei der Projektierung genügend Beachtung zu schenken.

SIA 272, Absatz 2.1.1: Es gilt der Grundsatz, dass im Baugrund stets Wasser vorhanden ist [6].

Es gilt aber auch: Während der Ausführung ist jeweils vor Ort zu überprüfen, ob die erwarteten Bergwasserverhältnisse, konkret Wasseranfall, Druck und Chemismus, der geologischen Prognose entsprechen [3]. Bei Abweichungen davon sind je nach Situation die vorgängig geplanten Massnahmen anzupassen.

2.3 Abdichtungsmassnahmen

Zur Erreichung der Dichtigkeit sind die nachfolgend aufgeführten Massnahmen bekannt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Vorauserkundung: Vorauseilende Drainagen sind Bauhilfsmassnahmen im Vortrieb, um die effektiv vorhandenen Bergwasserverhältnisse zu erkunden und um die Ortsbruststabilität im Bau zu verbessern [4].

Vorabdichtung: Tropf- und Fliesswasser wird an den Austrittsstellen gefasst und abgeleitet. Meistens erfolgt die Vorabdichtung durch Drainage-Halbschalen und Spritzbeton darüber. In Fällen von geringem Wasseranfall, z.B. in Querverbindungen oder Fluchtstollen, kann eine Vorabdichtung ausreichen, wodurch auf die eigentliche Abdichtung verzichtet werden kann [4].

Abdichtungsinjektionen: Die wasserführenden Klüfte des Gebirges bzw. die Poren des Untergrunds werden injiziert mit dem Ziel, die Durchlässigkeit des Gebirges zu verringern [4].

Wasserdichte Betonkonstruktion (WDB – weisse Wanne): starres Abdichtungssystem, welches durch die Minimierung

water conditions, it is possible and probable that within the same tunnel complex, different impermeability classes are required and therefore different waterproofing measures are employed.

The hydrogeological conditions are critical in determining which sealing concept and tunnel sealing system may be used in order to achieve the impermeability objective. In addition, the expected seasonal variation of the hydrogeological conditions need to be considered in the project design.

SIA 272, paragraph 2.1.1: The principle to be applied is that water is always present in the ground [6].

The following should also be applied: During execution, check in situ whether the presumed groundwater conditions, specifically the water volume, pressure and chemistry, correspond to the geological prediction [3]. If deviations are noted, the previously designed measures need to be verified and, if necessary, adapted to amend the situation.

2.3 Waterproofing Measures

The following measures are employed for the required impermeability (report is not necessarily exhaustive):

Preliminary drillings: Exploratory drillings from the working face are auxiliary measures in tunnelling in order to explore the effective groundwater conditions and to improve the face stability during construction [4].

Preliminary dewatering: Dripping and running water is captured at the point where it enters the tunnel. Preliminary dewatering is generally achieved using drainage half-shells covered with shotcrete. In cases of only minor water ingress, e.g. in cross-passages or escape tunnels, this kind of dewatering measure may be sufficient, without the laborious installation of a sealing liner [4].

Waterproofing by grout injection: The water-bearing joints in the rock mass or subsurface pores are grouted with the aim of reducing the permeability of the rock mass [4].

Waterproof concrete structure: Rigid waterproofing system. This method consists in minimising the crack widths and not using a tunnel sealing liner. Waterproof concrete structures require a high quality of the concrete production and execution. Construction joints, predetermined points and potential cracks are sealed using joint tape. All in all, a greater construction thickness is used than structurally necessary. As a fall-back in the event of a leak, the joints and potential cracks should be prepared for subsequent waterproofing grouting.

Use of tunnel sealing liners (for seepage or displacement concept): Waterproofing liners are categorised as flexible sealing systems. For more information see chapter 3.

der Rissbreiten und ohne Dichtungsbahn funktioniert. WDB erfordert hohe Qualitätsanforderungen an die Herstellung und Verarbeitung des Betons sowie an die Ausführung. Arbeitsfugen, Sollbruchstellen und potenzielle Risse werden mit einem Innenfugenband abgedichtet. Insgesamt wird eine grössere Konstruktionsstärke angewendet, als diese statisch im Minimum erforderlich wäre. Als Rückfallebene bei Undichtigkeit sind die Fugen und potenziellen Risse während der Ausführung für eine nachträgliche Abdichtungsinjektion vorzubereiten.

Abdichtung mit Dichtungsbahn bei Ableit- oder Verdrängungskonzept: Dichtungsbahnen gehören in die Kategorie der flexiblen Abdichtungssysteme, siehe dazu Kapitel 3.

Bergwasserdrainage: Beim Ableitkonzept wird das Gewölbe und je nach Erfordernis auch die Sohle entwässert. Neben der Entwässerung im Querschnitt ist der Längsentwässerung grosse Aufmerksamkeit zu widmen. Die Längsentwässerung sollte nach Möglichkeit im Freispiegel erfolgen, sodass auf das Pumpen des Bergwassers von einem Tiefpunkt aus verzichtet werden kann. Die Drainage ist so auszulegen, dass sie dauerhaft funktionstüchtig bleibt. Der Zugang zur Drainage für den Unterhalt ist vorschriftsgemäss einzuplanen.

2.4 Anforderungen an die Dichtigkeit von Bahntunneln

- Für Bahntunnel und zugehörige Nebenbauwerke schreibt die Norm SIA 197/1 folgende Dichtigkeitsklassen (DK) vor [2]:
- Gewölbe über der Fahrbahn, mindestens über die Breite der Fahrzeuge: Dichtigkeitsklasse DK 2
 - Portalbereich (ganzer Querschnitt) und andere frostgefährdete Bereiche: Dichtigkeitsklasse DK 2
 - Nischen und Räume für technische Einrichtungen: Dichtigkeitsklasse DK 1
 - Übrige Bereiche: Dichtigkeitsklasse DK 3

2.5 Anforderungen an die Dichtigkeit von Nationalstrassentunneln

Für Strassentunnel sind die Anforderungen an die Dichtigkeitsklassen in der SIA 197/2 nicht so klar definiert wie in der SIA 197/1 für Bahntunnel.

Die Anforderungen an die Dichtigkeit werden in Abhängigkeit von der Bauwerksnutzung festgelegt. Das ASTRA fordert je nach Nutzung vier Dichtigkeitsklassen, wobei in einer Tunnelanlage in der Regel gleichzeitig mehrere Dichtigkeitsklassen vorkommen (Bilder 5 und 6).

3 Flexible Abdichtungen

Die Wahl des Abdichtungssystems wird durch die Bauwerksgeometrie, die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse (Wasserdruck, Chemismus), die Verlegeart sowie durch Risikoüberlegungen im Schadenfall bestimmt. Sämtliche Abdichtungsmassnahmen für das gesamte Tunnelbauwerk, bestehend aus Tunnel und Nebenanlagen,

Bauwerk	Dichtigkeitsklasse	Merkblatt
Tunnel im Erhaltungsprojekt	DK 2	—
Tunnel im Neubauprojekt	DK 2 (oder DK 1)	—
Technische Räume, Tunnelzentralen	DK 1 (oder DK 2)	24001-10506
Querverbindungen begehbar und befahrbar	DK 2	24001-10705, 24001-10706
Lüftungsstollen	DK 3	—
Lüftungsschacht	DK 3	—
Fluchtstollen, Sicherheitsstollen	DK 3	24001-10707
Pilotstollen, Zugangsstollen als temporäre Bauhilfsmassnahme	DK 4	—

5 Übliche Dichtigkeitsklassen beim ASTRA
Common ASTRA impermeability classes

Groundwater drainage: According to the seepage concept, the vault and, if necessary, the invert is drained. Besides the drainage in the cross section, utmost attention has to be paid to the drainage in the longitudinal section. Horizontal draining should if possible be performed by gravity, in order to avoid the pumping of water from a low to a higher level. The drainage should be designed for permanent use. The maintenance access to the drainage pipe should be planned according to the regulations.

2.4 Impermeability Requirements in Railway Tunnels

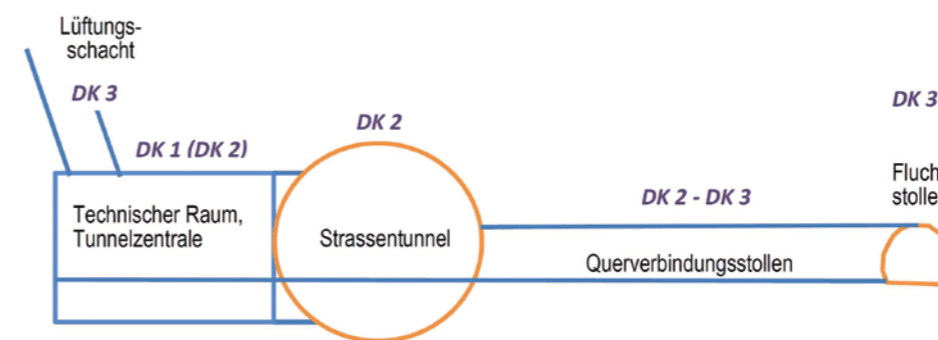
The standard SIA 197/1 specifies the following impermeability classes (DK) for railway tunnels and their related auxiliary structures [2]:

- Vault above the railway, at least for the width of the vehicle: impermeability class DK 2
- Entrance zone (whole cross section) and other frost-susceptible areas: impermeability class DK 2
- Bays and rooms for technical or service installations: impermeability class DK 1
- Other areas: impermeability class DK 3

2.5 Impermeability Requirements in Federal Road Tunnels

The requirements for the impermeability classes in road tunnels are not as clearly defined in SIA 197/2 as they are in SIA 197/1 for railway tunnels.

The requirements for impermeability are specified as a function of the use of the structure. Depending on the use, the Federal Road Office (ASTRA) normally demands the following impermeability classes, whereby different impermeability classes can be applied in the same tunnel facility (Figures 5 and 6).



6 Unterschiedliche Dichtigkeitsklassen in einer Tunnelanlage
Different impermeability classes in a tunnel facility

müssen aufeinander abgestimmt sein. Die Abdichtung ist daher ganzheitlich anzugehen und in einem umfassenden Abdichtungskonzept darzustellen. Dabei sind insbesondere auch alle Anschlüsse des Systems und Schnittstellen im Hinblick auf mögliche Schwachstellen mit Wassereintritten detailliert zu planen und während der Bauausführung genau zu überprüfen. Die Risiken des Abdichtungssystems sind bei der Systemwahl aufgrund der verschiedenen Beanspruchungen objektbezogen abzuschätzen [7].

3.1 Dichtungsbahnen

Dichtungsbahnen gehören in die Kategorie der flexiblen Abdichtungssysteme. Die SIA 272 unterscheidet folgende Dichtungsbahnen, die für Tunnelabdichtungen geeignet sind [6]:

- Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)
- Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen (PBD)
- geosynthetische Tondichtungsbahnen (TDB oder GTD)

3 Flexible Sealing

The choice of the tunnel sealing system should be determined by the structure's geometry, the geological and hydrogeological conditions (water pressure, chemistry), the installation type, and risk considerations in case of damage. All waterproofing measures for the entire tunnel structure, including the auxiliary facilities, must be coordinated. Waterproofing

should be approached holistically and described in a global, comprehensive sealing concept. In particular, all system and interface connections should be planned in detail with regard to possible weak points allowing water ingress and should be closely examined during construction. The risks of the sealing system shall be assessed during system selection, based on the various structure-specific requirements [7].

3.1 Sealing Liners

Sealing liners fall into the category of flexible sealing systems. SIA 272 differentiates the following impermeability liners suitable for tunnel sealing [6]:

- Polymeric geosynthetic liner or barrier (GBR-P)
- Bituminous geosynthetic barrier (GBR-P)
- Clay geosynthetic barrier (GBR-C)

SIA 272 specifies minimum requirements for these systems and distinguishes between the following applications [6]:

Bauwerksart Bauteil	Berg- und Grundwasser	Abdichtungskonzept	Abdichtungsart	Baustoffe	Merkblatt Nr.
1. Tunnelbauwerke					24 001-10500
1.1 Untertagbau, bergmänn. Tunnelbau					24 001-10500
Sohle	nichtdrückend	Ableitungskonzept	-	Drainage	24 001-10501
	drückend	Verdrängungskonzept	Vollabdichtung, LWA	einlagige KDB ≥ 3 mm	24 001-10502
Gewölbe	nichtdrückend	Ableitungskonzept	Regenschirm	einlagige KDB ≥ 2 mm	24 001-10501
	drückend	Verdrängungskonzept	Vollabdichtung	einlagige KDB ≥ 3 mm	24 001-10502
1.2 Tagbautunnel					24 001-10500
Sohle	nichtdrückend	Ableitungskonzept	-	Drainage, evtl. mit TDB	24 001-10501
	drückend	Verdrängungskonzept	Vollabdichtung, LWA	einlagige KDB ≥ 3 mm	24 001-10502
Wände, Decke/Gewölbe	nichtdrückend	Ableitungskonzept	Regenschirm	KDB, PBD, TDB	24 001-10501
	drückend	Verdrängungskonzept	Vollabdichtung	KDB, PBD, TDB	24 001-10502
1.3 Werkleitungskanal					24 001-10404
Deckenbeton	nichtdrückend	Ableitungskonzept	Regenschirm	PBD	24 001-10404
Stofffugen Fertigteilelemente	nichtdrückend	Ableitungskonzept	Membranabdichtung	KDB	24 001-10404
2. Nebenbauwerke					24 001-10500
SOS- und Hydrantennischen	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	24 001-10506
Ausstellbuchten	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	24 001-10506
SiSto und begehbare QV	wie Tunnel	wenn möglich keine Verkleidung und Abdichtung	wie Tunnel	wie Tunnel	24 001-10506
Begehbare QV zw. 2 Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	24 001-10506
Befahrbare QV	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	wie Tunnel	24 001-10506
Technische Lokale, Lüftungszentralen	nichtdrückend oder drückend	Verdrängungskonzept	Vollabdichtung, LWA	einlagige KDB ≥ 3 mm	24 001-10506
Bewehrte Betonbauteile	Feuchtigkeit, Schadstoffe	Rezeptur, Oberflächenschutz, Korrosionsschutz	WDB, Beschichtung, Betonstahllegierung	Expositionskl., WDM, BB, INOX Betonstahl	24 001-10506

7 Anwendbarkeit der Abdichtungssysteme nach Merkblatt 24001-10500 [7]
Applicability of sealing systems compliant with technical sheet 24001-10500 [7]

Die SIA 272 schreibt die Mindestanforderungen für diese Systeme vor und unterscheidet dabei zwischen folgenden Anwendungsgebieten [6]:
 B1.1 Bauten unter Terrain (= übrige Bauwerke)
 B1.2 Tagbautunnel und Galerien
 B2 Untertagbau

Bei der Bestimmung der projektspezifischen Anforderungen an das Abdichtungssystem interessieren uns vorliegend die Anwendungen B1.2 Tagbautunnel und B2 Untertagbau.

3.2 Schutz- und Drainageschichten

Wo Dichtungsbahnen verlegt werden, sind auch Schutzschichten gefragt, welche die Abdichtung vor mechanischen Beschädigungen schützen sollen. Je nach Bedarf werden auch Drainageschichten benötigt. Schutz- und Drainageschichten gehören zum Abdichtungssystem, wie in Kapitel 1.3 erläutert. Die Produktanforderungen sind ebenfalls in der SIA 272 geregelt [6].

3.3 Anwendbarkeit der Abdichtungssysteme

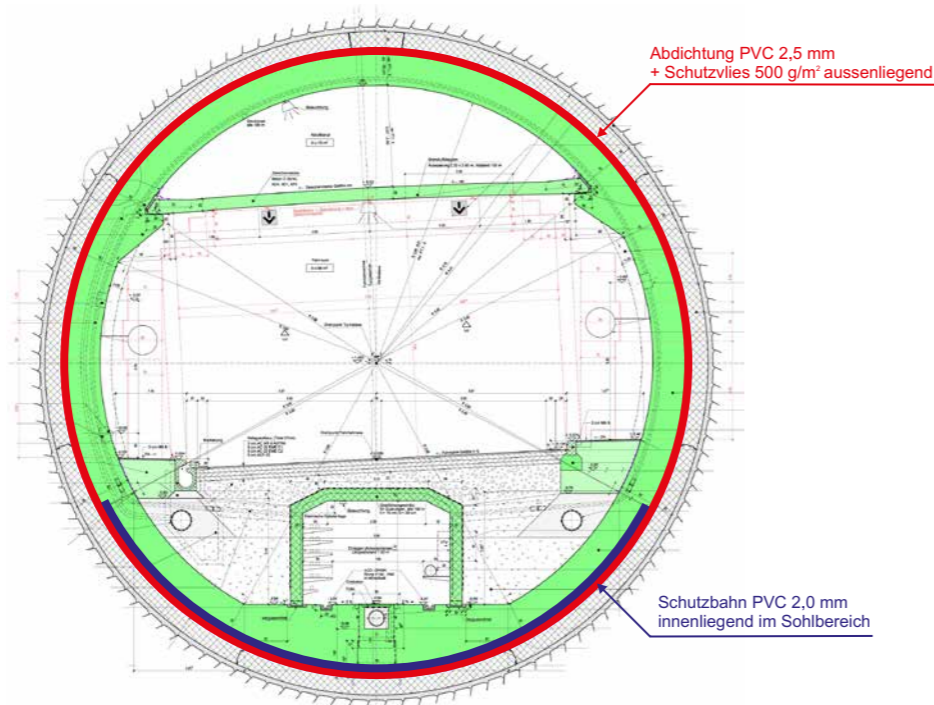
Ob das Ableitkonzept oder das Verdrängungskonzept als Abdichtungskonzept zur Anwendung kommt, muss ausführungstechnisch evaluiert und projektspezifisch entschieden werden. Die Wahl des Abdichtungskonzepts und des Abdichtungssystems muss in Abhängigkeit von den Dichtigkeitsanforderungen und den Umweltauflagen erfolgen.

Die vorliegende Tabelle aus [7] zeigt die Anwendbarkeit der Abdichtungskonzepte und der Abdichtungssysteme und dient als Projektierungshilfe (Bild 7).

Beim Verdrängungskonzept sind ergänzende Vorkehrungen für das Detektieren und Ableiten des Leckwassers (Leckwasser-Ableitsystem LWA) sowie allenfalls die Möglichkeit für nachträgliche Abdichtungsinjektionen einzuplanen [1].

4 Neubauprojekte des ASTRA

An vier Neubauprojekten wird aufgezeigt, wie die Tunnelabdichtung realisiert wurde. In Kapitel 4 und 5 wird zudem ersichtlich, dass für neue Tunnel höhere Dichtigkeitsanforderungen verlangt werden als für bestehende.



8 Vollabdichtung Belchentunnel [8]
 Belchen Tunnel circular sealing [8]

- B1.1 Structures below ground (= other structures)
- B1.2 Cut-and-cover tunnels and galleries
- B2 Underground construction

When determining the project-specific requirements for the sealing system, the applications B1.2 cut-and-cover tunnels and B2 underground construction are of interest to us.

3.2 Protective and Drainage Layers

Where impermeability liners are installed, the use of protective layers is also required, which are intended to protect the waterproofing liner from mechanical damage. Drainage layers may also be required. Protective and drainage layers are part of the sealing system, as explained in chapter 1.3. The product requirements of the protective and drainage layers are also reported in SIA 272 [6].

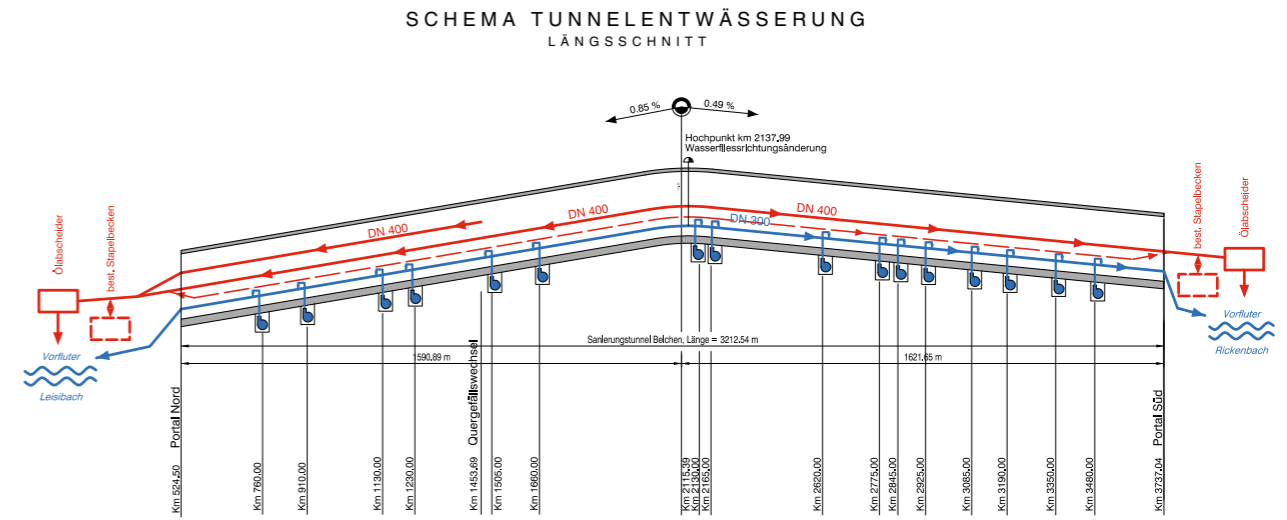
3.3 Applicability of Sealing Systems

Whether the seepage concept or the displacement concept should be applied, it is recommended to perform an evaluation with a view to execution in order to decide on a project-specific basis. The choice of sealing concept and the sealing system depends on the requirements of impermeability and environmental conditions.

The table below taken from [7] shows the applicability of the sealing concepts and systems and may be used as a project design tool (Figure 7).

The water displacement concept requires additional arrangements for the detection and discharge of the leakage

Quelle/credit: Detailprojekt TBM 2012, IG ST Belchen



9 Anordnung der Pumpschächte im Längsschnitt, Belchentunnel [8]
 Pumping shaft configuration in longitudinal section, Belchen Tunnel [8]

4.1 N2, Sanierungstunnel Belchen [8]

Bild 8 zeigt die Vollabdichtung des durch TBM aufgefahrenen Tunnels im Normalprofil. Der Belchentunnel liegt teilweise im stark quellfähigen Gipskeuper. Gipskeuper quillt mit starker Volumenzunahme, sobald er mit Wasser in Berührung kommt (Gipsquellen). An 16 Stellen ausserhalb des quellfähigen Gesteins wurden Sicker- und Pumpschächte eingerichtet (Bilder 9 und 10). Hier ist die Abdichtung im Sohlbereich lokal unterbrochen, damit das längs verlaufende Bergwasser gefasst werden kann und nicht dem Gipskeuper zugeführt wird [8].

4.2 N1, dritte Röhre Gubristunnel/ Ausbau Nordumfahrung Zürich

Die dritte Röhre Gubristunnel wird konventionell erstellt. Die Regenschirmabdichtung sorgt dafür, dass das Bergwasser drucklos abgeleitet und unten auf zwei Seiten gefasst wird. Das Bergwasser aus den Drainageleitungen wird alle

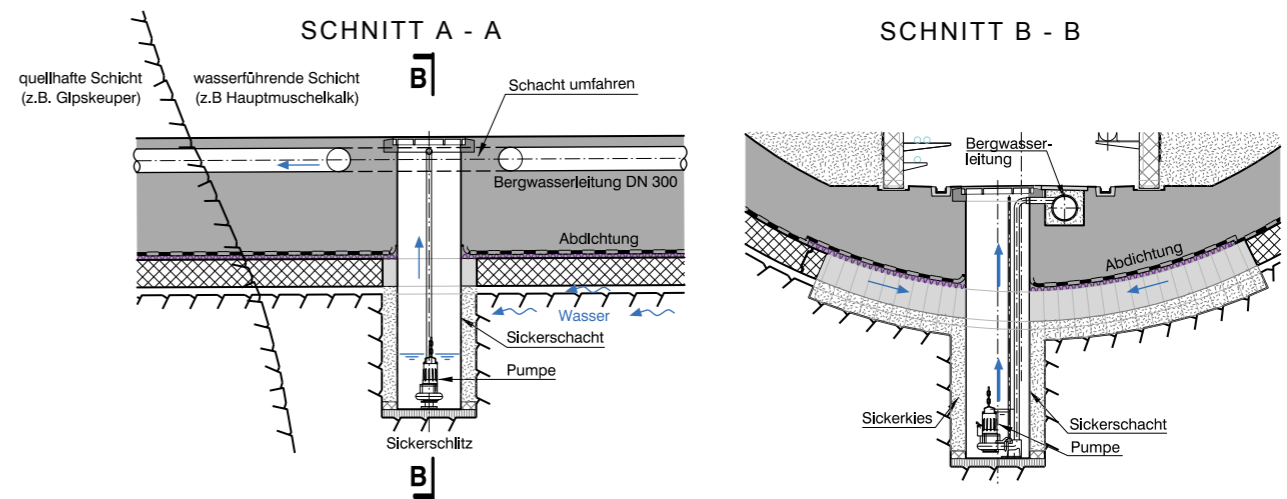
water (leakage water system) as well as an option for subsequent waterproofing grouting [1].

4 New Construction Projects

The application of tunnel sealing is shown on four new construction tunnels. Chapters 4 and 5 also illustrate that the impermeability requirements for new tunnels are higher than for existing tunnels.

4.1 N2, New Tunnel Construction Belchen

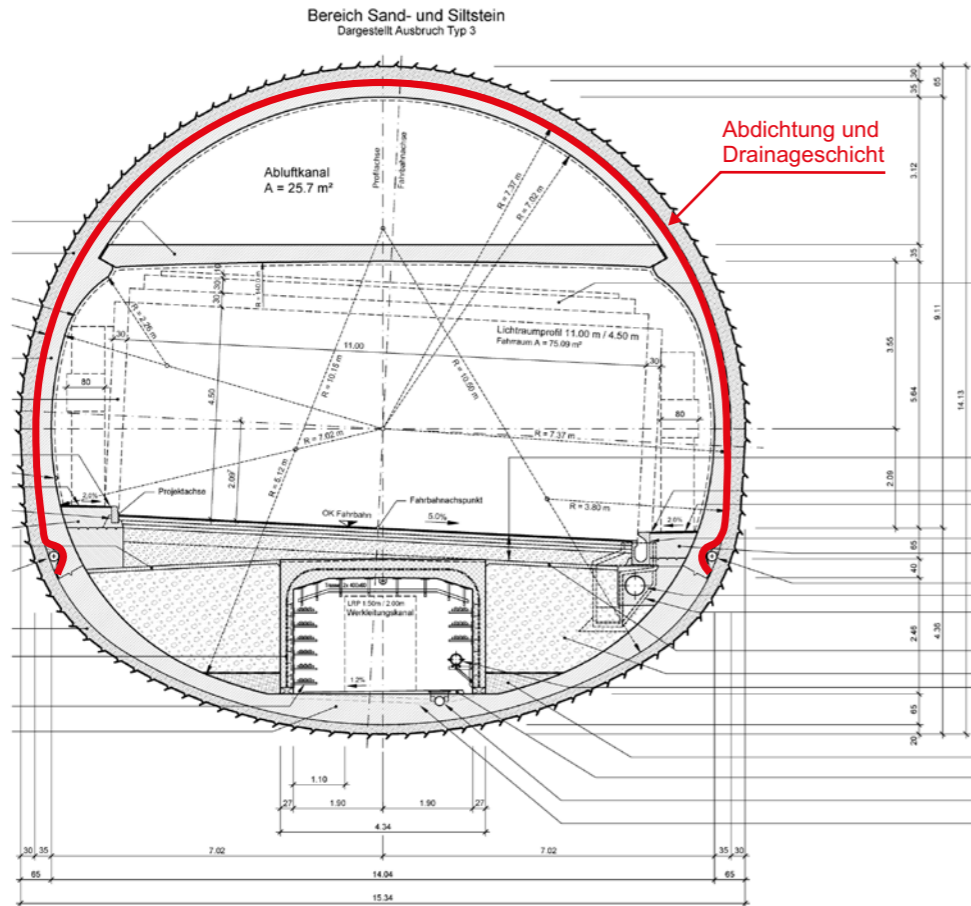
A new Belchen tunnel is under construction in order to refurbish the two existing tunnels. Figure 8 shows the circular sealing of the TBM tunnel in the standard profile. The Belchen Tunnel is partially located in the highly swelling Gypsum Keuper (Upper Triassic). Gypsum Keuper swells with a significant growth in volume as soon as it



10 Partielle Fassung und Ableitung des Bergwassers, Pumpschacht Belchentunnel [8]
 Partial collection and drainage of groundwater, Belchen Tunnel pumping shaft [8]

Quelle/credit: Detailprojekt TBM 2012, IG ST Belchen

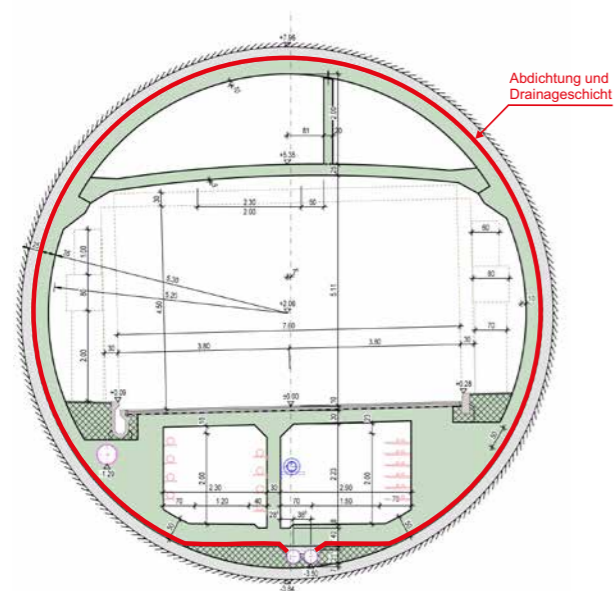
Quelle/credit: Detailprojekt TBM 2012, IG ST Belchen



Quelle/credit: Detailprojekt 2015, INGE AHB

11 Normalprofil dritte Röhre Gubristtunnel [9]
Standard profile, Gubrist Tunnel third tunnel [9]

75 m in die unter dem Welk liegende Bergwassersammelleitung geführt (Bild 11).



Quelle/credit: Ausführungsprojekt 2018, IG Gottardo Due GZ

12 Zweite Röhre Gotthardtunnel, Normalprofil TBM [10]
Gotthard Tunnel second tube, standard profile TBM [10]

comes into contact with water (gypsum upwelling). Infiltration and pumping shafts were built at 16 points before the water could reach the swelling rock (Figures 9 and 10). Here, the sealing of the invert is locally interrupted in order to collect the groundwater running longitudinally. This means that the water cannot enter the Gypsum Keuper [8].

4.2 N1, Third Tube Gubrist Tunnel in Zurich

On the northern bypass in Zurich, the third Gubrist Tunnel is being excavated with a roadheader. The umbrella sealing ensures that the groundwater is drained by gravity and collected on two sides at the foot. The groundwater seepage pipes are connected every 75 m to the main collector beneath the service duct (Figure 11).

4.3 N2, Second Tube Gotthard Tunnel (secondo tubo San Gottardo)

The second Gotthard Road Tunnel is planned with a non-pressure-retaining umbrella or circular sealing (Figure 12).

Figure 13 shows the impermeability classes adopted for the construction project. The cross-passages in hydrogeologically favourable strata are planned as single shotcrete

Dichtigkeitsklasse DK (SIA 272, 2.2.2)
generelle Zuordnung:

- Tunnel inkl. Buchten, Überfirstungen und Nischen, - befahrbare Querverbindungen, - begehbarer QV im Bereich von BSA-Anlagen (Unterstationen und technische Nischen), - LZ und Technische Nischen	DK 2
- Lüftungsstollen, - begehbarer QV im Bereich ohne BSA-Anlagen	DK 3
- Zugangsstollen (Pilotstollen)	DK 4

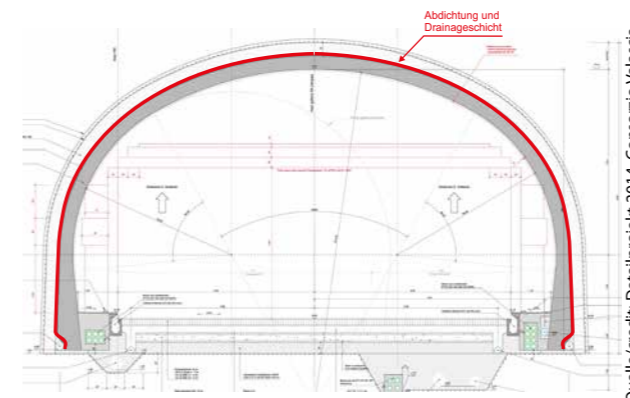
Quelle/credit: Ausführungsprojekt 2018, IG Gottardo Due GZ

13 Zweite Röhre Gotthardtunnel, Festlegung der Dichtigkeitsklassen [10]
Gotthard Tunnel second tube, specification of impermeability classes [10]

4.3 N2, zweite Röhre Gotthardtunnel (secondo tubo San Gottardo)

Die zweite Röhre Gotthardtunnel ist als nicht druckhaltende Regenschirm- oder Vollabdichtung geplant (Bild 12).

Im Bild 13 sind die im Ausführungsprojekt zugrunde gelegten Dichtigkeitsklassen dargestellt. Die Querverbindungen in hydrogeologisch günstigen Schichten sind einschalig nur mit der Vorabdichtung geplant, das heisst ohne Abdichtungsbahnen. Diese Lösung spart Kosten und Bauzeit,



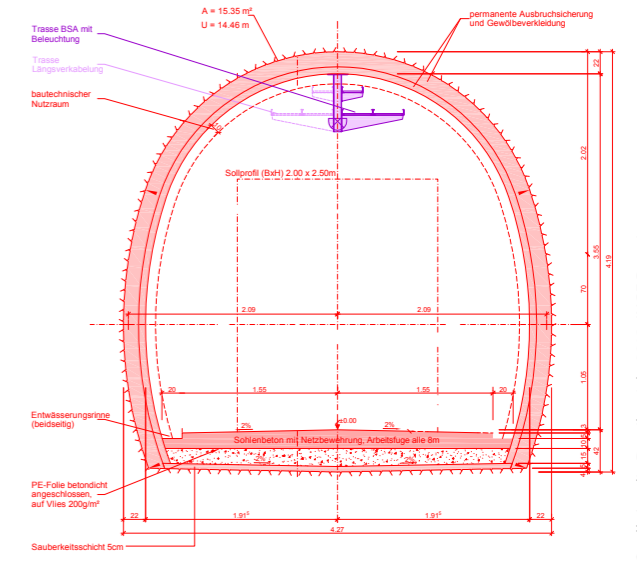
Quelle/credit: Detailprojekt 2014, Consorzio Valascia

14 Abdichtung im Untertagbaubereich, Tunnel Stalvedro [11]
Sealing of underground structures, Stalvedro Tunnel [11]



Quelle/credit: Detailprojekt 2014, Consorzio Valascia

15 Abdichtung im Tunnel Stalvedro [11]
Stalvedro Tunnel sealing [11]



Quelle/credit: Detailprojekt 2013, INGE Beverin

16 Sicherheitsstollen und Querverbindungen Tunnel Viamala [12]
Viamala Tunnel safety tunnel and cross-passages [12]

lining and only with preliminary dewatering, meaning without using a sealing liner. This solution will save costs and time by dispensing with a double-wall and with a geosynthetic sealing system.

4.4 N2, Stalvedro Tunnel

The S-N Stalvedro Tunnel was enlarged from two to three lanes. This means that both the excavation stabilisation and the interior vault were renewed. A 2.5 mm thick PVC geosynthetic liner was used, combined with a drainage mat (Figure 14).

The base concrete with an underlying drainage membrane is water-resistant. Any water infiltrating through cracks from below is drained by the subgrade drainage system (Figure 15).

4.5 N13, Viamala Safety Tunnel

Safety tunnels serve as escape routes on one hand and provide new possibilities for electrical installations on the other hand. The favourable hydrogeological situation and the rare use of the escape tunnels (only in emergency cases) allowed us to forgo using a geosynthetic liner or a sprayed barrier (Figure 16). Water-bearing cracks and gaps were pre-sealed using half-shells.

5 Maintenance of Existing Tunnels

Two existing road tunnels illustrate what kind of challenges a leaking tunnel and a dysfunctional drainage system can present.

5.1 N16, Tavannes-Bözingenfeld, Taubenlochschlucht

The nine tunnels in the Taubenlochschlucht were built in several stages between 1962 and 1988. Some of these tunnels do not have an umbrella sealing liner. Due to leakage in the vault, a significant water ingress and harsh



Quelle/credit: Massnahmenprojekt UeMa Glaçons, 2015, Groupement BG-EBBE-MFR et Groupement GIS

17 Drückendes Wasser und Vereisung im Tunnelinnenraum, Taubenlochschlucht [13]
Pressurised water and freezing in the tunnel interior, Taubenlochschlucht [13]

indem auf einen zweischaligen Ausbau mit einem Abdichtungssystem verzichtet wird.

4.4 N2, Galleria dello Stalvedro

Die Röhre S-N des Stalvedrotunnels wurde von zwei auf drei Spuren aufgeweitet. Damit wurde sowohl die Ausbruchssicherung wie auch das Innengewölbe neu erstellt. Als Abdichtung wurde eine Kunststoffdichtungsbahn PVC 2,5 mm – mit einer Drainagematte kombiniert – verwendet (Bild 14).

Der Sohlbeton mit darunterliegender Noppenbahn ist wasserabweisend. Das durch allfällige Risse von unten infiltrierte Wasser wird mit der Planumsentwässerung abgeleitet (Bild 15).

4.5 N13, Sicherheitsstollen Viamala

Sicherheitsstollen dienen einerseits als Fluchtwege, andererseits als Räume für elektrische Installationen. Die hydrogeologischen Verhältnisse und die seltene Nutzung des Sicherheitsstollens Viamala und Bärenburg machten es möglich, auf die Anwendung von Dichtungsbahnen bzw. einer Spritzabdichtung zu verzichten (Bild 16). Wasserführende Klüfte wurden mit Halbschalen als Vorabdichtung abgedichtet.

5 Erhaltungsprojekte bestehender Strassentunnel

Anhand von zwei Erhaltungsprojekten bestehender Strassentunnel wird aufgezeigt, welche Herausforderungen ein undichter Tunnel und eine nicht mehr funktionstüchtige Drainage stellen können.

5.1 N16, Tavannes–Bözigenfeld, Tunnel der Taubenlochschlucht

Die insgesamt neun Tunnel der Taubenlochschlucht wurden in mehreren Etappen zwischen 1962 und 1988 erstellt. Einige dieser Tunnel verfügen über keine Regenschirmabdichtung. Aufgrund der Undichtigkeit des Tunnelgewölbes, des grossen Wasserandrangs und der rauen klimatischen Bedingungen im Winter vereisten die Fahrbahn und

climatic conditions in winter, the road and the verge were repeatedly covered with a layer of ice, representing a hazard to road users and repeated obstructive operations as a result of the reinstatement measures (Figure 17).

Drainage holes were installed in 2016 as transitional measures prior to the actual UPIaNS maintenance project, together with discharge slits that captured the water in a controlled way (Figure 18). Cost of measures in seven short tunnels: approx. 1.1 million Swiss francs [13].



Quelle/credit: Massnahmenprojekt UeMa Glaçons, 2015, Groupement BG-EBBE-MFR et Groupement GIS

18 Massnahme Drainagebohrungen und Ableitungsslitze, Taubenlochschlucht [13]
Drainage bores and discharge slits, Taubenlochschlucht [13]

das Bankett immer wieder, was für die Verkehrsteilnehmer eine Gefahr darstellte und wegen der Aufräumarbeiten den Betrieb wiederholt behinderte (Bild 17).

Als Übergangsmassnahmen vor den eigentlichen UPIaNS-Massnahmen wurden im Jahr 2016 Drainagebohrungen gebohrt und Ableitungsslitze gefräst, welche das Wasser kontrolliert in die Sammelleitung führen (Bild 18). Baukosten der Massnahme in sieben kurzen Tunneln: ca. 1,1 Mio. Franken [13].

5.2 N13, Tunnel Benabbia, Mesocco

Im Misoxer Tunnel Benabbia wurden starke Wasserinfiltrationen festgestellt, welche sich als dunkle Flecken am Parament manifestierten und eine Degradation der Bau-substanz verursachten (Bild 19).

Als Sanierungsmassnahme wurden kleine Nischen mit den Innenabmessungen von 2,0 × 1,0 m im Grundriss geschaffen, von wo aus Drainagebohrungen in mehrere Richtungen mit der Länge von bis zu 24 m ausgeführt wurden (Bild 20). Baukosten der Massnahme: ca. 1,7 Mio. Franken [14].



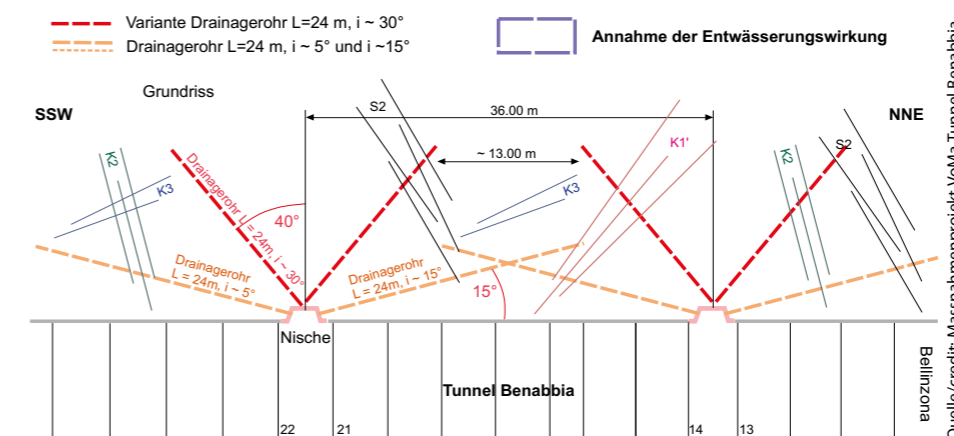
Quelle/credit: Massnahmenprojekt VoMa Tunnel Benabbia Mesocco 2015, E. Toscano SA

19 Wasserinfiltrationen, Tunnel Benabbia [14]
Water infiltration, Benabbia Tunnel [14]

5.2 N13, Benabbia Tunnel, Mesocco

Significant water infiltrations were detected in the Benabbia Tunnel in Mesocco, which were manifested as dark spots on the sidewall and caused a degradation of the building (Figure 19).

As refurbishment, small bays with internal ground-plan dimensions of 2.0 × 1.0 m were created, from where up to 24 m long drainage boreholes were drilled in several directions (Figure 20). Cost of measure: approx. 1.7 million Swiss francs [14].



Quelle/credit: Massnahmenprojekt VoMa Tunnel Benabbia, Mesocco, 2015, E. Toscano SA / BauGrundRisk

20 Massnahme Drainagebohrungen, Tunnel Benabbia [14]
Drainage hole measures, Benabbia Tunnel [14]

Literatur/References

[1] Norm SIA 197 (2004) Projektierung Tunnel – Grundlagen
 [2] Norm SIA 197/1 (2004) Projektierung Tunnel – Bahntunnel
 [3] Norm SIA 197/2 (2004) Projektierung Tunnel – Strassentunnel
 [4] Norm SIA 198 (2004) Untertagbau – Ausführung
 [5] Norm SIA 270 (2014) Abdichtungen und Entwässerungen – Allgemeine Grundlagen und Abgrenzungen
 [6] Norm SIA 272 (2009) Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagbau
 [7] Fachhandbuch ASTRA Tunnel/Geotechnik, Merkblätter 24 001-10500 Abdichtungen – Allgemeines, 24 001-10501 Regenschirmabdichtung, 24 001-10502 Vollabdichtung, 24 001-10503 Dichtungsbahnen, 24 001-10506 Abdichtung und Drainage von Nebengebäuden, 24 001-10601 Drainage- und Bergwasserleitung.
 [8] Projektdokumentation Tunnel Belchen, Detailprojekt TBM 2012, IG ST Belchen
 [9] Projektdokumentation Gubristtunnel dritte Röhre 2015, Detailprojekt, INGE AHB
 [10] Projektdokumentation zweite Röhre Gotthardtunnel 2TG und GdA, AP Normalprofil und Abdichtungskonzept, Ausführungsprojekt 2018, IG Gottardo Due G2
 [11] Projektdokumentation Galleria dello Stalvedro, Detailprojekt 2014, Consorzio Valascia
 [12] Projektdokumentation Sicherheitsstollen Viamala, Detailprojekt 2013, INGE Beverin
 [13] Projektdokumentation N16 Tavannes–Bözigenfeld/Tunnel Taubenlochschlucht: MP UeMa Glaçons, 2015, Groupement BG-EBBE-MFR et Groupement GIS
 [14] Projektdokumentation N13 MP VoMa Tunnel Benabbia, Mesocco, 2015, E. Toscano SA / BauGrundRisk

Martin Keller, Referent, dipl. Bauingenieur HTL/SIA, EMBA, SikaBau AG, Schlieren/CH
Oliver Haase, Co-Autor, dipl. Bauingenieur FH, Sika Schweiz AG, Zürich/CH

Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau

Theorie und Praxiserfahrung

Um eine hohe Lebensdauer von Tunnelbauwerken zu erreichen, sind Abdichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen heutzutage nicht mehr wegzudenken. Traditionell wurde in der Schweiz das Ableitkonzept eingesetzt, in den letzten Jahren kommt jedoch vermehrt das Verdrängungskonzept zum Einsatz. Die unterschiedlichen Konzepte sollen hier genauer erläutert werden.

Use of Plastic Sealing Materials in Tunnel Construction

Theory and Practical Experience

In order to achieve a long service life for tunnel structures, sealing systems featuring plastic sealing materials are now an essential requirement. Although the drainage concept has traditionally been deployed in Switzerland, recent years have been marked by increased use of the displacement concept. This contribution will explain the different concepts in greater detail.

1 Einführung

Kunststoffabdichtungen werden mittlerweile bei allen wichtigen Tunnels in der Schweiz verbaut. Vor 100 Jahren, bei der Elektrifizierung des Gotthardtunnels, kamen noch einfache Abdichtungsmörtel zur Anwendung. Heute werden moderne Kunststoffdichtungsbahnen mit einer sehr hohen Lebensdauer eingesetzt, welche uns einen sicheren Betrieb und eine lange Nutzung des Tunnels gewährleisten. Andere Abdichtungskonzepte wie zum Beispiel WD-Betonkonstruktionen oder Spritzabdichtungen sind im Tunnelbau bis jetzt noch nicht verbreitet im Einsatz und werden in diesem Beitrag nicht weiter beschrieben.

2 Einwirkungen auf das Abdichtungssystem

Tunnelbauwerke werden heute für eine Lebensdauer von über 100 Jahren erstellt. Dem Abdichtungssystem kommt somit eine zentrale Bedeutung zu und es muss hohen Anforderungen genügen. So schützt es die Tragkonstruktion, gewährleistet den sicheren und störungsfreien Betrieb sowie die Dauerhaftigkeit und das einwandfreie Funktionieren der technischen Installationen innerhalb des Bauwerks. Nicht nur im Betrieb, sondern auch während der Bauphase muss das Abdichtungssystem unterschiedlichen chemischen und mechanischen Belastungen widerstehen.

Die Kosten für das Abdichtungssystem betragen je nach System ca. zwischen 4% und 6% der Gesamtbaukosten, sind aber

1 Introduction

Plastic sealing membranes are now installed in all important tunnels in Switzerland. Back when the Gotthard Tunnel was being electrified 100 years ago, basic plugging mortar was still being used. The cutting-edge plastic sealing materials that are deployed today feature a very long service life, guaranteeing safe operation and extended use of the tunnel. Other sealing concepts, such as heat-insulated concrete structures and spray-on sealing, have not yet entered widespread use in tunnel construction and will not be addressed any further in this contribution.

2 Effects on the Sealing System

Modern-day tunnel structures are created for a service life of over 100 years, meaning that the sealing system is of central importance and has to meet demanding requirements. It protects the supporting structure and guarantees safe and uninterrupted operation, durability and flawless functioning of the technical installations within the structure. The sealing system is required to withstand various chemical and mechanical loads, both in the course of operation and during the construction phase.

The costs for the sealing system account for around 4–6% of the total construction costs depending on the system in question, but nevertheless represent an important invest-

Utilisation de lés d'étanchéité plastique dans la construction de tunnels

Théorie et expérience pratique

Dans le concept d'évacuation, l'eau existante est évacuée sans pression via le dispositif de drainage. L'effet est ici identique à celui d'un parapluie. À l'opposé, le concept de refoulement offre une étanchéité totale, comparable à celle d'une combinaison de plongeur ou d'un sous-marin. L'étanchement s'effectue au moyen de plusieurs couches, les joints étant doublement soudés et divisés en différents secteurs, ce qui permet ultérieurement, en cas de fuite, de remplir le secteur non étanche entre les lés. Au-delà d'une planification correcte et d'une exécution professionnelle, une assurance qualité exhaustive constitue également un critère primordial pour obtenir un ouvrage étanche.

für die Nutzung eine wichtige Investition. Die Wahl einer qualitativ hochwertigen Abdichtungslösung zahlt sich immer aus.

Da sie während der gesamten Lebensdauer das Bauwerk und dessen Installationen vor Feuchtigkeit und Nässe aus dem Untergrund schützt, wird die ursprüngliche Investition bei den zukünftigen Wartungs- und Reparaturkosten eingespart.

Abdichtungsmembranen sind einer Vielzahl von Einwirkungen ausgesetzt, denen sie während der Bauphase und später im Betrieb widerstehen müssen. Im Folgenden eine Zusammenstellung der wichtigsten Einflüsse.

2.1 Wasser

Wasser ist ein ständiger Begleiter bereits während der Einbauphase. Neben feuchten Oberflächen kann es auch lokal zu Wassereintrüben kommen. Das Abdichtungssystem schützt die Betonkonstruktion vor aggressivem Wasser und die Installationen vor Feuchtigkeit und Nässe.

2.2 Statische und dynamische Belastung

Unebene Untergründe, Beton, Armierung oder Baustellenverkehr sind nur einige Einwirkungen, die während der Bauphase direkt auf das Abdichtungssystem Einfluss nehmen. Im Betrieb ist die Abdichtung Auftrieb und Setzungen, Wasserdruck sowie geostatischen und mechanischen Kräften ausgesetzt. Die daraus entstehenden Bewegungen müssen ohne Beeinträchtigung überbrückt werden. Eine gewisse Flexibilität der Kunststoffdichtungsbahn bei gleichzeitig hoher mechanischer Beständigkeit ist deshalb eine wichtige Voraussetzung.

2.3 Feuer

Im Bauzustand hängt immer ein Teil der fertig verlegten Abdichtung offen im Tunnel, bevor sie durch den Betoninnenring gestützt wird. Beim Bau eines Tunnels wird im

Impiego delle guaine impermeabilizzanti di plastica nella costruzione di gallerie

Teoria ed esperienze pratiche

Nel concetto di deflusso, l'acqua prodotta viene convogliata senza pressione tramite un drenaggio. Il sistema funziona come un ombrello. Il concetto di dislocamento, al contrario, rappresenta un'impermeabilizzazione completa, paragonabile a una muta subacquea o a un sommergibile. L'impermeabilizzazione è realizzata a più strati, le giunture sono saldate due volte e suddivise in settori. In questo modo, successivamente, in caso di perdite, il settore non stagno tra le guaine può essere riparato per iniezione. Per una costruzione stagna, oltre alla progettazione corretta e all'esecuzione a regola d'arte, è importante anche un'assicurazione completa della qualità.

ment in terms of usability. It is always worth paying for a high-quality sealing solution.

As they protect the structure and its installations against moisture and wetness from the substrate throughout the entire service life, return on investment is achieved by saving on future maintenance and repair costs.

Sealing membranes are exposed to a variety of influences that they are required to withstand during the construction phase and subsequently when in operation. The most important influences are summarised below.

2.1 Water

Water is a constant factor as early as the installation phase, with moist surfaces and even localised ingress of water both possibilities. The sealing system protects the concrete structure against aggressive water and shields the installations from moisture and wetness.

2.2 Static and Dynamic Loads

Uneven substrates, concrete, reinforcement and construction site traffic are just some of the influences that directly affect the sealing system during the construction phase. During operation, the sealing is exposed to uplift, settlements, water pressure, and geostatic and mechanical forces. The resulting movements must be bridged without causing any interference. It is therefore essential for the plastic sealing material to feature a certain flexibility while simultaneously maintaining a high level of mechanical resistance.

2.3 Fire

During the construction phase, part of the fully installed sealing always hangs open in the tunnel before being supported by the concrete lining. During the construction of a tunnel,

Brand- und Löschkonzept eine Vorlaufdistanz definiert, also die maximal zulässige Länge der ungeschützten Tunnelfolie. Um die Gefahr der Ausbreitung eines Feuers während des Bauzustandes zu vermindern, werden Kunststoffdichtungsbahnen im Tunnelbau zusätzlich mit brandhemmenden Inhaltsstoffen ausgerüstet. Zusammen mit der Vorlaufdistanz erreicht man so eine hohe Sicherheit im Brandfall.

2.4 Temperatur

Durch den Betoniervorgang oder bei Injektionen ist das Abdichtungssystem kurzzeitig erhöhten Temperaturen ausgesetzt. Im Portalbereich kann es im Winter zu tiefen Temperaturen kommen, während bei grosser Gebirgsüberdeckung Dauerbelastungen von bis zu +45°C vorherrschen können. Generell sollte die Temperatur eines flüssigen Mediums in Kontakt mit den Kunststoffdichtungsbahnen nicht über +35°C betragen.

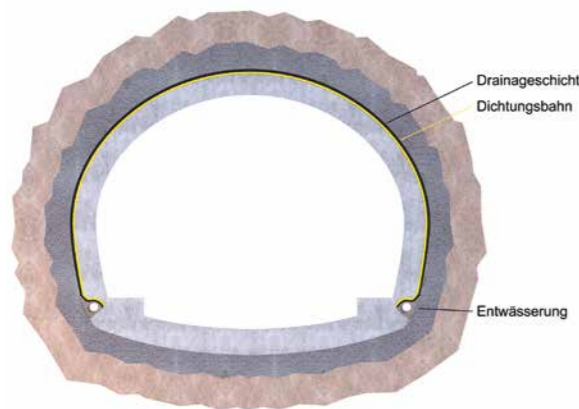
Herrschen höhere Temperaturen vor, so kann die Kunststoffdichtungsbahn für einen erhöhten Temperatureinsatz nachgerüstet werden, wie dies zum Beispiel bei der NEAT erfolgte. Beim Gotthard-Basistunnel herrschten mancherorts Wassertemperaturen von über +40°C, worauf die Abdichtungsbahn speziell ausgelegt wurde.

2.5 Chemische Einflüsse

Eine Abdichtungsbahn muss während des Einbringens dem alkalischen Beton widerstehen. Zudem greift das anfallende Berg- oder Grundwasser ebenfalls die Membrane an, denn es kann entweder sehr weich sein, oder darin sind Sulfate, Chloride oder weitere Stoffe gelöst. All diesen chemischen Einflüssen muss bei der Auswahl der Abdichtung Rechnung getragen werden.

2.6 Berücksichtigung in der Planung

Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, ist ein funktionstüchtiges Abdichtungssystem von zentraler Bedeutung. Alle möglichen Einflüsse müssen schon in der Planungsphase berücksichtigt werden, damit die richtige Abdichtungsmembrane ausgewählt werden kann. Da bei jedem Bauwerk die Einflüsse unterschiedlich stark ins Gewicht fallen, ist für jedes Projekt die individuell optimale Lösung zu finden.



1 Ableitkonzept
Drainage concept

a clearance distance is defined in the fire and extinguishing concept as the maximum permissible length of the unprotected tunnel foil. In order to reduce the risk of a fire spreading during the construction phase, plastic sealing materials in tunnel constructions are additionally equipped with fire-retardant materials. Coupled with the clearance distance, this helps ensure a high level of safety in the event of fire.

2.4 Temperature

During the concreting or grouting process, the sealing system is briefly exposed to increased temperatures. The portal area may experience low temperatures in winter, whereas areas with a thick rock cover may witness continuous loads of up to +45°C. In general, the temperature of a liquid medium that is in contact with the plastic sealing materials should not exceed +35°C.

In the event of higher temperatures, the plastic sealing material can be retrofitted for use in this context – as was the case with the NRLA, for example. As certain areas of the Gotthard Base Tunnel featured water temperatures of over +40°C, the sealing material was therefore produced with a special design.

2.5 Chemical Influences

The sealing material must be able to withstand the alkaline concrete while it is attached. The membrane is also attacked by the accruing groundwater, which may either be very soft or contain dissolved sulphates, chlorides and other substances. All these chemical influences must be taken into account when selecting the sealing.

2.6 Consideration during Planning

A well-functioning sealing system is of central importance when it comes to ensuring durability. All potential influences have to be considered as early as the planning phase in order to ensure that the right sealing membrane is selected. As the relative importance of the influences varies for each structure, it is necessary to identify the ideal solution for the specific project in question.

3 Sealing Concepts

Depending on the load, a tunnel structure will be designed using the drainage concept (featuring umbrella seals) or the displacement concept (all-round sealing). The sealing concept depends on the use of the structure, the hydrogeological, ecological and climatic conditions, and the water pressure. It is essential for all of these aspects to be taken into account when planning tunnel projects so as to meet the high demands in relation to the impermeability of the structure.

Given the requirement for dryness in sealing class 1 'completely dry' or 2 'dry to slightly moist', tunnel structures are normally created according to the SIA standard [1]. This standard also features sealing classes 3 'moist' and 4 'moist to wet', although these are only used for ancillary structures at most in relation to tunnel construction (e.g. crosscuts).

3 Abdichtungskonzepte

Je nach Beanspruchung wird ein Tunnelbauwerk im Ableitkonzept (Regenschirmabdichtung) oder im Verdrängungskonzept (Rundumabdichtung) ausgeführt. Das Abdichtungskonzept ist abhängig von der Bauwerksnutzung, den hydrogeologischen, ökologischen und klimatischen Bedingungen sowie vom Wasserdruck. All diese Aspekte sind bei der Planung von Tunnelprojekten unbedingt zu beachten, um die hohen Anforderungen an die Dichtigkeit des Bauwerkes zu gewährleisten.

In der Regel werden Tunnelbauwerke mit der Anforderung an die Trockenheit in der Dichtigkeitsklasse 1 «vollständig trocken» oder 2 «trocken bis leicht feucht» gemäss SIA-Norm [1] erstellt. Darüber hinaus kennt die Norm noch die Dichtigkeitsklassen 3 «feucht» und 4 «feucht bis nass», welche im Tunnelbau jedoch höchstens bei Nebenbauwerken (z. B. Querverbindungen) zum Tragen kommen.

3.1 Übersicht über die beiden Konzepte

Beim Ableitkonzept [2] wird das Grund- und Bergwasser drucklos über die Drainage und Entwässerungselemente abgeführt (siehe Bild 1). Eine funktionierende Drainage übernimmt dabei eine zentrale Aufgabe.

Wichtige Merkmale sind:

- Konzept mit dauerhafter Drainage
- geringere Kosten in der Ausführung
- geringerer Wasserdruck und dadurch Reduktion der Betondicke
- wirtschaftlicher Ausbau unter schwierigen hydrologischen Bedingungen
- höhere Unterhalts- und Wartungskosten
- mögliche Verkehrsbehinderung während Unterhaltsarbeiten

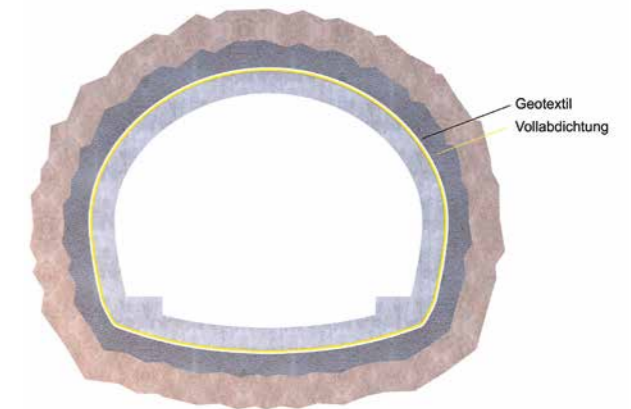
Beim Verdrängungskonzept wird das Grund- und Bergwasser nicht abgeleitet, sondern durch eine druckwasserhaltende Rundumabdichtung verdrängt (siehe Bild 2). Eine dauerhafte Abdichtungsmembrane ist hier wesentlich.

Wichtige Merkmale sind:

- erhöhte Anforderung der Abdichtung gefordert, Membrandicke mehr als 3 mm
- höhere Ausbaukosten
- Anpassung der Betonkonstruktion an den Wasserdruck
- niedrigere Unterhalts- und Wartungskosten
- geringere Beeinflussung des Grundwasserspiegels nach Bauabschluss
- geringere Beeinflussung des Grundwasservorkommens

3.2 Ableitkonzept

Das Ableitkonzept wirkt wie ein Regenschirm. Anfallendes Wasser wird zwischen Ausbruchsicherung und Abdichtungsmembrane in einer Drainageschicht drucklos abgeleitet, seitlich oder an der Sohle gesammelt und über eine Drainageleitung dem Vorfluter zugeführt (siehe Bild 3).



2 Verdrängungskonzept
Displacement concept

3.1 Overview of Both Concepts

In the drainage concept [2], the groundwater is discharged under gravity via the drainage and dewatering elements (see Fig. 1). Well-functioning drainage is central to this process.

Key features include:

- Concept with permanent drainage
- Lower execution costs
- Lower water pressure, thus reduced concrete thickness
- Cost-effective excavation under difficult hydrological conditions
- Higher maintenance and repair costs
- Potential obstruction of traffic during maintenance work

In the displacement concept, the groundwater is not drained but displaced via pressure water resistant all-round sealing (see Fig. 2). A permanent sealing membrane is essential in this context.

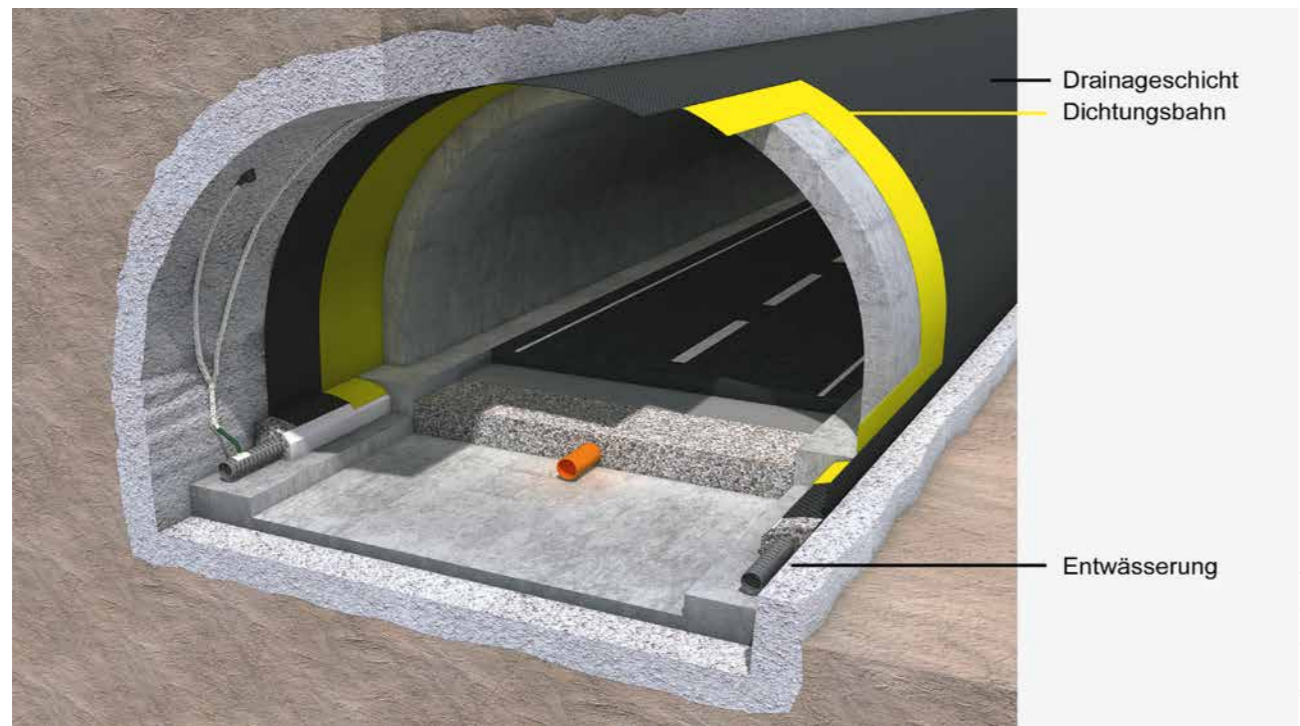
Key features include:

- Increased sealing requirement, membrane thickness of over 3 mm
- Higher excavation costs
- Adaptation of concrete structure in line with water pressure
- Lower maintenance and repair costs
- Reduced influence on groundwater level following completion of construction work
- Reduced influence on groundwater reserves

3.2 Drainage Concept

The drainage concept works like an umbrella. Accumulated water is drained under gravity between the excavation support and the sealing membrane into a drainage layer, collected at the side or at the base and guided to the receiving waters via a drainage line (see Fig. 3).

In order to ensure correct functionality, the drainage layer must feature a sufficiently large drainage and sintering cavity. The drainage layer also serves as a protective layer



3 Tunnel mit Ableitkonzept
Tunnel with drainage concept

Dabei muss die Drainageschicht zur Sicherstellung der Funktion über einen ausreichend dimensionierten Drainage- und Sinterhohlraum verfügen. Darüber hinaus übernimmt die Drainageschicht den Zweck einer Schutz- und Ausgleichschicht. Dieses Konzept wird traditionell im Tunnelbau in der Schweiz eingesetzt, da es einen optimalen Kompromiss zwischen Wasserdichtigkeit und Wirtschaftlichkeit darstellt. Zudem ist es im Sprengvortrieb, in der Tübbingbauweise, beim Tagbautunnel und bei weiteren Bauweisen vielseitig einsetzbar. Voraussetzung dafür ist, dass das anfallende Bergwasser auch abgeleitet werden kann und darf.

Verlegt werden hier als Drainageschicht Geotextilien, Kunststoffgitter oder Noppenfolien, welche eine hohe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Als Abdichtung kommen Kunststoffdichtungsbahnen von mehr als 2 mm Dicke zum Einsatz.

Fast alle Untertagbauprojekte beinhalten auch Tagbaubauwerke wie zum Beispiel Portalbauwerke, Lüftungskamine oder Tagbautunnel. Beim Tagbau wird, im Gegensatz zum Untertagbau, zuerst die Tragkonstruktion fertiggestellt und erst anschliessend die Abdichtung aufgebracht. Hier werden seit über 25 Jahren vollflächig verklebte Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt (siehe Bild 4). Dieses System verbindet den Vorteil der Hinterlaufsicherheit mit dauerhaftem Schubverbund, definierten Schichtdicken der Abdichtung und optimierten Schutzmassnahmen (siehe Bild 5). Es kombiniert damit die Vorteile des Flüssigkunststoffs mit denen der Dichtungsbahn. Die einheitliche Qualität und die konstante Schichtdicke der Abdichtungsmembrane sind in jedem Fall vorhanden. Im Falle einer Beschädigung verhindert der

and a compensation layer. This concept is traditionally used in tunnel construction in Switzerland as it represents an ideal compromise between impermeability and cost-effectiveness. It can additionally be deployed in a variety of ways, such as in drill and blast excavation, in segmental lining constructions, in cut-and-cover tunnels and more besides. When using this concept, it is first necessary to ensure that the accumulated groundwater can also be drained.

This calls for geotextiles, plastic grilles or dimpled foils featuring a high level of permeability to be installed as a drainage layer. Plastic sealing materials with a thickness of over 2 mm are used for sealing purposes.

Almost all underground projects also include open-pit structures such as portals, ventilation chimneys and cut-and-cover tunnels. In contrast to underground tunnelling, open-pit construction requires the supporting structure to be completed first before the sealing is installed. Fully-bonded plastic sealing materials have been deployed as part of this concept for over 25 years (see Fig. 4). In addition to preventing water from flowing behind, this system also features a permanent shear bond, defined layer thicknesses of the sealing and optimised protective measures (see Fig. 5). As a result, it combines the benefits of fluid plastic with those of the sealing material. The uniform quality and constant layer thickness of the sealing membrane are always assured. In the event of damage, the adhesive bond prevents water from spreading between the concrete and the sealing material in an undesired manner. This means that the ingress of water is restricted to as small an area as possible.

Quelle/credit: Sika Schweiz AG



4 Tagbautunnel – Verkleben der Membrane
Cut-and-cover tunnel – bonding the membrane

Klebeverbund eine unerwünschte Ausbreitung des Wassers zwischen dem Beton und der Dichtungsbahn. So wird der Wasserzutritt auf einen minimalen Bereich beschränkt.

3.3 Verdrängungskonzept

Das Verdrängungskonzept ist eine Rundumabdichtung respektive Vollabdichtung, vergleichbar mit einem Taucheranzug oder bei grösserem Wasserdruck mit einem U-Boot. Die Betonkonstruktion und die Abdichtung sind dem vollen hydrostatischen Druck ausgesetzt und dementsprechend zu dimensionieren. In den letzten Jahren wurden immer wieder Tunnelbauprojekte mit diesem aufwendigen und für den Planer wie auch den ausführenden Unternehmer anspruchsvollen Abdichtungskonzept ausgeführt.

Beim Verdrängungskonzept wird unter verschiedenen Abdichtungssystemen unterschieden:



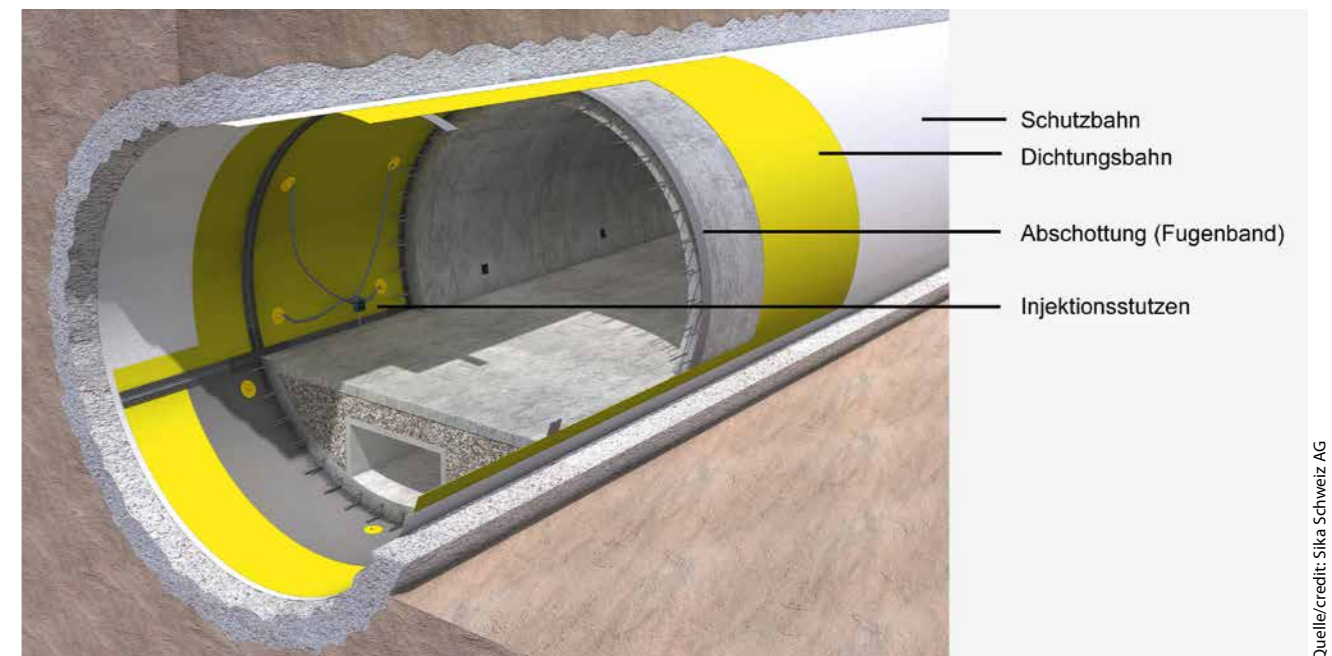
5 Tagbautunnel mit verklebter Membrane
Cut-and-cover tunnel with bonded membrane

3.3 Displacement Concept

The displacement concept is a form of all-round seal or full seal that is comparable to a diving suit or to a submarine in the context of higher water pressure. As the concrete structure and the sealing are exposed to the full hydrostatic pressure, they must feature appropriate dimensions. A series of tunnel construction projects have been executed in recent years using this complex sealing concept, which is a demanding prospect for planners and contractors alike.

When it comes to the displacement concept, a distinction is made between the various sealing systems:

- Single-layer full seal
- Two-layer full seal with leakage water drainage
- Two-layer full seal as a system with and without vacuum testing



6 Tunnel mit einlagiger Vollabdichtung
Tunnel with single-layer full seal

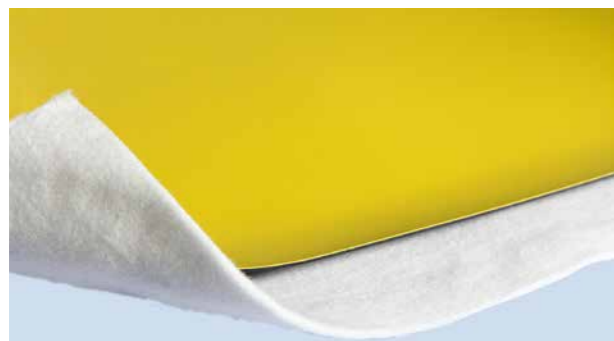
Quelle/credit: Sika Schweiz AG

- einlagige Vollabdichtung
- zweilagige Vollabdichtung mit Leckwasserableitung
- zweilagige Vollabdichtung als System mit und ohne Vakuumprüfung

Das System mit doppelter Vollabdichtung und Vakuumprüfung wird auch Prüf- und Injektionsverfahren (P+I) genannt.

Bei der einlagigen Vollabdichtung (siehe Bild 6) wird zu Beginn eine Lage Geotextil als Schutz- und Ausgleichsschicht verlegt. Die einzelne abdichtende Membrane muss dann eine Dicke von ≥ 3 mm aufweisen. Alternativ können auch vlieskaschierte Bahnen eingesetzt werden, bei denen das Geotextil fest mit der Kunststoffdichtungsbahn verbunden ist (siehe Bild 7). Zudem werden als Zusatzmassnahme Abschottungen mit Fugenbändern angeordnet. Optional können Stutzen zur nachträglichen Injektion vorgesehen werden (siehe Bild 9).

Bei zweilagigen Vollabdichtungen mit einer Leckwasserableitung wird das System ebenfalls mit einer Schutzlage



7 Vlieskaschierte Bahn
Fleece-laminated strip

aus Geotextil und einer Abdichtungsmembrane aufgebaut. Als nächste Lage folgt dann eine hohlraumbildende Schicht, zum Beispiel ein Kunststoffgitter, damit allfälliges Leckwasser drucklos abgeleitet werden kann. Als zweite Abdichtungslage werden schliesslich eine weitere Kunststoffdichtungsbahn mit einer Dicke von ≥ 2 mm sowie die Fugenbänder verlegt.

Das Prüf- und Injektionsverfahren (siehe Bild 8) wiederum ist ähnlich der zweilagigen Vollabdichtung aufgebaut. Auf das Geotextil wird eine erste Membrane mit ≥ 3 mm Dicke verlegt. Direkt darauf folgt dann eine zweite Abdichtungslage mit einer Dicke von ≥ 2 mm und einer Noppenstruktur, welche als hohlraumbildende Schicht die Vakuumprüfung zwischen den Abdichtungslagen ermöglicht. Auch hier werden Fugenbänder zur Abschottung verwendet. Die Norm [1] sieht vor, dass die beiden Abdichtungsmembranen mittels Verschweissen in Sektoren unterteilt werden. Diese Kissen können beim P+I über eingebaute Kontroll- und Injektionsstutzen (siehe Bild 9) mittels Vakuum auf ihre Dichtigkeit geprüft und gegebenenfalls ausinjiziert werden. Als Injektionsmaterial dient zum Beispiel ein Acrylat.

The system featuring a dual full seal and vacuum testing is also known as the testing and injection method (T+I).

In the case of a single-layer full seal (see Fig. 6), a geotextile layer is installed first as a protective layer and a compensation layer. The individual sealing membrane must then feature a thickness of ≥ 3 mm. Fleece-laminated strips can alternatively be used, with the geotextile being securely connected to the plastic sealing material (see Fig. 7). Partitions with joint tape are also arranged as an additional measure and ports for subsequent grouting can optionally be installed (see Fig. 9).

For two-layer full seals with leakage water drainage, the system is likewise structured with a geotextile protective layer and a sealing membrane. This is followed by a cavity-forming layer, such as a plastic grille, in order to ensure that any leakage water can be drained under gravity. The second sealing layer is then installed, comprising another instance of plastic sealing material with a thickness of ≥ 2 mm and the joint tapes.

In structural terms, the testing and injection method (see Fig. 8) is similar to the two-layer full seal. An initial membrane with a thickness of ≥ 3 mm is installed on the geotextile and is directly followed by a second sealing layer with a thickness of ≥ 2 mm and a dimpled structure, which serves as a cavity-forming layer and enables vacuum testing between the sealing layers. This concept again features the use of joint tapes for partitioning purposes. The standard [1] requires that both sealing membranes be divided into sectors by means of welding. In T+I, the impermeability of these pads can be checked by means of vacuum via installed monitoring and injection ports (see Fig. 9) and the pads can be filled out if necessary. Acrylate is one of the injection materials that may be used.

4 Installation

4.1 Substrate

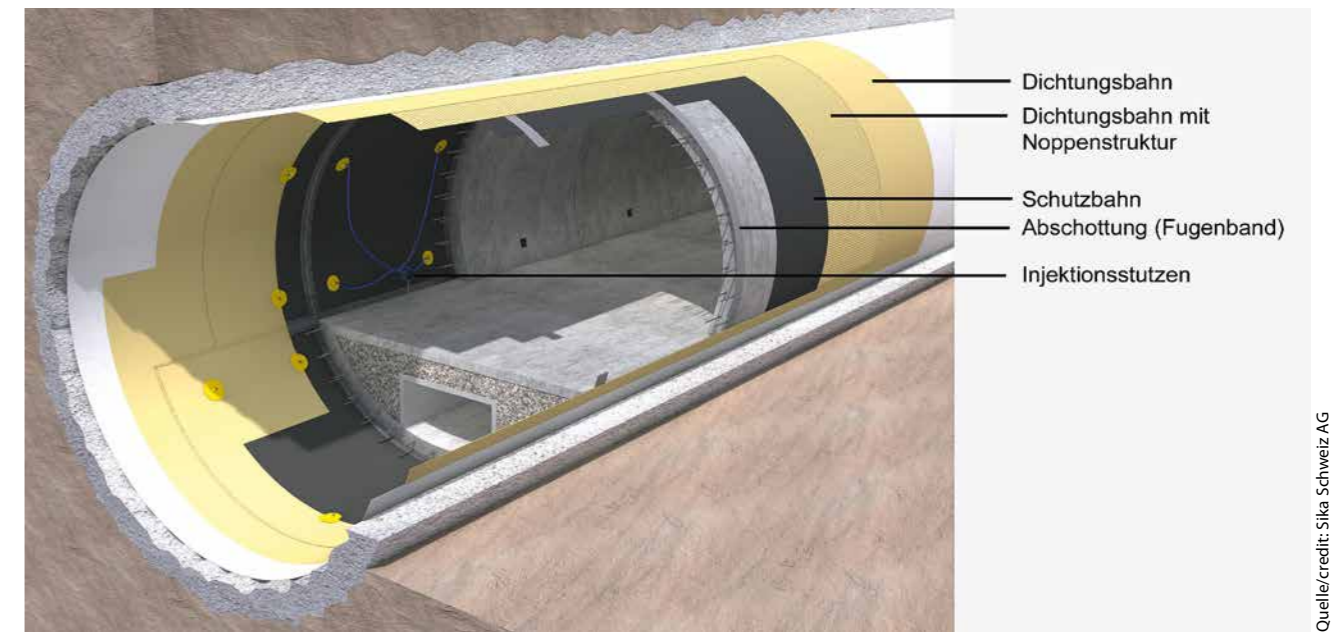
The substrate is key to ensuring functional sealing. The design of the sealing substrate has to comply with standards and regulations, meaning that requirements relating to strength, evenness, roughness, cleanliness and dryness must be observed. In addition, the sealing support must not feature steel fibres or any other sharp or protruding parts. It is essential that the sealing be installed close to the substrate, as the substrate is part of the sealing system and the correct preparation of the substrate is part of the project.

4.2 Sealing Materials

There are two different types of plastic sealing materials currently available on the market:

- PVC-P: polyvinylchloride
- TPO or FPO: flexible thermoplastic polyolefin

PVC-P sealing materials are generally used on the Swiss market, as they are more flexible and have proven themselves in drill and blast excavation for over 50 years. Thanks to the lower Young's modulus, they are also able to adapt to a



8 Tunnel mit zweilagiger Vollabdichtung als System mit Vakuumprüfung (P+I)
Tunnel with two-layer full seal as system with vacuum testing (T+G)

4 Einbau

4.1 Untergrund

Wesentlich für eine funktionierende Abdichtung ist der Untergrund. Der Abdichtungsträger muss grundsätzlich norm- und regelkonform ausgeführt werden. Dabei gilt es, die Anforderungen bezüglich Festigkeit, Ebenheit, Rauigkeit, Sauberkeit und Trockenheit einzuhalten. Ebenso darf der Abdichtungsträger weder Stahlfasern noch andere spitze oder vorstehende Teile aufweisen. Ein untergrundnahe Verlegen der Abdichtung ist wesentlich. Der Untergrund ist Teil des Abdichtungssystems und die korrekte Untergrundvorbereitung ein Teil des Projektes.

4.2 Dichtungsbahnen

Es existieren derzeit zwei unterschiedliche Typen von Kunststoffdichtungsbahnen auf dem Markt:

- PVC-P: Polyvinylchlorid
- TPO oder FPO: flexible thermoplastische Polyolefine

In der Regel werden im Schweizer Markt PVC-P-Dichtungsbahnen eingesetzt. Diese sind flexibler und haben sich seit über 50 Jahren im Sprengvortrieb bewährt. Durch den tieferen E-Modul passen sie sich gerne auch einem etwas unebenen Untergrund an. TPO-Dichtungsbahnen hingegen werden bei aggressiven Bergwässern oder im druckwasserhaltenden Bereich, vorzugsweise bei P+I-Abdichtungssystemen, eingesetzt. Hier ist die höhere chemische Beständigkeit von TPO klar von Vorteil. Da es sich um unterschiedliche Produkte handelt, sind PVC und TPO nicht miteinander verschweisbar.

Beide Typen verfügen über eine hohe Festigkeit und ein multiaxiales Dehnungsvermögen, sind beständig gegen Alterung, Wurzelwuchs und Mikroorganismen, wider-

somewhat uneven substrate. In contrast, TPO sealing materials are used in the context of aggressive groundwater or in the pressure water resistant range – preferably in T+I sealing systems. The greater chemical resistance of TPO provides a clear benefit in such cases. As they are different products, PVC and TPO cannot be welded to one another.

Both types demonstrate a high level of strength, multi-axial ductility, dimensional stability, low-temperature flexibility and resistance to ageing, root penetration, micro-organisms, mechanical loads and chemical loads.

All plastic sealing materials that are installed in tunnel constructions must be equipped with a signal layer, which means that the upper side of the sealing layer has to feature a coloured layer. The dark layer becomes visible if this layer sustains mechanical damage, making it obligatory for the site management to check the membranes.

4.3 Application

The sealing system is applied in multiple stages, beginning with the installation of the drainage layer or compensa-



9 Injektionsstutzen
Injection port



10 Rondelle zur Befestigung
Attachment pad

Quelle/Credit: Sika Schweiz AG

standsfähig gegen mechanische und chemische Belastung sowie dimensionsstabil und kälteflexibel.

Alle Kunststoffdichtungsbahnen, die im Tunnelbau verlegt werden, müssen mit einer Signalschicht ausgestattet sein. Das bedeutet, dass die obere Seite der Dichtungsbahn mit einer farbigen Schicht versehen ist. Wird diese Schicht mechanisch beschädigt, kommt die dunkle Schicht zum Vorschein, was die Bauleitung zu einer Kontrolle der Membrane verpflichtet.

4.3 Verlegung

Die Applikation des Abdichtungssystems erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird die Drainageschicht bzw. Ausgleichsschicht verlegt. Anschliessend folgen Rondellen oder Discs als Befestigungspunkte für die Membrane, welche beim folgenden Prozess mittels Heissluft mit der Dichtungsbahn verschweisst werden (siehe Bild 10). Bei vlieskaschierten Bahnen werden Klettrondellen direkt am Abdichtungsträger befestigt. Das aufkaschierte Vlies übernimmt neben der Montagehilfe bei der Applikation auch noch eine Schutz- und Ausgleichsfunktion. Die Befestigung wird hier durch die Verkrallung der Kletthaken im Vlies gewährleistet. Bei der Tübbingbauweise wird gelegentlich die vlieskaschierte Bahn auch mit einem Heissleim («Hotmelt») direkt mit dem Tübbing verklebt. Um ein Knicken oder um Spannungsspitzen der Abdichtungsbahn zu vermeiden, ist die untergrundnahe Verlegung sicherzustellen. Das bedeutet, dass die Abdichtungsbahn möglichst genau dem Untergrund folgen muss, weil sonst beim nachträglichen Betonieren die Folie eine Beschädigung erfahren könnte.

Da die Verlegung der Abdichtung in Bahnen erfolgt, müssen die Überlappungen mit einer doppelten Naht mittels Heissluft verschweisst werden. Zwischen den Nähten entsteht so ein Prüfkanal (siehe Bild 11).

Nach dem Zusammenfügen der Bahnen werden die Doppelnähte mittels Druckluft auf Dichtigkeit überprüft. Dabei wird mit einer Nadel zwischen die Doppelnähten gestochen und ca. 2 bar Druck aufgebaut (siehe Bild 12). Der Druck ist gemäss DVS 2225-2 [3] abhängig von der Materialdicke, der Lufttemperatur und der Materialart. Bei einer Undichtigkeit entsteht innert zehn Minuten ein Druckverlust von über 10%. Maschinelle Doppelnähte sind den Handschweissnähten möglichst vorzuziehen, weil die Qualität der Schweissnaht konstanter ist.

tion layer. This is followed by the pads or discs that serve as attachment points for the membranes and are welded to the sealing material in the subsequent process using hot air (see Fig. 10). With respect to fleece-laminated layers, Velcro pads are attached directly to the sealing support. The laminated fleece not only serves as a mounting aid during application, but also protects and compensates. In this context, the attachment is ensured by the way that the Velcro hooks grip the fleece. When used in segment constructions, the fleece-laminated layer is also occasionally bonded directly to the segment in a hot-melt procedure. Installation must take place close to the substrate so as to prevent kinks or tension peaks in the sealing material. This means that the sealing material must follow the substrate as precisely as possible, as the foil might otherwise be damaged during the subsequent concreting.

As the sealing has to be installed in strips, the overlaps must be welded with a double seam using hot air. This leads to the formation of a test channel between the seams (see Fig. 11).

Once the strips have been fitted together, the double seams are checked using hot air to ensure that they are impermeable. This process involves inserting a needle between the double seam and applying approx. 2 bar of pressure (see Fig. 12). According to the DVS 2225-2 standard [3], the amount of pressure depends on the material thickness, air temperature and material type. If the double seam is permeable, there will be a pressure loss of over 10% within ten minutes. Mechanical double seams are to be preferred to manual weld seams where possible as they feature a more consistent quality.

With respect to reinforced components, a protective layer (see Fig. 8) must be installed in all systems to prevent damage occurring during the construction phase as a result of mechanical influences.

4.4 Injektion

As previously described, injection ports (see Fig. 9) are deployed depending on the system in question. These



11 Maschinenschweissung (Fügen) im Tunnel
Machine welding (joining) in tunnel

Quelle/Credit: Sika Schweiz AG

Bei bewehrten Bauteilen ist bei sämtlichen Systemen eine Schutzbahn (siehe Bild 8) vorzusehen, welche während der Bauphase Beschädigungen durch mechanische Einwirkungen verhindert.

4.4 Injektion

Wie bereits beschrieben, kommen je nach System Injektionsstutzen (siehe Bild 9) zum Einsatz. Diese dienen zur nachträglichen Injektion undichter Felder oder Sektoren und werden nur bei Bedarf benutzt. Das Gleiche gilt für injizierbare Fugenbänder, welche als horizontale wie auch radiale Abschottung durchgängig mit der Abdichtungsfolie verschweisst sind. Auch hier wird nur bei einer festgestellten Undichtigkeit injiziert.

Ein weiteres wichtiges Element der Abdichtung ist die Firstspaltverpressung. Der beim Betonieren entstehende Hohlraum zwischen Innenring und Abdichtungsebene am Tunnelgewölbe wird nachträglich mittels Injektion vollständig ausgefüllt. Diese Verfüllung allfälliger Hohlräume muss eingeplant und fachgerecht ausgeführt werden. Diese Injektion verhindert hohe Sanierungskosten durch Folgeschäden.

4.5 Qualitätssicherung

Zur Erfüllung der geforderten Eigenschaften eines Abdichtungssystems ist eine Qualitätssicherung erforderlich. Die Anforderungen bezüglich Qualitätslenkung und Qualitätskontrolle sind in einem Prüf- und Kontrollplan zu definieren.

Im Prüf- und Kontrollplan werden Fremd- und Eigenüberwachung geregelt und somit die Qualitätssicherung bezüglich der verwendeten Materialien sowie des fach- und normgerechten Einbaus des Abdichtungssystems sichergestellt.

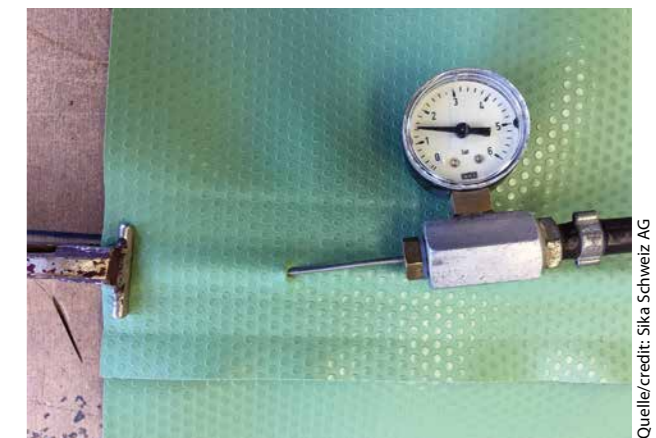
5 Fazit

Membranabdichtungen sind mittlerweile bei allen Tunnels in der Schweiz im Einsatz. Was im letzten Jahrhundert mit einfachen Abdichtungsmörteln begann, hat sich unterdessen zu einem Spezialgebiet des Bauwesens entwickelt.

Moderne Abdichtungssysteme sichern den Betrieb und die Lebensdauer der Installationen heutiger Tunnelbauwerke. Damit ein dichtes und den Normen entsprechendes Bauwerk erstellt werden kann, müssen die korrekte Planung, die fachgerechte Ausführung und eine umfassende Qualitätssicherung Hand in Hand arbeiten.

Literatur

- [1] SIA 272:2009, Abdichtung und Entwässerung von Bauten unter Terrain und im Untertagbau
- [2] Sika-Broschüre «Abdichtung im Tunnelbau», September 2011
- [3] DVS 2225-2:1992-08, Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau – Baustellenprüfungen



12 Prüfung der Schweissnaht mittels Druckluftprüfung
Inspection of weld seam via compressed-air testing

Quelle/Credit: Sika Schweiz AG

are used only as required for subsequent injecting of permeable fields or sectors. The same applies for joint tapes that are suitable for injections and serve as horizontal or radial partitions that are fully welded with the sealing foil. Here, too, injecting is only performed in the event that permeability is detected.

Another important element of sealing is the compression of the roof gap. The cavity that is generated between the lining and the sealing layer on the tunnel vault during concreting is subsequently completely filled by means of injecting. This procedure of filling any cavities that may be present must be planned in and properly executed. The injection process described here prevents high renovation costs resulting from subsequent damage.

4.5 Quality Assurance

It is necessary to perform quality assurance to establish that the required properties of a sealing system are met. The requirements relating to quality control and quality monitoring must be defined in a testing and monitoring plan.

This testing and monitoring plan regulates self-monitoring and third party monitoring, thereby ensuring quality assurance in relation to the materials used and proper installation of the sealing system in compliance with the standards.

5 Conclusion

Membrane seals are now used in all tunnels in Switzerland. What began in the 20th century with basic plugging mortar has now developed into a specialist field in the world of construction.

Modern sealing systems safeguard the operation and the service life of the installations in present-day tunnel constructions. In order to ensure the creation of an impermeable structure in compliance with the standards, the aspects of correct planning, proper execution and comprehensive quality assurance have to go hand in hand.

Angela Winter, Dipl.-Bauingenieurin (FH), Basler & Hofmann AG, Zürich/CH
Oscar Malva, MSc in Civil Engineering, Basler & Hofmann AG, Zürich/CH

Abdichtungssysteme des Weinbergtunnels

SBB-Durchmesserlinie Zürich

Um das Angebot im Bahnknoten Zürich zu erweitern und Kapazitätsengpässe aufzuheben, realisierte die SBB eine neue Doppelspur von Zürich nach Oerlikon. Bestandteile davon sind der neue unterirdische Durchgangsbahnhof Löwenstrasse am HB Zürich sowie der Weinbergtunnel. Nach einer allgemeinen Projektübersicht werden die unterschiedlichen Abdichtungssysteme des Projektes erläutert.

Sealing Systems in the Weinberg Tunnel

The Zurich Cross Rail

In order to expand its services at the Zurich junction and to eliminate the bottlenecks, the SBB realised a new double track from Zurich to Oerlikon. This includes the new underground through station Löwenstrasse at Zurich main station and the Weinberg tunnel. After a general project overview, the different sealing systems of the project will be explained.

1 Weinbergtunnel

In einer umfassenden Risikoanalyse wurden verschiedenste Tunnelsysteme gegenübergestellt. Im Variantenvergleich zeigte sich, dass die Variante Doppelspurtunnel mit Notausgängen alle 460 m das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufwies.

Der Rohbau des Bahnhofs Löwenstrasse (Abschnitt 2) mit dem 4,8 km langen Weinbergtunnel (Abschnitt 3) wurde 2012 zur Ausrüstung an die Bahntechnik übergeben. Im Juni 2014 wurde die Durchmesserlinie termingerecht in Betrieb genommen. Die Rohbaukosten für den Abschnitt 3 Weinbergtunnel betragen 364,651 Mio. Franken.

Das Tunnelnormalprofil weist einen Durchmesser von 11,24 m auf. Es besteht aus einem zweischaligen Ausbau mit 30 cm starken armierten Tübbing und einem 30 cm starken unarmierten Innengewölbe.

2 Geologisch-geotechnische Verhältnisse

2.1 Molassefelsstrecke

Ab dem nördlichen Portal beim Bahnhof Oerlikon verläuft der Weinbergtunnel auf den ersten rund 4300 m durchgehend in der Oberen Süsswassermolasse. Der Molassefels besteht im Raum Zürich aus einer Wechsellagerung von Sandstein, Siltstein und Mergel mit fließenden Übergängen.

Auf den ersten 500 bis 600 m wurde in der Firste ein bis zu 10 m mächtiger Glimmersandsteinkomplex aufgeföhren, welcher schon beim Bau des benachbarten Wipkinger Tunnels angetroffen wurde. Bei diesem Glimmersandstein han-

1 Weinberg Tunnel

A wide range of tunnel systems was compared in a comprehensive risk analysis. A comparison of variants showed that the variant double-track tunnel with emergency exits every 460 m had the best cost-benefit ratio.

The shell of the station Löwenstrasse (section 2) with the 4.8 km long Weinberg tunnel (section 3) was handed over to the rail technology for equipment in 2012. In June 2014, the Zurich Cross Rail began operation on schedule. The structural works on section 3 Weinberg tunnel amounted to 364,651 Mio. Swiss Francs.

The standard tunnel cross-section is 11.24 m in diameter. It consists of a double-shell lining with 30 cm thick reinforced segments and a 30 cm thick unreinforced inner lining.

2 Geological and Geotechnical Conditions

2.1 Molasse Rock Section

From the northern portal at Oerlikon station, the Weinberg tunnel passes through the upper freshwater molasse for around the first 4,300 m. In the Zurich area, the molasse rock consists of alternating sequences of sandstone, siltstone and marl with flowing transitions.

In the first 500 to 600 m, a mica sandstone layer with a thickness up to 10 m was excavated in the crown. This was already encountered during construction of the nearby Wipkinger tunnel. This mica sandstone is a poorly cemented,

Systèmes d'étanchéité du tunnel du Weinberg

Ligne diamétrale CFF de Zurich

Long de 4,8 km, le tunnel du Weinberg passe d'abord sous l'aile historique sud de la gare, puis sous la plateforme de correspondance complexe du quai de gare. La ligne en forme de S passe ensuite sous la Limmat et l'ETH de Zurich via la gare d'Oerlikon.

Le tunnel a été réalisé avec différents modes de creusement sur un tracé traversant différentes formations rocheuses. La section dans le terrain meuble sous la Limmat été réalisée par étanchement total (P+I) (vérifiable et injectable), la plus longue section dans la roche étant partiellement étanchée. La section en creusement conventionnel via la gare d'Oerlikon a été raccordée au bâtiment de secours et de sauvetage par étanchement total. La galerie de secours et sauvetage n'a pas été étanchée.

delt es sich um ein schlecht zementiertes, fein- bis mittelkörniges Sediment, das sehr empfindlich auf Wasser reagiert und einen hohen Quarzgehalt aufweist. Teilweise lag der Glimmersandstein entfestigt vor.

Im Bereich Bucheggstrasse wurde eine Lockergesteinschicht mit Wassereintrich durchfahren. Diese war dank umfangreicher Prospektionsbohrungen gut bekannt. Der Tunnelfirst tangiert die 6 bis 8 m mächtige Grundmoräne auf rund 120 m Länge. Über der Grundmoräne liegen eiszeitliche grundwassergesättigte Schotter. Es galt zu verhindern, dass eine Verbindung zwischen Tunnel und Lockergesteinsauffüllung entstand, denn diese hätte umfangreiche Abdichtungs- und Injektionsmassnahmen zur Folge gehabt.

2.2 Lockergesteinsstrecke

Zwischen Limmatquai und Bahnhofquai durchfährt der Weinbergtunnel auf 280 m Länge verschiedene Lockergesteinsschichten mit sehr unterschiedlichen Bodeneigenschaften. Auf die Molasse folgt zunächst eine feinkörnige, siltig-feinsandige, schwach tonige Grundmoräne, die mit Kies, Steinen und einzelnen Blöcken durchsetzt ist. Diese wird durch dicht gelagerte und wenig durchlässige Seeablagerungen überlagert. Darüber folgen gletschernehe Limmattal-Schotter mit einem mittleren k-Wert von 3×10^{-3} m/s.

3 Baumethoden

3.1 Maschinelles Vortrieb

Vom Startschacht Brunnenhof (Bild 1) erfolgte der Vortrieb mit einer Mixschild-TBM fallend. Im Abschnitt Fels wurde ein fünfteiliger Tübbingring plus Schlussstein eingebaut. Im Bereich der Vollabdichtung war die Tübbingstärke konstant

I sistemi di impermeabilizzazione della galleria del Weinberg

Linea diametrale FFS di Zurigo

La galleria del Weinberg, lunga 4,8 km, sottopassa in primo luogo lo storico tratto meridionale dell'edificio della stazione e, quindi, il complesso punto nodale per la circolazione presso il Bahnhofquai. La linea prosegue a forma di S sotto la Limmat e il Politecnico federale di Zurigo, per giungere alla stazione ferroviaria di Zurigo-Oerlikon.

Durante la costruzione sono state attraversate diverse formazioni rocciose con diversi tipi di avanzamento. La tratta TBM in materiale sciolto sotto la Limmat è stata eseguita con un'impermeabilizzazione completa P+I (esaminabile e iniettabile), mentre la sezione più lunga nella roccia è stata dotata prevalentemente di un'impermeabilizzazione parziale. L'avanzamento convenzionale in direzione della stazione ferroviaria di Zurigo-Oerlikon è stato chiuso con un'impermeabilizzazione totale sull'edificio di fuga e salvataggio. Le gallerie di fuga e salvataggio non sono state impermeabilizzate.

fine- to medium-grained sediment that is very sensitive to water and has a high quartz content. In part, the mica sandstone was softened.

In the Bucheggstrasse area soft ground with ingress of water was passed through. This was well known thanks to extensive prospecting drillings. The tunnel crown touches the 6 to 8 m thick ground moraine over a length of around 120 m. Groundwater-saturated Ice Age ballast lies above the ground moraine. A connection between the tunnel and the loose rock filling had to be avoided as this would have required significant sealing and grouting measures.

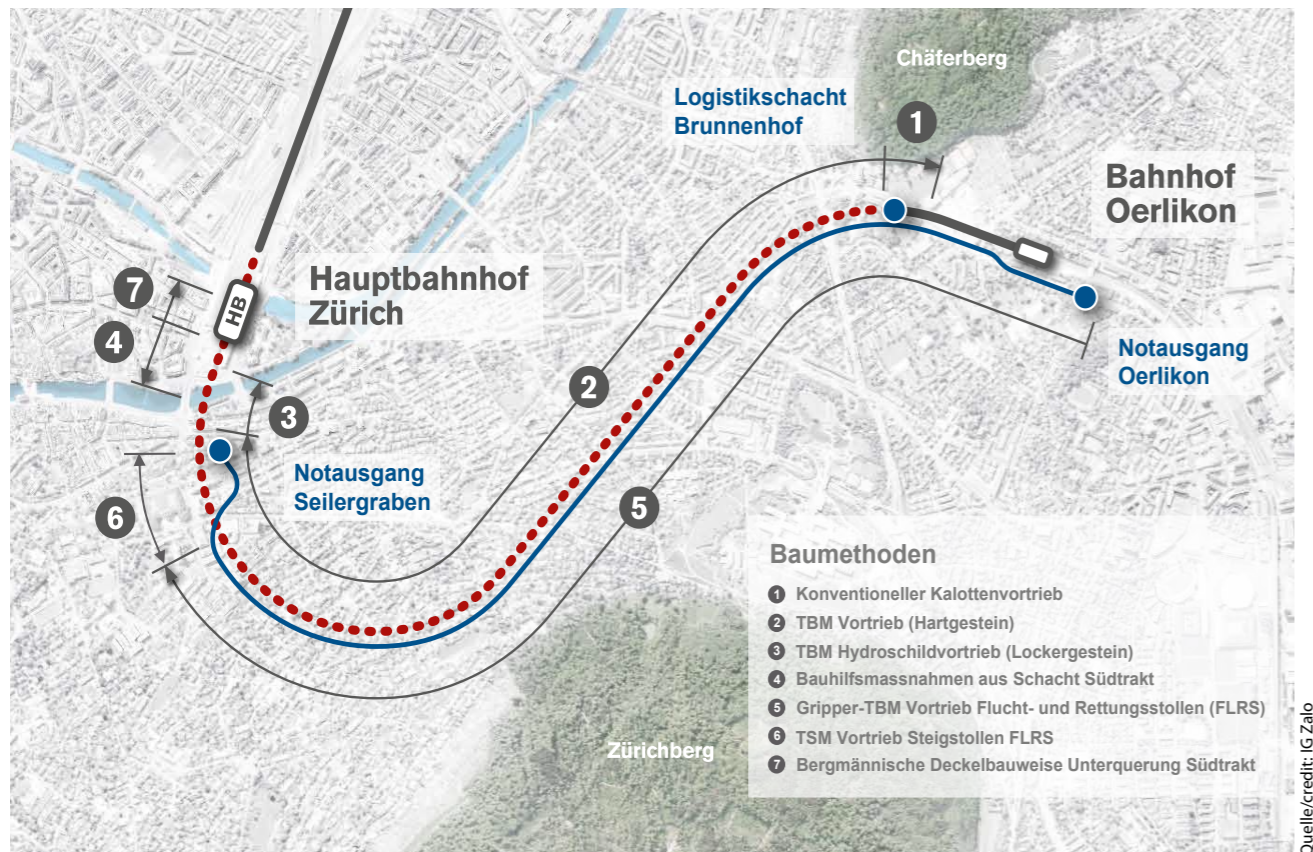
2.2 Soft Ground Section

Between Limmatquai and Bahnhofquai, the Weinberg tunnel passes through various soft ground layers with very different soil properties over a length of 280 m. The molasse is followed first of all by a fine-grained, silty to fine sandy, slightly clayey ground moraine, interspersed with gravel, stones and individual blocks. These are covered by dense and low impermeable lake deposits. This is followed by Limmattal gravel similar to glaciers with an average k-value of 3×10^{-3} m/s.

3 Construction Methods

3.1 Mechanical Excavation

From the Brunnenhof starting shaft (Fig. 1), tunnelling was done on a downward gradient with a mixshield TBM. In the rock section, a ring with five segments and one keystone was installed. In the area of full sealing, the segment thickness was kept at a constant of 30 cm with a 30 cm thick unreinforced inner lining. The annular gap was filled in the



1 Übersicht Baumethoden Weinbergtunnel
Overview of Weinberg Tunnel construction methods

30 cm mit einem 30 cm starken unarmierten Innengewölbe. Der Ringspalt wurde in der Sohle (über 60°) mit Mörtel verfüllt und im Parament- und Firstbereich mit rundem Perlkies hinterfüllt. Im Bereich von auf den Tübbingen aufliegenden Gesteinspaketen wurden diese durchbohrt und die horizontalen Klüfte mit Mörtel verfüllt. Die Tübbinge weisen keine Fugendichtung auf (Bild 2a). Der grösste Teil des Tunnels wurde nur teilabgedichtet, das heisst, Schlussstein und Sohl-tübbinge waren 50 bis 60 cm stark, sodass die Verkleidung nur noch im Parament- und Firstbereich über 240° eingebaut werden musste und das Sohlinnengewölbe entfallen konnte.

Die Umstellung auf Hydroschildvortrieb erfolgte unter der Zähringerstrasse. Die Unterquerung der Limmat erfolgte in steigendem Vortrieb. Es wurde ein sechsteiliger 30 cm starker Tübbingring mit konischem Schlussstein eingebaut. Die Tübbingfugen sind abgedichtet (Wasserdruck 3 bar), die Verschraubung wurde wieder entfernt, der Ringspalt ist mit Mörtel verfüllt. Es erfolgte eine Nachinjektion des Ringspalts vor dem Ausfahren aus der Molasse in die Moräne, um die Wasserzirkulation einer allfällig nicht ganz vollständigen Vermörtelung zu kompensieren. Der Ausbau ist zweischalig mit einer Vollabdichtung (Bild 2b).

3.2 Konventioneller Vortrieb Oerlikon

Der konventionelle Gegenvortrieb (Bild 1) wurde aus der Montagekaverne im Schacht Brunnenhof im Kalottenvor-

invert (over 60°) with mortar and backfilled in the tunnel side walls and crown area with round pea gravel. In the area where masses of rock lay on the segments, these were drilled through and the horizontal fractures were filled with grout. The segments have no joint seal (Fig. 2a). The main part of the tunnel was only partially sealed, i.e. the keystone and invert segments were 50 to 60 cm thick so that the lining only had to be installed in the tunnel side walls and crown area over 240° and there was no need for an invert lining.

The conversion to the hydroschild mode took place under the Zähringerstrasse. The tunnel passed beneath the Limmat with an upward drive. A six-part, 30 cm thick segment ring with a conical keystone was installed. The segment joints were sealed (3 bar water pressure), the bolts were removed again and the annular gap was filled with grout. The annular gap was reinjected before passing from the molasse into the moraine in order to compensate the water circulation of any incomplete grouting. The two-shell lining has a full seal (Fig. 2b).

3.2 Conventional Tunnelling Oerlikon

The conventional counter-drive (Fig. 1) was advanced from the assembly cavern in the Brunnenhof shaft in top-heading excavation method to the later tunnelled Oerlikon portal in the 30 m deep pre-cut of Section 4. The

trieb zum späteren bergmännischen Portal Oerlikon im 30 m tiefen Voreinschnitt des Abschnitts 4 vorgetrieben. Der Voreinschnitt, welcher erst einige Wochen nach Vortriebsende auf Tunnelniveau ausgehoben wurde, führte zu grossen Terrainverschiebungen in Richtung Baugrube. Diese wiederum führten zu erheblichen Konvergenzen im Paramentbereich, zu Hebungen im First und zu einer Gelenkbildung und Überbeanspruchung der Ausbruchsicherung (Kalottenfussanker, Netze, Gitterträger und Spritzbeton), was im Portalbereich einen nachträglichen Stahlbau erforderlich machte. Das Innengewölbe musste im Bereich des Stahlbaus daher in Spritzbeton ausgeführt werden.

3.3 Flucht- und Rettungsstollen (FLRS)

Parallel zum Tunnel verläuft der Flucht- und Rettungsstollen (Aussendurchmesser 3,75 m), der mit einer Gripper-TBM aufgefahren wurde. Er wurde einschalig ausgebaut mit einer Ausbruchsicherung (12 cm Spritzbeton bewehrt) und einer Verkleidung (8 cm Spritzbeton bewehrt). Es gibt insgesamt acht Querverbindungen zum Haupttunnel. Der Flucht- und Rettungsstollen wurde ohne Abdichtung ausgeführt. Die Schleusen Oerlikon und Seilergraben wurden teilabgedichtet. Wie sich in der Ausführung gezeigt hat, führt aufsteigendes Bergwasser in den Portalbereichen zu einer Vernässung der Fahrbahn und zur Versinterung der seitlichen Rigolen, was zu zusätzlichen Massnahmen für die Erhaltung geführt hat.

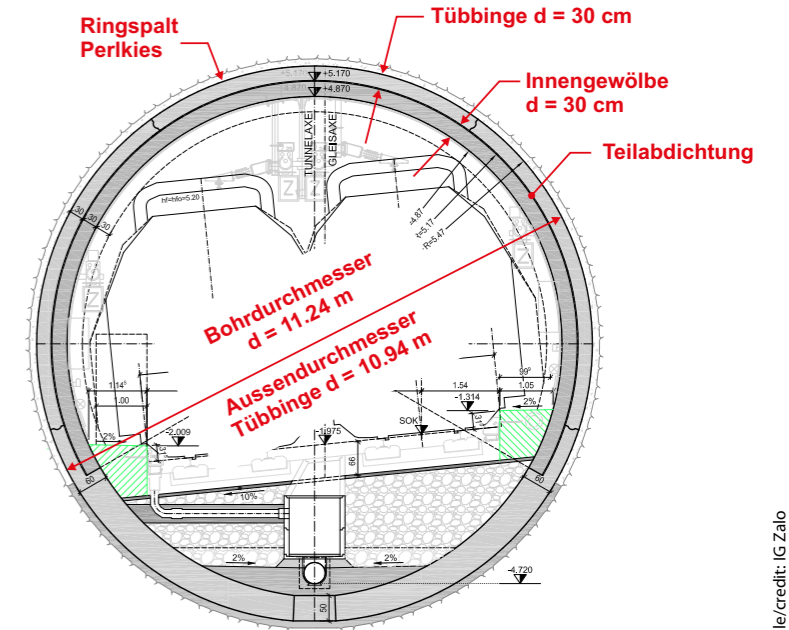
4 Abdichtungssysteme

Gemäss Nutzungsvereinbarung ist für den Tunnel die Dichtigkeitsklasse 2 (trocken bis leicht feucht) festgelegt. Für den Flucht- und Rettungsstollen ist Dichtigkeitsklasse 3 (feucht) gefordert. Aufgrund der unterschiedlichen Wasserverhältnisse im Gebirge sind auch unterschiedliche Abdichtungssysteme erforderlich.

Die technischen Räume in den Querverbindungen müssen die Dichtigkeitsklasse 1 (vollständig trocken) erfüllen.

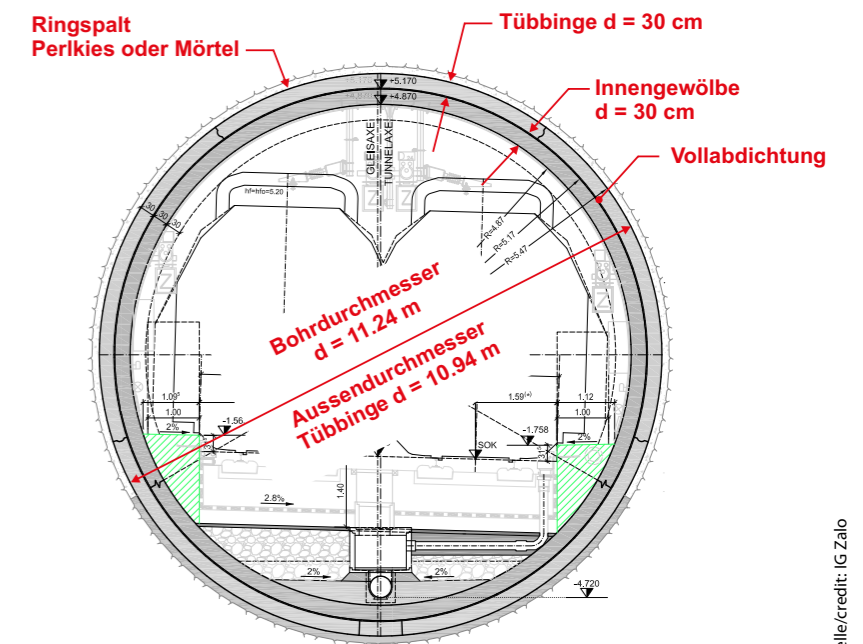
4.1 Teilabdichtung

Im Bereich der Felsstrecke wurde der Tunnel hauptsächlich mit einer Teilab-

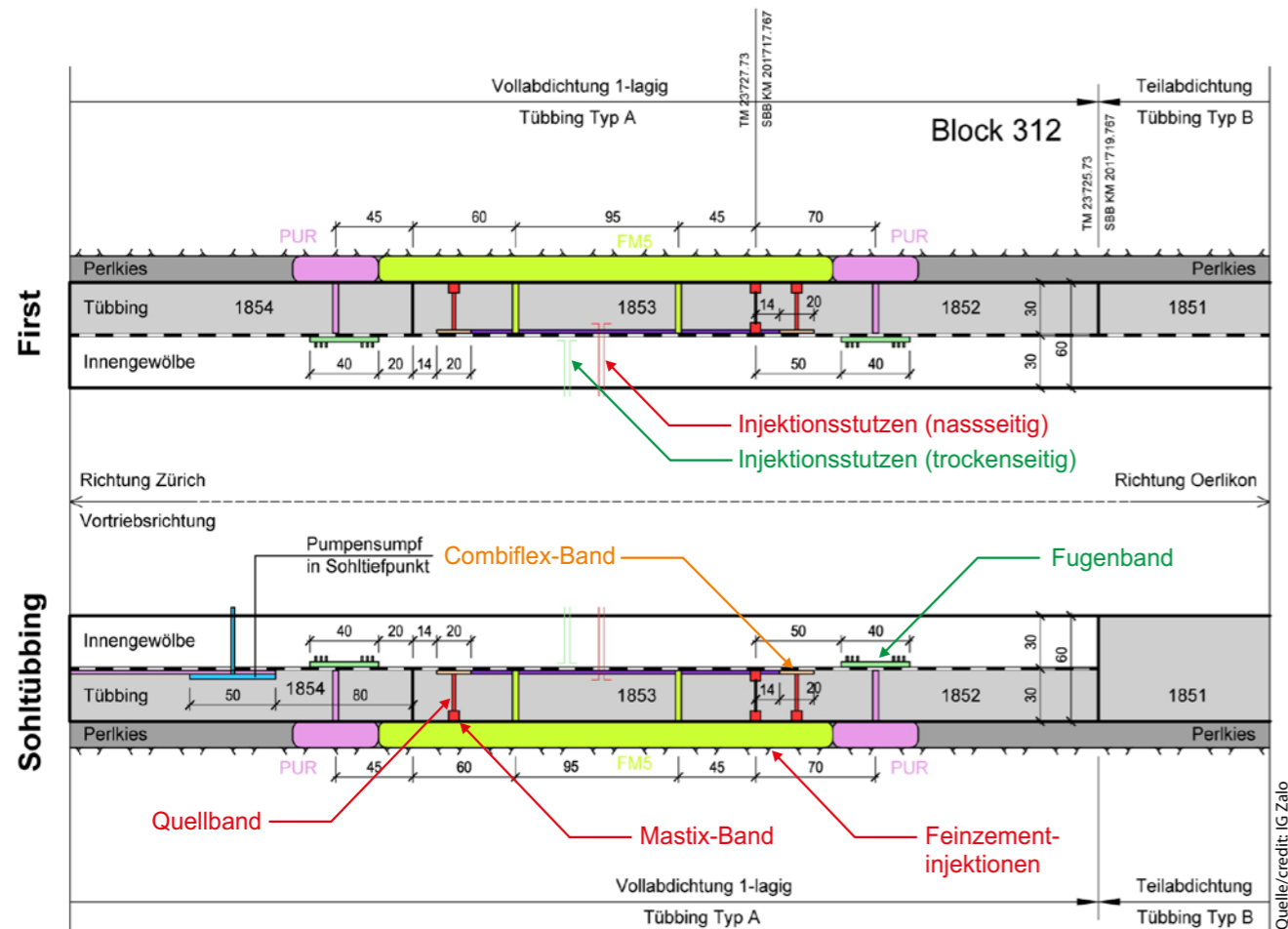


2a Normalprofil maschineller Vortrieb mit Teilabdichtung
Normal profile of mechanical drive with partial sealing

pre-cut, which was only excavated to tunnel level a few weeks after the end of tunnelling, led to major shifts in terrain in direction of the excavation pit. These in turn led to significant convergence in the tunnel side wall area, to crown heavings, articulating joints and overstraining of the excavation support (crown base anchors, wire mesh netting, lattice girders and shotcrete), which made subsequent steel installation necessary in the portal area. The



2b Normalprofil maschineller Vortrieb mit Vollabdichtung
Normal profile of mechanical drive with full sealing



3 Abdichtungsübergang Dammring
Seal transition bulkhead ring

dichtung zwischen Tübbing und Innengewölbe ausgebildet. Das anfallende Bergwasser wird durch eine Drainageleitung (GUP NW 400) in der Sohle am Tiefpunkt des Weinbergtunnels gefasst (Pumpstation Querschlag 1). Der Wasserzutritt im Tunnel (wenige Liter/Minute) dürfte nur eine geringe Beeinflussung durch das Niederschlagsgeschehen aufweisen, da die felsoberflächennahen Tunnelabschnitte mit einer Vollabdichtung versehen wurden, um das Drainieren von Gebirgswasser dort zu reduzieren bzw. zu verhindern.

4.2 Vollabdichtung

Die Abdichtung besteht im Fels (Portal- und Übergangsbereiche) aus einer einlagigen Kunststoffbahn aus FPO (flexible Polyolefine) mit einer Stärke von 3 mm. In der Lockergesteinsstrecke wurde die Vollabdichtung als P+I (prüf- und injizierbar) ausgeführt (3 mm + 2 mm). Die Grösse der Kissen erfolgte gemäss Vorschlag Unternehmer (pro Block 6x 2 Kissen in der Sohle und 4 Kissen im Gewölbe). Aussenliegend war die Abdichtung mit einem Baugrundvlies (~700 g/m²) belegt. Die Montage erfolgte mit Klettunkten. Im Bereich der Querschläge (Innengewölbe armiert) und des armierten Sohlgewölbes wurde zum Schutz der Abdichtung eine Schutzfolie (2 mm) eingelegt.

inner lining in the steel installation area therefore had to be shotcreted.

3.3 Escape and Rescue Tunnel (ERT)

The escape and rescue tunnel (outer diameter 3.75 m), which was excavated with a Gripper TBM, runs parallel to the tunnel. It was lined with a single shell with excavation support (12 cm reinforced shotcrete) and a lining (8 cm reinforced shotcrete). There are a total of eight cross passages to the main tunnel. The escape and rescue tunnel was constructed without sealing. The Oerlikon and Seilergraben locks were partially sealed. As was shown in construction, rising groundwater in the portal areas leads to water-logging of the concrete floor and the sintering of the lateral infiltration ditches, leading to additional maintenance measures.

4 Sealing Systems

According to the user agreement, sealing class 2 (dry to slightly moist) is specified for the tunnel. Sealing class 3 (moist) is required for the escape and rescue tunnel. Due to the different water conditions in the rock, different sealing systems are also required.

4.3 Übergänge (Dammring mit Injektionen, Fugenbänder, Quellbänder)

Die Abdichtungsübergänge (Vollabdichtung 2-lagig-Vollabdichtung 1-lagig-Teilabdichtung (Bild 4)) sind mittels Dammringen abgeschottet. Damit wird eine Längsläufigkeit entlang des Tunnels im Ringspalt zwischen Abdichtung und Tübbing und innerhalb der Tübbingfugen unterbunden. Die Dammringe erstrecken sich jeweils über ein bis drei Ringfugen (~ 3 m).

Der Ringspalt wurde ausinjiziert, um die Längsläufigkeit ausserhalb der Tübbinge zu unterbrechen. Dazu wurden im Perkies, durch Bohrungen durch den Tübbing, zwei Ringe mit PUR (Polyurethan, schnell reagierend, auch bei Wasserzufluss) erstellt. Zwischen diesen Begrenzungsringen wurde der Perkies mit Feinzement (FM5) injiziert (Bild 3).

Um den Wasserzufluss durch die Tübbingfugen zu unterbinden, wurden im Bereich des Dammrings in die Ringfugen beim Tübbingeinbau Mastix-Bänder (Typ N, Kautschuk/Bitumen) eingelegt und in die Längsfugen Quellbänder (Tegu-band aus acrylpolymerimprägniertem Polyurethan-Weichschaumstoff).

Zwischen Tübbing und Abdichtung (nasseitig) wurden Combiflex-Bänder (200/2 mm) aufgeklebt, darauf wurde die Abdichtungsfolie (FPO) verschweisst.

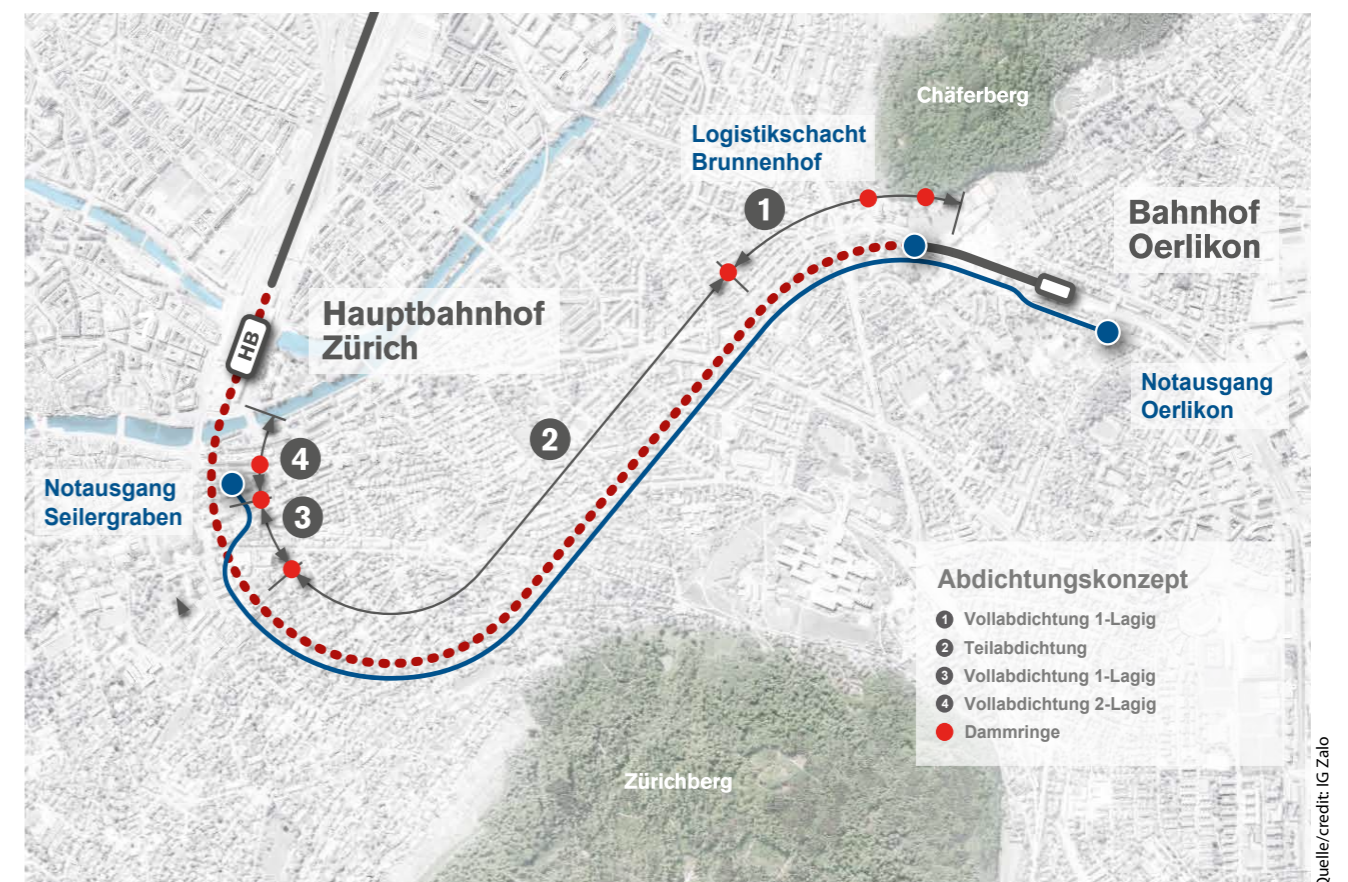
The technical rooms in the cross-passages must meet sealing class 1 (completely dry).

4.1 Partial Sealing

In the rock section, the tunnel was mainly constructed with a partial sealing between the segment and inner lining. The seepage water is collected in the invert at the lowest point of the Weinberg tunnel (pump station cross-cut 1) by a drainage pipe (GUP NW 400). The ingress of water in the tunnel (a few litres per minute) should only be slightly influenced by precipitation, as the tunnel sections near the rock surface are fully sealed to reduce or prevent the draining of water there.

4.2 Full Sealing

The sealing in the rock (in the portal and transition areas) consists of a single-layer plastic sheet made from FPO (flexible polyolefin) with a thickness of 3 mm. In the soft soil section, the full sealing was designed as P+I (3 mm + 2 mm). The size of the pads was based on the contractor's recommendation (6x 2 pads per block in the invert and four pads in the vault). On the outside, the seal was covered with a subsoil fleece (~700 g/m²). The assembly was done with Velcro pads. A protective foil (2 mm) was inserted in the area of the cross-passages (reinforced inner lining) and the reinforced invert to protect the seal.



4 Übersicht Abdichtungskonzept Weinbergtunnel
Overview of Weinberg tunnel sealing arrangements

Zwischen Abdichtungsfolie und Innengewölbe wurden mehrere Fugenbänder (injizierbar) eingebaut (trockenseitig). Zwischen diesen Fugenbändern kann der Zwischenraum zwischen Abdichtungsfolie und Tübbing resp. Innengewölbe über Stützen nass- und trockenständig abschnittsweise injiziert werden. Diese Massnahme war bisher nicht notwendig, die geforderte Dichtigkeit wurde erreicht und das Bauwerk mängelfrei der Bauherrschaft übergeben.

Insgesamt wurden sechs Dammringe (Bild 4) erstellt bei den Übergängen Startkaverne-konventioneller Vortrieb, Startkaverne-maschinellem Vortrieb Felsstrecke, Vollabdichtung-Teilabdichtung, Teilabdichtung-Vollabdichtung (1-lagig), Vollabdichtung 1-lagig-Vollabdichtung 2-lagig und Vortrieb Felsstrecke-Lockergestein. Es wurden keine Bohrungen ins Gebirge erstellt, um Risse und Klüfte infolge Auflockerung zu verpressen. Die Längszirkulation konnte durch die Injektion des Perlkieses wirkungsvoll unterbunden werden. Der wesentliche Wassereintrag kommt aus den Glimmersandsteinschichten. Zwischen Sohlgewölbe und Tübbing wurde über dem Schlussstein eine Noppenbahn eingebaut, um eine hohe Qualität des Sohlgewölbes sicherzustellen. Im Bereich der Dammringe wurde diese unterbrochen. Die Grenzen zwischen Voll- und Teilabdichtung wurden aufgrund der angetroffenen geohydrologischen Verhältnisse festgelegt und optimiert, wodurch substanzielle Baukosten eingespart werden konnten.

4.4 Stahleinbau mit Spritzabdichtung

Im Bereich des konventionellen Vortriebs in Richtung Oerlikon kam es nach dem Vortrieb und dem Erstellen der Ausbruchsicherung zu Verformungen. Diese Verformungen machten einen Stahleinbau mit HEB 180 (15 Stück) auf einer Länge von 18 m erforderlich (Bild 5). Durch den Stahleinbau stand für das Innengewölbe und die aussenliegende Abdichtung weniger Platz als geplant zur Verfügung. Die Toleranzen für spätere Einbauten durften dabei nicht in Anspruch genommen werden. Um eine genügende Tragfähigkeit zu erreichen, wurde das Innengewölbe zwischen den Stahlträgern mit Gitterträgern und Matten bewehrt. Der Einbau einer FPO-Folie wäre aufgrund der ungünstigen Geometrie mit den



5 Stahleinbau im konventionellen Vortrieb
Steel installation in conventional tunnelling

4.3 Transitions (Bulkhead Ring with Grouting, Joint Tapes, Swelling Tapes)

The sealing transitions (double-layer full sealing – single-layer full sealing – partial sealing (Fig. 4) are partitioned using insulation rings. This prevents longitudinal flow along the tunnel in the annular gap between sealing and segment and within the segment joints. The bulkhead rings each extend over one to three ring joints (~ 3 m).

The annular gap was grouted to interrupt the longitudinal flow on the outside the segments. For this purpose, two rings with PUR (polyurethane, fast-reacting, even in case of water ingress) were created in the pea gravel by drilling through the segment. The pea gravel was injected with fine cement (FM5) between these stop rings (Fig. 3).

In order to prevent ingress of water through the segment joints, Mastix tapes (type N, rubber/bitumen) were inserted into the ring joints in the area of the bulkhead ring during segment installation and swelling tape were inserted into the longitudinal joints (Tegutape made from polyurethane foam impregnated with acrylic polymer).

Combiflex tapes (200/2 mm) were glued in between the segment and the sealing (on the wet side) and the sealing membrane (FPO) was welded onto them.

Several joint tapes (injectable) were installed between the sealing membrane and inner lining (dry side). Between these joint tapes, the cavity between sealing membrane and segment and/or inner lining can be injected in sections via injection port on the wet and dry sides. This measure was not necessary until now, the required impermeability was achieved and the construction was handed over to the client without any defects.

In total, six bulkhead rings were implemented in the transitions (Fig. 4) between starting cavern-conventional drive, starting cavern-bored tunnel rock section, full sealing-partial sealing, partial sealing-full sealing (single-layer), single-layer full sealing – double-layer full sealing and tunnelling rock section-soft ground. No injection holes were drilled into the rock in order to stabilise cracks and fissures due to loosening. Grouting the pea gravel was an effective way of preventing longitudinal circulation. The significant ingress of water comes from the mica sandstone layers. A drainage membrane was inserted above the keystone between the invert and the segment to ensure a high quality of the base invert. This was interrupted in the bulkhead ring area. The boundaries between full and partial sealing were determined and optimised on the basis of the geohydrological conditions encountered, allowing substantial savings on construction costs.

4.4 Steel Support Installation with Spray-On Sealing

In the area of the conventional drive towards Oerlikon, deformations occurred after tunnelling and the construction



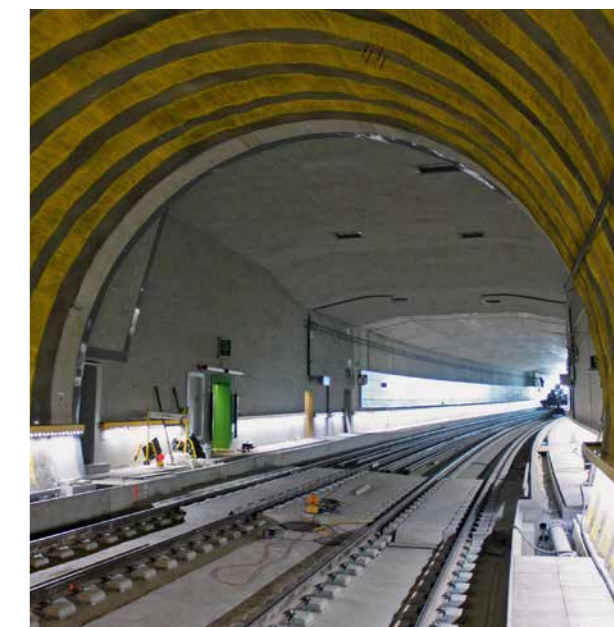
6 Spritzabdichtung und Injektionsschläuche im Bereich Stahleinbau
Spray-on sealing and grouting hoses in steel installation area

vielen Stößen nicht mehr möglich gewesen, daher wurde die Abdichtung in diesem Bereich als Spritzabdichtung mit Masterseal 345 (auf Polymerbasis, 5 mm) ausgeführt. Diese wurde direkt auf den Spritzbeton der Ausbruchsicherung aufgetragen und verbindet die Ausbruchsicherung kraftschlüssig mit dem Innengewölbe. Dadurch könnte die Spritzbetonschale statisch als Ganzes berücksichtigt werden.

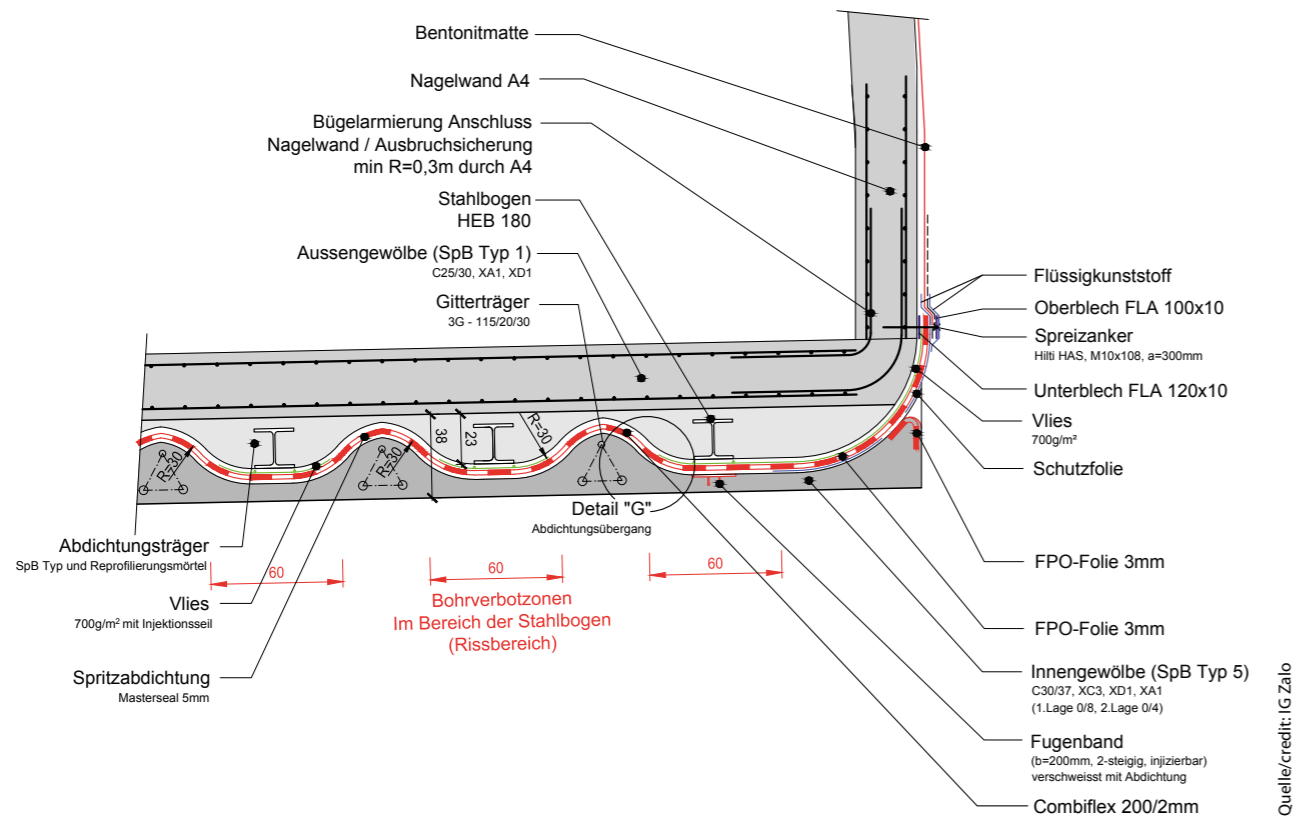
Im Bereich der Stahlträger musste zwischen Stahleinbau und Spritzbetonverkleidung mit unterschiedlichem Verformungsverhalten und Rissbildung gerechnet werden. Über die Stahlträger wurde daher ein Vlies als Träger der Spritzabdichtung aufgeschossen. Damit konnte sichergestellt werden, dass das zulässige Dehnmass der Spritzabdichtung nicht überschritten wurde. Um allfällige Undichtigkeiten nachträglich abzudichten, wurden auf den Trägern unter dem Vlies ringförmig Injektionsseile verlegt, dadurch wären nassseitig Injektionen möglich gewesen (Bild 6).

Der Übergang zur Folienabdichtung Richtung Zürich erfolgte direkt nach dem Stahleinbau. Die Folienabdichtung wurde mit einem Combiflex-Band mit der Ausbruchsicherung verklebt und mit der Spritzabdichtung eingespritzt. Als Abschluss wurden trockenständig drei 6-stegige Fugenbänder verlegt, um die Hinterläufigkeit aus dem Voreinschnitt (Rettengebäude als weisse Wanne, ca. 2 bar Druckunterschied) zu verhindern. Nassseitig wurden keine Massnahmen getroffen, da auch im Bereich des Schachtes Brunnenhof über die

of the excavation support. These deformations required a steel support installation with HEB 180 (15 pcs) over a length of 18 m (Fig. 5). Due to the steel support installation, there was less space available than planned for the inner lining and the external sealing. The tolerances for later



7 Innengewölbe mit Bohrverbotszonen im Endzustand
Inner lining with no-drill zones in final state



8 Abdichtungsübergang Tunnel-Tagbau (Längsschnitt Firste)
Sealing transition from tunnel to surface construction (crown longitudinal section)

Jahre ein stehender Grundwasserspiegel mit einem Druck von 3 bar zu erwarten ist. Die Dichtung erfolgte im Übergang auf die Teilabdichtung durch die Dammringkonstruktion. Um Beschädigungen an der Abdichtung durch Bohrungen und Befestigungen zu verhindern, wurden im Bereich des Stahleinbaus die Bohrverbotszonen (Bild 7) farblich markiert.

4.5 Übergang Tunnel-Tagbau

Der Übergang vom Tunnel (Abschnitt 3) zum Tagbau (Abschnitt 4) ist nicht nur der Übergang zwischen zwei Bauwerken in unterschiedlicher Bauweise, sondern auch Schnittstelle zwischen zwei Planern und zwei Unternehmern. Dies führte zu diversen Umplanungen und Anpassungen, Abmahnungen und Verzögerungen. Das Endprodukt für den Bauherrn ist ein Abdichtungsübergang mit vielen verschiedenen Systemen. Das Gewährleistungsrisiko liegt daher beim Bauherrn. Der Anschluss erfolgte als rücklaufender Stoss, das heisst, es war ein Wechsel von Spritzabdichtung auf FPO und auf Dualseal erforderlich. Die Folie wurde mit einem Combiflex-Band an den Spritzbeton angeschlossen und mit der Spritzabdichtung eingespritzt (Bild 8). Zusätzlich wurde ein Fugenband ringförmig angeordnet, um ein Eindringen von Wasser aus dem Tagbau in den Tunnel zwischen Abdichtung und Innengewölbe zu verhindern. Die Folie wurde über das Portal an die Stirnwand geführt und dort mit einer Klemmkonstruktion befestigt (Bild 9). Dieser Abschluss ist die Schnittstelle zum Tagbau. Die Klemmschiene wurde wieder gelöst und überlappend eine Bentonitmatte angebracht. Anschliessend wurde die Klemmschiene wieder angebracht und mit Flüssigkunststoff

installations could not be used. In order to achieve a sufficient load bearing capacity, the inner lining was reinforced between the steel girders with lattice girders and wire mesh mats. The installation of an FPO membrane would no longer have been possible due to the unfavourable geometry with the many recesses, therefore, the sealing in this area was realised as a sprayed sealing with Masterseal 345 (polymer-based, 5 mm). This was applied directly to the shotcrete of the excavation support and creates a strong connection between the excavation support and the inner lining. This allows the shotcrete lining to be taken considered statically as a whole.

In the area around the steel girders, various deformities and cracks were to be expected between the steel installation and shotcrete lining. A fleece was thus fixed over the steel girders as a base (substrate) for the spray-on seal. This ensured that the permissible strains of the sprayed sealing were not exceeded. In order to subsequently seal any leaks, injection channels were installed onto the girders beneath the fleece in a ring shape, in order to allow post-injections on the wet side (Fig. 6).

The transition to the foil sealing in the direction of Zurich took place immediately following the steel installation. The foil sealing was glued to the excavation support with a Combiflex tape and injected with the spray-on seal. As a connection, three six-level joint tapes were laid on the dry side in order to prevent the backflow from the pre-cut (rescue



9 Abdichtungsübergang Tunnel-Tagbau (Portalwand)
Sealing transition from tunnel to surface construction (portal wall)

ummantelt. Die Bentonitmatte wurde über die ganze Portalwand verlegt und geht weiter als aussenliegende Abdichtung des Tagbaus. Das Leckwasser der Undichtigkeiten wurde in der Sohle gezielt durch Drainage trocken- und nassseitig gefasst und drucklos in die Sohl drainage abgeleitet.

4.6 Flucht- und Rettungsstollen sowie Querverbindungen

Der Flucht- und Rettungsstollen wurde ohne Abdichtung ausgeführt.

Die Querverbindung A8 im Bereich der Vollabdichtung wurde mit einer Spritzabdichtung (Masterseal) ausgeführt. Ursprünglich war eine Teilabdichtung mit Ortbetoninnengewölbe vorgesehen. Mit dieser Projektänderung konnten erhebliche Kosten eingespart werden. Der Anschluss an den Tunnel erfolgte über einen rückläufigen Stoss. Um die Querverbindung herum und im Haupttunnel vor und nach der Querverbindung wurde ein Fugenband angeordnet, um die Wasserläufigkeit von Wasser zwischen Abdichtung und Innengewölbe zu verhindern. Die restlichen sieben Querverbindungen zum Haupttunnel wurden ohne Abdichtung ausgeführt. Die Abdichtung im Haupttunnel wurde mittels Fugenband an das Innengewölbe und mittels Combiflex-Band an den Tübbing abgeschlossen.

Bereits beim Bau zeigte sich, dass in den Portalbereichen Oerlikon und Seilergraben aufgrund der Nähe zur Oberfläche und der Talklüftung örtlich Wasserzutritte

building as white tank, approx. 2 bar pressure difference). No measures were taken on the wet side, as a standing water table with a pressure of 3 bar is also to be expected in the area around the Brunnenhof shaft over the years. The sealing was made in the transition to the partial sealing through the bulkhead ring construction. In order to avoid damage to the seal from drilling and mounting, the no-drill zones in the steel installation area (Fig. 7) were marked in colour.

4.5 Transition from Tunnel to Surface Construction

The transition from the tunnel (section 3) to surface construction (section 4) is not only the transition between two structures of different construction, but also the interface between two planners and two contractors. This led to all kinds of rescheduling and adjustments, warnings and delays. The end product for the client is a sealing transition with many different systems. The client therefore assumes the guarantee risk. The connection was made as a returning recess, i.e. a switch from spray-on sealing to FPO and to Dualseal was required. The membrane was connected to the shotcrete with a Combiflex tape and covered with the spray-on sealing (Fig. 8). In addition, a joint tape was arranged in a ring to prevent ingress of water from surface construction into the tunnel between the seal and the inner lining. The membrane was led over the portal to the front wall and attached there with a clamp device (Fig. 9). This connection is the interface with the surface construction. The clamping rail was detached again and an overlapping bentonite mat was applied. The clamping rail was then reattached and coated with liquid plastic. The bentonite mat was laid over the entire portal wall and continues as an external sealing for the surface construction. The water



10 Versinterungen im Entwässerungsschacht FLRS
Sintering in ERT drainage shaft



11 Aufweitung Rigole FLRS
ERT infiltration ditch expansion

vorkamen. Die Nassstellen wurden mittels Noppenbahnen und Halbschalen gefasst und in die seitlichen Rigolen geleitet. Dieses Vorgehen hat sich bewährt, die Anforderungen an die Dichtigkeitsklasse 2 wurden erfüllt. Kritischer ist der Sohlbereich mit aufsteigendem Bergwasser. Obwohl das Bergwasser vom Chemismus her unkritisch hätte sein sollen, traten starke Versinterungen auf (Bild 10). Da das eindringende Bergwasser in den seitlichen Rigolen der Fahrbahn gefasst wird (technisch keine Sohl-Drainage vorgesehen, bedingt durch die Prognose, dass die Molasse trocken ist, und baulich nicht möglich infolge Entwässerungsleitung und Kabelrohrblock mit Schächten), führte dies zu einem neuen Gleichgewicht mit Ausfällungen. Im Portalbereich mussten daher nachträglich die Rigolen ausgeweitet (Bild 11) und ein Retentionsschacht für die Ausfällungen erstellt werden. Da die Kabelzugschächte nicht entwässert sind, sind diese teilweise nass und das eindringende Wasser fließt durch die Kabelschutzrohre ab, bei gleichzeitiger Versinterung. Die Schächte wurden daher temporär mit Depotsteinen besetzt.

5 Fazit der Bauleitung

Das abgestufte Abdichtungskonzept im Weinbergtunnel mit den Abdichtungsübergängen hat sich bewährt. Die Kombination FPO-Folie und Spritzabdichtung Masterseal mit Combiflex-Bändern erfüllt die Dichtigkeitsanforderungen. Die Abdichtung wurde in der geforderten Qualität eingebaut, Nachinjektionen waren nicht erforderlich. Die Übergänge zu den Tagbauten mit Profilwechsel von der Tunnelröhre zu den Rahmentragwerken stellten eine Herausforderung dar. Auch der Wechsel der Abdichtungssysteme ist problematisch. Der Übergang beim Portal Oerlikon ist nicht dicht.

leaks were collected specifically in the invert by drainage on the dry and wet sides and directed without pressure into the invert drainage.

4.6 Escape and Rescue Tunnels and Cross-Passages

The escape and rescue tunnels were constructed without sealing.

The A8 cross-passage in the full sealing area was constructed with a spray-on seal (Masterseal). Originally, a partial sealing with in-situ concrete inner shell lining was planned. This change to the project allowed significant cost savings to be made. The connection

to the tunnel was made as a returning recess. A joint tape was placed around the cross-passage and in the main tunnel before and after the cross-passage to prevent water from running between the seal and the inner lining. The remaining seven cross-passages to the main tunnel were not sealed. The sealing in the main tunnel was connected to the inner lining using joint tape and to the segments using Combiflex tape.

During the construction stage it became already apparent that local ingresses of water occurred in the Oerlikon and Seilergraben portal areas due to their proximity to the surface and valley fissures. The water in wet areas was collected using dimpled drainage membranes and half-shells and led into the lateral infiltration ditches. This procedure proved itself to be effective and the requirements for sealing class 2 were met. More critical is the invert area with rising groundwater. Although the groundwater should not have been significant from a chemical perspective, severe sintering occurred (Fig. 10). Since the ingressing groundwater is collected in the lateral infiltration ditches of the track (technically no invert drainage planned, due to the forecast that the molasse is dry, and not possible from a construction perspective due to the draining pipe and cable pipe block with shafts), this led to a new balance with precipitations. In the portal area, the infiltration ditches therefore had to be expanded after the fact (Fig. 11) and a retention shaft had to be created for precipitation. As the cable ducts are not drained, they are partially wet and the ingressing water flows through the cable protection conduits, with simultaneous sintering. The shafts were therefore temporarily fitted with sustained-supply stones.

Die Kisseinteilung im Bereich P+I hat einen grossen Einfluss auf die Dichtigkeit des Gesamtsystems und ist dem Unternehmer in der Submission vorzugeben.

Die Portalbereiche des Flucht- und Rettungstollens hätten aus jetziger Sicht abgedichtet werden sollen. Aufgrund des ausgereizten Querschnitts wäre nur eine Spritzabdichtung möglich gewesen. In den Schleusen, wo eine Spritzabdichtung appliziert wurde, hat sich dieses System sehr gut bewährt, wenn auch die Qualitätskontrolle eine gewisse Herausforderung darstellt. In der Sohle wäre eine Entspannung mit Noppenfolie und Sohl-Drainage eine gute Alternative gewesen. Dass die Kabelzugschächte nicht entwässert sind, führt zu erhöhtem Unterhalt.

Literatur/References

- [1] Bosshard, M.; Kobel, R.; Stadelmann, H.: Neue Bahn-Durchmesserlinie Zürich: Herausforderungen bei TBM-, Rohr- und konventionellen Vortrieben; STUVA-Tagung 2009
- [2] Bosshard, M.; Bolliger, J.; Kobel, R.: Durchmesserlinie Zürich, Weinbergtunnel – Herausforderung Lockergesteinsstrecke und Flussunterquerung; Geomechanik und Tunneling/Geomechanik und Tunnelbau 2011

5 Conclusion of the Site Supervision

The graduated sealing concept in the Weinberg tunnel with the sealing transitions has proven itself. The combination of FPO membrane and Masterseal spray-on sealing with Combiflex tapes met the requirements for impermeability. The sealing was installed in the required quality and regrouting was not necessary. Transitions to surface construction with the change in profile from the tunnel to the framework structures presented a challenge. Changing the sealing systems is also problematic. The transition at the Oerlikon portal is not watertight.

The distribution of the pads in the P+I area has a major impact on the impermeability of the entire system and must be specified to the contractor in the tender.

From today's perspective, the portal areas of the escape and rescue tunnel should have been sealed. Due to the exploited cross-section, only spray-on sealing would have been possible. In the locks where a spray-on sealing was applied, this system proved itself to work well, although the quality control does also pose a certain challenge. In the invert, relief through dimpled foil and invert drainage would have been a good alternative. The fact that the cable ducts are not drained leads to increased maintenance.

Romed Insam, Dipl.-Ing., BBT SE, Innsbruck/AT
 Eric Carrera, MSc ETH Bau-Ing., PG BBTN, Amberg Engineering AG, Regensdorf-Watt/CH
 Remo Crapp, Dipl. Bau-Ing. FH, PG BBTN, Lombardi SA, Minusio/CH

Das Entwässerungssystem des Brenner-Basistunnels

Randbedingungen für die Ausbildung des Entwässerungssystems am Brenner-Basistunnel auf der österreichischen Projektseite

Der Brenner-Basistunnel besteht aus zwei eingleisigen Haupttunnelröhren in einem Abstand von 70 m, die alle 333 m mittels Querschlägen miteinander verbunden sind. Unterhalb der beiden Tunnelröhren verläuft mittig der Erkundungsstollen. Dieser übernimmt im Betriebszustand die Funktion eines Servicestollens, in dem Instandhaltungsarbeiten an technischen Anlagen und Entwässerungselementen der Bahnanlage durchgeführt werden.

The Brenner Base Tunnel Drainage System

Brenner Base Tunnel Drainage System Design Boundary Conditions on the Austrian Side of the Project

The Brenner Base Tunnel consists of two single-track main tunnels 70 m apart, which are connected to each other by cross-passages every 333 m. An exploratory tunnel runs centrally beneath the two tunnels. During operation, it assumes the function of a servicing tunnel in which maintenance work on technical systems and railway system drainage elements are carried out.

1 Einleitung

Der SCAN-MED-Korridor (Skandinavien–Mittelmeer) bildet die längste Nord-Süd-Verbindung mitten durch Europa von Helsinki bis La Valletta. Diese transeuropäische Verkehrsverbindung verbindet die urbanen Zentren von Finnland, Schweden, Dänemark, Deutschland, Österreich und Italien mit den Häfen in Skandinavien und dem Mittelmeer. Kernstück des SCAN-MED-Korridors ist der ca. 55 km lange Brenner-Basistunnel (BBT) von Innsbruck bis Franzensfeste, welcher der Überwindung der natürlichen Barriere der Alpen dient. Damit stellt der BBT eines der wichtigsten Infrastrukturprojekte dar und genießt höchste Priorität in der EU.

Der BBT schliesst im Norden sowohl an den Bahnhof Innsbruck als auch an die Zulaufstrecken im Unterinntal an und mündet im Süden in die projektierte Neubaustrecke Richtung Verona. Die konkreten Planungen laufen seit 1999, Baubeginn für die ersten Bauabschnitte war im Jahr 2007 [2]. Die Inbetriebnahme des BBT für den fahrplanmäßigen Betrieb ist 2027 geplant. Die Kosten werden auf 8,7 Mia. Euro geschätzt [2]. Diese werden zu 50% (Erkundungsmassnahmen) bzw. 40% (Hauptbaumassnahmen) durch die Europäische Union finanziert. Die übrigen 50% (Erkundungsmassnahmen) bzw. 60% (Hauptbaumassnahmen) werden durch Österreich und Italien jeweils zur Hälfte getragen.

1 Introduction

The SCAN-MED (Scandinavia–Mediterranean) corridor forms the longest north-south route straight through Europe from Helsinki to La Valletta. This trans-European transport link connects the urban centres of Finland, Sweden, Denmark, Germany, Austria and Italy with the ports in Scandinavia and the Mediterranean. The core of the SCAN-MED corridor is the approx. 55 km long Brenner Base Tunnel (BBT) from Innsbruck to Franzensfeste, which serves to overcome the natural barrier of the Alps. The BBT is therefore one of the most important infrastructure projects and enjoys highest priority in the EU.

In the north, the BBT connects to both Innsbruck station and the access routes in the lower Inn valley, and converges with the planned new line to Verona in the south. Specific planning has been underway since 1999, and construction of the first section began in 2007 [2]. Commissioning of the BBT for scheduled operations is planned for 2027. The costs are estimated at EUR 8.7 billion [2]. They are borne to 50% (investigation measures) and 40% (main construction measures) by the European Union. The remaining 50% (investigation measures) and 60% (main construction measures) are carried by Austria and Italy at fifty percent each.

Le système de drainage du tunnel de base du Brenner

Contraintes pour la mise en place du système de drainage du tunnel de base de Brenner du côté autrichien du projet

Du côté autrichien du projet, les tubes principaux du tunnel sont réalisés en majeure partie à l'aide de tunneliers à bouclier. Dans ces portions, il s'agit de trouver le moyen de drainer les eaux phréatiques par l'espace laissé entre les voussoirs scellés par des joints étanches et la roche sur de larges segments. L'eau phréatique est ainsi collectée au niveau de chaque rameau, puis évacuée par un tuyau vertical vers la galerie de reconnaissance ou des galeries de service, avant d'être rejetée à l'extérieur au niveau du portail. Il est ainsi possible d'éviter les drainages latéraux dans les tubes principaux du tunnel sur de longues portions et de réduire ainsi le travail de maintenance.

Il sistema di drenaggio della galleria di base del Brennero

Condizioni quadro per la realizzazione del sistema di drenaggio della galleria di base del Brennero sul lato austriaco del progetto

Le canne principali della galleria vengono in gran parte realizzate, sul lato austriaco del progetto, da TBM scudate. In questi tratti si tenta di rendere possibile il drenaggio dell'acqua di falda in ampi settori attraverso la fessura anulare tra i conci di rivestimento stagni e la montagna. L'acqua di falda viene raccolta presso ogni cunicolo trasversale, convogliata tramite una condotta verticale nei cunicoli esplorativi ovvero di servizio e direzionata verso l'esterno all'imbocco. In questo modo, i drenaggi longitudinali nelle canne principali possono essere eliminati su lunghi tratti, con una conseguente riduzione delle spese di manutenzione.

2 Projektübersicht

2.1 Tunnelsystem

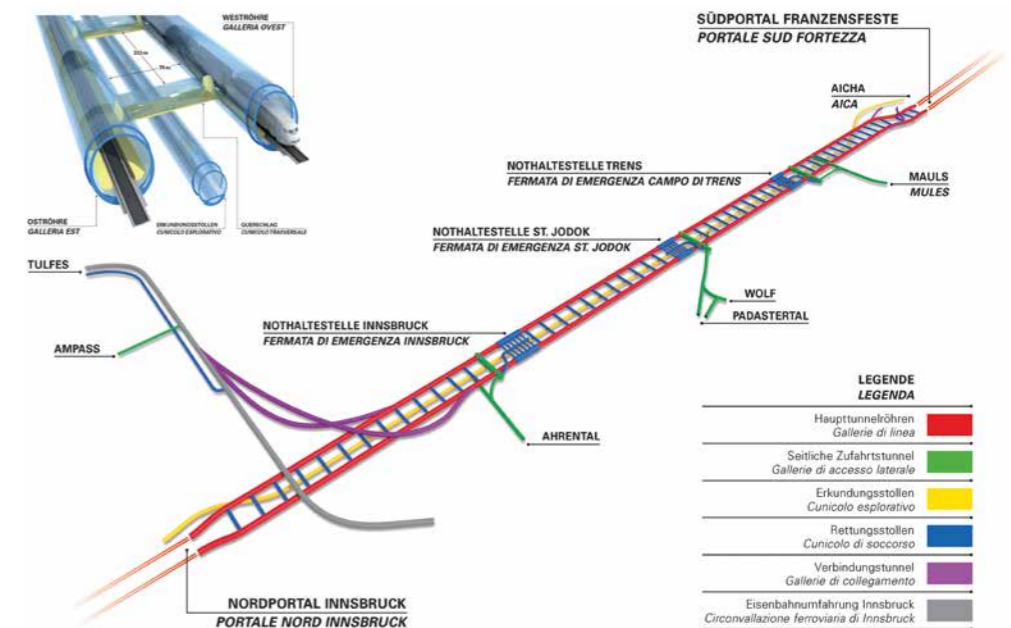
Der BBT besteht aus zwei eingleisigen Haupttunnelröhren in einem Abstand von 70 m, die alle 333 m durch Querschläge miteinander verbunden sind, sowie aus einem um ca. 10 m bis ca. 18 m tiefer liegenden, in der Mitte der beiden Haupttunnelröhren situierten Erkundungs- bzw. Servicestollen (siehe Bild 1). Zum Tunnelsystem gehören auch die vier Verbindungstunnel im Norden und Süden zur Verknüpfung mit den Bestandsstrecken. Darüber hinaus wird auch der seit knapp über 20 Jahren bestehende zweigleisige Inntaltunnel (Umfahrung Innsbruck) durch bauliche Massnahmen sicherheitstechnisch aufgewertet und in das Tunnelsystem eingegliedert.

Es sind insgesamt drei Nothaltestellen in einem Abstand von max. 20 km jeweils in Innsbruck, St. Jodok und Trens vorgesehen. An jeder Nothaltestelle ist eine Querkaverne situiert, in welcher ein Grossteil der technischen Anlagen für den Betrieb und die Instandhaltung konzentriert wird. Jede Nothaltestelle ist über die

2 Project Overview

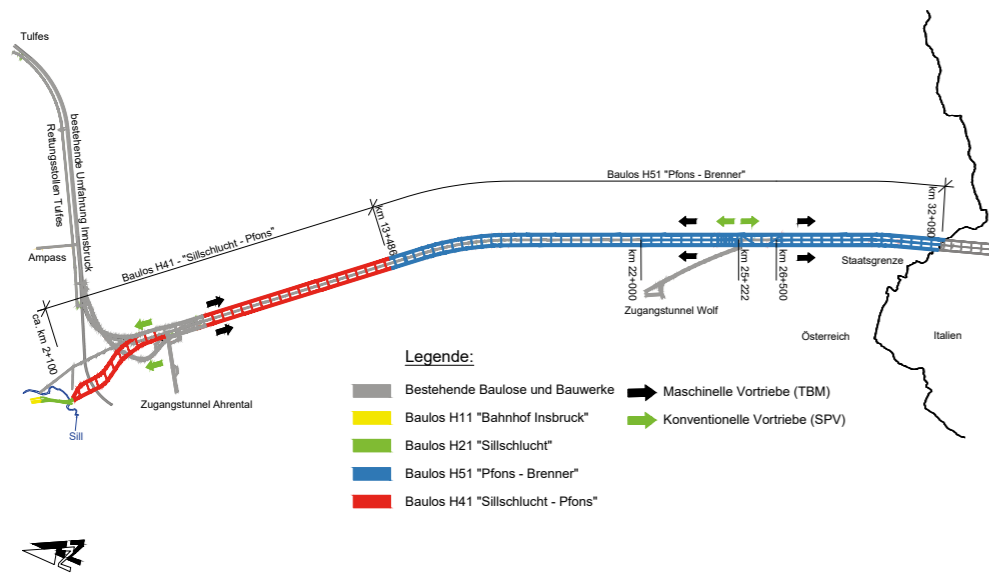
2.1 Tunnel System

The BBT consists of two single-track main tunnels 70 m apart, which are connected by cross-passages every 333 m, as well as an exploratory and service tunnel, located approximately 10 m to 18 m below and situated in the centre of the two main tunnels (see Fig. 1). The tunnel system also includes four connecting tunnels in the north and south for linking with the existing routes. In addition, the double-track Inn Valley Tunnel (Innsbruck bypass), which has existed for just



1 Übersicht Tunnelsystem Brenner-Basistunnel (BBT)
 Brenner Base Tunnel (BBT) system overview

Quelle/credit: BBT SE



2 Übersicht über die noch auszuführenden Hauptlose auf der österreichischen Projektseite und Vortriebskonzept
 Overview of the main lots still to be executed on the Austrian side of the project and tunnelling concept

Querkavernen durch einen Zufahrtstunnel erschlossen und mit Strassenfahrzeugen erreichbar. Die Zufahrtstunnel, die ein maximales Gefälle von ca. 10% aufweisen, münden darüber hinaus auch direkt in den tiefer gelegenen Erkundungsstollen. Im BBT ist eine Überleitstelle südlich der Nothaltestelle St. Jodok vorgesehen.

Die Längsneigung des Basistunnels beträgt 6,7‰ auf der Nordseite (Österreich) und 4‰ auf der Südseite (Italien) des Brenners. Die Trassierung des BBT ist – mit Ausnahme der Portalbereiche – auf eine maximale Entwurfsgeschwindigkeit von 250 km/h ausgelegt.

2.2 Rohbaulose auf beiden Projektseiten

Die Rohbauarbeiten des BBT gliedern sich in verschiedene Vor-, Erkundungs- und Hauptlose, die länderspezifisch in Österreich respektive Italien ausgeführt werden. Die zukünftigen Gewerke der Ausrüstung und Bahntechnik hingegen werden grenzüberschreitend ausgeführt. Eine Übersicht über die wichtigsten Erkundungs- und Hauptlose (Rohbau) des BBT geht aus der Tabelle 1 hervor.

2.3 Hauptlose auf der österreichischen Projektseite

Das Hauptlos H11 «Bahnhof Innsbruck» (derzeit im Bau) beinhaltet die erforderlichen Baumassnahmen für die Einbindung des BBT in den Hauptbahnhof Innsbruck (siehe Bild 2).

Das Hauptlos H33 «Tulfes-Pfons» (derzeit im Bau) besteht aus dem maschinellen Vortrieb des ca. 15 km langen Erkundungsstollenabschnittes von km 6,9 bis km 22,0 und aus den konventionellen Sprengvortrieben des Rettungstollens Tulfes, der Querkaverne Ahrental, der Verbindungstunnel sowie der Nothaltestelle Innsbruck.

nels, which have a maximum gradient of about 10%, also open directly into the deeper exploratory tunnel. A cross over linking the two running tubes is planned south of the St. Jodok emergency station.

The longitudinal base tunnel gradient is 6.7‰ on the northern side of the Brenner (Austria) and 4‰ on the southern side (Italy). The BBT alignment – with the exception of the portal areas – is designed for a maximum speed of 250 km/h.

2.2 Structural Work Lots on Both Project Sides

The BBT's structural works are subdivided into various preliminary, exploration and main lots, which are country-specific and carried out in Austria and Italy respectively. The prospective equipment and railway engineering lots, on the other hand, will be transnational. An overview of the most important BBT exploration and main lots (structural works) is shown in Table 1.

2.3 Main Lots on the Austrian Side of the Project

The main H11 'Innsbruck Station' lot (currently under construction) includes the construction measures necessary to integrate the BBT in Innsbruck's main railway station (see Fig. 2).

The main H33 'Tulfes-Pfons' lot (currently under construction) consists of mechanised tunnelling of the approximately 15 km long exploratory tunnel section from km 6.9 to km 22.0 and the conventional drill and blast operations for the Tulfes rescue tunnel, the Ahrental transverse cavern, the connecting tunnel and the Innsbruck emergency station.

The main H21 'Sillschlucht' lot includes short cut-and-cover tunnels, retaining walls and bridges in the area between

over 20 years, will be upgraded in terms of safety by structural measures and will be incorporated into the tunnel system.

A total of three emergency stations at a distance of 20 km max. each, in Innsbruck, St. Jodok and Trens, are planned. A transverse cavern, in which a large part of the technical facilities for operation and maintenance are concentrated is situated at each emergency station. Each emergency station is accessed via the transverse caverns through an access tunnel and is accessible by road vehicles. The access tunnels,

Quelle/credit: PG BBTN

Tabelle 1 Übersicht über die Erkundungs- und Hauptlose (Rohbau) des BBT
 (grau beschriftete Lose sind bereits fertig oder derzeit in Bau, schwarz beschriftete Lose sind noch auszuschreiben bzw. noch zu bauen)

Table 1 Overview of the exploration and main lots (structural work) for the BBT
 (lots in grey are already complete or currently under construction, lots in black have yet to be tendered and/or constructed)

Erkundungslose Exploration lots		Land Country	Ausführung Construction
E41	Erkundungslos Ahrental Ahrental exploration lot	Österreich Austria	2009–2013
E51	Erkundungslos Wolf 1 Wolf 1 exploration lot	Österreich Austria	2011–2012
E52	Erkundungslos Wolf 2 Wolf 2 exploration lot	Österreich Austria	2013–2017
E53	Geologische Versuche Hochstegenzone Hochstegenzone geological testing	Österreich Austria	2016–2018
E62	Erkundungslos Mauls 1 Mauls 1 exploration lot	Italien Italy	2011–2015
E91	Erkundungslos Aicha-Mauls Aicha-Mauls exploration lot	Italien Italy	2008–2011
Hauptlose Main lots		Land Country	Ausführung Construction
H11	Hauptlos Bahnhof Innsbruck Innsbruck Station main lot	Österreich Austria	2017–2020
H21	Hauptlos Sillschlucht Sillschlucht main lot	Österreich Austria	2018–2022
H33	Hauptlos Tulfes-Pfons Tulfes-Pfons main lot	Österreich Austria	2014–2019
H41	Hauptlos Sillschlucht-Pfons Sillschlucht-Pfons main lot	Österreich Austria	2020–2023
H51	Hauptlos Pfons-Brenner Pfons-Brenner main lot	Österreich Austria	2018–2023
H61	Hauptlos Mauls 2–3 Mauls 2–3 main lot	Italien Italy	2016–2023
H71	Hauptlos Unterquerung Eisack Eisack underground crossing main lot	Italien Italy	2014–2022
H81	Hauptlos Bahnhof Franzensfeste Franzensfeste Station main lot	Italien Italy	Wird in mehreren Arbeiten und sukzessive hergestellt built gradually in several works

Quelle/credit: BBT SE

Das Hauptlos H21 «Sillschlucht» beinhaltet kurze Tunnel in offener Bauweise, Stützmauern und Brücken im Bereich zwischen dem Bahnhof Innsbruck und dem Nordportal des BBT. Mit diesem Hauptlos werden darüber hinaus auch die ersten 500 m je Haupttunnelröhre vom Nordportal in Richtung Süden vorgetrieben.

Anschliessend zum Hauptlos H21 und nach Fertigstellung des Hauptloses H33 folgt das Baulos H41 «Sillschlucht-Pfons». Dieses beinhaltet den Vortrieb der restlichen Haupttunnelabschnitte bis km 13,5, den Innenausbau der Haupttunnelröhren und Querschläge vom Nordportal bis km 13,5, den Innenausbau der Nothaltestelle Innsbruck, der Querkaverne Ahrental, der Querschläge, der Abzweigungsbaugeräte, des Zufahrtstunnels Ahrental und des Erkundungsstollenabschnittes von der Sillschlucht bis km 13,5.

Das Herzstück des Hauptloses H51 «Pfons-Brenner» (von km 13,5 bis zur Staatsgrenze bei km 32,1) ist der Knoten Wolf, bestehend aus der Nothaltestelle St. Jodok (siehe Bild 3), der Querkaverne St. Jodok und der Überleitstelle. Bestandteile dieses Bauloses sind ferner die Vortriebe der Haupttunnelröhren von km 13,5 bis km 32,1 (Staatsgrenze) und des Erkundungsstollens.

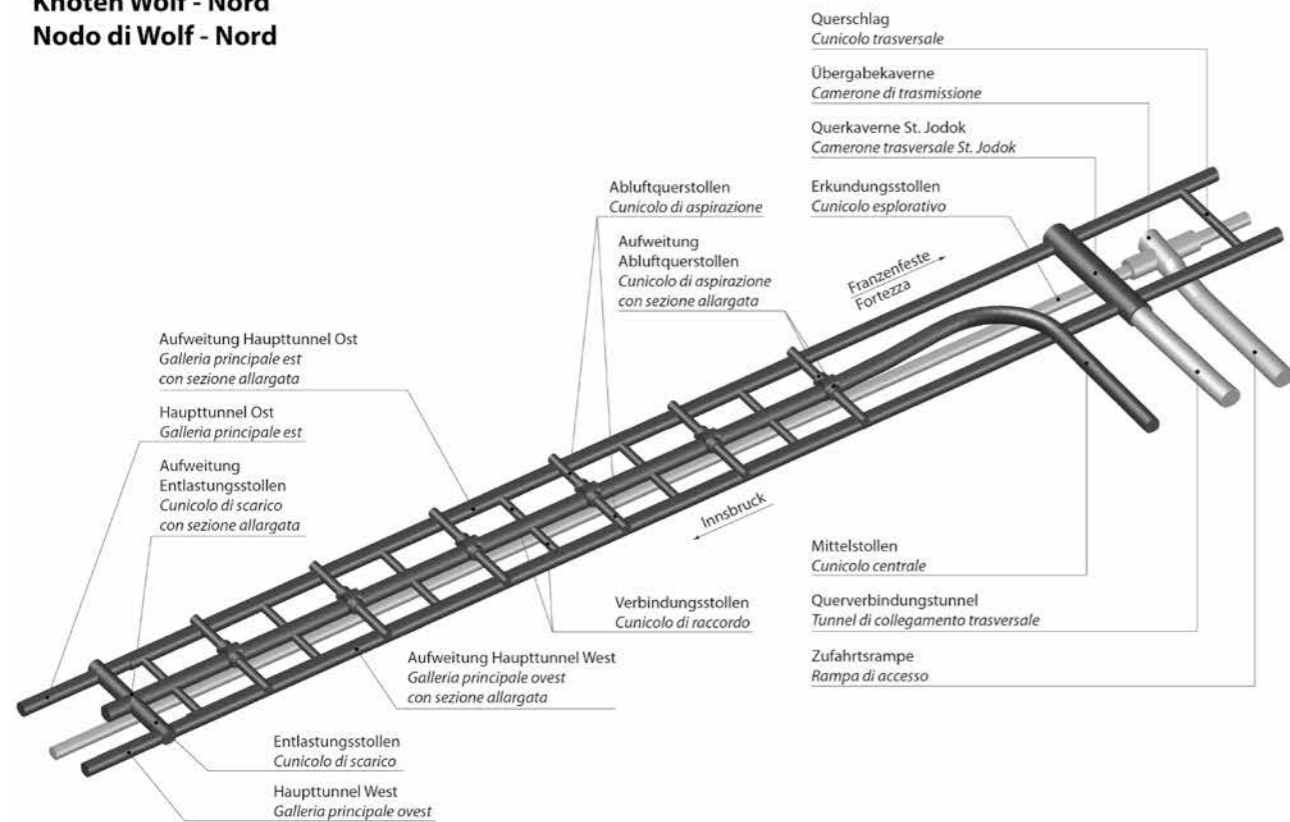
2.3.1 Vortriebskonzept und logistische Randbedingungen

Die Haupttunnelvortriebe auf der österreichischen Projektseite werden über die Zufahrtstunnel Ahrental und Wolf abgewickelt (siehe Bild 2). Der Ausbruch der Nothaltestel-

Innsbruck station and the north BBT portal. In addition, in this main lot, the first 500 m of each main tunnel will be driven southwards from the north portal.

The 'Sillschlucht-Pfons' H41 construction lot follows the main H21 lot and completion of the main H33 lot. It includes tunnelling of the remaining main tunnel sections up to km 13.5, interior lining of the main tunnels and cross-passages from the north portal to km 13.5, the interior lining of the Innsbruck emergency station, the Ahrental transverse cavern, the

Knoten Wolf - Nord
Nodo di Wolf - Nord



3 Übersicht Nothaltestelle St. Jodok (A)
St. Jodok (A) emergency station overview

len sowie der Querkavernen, der Überleitstelle und der 87 Querschläge erfolgt konventionell im Sprengverfahren. Der Vortrieb der Haupttunnelröhren erfolgt maschinell mit vier Schildmaschinen ab dem Zwischenangriff Wolf und zwei Schildmaschinen ab dem Zwischenangriff Ahrental. Die Haupttunnelvortriebe von der NHS Innsbruck Richtung Norden bis zum Durchschlagspunkt zum Baulos H21 erfolgen konventionell.

Der Erkundungsstollen wird ab dem Zwischenangriff Wolf Richtung Norden und Richtung Süden konventionell im Sprengverfahren ausgebrochen. Ab dem Zwischenangriff Ahrental wird der Erkundungsstollen Richtung Süden mittels einer Gripper-TBM vorgetrieben.

2.3.2 Regelprofile Haupttunnelröhren und Erkundungsstollen

In den maschinell aufgefahrenen Haupttunnelabschnitten ist mehrheitlich ein einschaliger Tübbingausbau vorgesehen (siehe Bild 4). Der Ausbruchquerschnitt beträgt ca. 84,5 m² und weist einen nominellen Bohrdurchmesser von 10,37 m auf. Die Ausschreibungsplanung auf der österreichischen Projektseite sieht eine Tunnelauskleidung mit 40 cm dicken und 1,90 m breiten Tübbing vor. Dem Entwurf liegt ein konisch ausgeführtes, gedichtetes Universalringssystem (Universal-tübbing), Ringteilung 6 + 0 mit einem innenliegenden Fertigteil-Sohlelement, zugrunde.

cross-passages for the junction structures, the Ahrental access tunnel and the exploratory tunnel up to km 13.5.

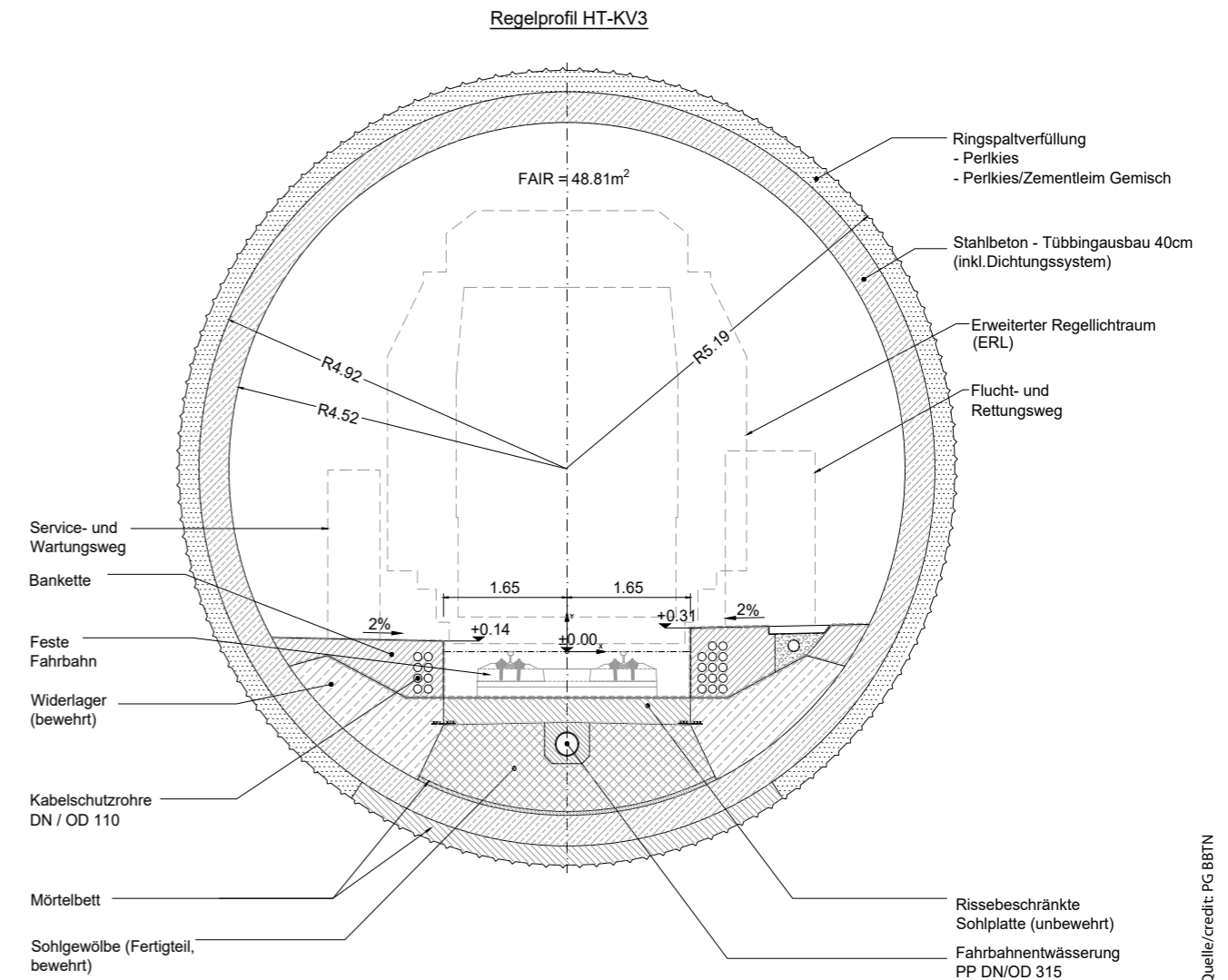
The heart of the main H51 'Pfnos-Brenner' lot (from km 13.5 to the national border at km 32.1) is the Wolf hub, consisting of the St. Jodok emergency station (see Fig. 3), the St. Jodok transverse cavern and the cross over connecting the two main tubes with each other. Additionally, the excavation of the main tunnels from km 13.5 to km 32.1 (national border) and the excavation of the exploratory tunnel are also part of this construction lot.

2.3.1 Tunnelling Concept and Logistical Boundary Conditions

The main tunnel drives on the Austrian side of the project are handled via the Ahrental and Wolf access tunnels (see Fig. 2). The emergency stations, transverse caverns, cross over and the 87 cross-passages are excavated using conventional drill and blast methods. The main tunnels are excavated by four shield machines from the Wolf intermediate attack and two shield machines from the Ahrental intermediate attack. The main tunnel drive from NHS Innsbruck northwards to the breakthrough point with construction lot H21 is conventional.

The exploratory tunnel is excavated conventionally northwards and southwards from the Wolf intermediate at-

Quelle/credit: PG BBTN



4 Regelprofil Haupttunnel, maschineller Vortrieb HT-KV3 (einschaliger Ausbau ohne Ulmendrainagen)
Main tunnel standard section, mechanised tunnelling HT-KV3 (single-shell lining without sidewall drainage)

Die Tübbingauskleidung fungiert generell als alleiniges Trag- und Gebrauchselement. Bei Verletzungen der Gebrauchstauglichkeit des Tübbingausbaus bei sehr hohen Belastungsniveaus im Bereich von Störzonen und in Querschlagkreuzungsbereichen wird nachträglich eine bewehrte Innenschale aus Ortbeton eingebaut (siehe Bild 5).

Das Erfordernis des Einbaus einer Innenschale wird gemeinsam zwischen Bauherr und Projektverfasser, nach Beobachtung des tatsächlich aufgetretenen Systemverhaltens während der Vortriebsphase und nach Abwägung der möglichen Alternativen (Sanierung von vereinzelt beschädigten Tübbingringen), festgelegt.

Das Bergwasser wird drucklos abgeleitet. Als Abdichtungsebene fungieren in den einschaligen Abschnitten die Tübbinge mit Dichtungsrahmen. In den zweischaligen Abschnitten wird zwischen Innenschale und Tübbingring ein Abdichtungssystem eingebaut.

tack using drill and blast methods. The exploratory tunnel is driven southwards by means of a Gripper TBM from the Ahrental intermediate attack.

2.3.2 Main Tunnels and Exploratory Tunnel Standard Cross Sections

In the main tunnel sections, which are excavated by shield TBM's, a single-shell segmental lining is predominantly planned (see Fig. 4). The excavated cross-section is approximately 84.5 m² with a nominal bore diameter of 10.37 m. Tender planning on the Austrian side of the project foresees a tunnel lining consisting of 40 cm thick and 1.90 m wide segments. The design is based on a conical, sealed, universal ring system (universal segments), ring divisions 6 + 0, with an internal, prefabricated invert segment.

The segmental lining generally serves as the sole supporting and service element. If the serviceability of the segmental lining is compromised at very high stress levels around fault

Quelle/credit: PG BBTN

In den Haupttunneln ist ein Trennwassersystem vorgesehen. Wenn möglich wird das Bergwasser über den Ringspalt zwischen Tübbing und Gebirge drainiert (siehe Kap. 4.2). Ist diese Ausbildung nicht möglich, werden auf beiden Gewölbeseiten auf Höhe der Widerlager längs laufende Drainagen, zur Fassung der zutretenden Bergwässer, eingebaut. Als Drainagerohre sind Teilsickerrohre DN/OD 250 mm gemäss der Richtlinie «Tunnelentwässerung» [6] vorgesehen. Zur Aktivierung der Ulmendrainagen werden in jedem zweiten Ring im Übergangsbereich Sohle/Ulme Drainagebohrungen durch den Tübbing hergestellt.

Je nach tatsächlich angetroffenen Verhältnissen kommen somit in den maschinell aufgefahrenen Abschnitten folgende drei Regelprofile zum Einsatz:

- HT-KV1 (zweischaliger Ausbau mit Ulmendrainagen) (siehe Bild 5)
- HT-KV2 (einschaliger Ausbau mit Ulmendrainagen) (siehe Bild 6)
- HT-KV3 (einschaliger Ausbau ohne Ulmendrainagen) (siehe Bild 4)

Anfallendes Betriebs- und Schmutzwasser aus dem Fahrraum wird über die Fahrbahntwässerungsleitung, die mit einem Stetswasserlauf von 4 l/s ausgebildet wird, abgeführt. Die Einleitung von Betriebs- und Schmutzwasser in die Fahrbahntwässerungsleitung erfolgt ca. alle 111 m im Bereich der Kontrollschächte über zwei lateral angeordnete Abläufe.

Die konventionell im Sprengvortrieb ausgebrochenen Haupttunnelröhren sowie teilweise der Erkundungsstollen werden als zweischaliges System mit einer klassischen Regenschirmabdichtung ausgeführt. Der Erkundungs- und spätere Servicestollen weist im Sohlbereich ein Sohlgerinne zur Abführung des Bergwassers (Abflussquerschnitt ca. 1 m²) auf (siehe Bild 7).

3 Randbedingungen für die Ausbildung des Entwässerungssystems

3.1 Konstruktive Aspekte und Randbedingungen aus der zukünftigen Instandhaltung und dem Betrieb

Das Tunnelsystem des BBT und dessen konstruktive Ausbildung – darunter auch das Entwässerungssystem – sowie die technischen Anlagen haben einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Instandhaltung. Diese hat wiederum Auswirkungen auf den Betrieb und die Verfügbarkeit sowie auf die zukünftigen Betriebs- und Instandhaltungskosten [4].

Die besondere Situation beim Brenner-Basistunnel mit einem unter den Haupttunnelröhren verlaufenden Erkundungs- bzw. Servicestollen bietet im Vergleich zu anderen langen Eisenbahntunneln ein hohes Optimierungspotenzial, das für eine effiziente und wirtschaftliche Instandhaltung der technischen Anlagen und des Entwässerungssystems positiv genutzt werden kann.

zones and in cross-passage intersections, a reinforced inner lining of in-situ concrete will be installed subsequently (see Fig. 5).

The requirement for installation of an inner lining is determined jointly between the client and the designer after observation of the actual system behaviour during the excavation phase and after considering the possible alternatives (refurbishment of individual, damaged segmental rings).

Groundwater is discharged using gravity methods. In the single-shell sections, the segments with gaskets act as the sealing plane. In the double-shell sections, a sealing system is installed between the inner lining and the segmental lining.

Separate sewer systems are planned for the main tunnels. Where possible, the groundwater is drained via the annular gap between the segment rings and the rock mass (see Sec. 4.2). If this design is not possible, longitudinal drains are installed on both sides of the vault at the level of the abutments to capture the incoming groundwater. The drainpipes are ND/OD 250 mm partial drainpipes in accordance with the 'Tunnel drainage' guidelines [6]. To activate the tunnel's sidewall drainage, drainage holes are bored through the segments in every second ring in the base/sidewall transition zone.

Depending on the actual conditions encountered, the following three standard sections are therefore used in the TBM excavated sections:

- HT-KV1 (double-shell lining with sidewall drainage) (see Fig. 5)
- HT-KV2 (single-shell lining with sidewall drainage) (see Fig. 6)
- HT-KV3 (single-shell lining without sidewall drainage) (see Fig. 4)

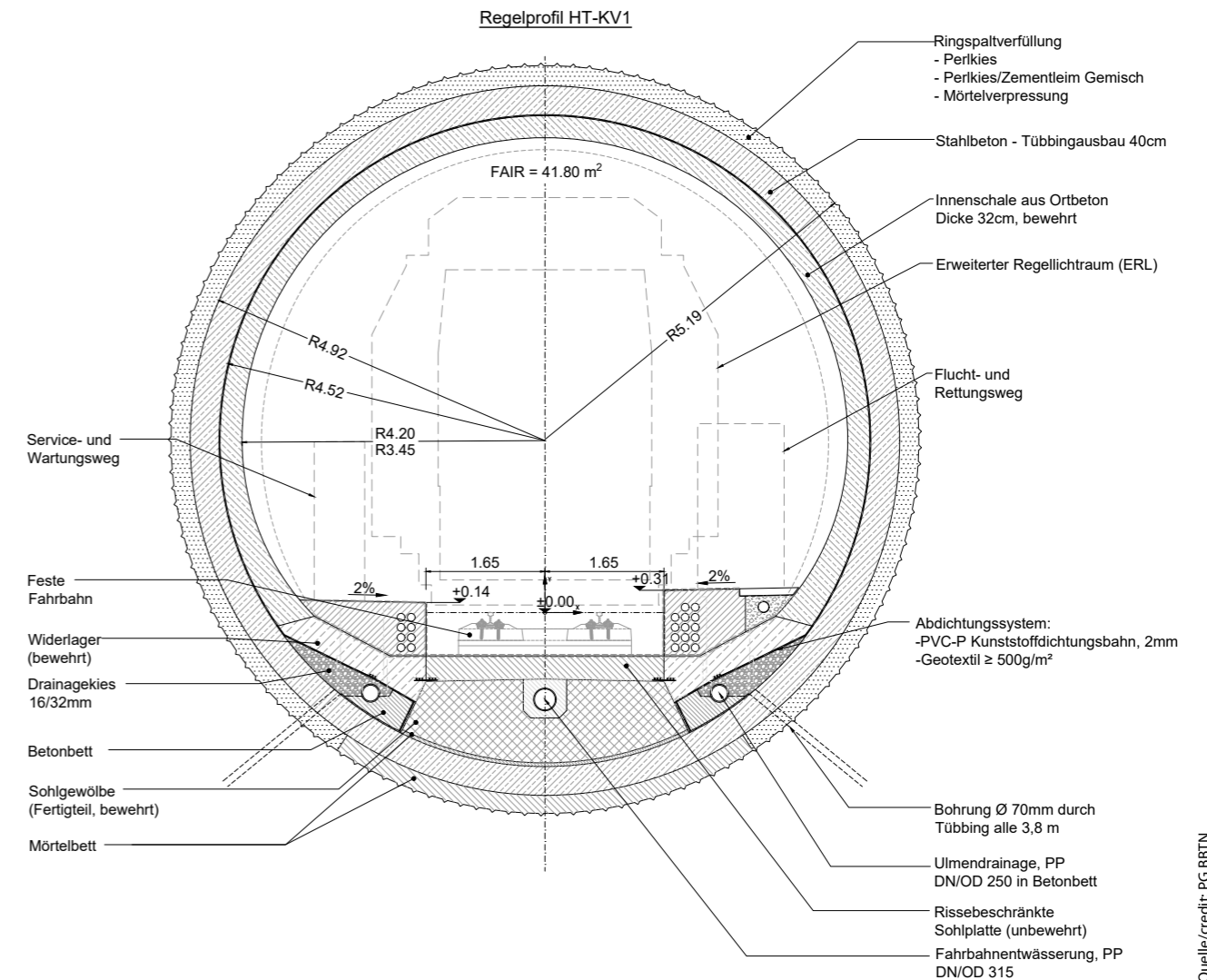
Accumulating operating and waste water from the track surface is discharged via a separate pipe, which is designed for a continuous water flow of 4 l/s. Operating and waste water is discharged into this pipe approximately every 111 m in the area of the inspection chambers via two lateral drains.

The conventionally by drill and blast excavated main tunnels as well as some sections of the exploratory tunnel, are designed as double-shell systems with a traditional umbrella seal. The exploratory and subsequent servicing tunnel has a floor channel for groundwater removal (flow cross-section approx. 1 m²) (see Fig. 7).

3 Drainage System Design Boundary Conditions

3.1 Structural Aspects and Boundary Conditions Derived from Future Maintenance and Operations

The BBT tunnel system and its structural design – including the drainage system – as well as the technical facilities, have



5 Regelprofil Haupttunnel, maschineller Vortrieb HT-KV1 (zweischaliger Ausbau mit Ulmendrainagen)
Main tunnel standard section, mechanised tunnelling HT-KV1 (double-shell lining with sidewall drainage)

Im Zuge einer Studie der TU Graz [3] zu der erforderlichen Anzahl an Überleitstellen im BBT wurde der zukünftige Instandhaltungsaufwand für den BBT ermittelt und dabei ein hoher Aufwand für die Instandhaltung des Entwässerungssystems in den Haupttunnelröhren festgestellt.

In der Studie wurde weiters aufgezeigt, dass die erforderlichen Instandhaltungsarbeiten in dem gemäss genehmigtem Projekt vorgesehenen Zeitraum und mit dem vorgesehenen Personal- und Geräteaufwand nicht möglich sind. In der Konsequenz ergäbe sich eine Reduktion der Verfügbarkeit der Tunnelanlage für den Bahnbetrieb.

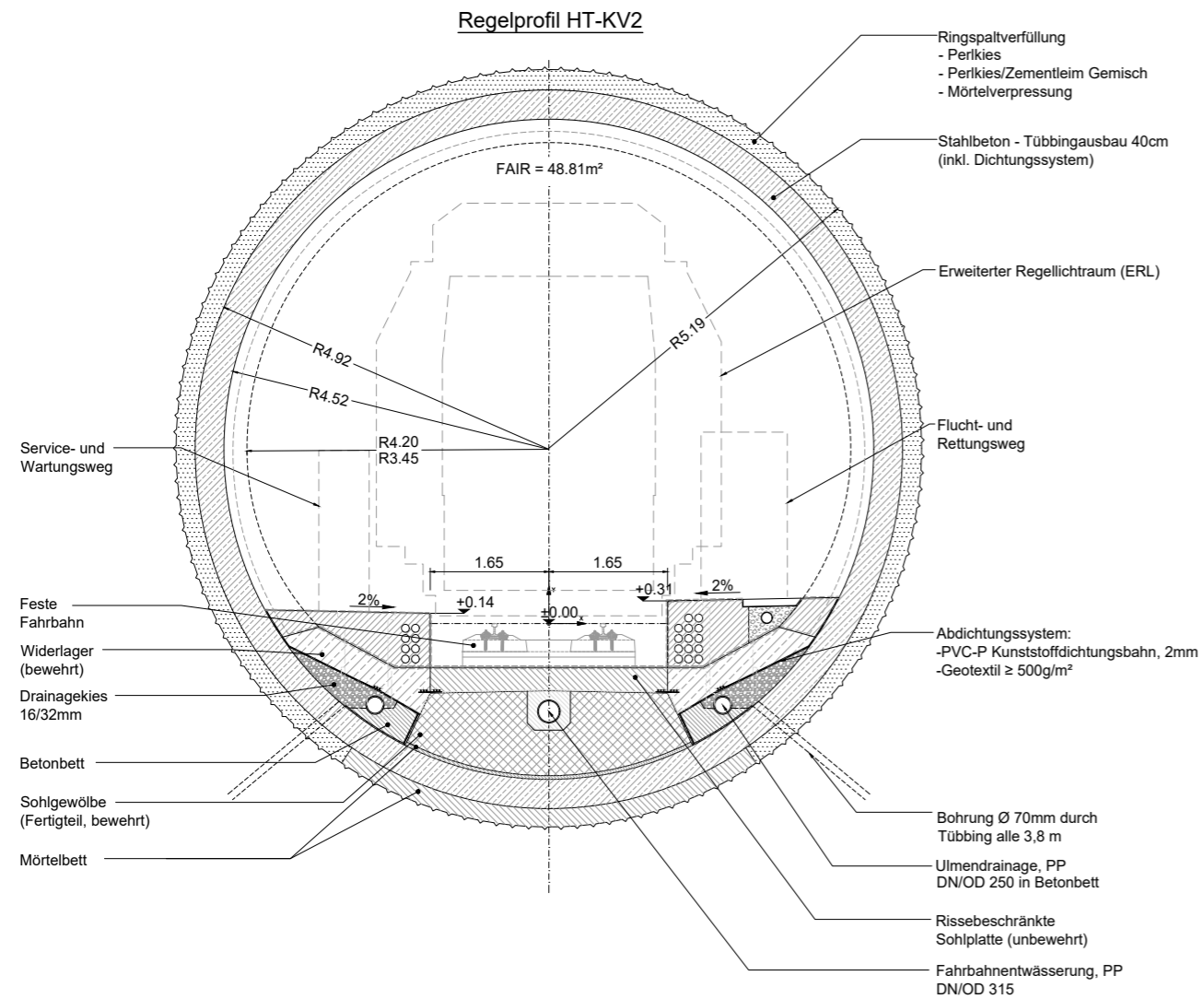
Im Zuge der Projektphase «grenzüberschreitende Regelplanung» wurden auch in Abstimmung mit den ÖBB verschiedene Lösungsansätze für eine Optimierung des Entwässerungssystems zur Reduzierung des prognostizierten Instandhaltungsaufwandes und damit zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Tunnelanlage für den Bahnbetrieb aufgezeigt:

a significant impact on future maintenance. In turn, this affects operation and availability, as well as future operating and maintenance costs [4].

The unusual situation of the Brenner Base Tunnel, with an exploratory and servicing tunnel running beneath the main tunnels, offers a high optimisation potential compared to other long railway tunnels, which can be exploited positively for efficient and economic maintenance of the technical facilities and the drainage system.

As part of a study carried out by Graz University of Technology [3] on the required number of transfer points in the BBT, future BBT maintenance costs were predicted and a high outlay for the maintenance of the drainage system in the main tunnels was determined.

Furthermore, the study demonstrated that the required maintenance work is not realisable within the time frame provided for in the approved project with the necessary



6 Regelprofil Haupttunnel, maschineller Vortrieb HT-KV2 (einschaliger Ausbau mit Ulmendrainagen)
Main tunnel standard section, mechanised tunnelling HT-KV2 (single-shell lining with sidewall drainage)

a) Konstruktive Optimierungen:

- einfache und klare Konzeption des Entwässerungssystems, leichte Zugänglichkeit, ruhiger Bergwasserabfluss, Wahl von Baustoffen mit geringem Versinterungspotenzial [5], angepasste Materialien und Oberflächenbeschaffenheit der Rohre gemäss der Richtlinie «Tunnelentwässerung» [6]
- Spülung der Ulmendrainagen der Haupttunnelröhren über die Querschläge oder über den Erkundungsstollen; die Spülung der Ulmendrainagen der Haupttunnelröhre erfolgt dabei ohne Unterbrechung des Bahnbetriebes
- Verzicht auf Ulmendrainagen und Putzschächte in Teilabschnitten der Haupttunnelröhren, die maschinell aufgeföhren werden; die Drainage des zutretenden Wassers erfolgt über den Ringspalt zwischen Tübbingausbau und Gebirge (siehe Kap. 4)

b) Optimierung der Instandhaltungsmassnahmen:

- Einsatz alternativer Spülgeräte (z.B. Drainagemolchsysteme) und Spülfahrzeuge
- Einsatz einer flüssigen Härtestabilisation oder Mineralsalzlösung zur Verhinderung harter Versinterungsbildungen

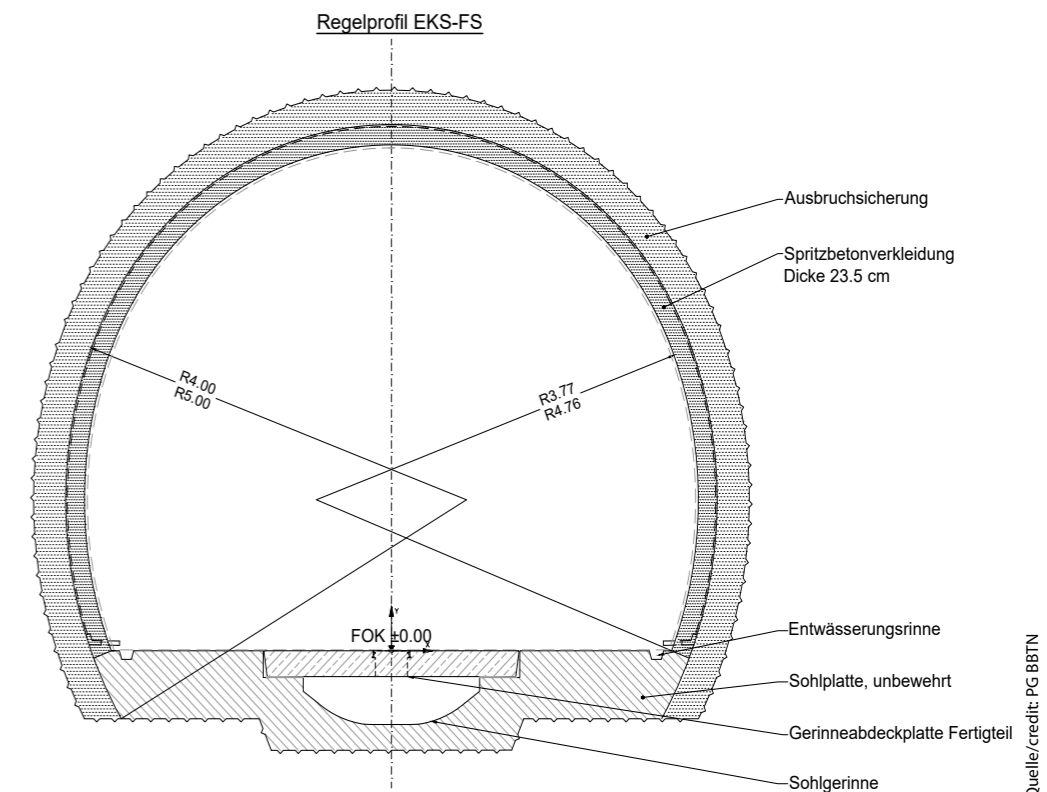
personnel and equipment. The consequence would be a reduction in the availability of the tunnel system for railway operations.

During the 'cross-border planning' project phase, different approaches for drainage system optimisation to reduce the predicted maintenance costs and thus increase the availability of the tunnel system for the railway operation were developed in cooperation with ÖBB:

a) Structural optimisation:

- Simple and clear drainage system design, easy accessibility, unobtrusive groundwater runoff, choice of building materials with low sintering potential [5], adapted materials and surface quality of the pipes in accordance with the 'Tunnel drainage' guidelines [6].
- Flushing the main tunnel sidewall drains via the cross-passages or the exploratory tunnel; flushing the main tunnel sidewall drains without interrupting railway operations.
- Dispensing with sidewall drainage and inspection cham-

Quelle/Credit: PG BBTN



7 Regelprofil Erkundungs- und Servicestollen, konventioneller Sprengvortrieb (zweischaliger Ausbau mit Spritzbeton)
Exploratory and service tunnel standard section, conventional drill and blast (double-shell lining with shotcrete)

Quelle/Credit: PG BBTN

Die verschiedenen Lösungsansätze für die konstruktive Optimierung des Entwässerungssystems wurden grösstenteils in den Ausschreibungs- und Ausführungsplanungen umgesetzt. Eine Spülung der Ulmendrainagen in den Haupttunnelröhren aus den Querschlägen bzw. aus dem Erkundungsstollen heraus wurde aufgrund verschiedener Konfliktpunkte bis zum heutigen Stichtag nicht weiter untersucht.

Die Optimierung der Instandhaltungsmassnahmen bezüglich des Entwässerungssystems wird im Zuge der weiteren Projektphasen vertieft. Die sich gegebenenfalls daraus ergebenden konstruktiven Massnahmen werden im Zuge der Ausführung – soweit möglich – berücksichtigt.

Weiters wird angestrebt, das Versinterungsverhalten im Zuge der Bau- und Ausrüstungsphase zu beobachten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse in den Instandhaltungsplan einfließen zu lassen.

3.2 Geologische/hydrogeologische Verhältnisse

Durch die bisherigen auf österreichischem Projektgebiet ausgeführten Bauarbeiten ist der Vortrieb im Erkundungsstollen vom Nordportal bis ca. km 14,8 und von km 25,2 bis km 26,5 abgeschlossen.

Die zukünftigen Baulose H41 und H51 durchörtern folgende geologische Formationen:

- die ostalpine Innsbrucker Quarzphyllitzone von km 2,1 bis km 12,5
- die penninische Obere Schieferhülle von km 12,5 bis km 12,8
- die ostalpine Innsbrucker Quarzphyllitzone von km 12,8 bis km 14,0
- die penninische Obere Schieferhülle von km 14,0 bis km 28,5
- die subpenninische Untere Schieferhülle von km 28,5 bis km 30,3
- das subpenninische Basement im Tuxer Zentralgneiskern von km 30,3 bis km 32,1

bers in mechanically excavated sections of the main tunnels; incoming groundwater is drained via the annular gap between the segmental lining and the rock mass (see Sec. 4)

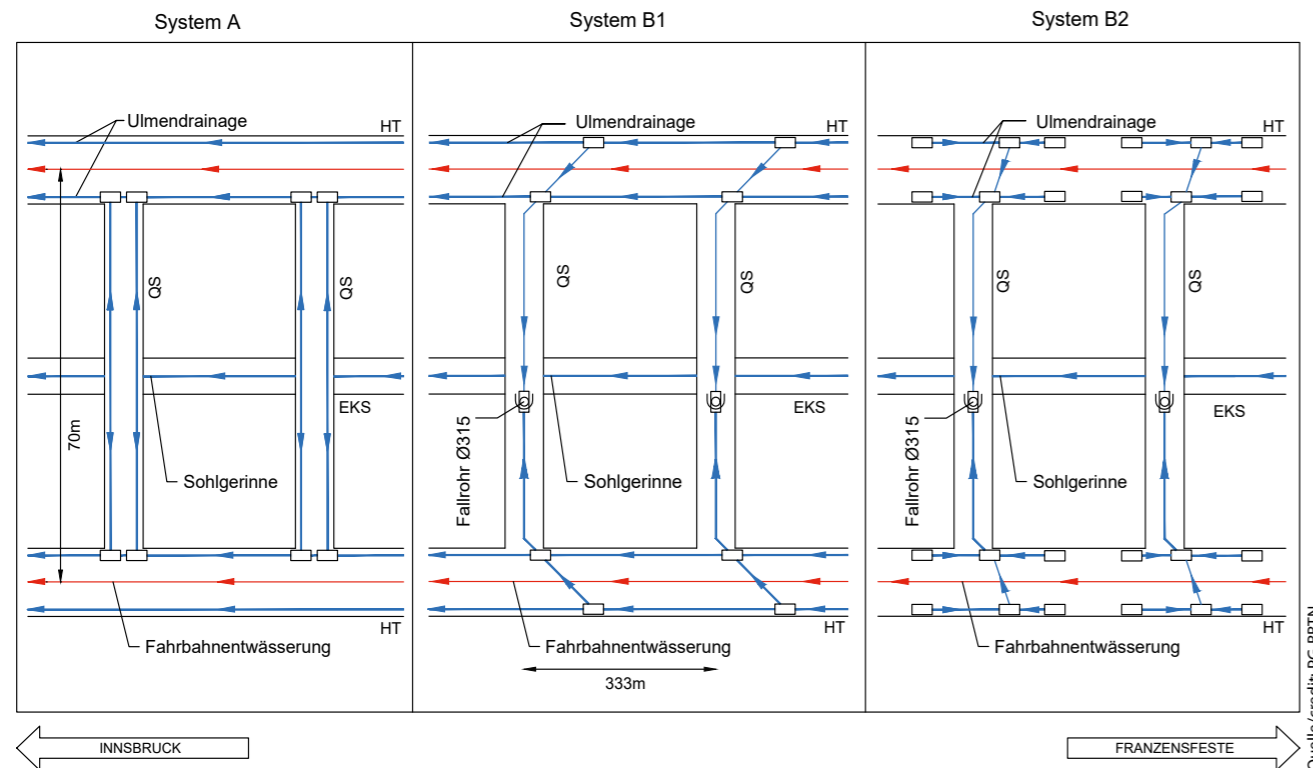
b) Maintenance measure optimisation:

- Use of alternative flushing equipment (e.g. drainage pigging systems) and flushing vehicles.
- Use of a liquid hardness stabiliser or mineral salt solution to prevent hard sintering formation.

The various approaches for the optimisation of the drainage system have largely been implemented in the tender and detail design. Sidewall drainage flushing in the main tunnels from the cross-passages or the exploratory tunnel has not been investigated further by today's deadline due to various points of conflict.

Optimisation of the maintenance measures relating to the drainage system will be intensified in the course of further project phases. Any resulting structural measures will be taken into consideration – where possible – during execution.

Moreover, the intention is to observe sintering behaviour during the construction and fitting-out phase and to incorporate the findings gained from this into the maintenance schedule.



8 Prinzipschema Entwässerungsabschnitte: System A (konventionell im Sprengvortrieb aufgefahrene Abschnitte), System B1 (maschinell aufgefahrene Abschnitte – mit durchgehenden Ulmendrainagen) und System B2 (maschinell aufgefahrene Abschnitte – ohne durchgehende Ulmendrainagen)
 Drainage system schematics: System A (sections tunnelled using conventional drill and blast), System B1 (sections excavated mechanically – with continuous sidewall drainage) and System B2 (sections excavated mechanically – without continuous sidewall drainage)

Auf Basis der hydrogeologischen Grundlagen und der Erkenntnisse aus den bereits aufgefahrenen Erkundungsstollenabschnitten lassen sich mehrere hydrogeologische Szenarien ableiten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die hydrogeologischen Verhältnisse im metamorphen Festgestein (z. B. Schiefer der Quarzphyllitzone oder der Glocknerdecke) von hohen Drücken und sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten gekennzeichnet sind. Auf der österreichischen Projektseite kann davon ausgegangen werden, dass sich der Erkundungsstollen und die Haupttunnelröhren bis zu ca. 95% der aufzufahrenden Strecke in trockenen bis bergfeuchten Verhältnissen befinden und mit wenig Wasseranfall zu rechnen ist. Hohe Sulfatgehalte ($SO_4 > 3000 \text{ mg/l}$) werden nur über kurze Abschnitte erwartet.

4 Umsetzung des Entwässerungssystems in der Ausschreibungs- und Ausführungsplanung

4.1 Entwässerungssysteme auf der österreichischen Seite

Im Zuge der Ausschreibungsplanung der Hauptlose H41 und H51 wurden zwei Entwässerungssysteme für die Haupttunnelröhren definiert (siehe Bild 8).

Das System A umfasst die konventionell aufgefahrenen Bereiche, bei welchen der Einbau von Bergwasserdrainagelei-

3.2 Geological/Hydrogeological Conditions

The construction work carried out so far on the Austrian project side has completed tunnelling in the exploratory tunnel from the north portal to km 14.8 and from km 25.2 to km 26.5.

The future construction lots H41 and H51 will pass through the following geological formations:

- the East Alpine Innsbruck Quartz Phyllite Zone from km 2.1 to km 12.5
- the Pennine Upper Schieferhülle from km 12.5 to km 12.8
- the East Alpine Innsbruck Quartz Phyllite Zone from km 12.8 to km 14.0
- the Pennine Upper Schieferhülle from km 14.0 to km 28.5
- the sub-Pennine Lower Schieferhülle from km 28.5 to km 30.3
- the sub-Pennine basement in the Tux Central Gneiss Core from km 30.3 to km 32.1

Several hydrogeological scenarios can be derived based on fundamental hydrogeology and the findings from the previously excavated exploratory tunnel sections. In summary, it can be stated that the hydrogeological conditions in the hard metamorphic rocks (e.g. schist of the quartz phyllite zone or the Glockner nappe) are characterised by high pressures and very low hydraulic permeabilities. On the Austrian side of the project, it can be assumed that the exploratory tunnel and

tungen erforderlich ist (keine alternative Drainagemöglichkeit). Im Abschnitt mit System A wird das Bergwasser über Drainageleitungen gefasst und abgeleitet. Die Querschläge weisen in Längsrichtung ein Dachgefälle auf und entwässern somit in Richtung Haupttunnel.

Das System B beinhaltet alle maschinell aufgefahrenen Strecken, bei denen theoretisch eine Bergwasserdrainage über den Ringspalt möglich ist. Im Abschnitt mit System B wird das Bergwasser auf dem Niveau der Haupttunnelröhre bei jedem Querschlag (Regelabstand 333 m) in den Erkundungsstollen abgeleitet. Die Querschläge weisen somit – im Unterschied zum System A – ein fallendes Gefälle zum Erkundungsstollen hin auf.

Vom Erkundungsstollen gelangt das Bergwasser über das Sohlgerinne (siehe Bild 7) in die Vorflut, den Fluss Sill.

Im Abschnitt mit System B soll, wenn möglich, das Bergwasser auf Niveau Haupttunnel über den Ringspalt drainiert werden. Diese Lösung kann nur angewendet werden, falls der Ringspalt mit Perlkies verblasen oder mit einem Perlkies-Zementleim-Gemisch verfüllt wird. Wird der Ringspalt z. B. in Störzonen mit einem Ringspaltmörtel verpresst, kann eine durchgehende Drainage über den Ringspalt nicht sichergestellt werden. Die Bergwasserdrainage erfolgt dann über längslaufende Ulmendrainagen. Das System B wird daher in zwei Untersysteme unterteilt: System B1 mit durchgehenden Ulmendrainagen und System B2 ohne Ulmendrainagen (siehe Bild 8).

4.2 Umsetzung des Systems B in den Ausschreibungsplanungen

Im System B2 werden in den maschinell aufgefahrenen Haupttunnelröhren keine Ulmendrainagen eingebaut. Das zutretende Bergwasser wird über den Ringspalt abgeleitet. Unmittelbar vor und nach der Querschlagseinmündung werden in der Haupttunnelröhre auf einer Länge von ca. 25 m Ulmendrainagen eingebaut und Bohrungen durch den Tübbingring ausgeführt, um den Ringspalt in die Ulmendrainagen zu entwässern. Im Einmündungsbereich Querschlag-Haupttunnel wird das Bergwasser über ein Vollrohr in den Querschlag abgeleitet. Vom Querschlag aus gelangt das Wasser über eine vertikale Leitung DN/OD 315 in den Erkundungsstollen (siehe Bild 9). Voraussetzung für die Umsetzung des Systems B2 ist, dass der Ringspalt im Gewölbereich mit Perlkies verblasen oder mit einem Perlkies-Zementleim-Gemisch verfüllt wird. Der Perlkies muss eine Durchlässigkeit von $> 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ aufweisen.

In geotechnisch anspruchsvollen Abschnitten (Störzonen, druckhaftes Gebirge) ist eine Verpressung des Ringspaltes mit einem Ringspaltmörtel erforderlich. Dieser Baustoff weist eine vergleichsweise geringe Durchlässigkeit auf und kann dadurch keine drainierende Funktion wahrnehmen. Zur Fassung und Ableitung der Bergwässer ist somit der

the main tunnels are located in dry to moist conditions for up to approx. 95% of the distance to be excavated and low amounts of water are predicted. High sulphate levels ($SO_4 > 3,000 \text{ mg/l}$) are only anticipated in small sections.

4 Drainage System Implementation in Tender and Detail Design

4.1 Drainage Systems on the Austrian Side of the Project

As part of the tender design for the main H41 and H51 lots, two drainage systems for the main tunnels were defined (see Fig. 8).

System A comprises the conventionally excavated sections where the installation of groundwater drainpipes is necessary (no alternative drainage options). In the System A section, the groundwater is collected and discharged via drainpipes. The cross-passages have a longitudinal roof pitch and therefore drain towards the main tunnel.

System B includes all sections excavated mechanically in which groundwater drainage is theoretically possible via the annular gap. In the System B section, the groundwater is discharged to the exploratory tunnel at the level of the main tunnels at every cross-passage (standard spacing 333 m). The cross-passages therefore have a downhill gradient to the exploratory tunnel – in contrast to System A.

From the exploratory tunnel, the groundwater enters the receiving watercourse, the Sill river, via the floor channel (see Fig. 7).

In the System B section, the groundwater should be drained at the level of the main tunnel via the annular gap, if possible. This solution can only be employed if the ring gap is backfilled fully with pea gravel or filled with a pea gravel-cement paste mixture. If the annular gap is grouted using an annulus mortar, e.g. in fault zones, continuous drainage throughout the annulus cannot be guaranteed. Groundwater is then drained using axial sidewall drainage. System B is therefore divided into two subsystems: System B1 with continuous sidewall drainage and System B2 without sidewall drainage (see Fig. 8).

4.2 System B Implementation in Tender Design

In System B2, no sidewall drainage is installed in the mechanically excavated main tunnels. The incoming groundwater is discharged via the annular gap. Immediately before and after the cross-passage junction, sidewall drainage is installed in the main tunnel over a length of approx. 25 m and bores are made through the segment ring in order to drain the ring gap in the sidewall drains. In the cross-passage-main tunnel junction, the groundwater is discharged through a full-section pipe in the cross-passage. From the cross-passage, the water reaches the exploratory tunnel via a vertical pipe, ND/OD 315 mm (see Fig. 9). The require-

Einbau von längslaufenden Ulmendrainagen erforderlich (System B1). Aus diesen wird das Bergwasser in die Querschläge abgeführt und in den Erkundungsstollen abgeleitet.

Die Festlegung der Entwässerungssysteme B1 und B2 erfolgt im Zuge der Ausführung gemeinsam zwischen Bauherr und Projektverfasser, in Abhängigkeit von den tatsächlich angebotenen Verhältnissen (Art der Ringspaltverfüllung, anfallende Wassermengen). Für die Ausschreibungsplanungen der Hauptlose H41 und H51 wurden beide Systeme berücksichtigt [1]. Auf Basis der geologischen Prognose wird derzeit davon ausgegangen, dass im Bereich der maschinellen Vortriebe über 75 % der Länge ohne Ulmendrainagen aufgeföhren werden können.

5 Schlussbemerkungen

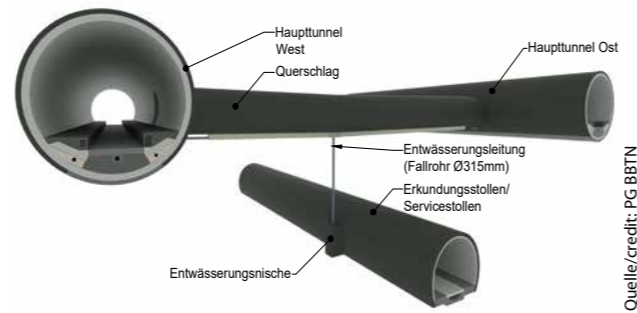
Der BBT hat gegenüber anderen langen Tunnelbauwerken den Vorteil, dass – neben den beiden für den Verkehr vorgesehenen Haupttunnelröhren – eine dritte Röhre in das Gesamttunnelsystem integriert wird. Diese dritte Röhre, die neben den Portalen auch über drei Zufahrtstunnel erreichbar ist, fungiert zunächst als Erkundungs- und Logistikmassnahme und dient in der späteren Betriebsphase als Servicestollen, in dem verschiedene Instandhaltungsarbeiten regelmässig über mehrere Tage in der Woche ohne Betriebsunterbrechungen durchgeführt werden können.

Ziel der BBT SE und des zukünftigen Betreibers ist unter anderem die Herstellung einer möglichst instandhaltungsfreundlichen und nachhaltigen Eisenbahnanlage mit einer möglichst hohen Verfügbarkeit.

Erfahrungen aus verschiedenen langen Tunnelbauwerken und Untersuchungen zur zukünftigen Instandhaltung des BBT zeigen, dass die Instandhaltung des Entwässerungssystems im Vergleich zu anderen Gewerken sehr aufwendig und zeitintensiv sein kann.

In den letzten Jahren wurden am BBT verschiedene Lösungsansätze für eine Optimierung des Entwässerungssystems aus Sicht der konstruktiven Ausbildung, der zukünftigen Instandhaltung und unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen untersucht und zum Teil in die Planungen umgesetzt. Weitere Optimierungen, vor allem Optimierungen der Instandhaltungsmassnahmen, werden in den zukünftigen Planungs- und Ausführungsphasen zusammen mit den österreichischen (ÖBB) und italienischen (RFI) Bundes- bzw. Staatsbahnen vertieft.

Abschliessend möchten wir uns bei der BBT SE als Bauherr und bei den Partnern der Projektgemeinschaft Brenner-Basistunnel Nord – PG BBTN (Amberg Engineering AG, Lombardi SA, Müller + Hereth, Obermayer Planen und Beraten und hbpm) für die konstruktive, zielorientierte und angenehme Zusammenarbeit bedanken.



9 3D-Ansicht Bergwasserentwässerung System B
3D view of System B groundwater drainage system

Quelle/Credit: PG BBTN

ment for implementing System B2 is that the annular gap in the vault area is backfilled fully with pea gravel or filled with a pea gravel-cement paste mixture. The pea gravel must have a permeability of $> 5 \times 10^{-3}$ m/s.

In geotechnically complex sections (fault zones, squeezing rock) it is necessary to grout the ring gap using an annulus mortar. This construction material has a relatively low permeability and thus cannot perform a drainage function. It is therefore necessary to install longitudinal sidewall drainage to collect and discharge the groundwater (System B1). From here, the groundwater is transferred to the cross-passages and discharged into the exploratory tunnel.

Drainage systems B1 and B2 are specified during the execution phase in agreement between the client and the design JV, depending on the actual circumstances encountered (type of ring gap backfill, accumulating water volumes). Both systems are taken into consideration for the tender of the H41 and H51 main lots [1]. Based on the geological predictions, it is currently assumed that in the mechanically excavated areas over 75 % of the length can be excavated without sidewall drainage.

5 Closing Remarks

Compared with other long tunnel structures, the BBT has the advantage that – in addition to the two main tunnels intended for traffic – a third tube is integrated into the overall tunnel system. This third tube, which can also be reached via three access tunnels in addition to the portals, initially acts as an exploration and logistics tunnel and serves as a service tunnel in the subsequent operating phase, in which a variety of maintenance works can be regularly carried out over several days per week without interrupting operations.

The objective of BBT SE and the future operator is, among other things, to produce a maintenance-friendly and sustainable railway system with the highest possible availability.

Experience from various long tunnel structures and studies on the future maintenance of the BBT reveal that maintenance of the drainage system can be very complex and time-consuming compared to other facilities.

Literatur/References

- [1] Ausschreibungsunterlagen Baulos H51 «Pfons–Brenner»; BBT SE und PG BBTN; 07.12.2016
- [2] BBT SE: Homepage, www.bbt-se.com
- [3] Berghold, A.: Zwischenergebnisse Sperrpausen im BBT, TU Graz, 18.06.2013 (unveröffentlichter Bericht)
- [4] Eckbauer, W.; Insam, R.; Zierl, D.: Planungsoptimierungen beim Brenner-Basistunnel aus Sicht der Instandhaltung und Nachhaltigkeit. Geomechanics and Tunneling (Volume 7, October 2014), Ernst & Sohn, S. 601–609
- [5] Pichler, W.; Wagner, H.; Insam R.: Spritzbeton mit reduziertem Versinterungspotential – Praktische Anwendung auf österreichischen Grossbaustellen. Alpbach: Spritzbetontagung 2015
- [6] Richtlinie Tunnelentwässerung, ÖBV (Österreichische Bautechnik Vereinigung), April 2010

In recent years, various approaches for drainage system optimisation have been investigated at the BBT from a structural design and future maintenance perspective, taking project-specific boundary conditions into consideration, and partially implemented in planning. Additional optimisation, in particular maintenance measures, will be intensified in future planning and execution phases, in collaboration with the Austrian (ÖBB) and Italian (RFI) federal and state railways.

Finally, we would like to thank BBT SE as the client and the project JV-partners at Projektgemeinschaft Brenner-Basistunnel Nord – PG BBTN (Amberg Engineering AG, Lombardi SA, Müller + Hereth, Obermayer Planen und Beraten and hbpm) for the constructive, goal-oriented and pleasant collaboration.

Marcel Christian Wegmüller, Dipl. Bau.-Ing. ETHZ, Ingenieurbüro M.C. Wegmüller, Riehen/CH

Vom Umgang mit Versinterungen in Entwässerungssystemen

Das Entwässerungssystem eines Bauwerks muss funktionsfähig bleiben, damit Schäden vermieden werden können. Um dies zu erreichen, muss das Entwässerungssystem einen Versinterungshohlraum aufweisen, der genügend gross ist, um die Versinterungen aufzunehmen, die sich während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks aufbauen. Ist dies nicht möglich, sind weitere Massnahmen wie der Einbau von Depotsteinen und/oder des Rückführungssystems sinnvoll.

Dealing with Scaling in Draining Systems

A structure's draining system must remain functional in order to avoid damage. For this to be achieved, the drainage system must possess a scaling cavity large enough to absorb the scaling that builds up throughout the structure's lifespan. If this is not possible, additional measures such as the installation of sustained-supply stones and/or the return feedback system may be useful.

1 Einleitung

Um den hohen Nutzungsanforderungen an Tunnelbauwerke gerecht zu werden, muss das Drainage- und Entwässerungssystem ununterbrochen funktionieren. Bei Versagen bzw. Verschluss des Systems führt zufließendes Bergwasser zu einem lokalen Druckaufbau. Der Druck kann je nach geologischen Verhältnissen sehr rasch zu hohe Werte annehmen, sodass Schäden zu befürchten sind.

Die Entstehung von Versinterungen in der Entwässerungsanlage ist stark vom anfallenden Bergwasser und von der Art der Verkleidung abhängig. Sie ist auf die Veränderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes des Bergwassers beim Eintritt in den Tunnel zurückzuführen. Die im Bergwasser gelöste Kohlensäure kann im Kontakt mit der Tunnelluft ausgasen (CO_2 -Partialdruckausgleich) und zur Ausfällung von Kalk führen. Noch stärkere Ablagerungen entstehen durch den Kontakt des Bergwassers mit zementhaltigen Baustoffen, der zu einer pH-Wert-Erhöhung führt und für die harten weissen Ablagerungen entscheidend ist. Durch kohlensaures oder weiches Bergwasser kann ausserdem der in der Ausbruchsicherung oder in Injektionskörpern enthaltene Kalk herausgelöst werden, der verstärkt in der Entwässerungsanlage wieder ausfällt.

2 Aufbau des Entwässerungssystems

An erster Stelle muss das Funktionsprinzip des Entwässerungssystems erläutert werden. Das Entwässerungssystem kann in zwei Teile gegliedert werden.

2.1 Primäres Entwässerungssystem

Das primäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau nicht mehr zugänglich sind und deren

1 Introduction

In order to meet the heavy usage requirements for tunnel structures, the drainage and draining systems must function without interruption. If the system fails and/or is closed off, the flow of groundwater leads to a build-up of pressure in the area. Depending on the geological conditions, pressure can mount quickly, which may cause damage.

Scaling that occurs in the draining system is heavily dependent on the groundwater present and the type of cladding. It results from change in the balance between lime and carbonic acid in the groundwater on entry into the tunnel. The carbonic acid dissolved in the groundwater can produce gas in contact with the tunnel air (CO_2 partial pressure offset) and lead to lime precipitation. Contact between the groundwater and materials containing cement leads to even more deposits. It brings about an increase in pH value and is crucial in producing the hard white scale deposits. Carbonic or soft groundwater can also be used to free the limestone contained in the excavation support or in injection bodies. This then occurs in greater quantities in the draining system.

2 Draining System Structure

First of all, it is important to explain the operating principle of the draining system. The draining system can be divided into two parts.

2.1 Primary Draining System

The primary draining system contains all components which are no longer accessible after construction and whose purpose is to collect the water seeping through the

La gestion des phénomènes de concrétion dans les systèmes de drainage

Le système de drainage d'un ouvrage doit toujours rester fonctionnel afin de prévenir tout dommage. Pour ce faire, ce système de drainage doit être doté d'une cavité de concrétion suffisamment grande pour absorber les concrétions qui se forment pendant toute la durée de vie de l'ouvrage. En cas d'impossibilité, d'autres mesures, telles que l'installation de blocs solides et/ou du système de drainage, sont recommandées. Les blocs solides sont constitués de substances empêchant la formation de concrétions par l'eau de roche. Après usure de ces blocs, le système de drainage est en mesure de prévenir la formation de nouvelles concrétions.

A proposito del trattamento dei sedimenti nei sistemi di drenaggio

Il sistema di drenaggio di una costruzione deve rimanere funzionante per essere in grado di evitare i danni. Per ottenere questo risultato, il sistema di drenaggio deve essere dotato di una cavità di sedimentazione sufficientemente grande per raccogliere i sedimenti che si accumulano nel corso dell'intera vita utile della costruzione. Se questo non è possibile, è necessario prendere delle altre misure, come l'utilizzo di blocchi anti-sedimentazione e/o di un sistema di ricircolazione. I blocchi anti-sedimentazione sono composti da sostanze che impediscono la formazione di sedimenti prodotti dall'acqua di falda. Se sono utilizzati questi blocchi, il sistema di ricircolazione è in grado di impedire la formazione ulteriore di sedimenti.

Aufgabe es ist, das anfallende Bergwasser des Gebirges zu fassen und dem sekundären Entwässerungssystem zuzuführen. Dazu gehören: Flächendrainagen (Vliese, Drainagematten, Sickerpackungen, Noppenbahnen...), Liniendrainagen (Halbschalen...) sowie «Punkt drainagen» (Bohrungen...).

2.2 Sekundäres Entwässerungssystem

Das sekundäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau unterhalten werden können. Dazu gehören Sickerleitungen, Entwässerungsrohre, Schächte usw.

3 Die Gestaltung des primären Entwässerungssystems

Im primären Entwässerungssystem können diese Ablagerungen/Versinterungen nicht entfernt werden. Nun sollte es klar sein, dass, wenn man Schäden vermeiden will, die im primären Entwässerungssystem entstehenden Ablagerungen so viel Platz zur Verfügung haben müssen, dass sie sich während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks «ungehindert ausbreiten» können. Können sie dies nicht, verändert sich das Bergwasserregime und die Folgen sind Schäden am Bauwerk. Der Platzbedarf zur Aufnahme der Ablagerungen kann als «Versinterungshohlraum V_H » bezeichnet werden. Er lässt sich nicht exakt berechnen, aber relativ gut und einfach abschätzen.

Anhand einer einfachen Rechnung kann der Versinterungshohlraum V_H abgeschätzt werden, der notwendig ist, um das drucklose Ableiten des Bergwassers während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks zu gewährleisten. Die Grundlage dazu bietet der Stabilitätsindex nach Ryznar (SI) einer oder mehrerer Wasserproben. Der Stabilitätsindex gibt an, wie viel Gramm Kalkablagerungen ein untersuchtes Bergwasser vom Austritt aus dem Fels bis zum Eintritt in das sekundäre

rock into the tunnel and supply it to the secondary draining system. These include: Surface drainage (fleeces, drainage mats, seepage packing, drainage membranes, etc.), line drainage (half-shells, etc.) and 'point drainage' (drilling, etc.).

2.2 Secondary Draining System

The secondary draining system includes all components that can be maintained after construction. These include seepage lines, drainpipes and shafts etc.

3 Primary Draining System Design

In the primary draining system, these deposits/scales cannot be removed. It should now be clear that to avoid damage, the deposits which occur in the primary draining system must have as much space necessary to ensure that they can 'spread unhindered' for the structure's entire lifespan. If this is not possible, the groundwater regime changes, resulting in damage to the structure. The space required to hold the deposits may be referred to as the 'scaling cavity V_H '. It cannot be calculated precisely, but can be estimated relatively easily and well.

The scaling cavity V_H required to ensure pressure-free drainage of groundwater for the entire lifespan of the structure can be estimated using a simple calculation. This is based on the Ryznar stability index (SI) of one or multiple water samples. The stability index indicates how many grams of lime deposits are produced by the groundwater under investigation from the point at which it escapes from the rock until it enters the secondary draining system. This quantity of lime deposits is known as the 'scaling rate V_R [$^{\circ}\text{dH}$, or German degree of hardness]'. See Table 1 for more on the relationship between the stability index SI of a groundwater sample and the scaling rate V_R of the same sample.

Table 1 Korrelation zwischen Stabilitätsindex SI und Versinterungsrate V_R . $SI = \text{Stabilitätsindex nach Ryznar}$, $V_R [^\circ\text{dH}] = \text{Versinterungsrate des Bergwassers beim Durchströmen des primären Entwässerungssystems}$.

Table 1 Correlation between stability index SI and scaling rate V_R . $SI = \text{Ryznar stability index}$, $V_R [^\circ\text{dH}] = \text{groundwater scaling rate for primary draining system flows}$.

	Keine Ablagerungen	Wenig Ablagerungen	Mittlere Ablagerungen	Starke Ablagerungen	Sehr starke Ablagerungen
SI	> 7,5	7,5–7	7–6,5	6,5–5,5	< 5,5
$V_R [^\circ\text{dH}]$	0 °dH	1 °dH	2 °dH	2–5 °dH	5–10 °dH

re Entwässerungssystem verursacht. Diese Menge an Kalkablagerungen wird als «Versinterungsrate $V_R [^\circ\text{dH}]$ » bezeichnet. Zum Zusammenhang zwischen dem Stabilitätsindex SI einer Bergwasserprobe und der Versinterungsrate V_R derselben Probe siehe **Table 1**.

Im Folgenden wollen wir versuchen, die Aussagen anhand von Beispielen zu überprüfen.

Beispiel 1:

Wie gross müsste im Simplontunnel der notwendige Versinterungshohlraum sein, damit die Funktionalität des primären Entwässerungssystems während der gesamten Lebensdauer von 100 Jahren nie gefährdet ist? Die Berechnung soll für die Zone mit den stärksten Ablagerungen durchgeführt werden. Sie befindet sich im Tunnel Ii (Oströhre, im Südabschnitt auf italienischer Seite).

Die Lebensdauer T_B des Bauwerks beträgt 100 Jahre = $3,15 \cdot 10^9$ s. Die Zone mit den stärksten Ablagerungen misst $L = 1500$ m.

Der durchschnittliche Stabilitätsindex SI der Wasserproben aus dieser Zone (Schnitt aus drei Proben) beträgt 3,6 und stellt damit den tiefsten bekannten Wert dar (in der Schweiz, Deutschland und Österreich).

1 °dH entspricht 17,8 mg CaCO_3/l Bergwasser. Spez. Dichte Dolomit = $2,7 \text{ kg}/\text{dm}^3$. Der durchschnittliche Wasseranfall Q in dieser Zone beträgt $Q = 4 \text{ l/s}$.

Aus der Tabelle ergibt sich $V_R [^\circ\text{dH}]$.

$V_R = \text{ca. } 8 \text{ }^\circ\text{dH}$ entspricht $142,4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$.

Der Versinterungshohlraum ergibt sich nun einfach aus

$$V_{H(0)} = \frac{T_B \cdot Q \cdot V_R}{L \cdot \rho}$$

$$V_{H(0)} = \frac{4 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 142,4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{1500 \cdot 2700 \text{ g}/\text{dm}^3} = 443 \text{ l/m'}$$

Dieser Wert scheint eher an der unteren Grenze zu sein, denn die Ablagerungsneigung des Bergwassers an dieser Stelle ist enorm. Leider fällt auch in diesem Tunnel das Bergwasser nicht gleichmässig über die Länge L an, son-

We will now try to examine the statements based on examples.

Example 1:

How large would the scaling cavity in the Simplon Tunnel need to be to ensure that the functionality of the primary draining system is never put at risk throughout the entire lifespan of 100 years? The calculation should be done for the area with the most deposits. This is found in tunnel II (east tunnel, in the southern section on the Italian side).

The lifespan T_B of the structure is 100 years = $3.15 \cdot 10^9$ s. The area with the most deposits measures $L = 1,500$ m.

The average stability index SI of the water samples from this area (average of three samples) is 3.6 and is therefore the lowest known value (in Switzerland, Germany and Austria).

1 °dH corresponds to 17.8 mg CaCO_3/l groundwater. Special Dolomite density = $2.7 \text{ kg}/\text{dm}^3$. The average water precipitation Q in this area is $Q = 4 \text{ l/s}$.

The table indicates the $V_R [^\circ\text{dH}]$.

$V_R = \text{approx. } 8 \text{ }^\circ\text{dH}$ corresponds to $142.4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$.

The scaling cavity is therefore calculated as follows:

$$V_{H(0)} = \frac{T_B \cdot Q \cdot V_R}{L \cdot \rho}$$

$$V_{H(0)} = \frac{4 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 142.4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{1,500 \cdot 2,700 \text{ g}/\text{dm}^3} = 443 \text{ l/m'}$$

However, this value appears to be towards the lower end, as the groundwater has a massive tendency towards forming deposits at this point. Unfortunately, the groundwater is not distributed equally across the length L in this tunnel either, but appears in a concentrated way in the form of wells (up to 40°C). The necessary scaling cavity increases many times over at this point. It is therefore important to monitor the properties of the groundwater on an ongoing basis throughout construction in order to be able to take effective measures where necessary. In order to avoid a build-up of water pressure at this point, special designs such as volumetric

dem tritt in Form von Quellen (bis 40°C) konzentriert auf. Der notwendige Versinterungshohlraum wächst an dieser Stelle um ein Vielfaches. Es ist deshalb wichtig, die Eigenschaften des Bergwassers während der Bauausführung laufend zu überwachen, um im Bedarfsfall wirkungsvolle Massnahmen ergreifen zu können. Um einen Wasserdruckaufbau an dieser Stelle zu verhindern, sind Spezialkonstruktionen wie volumetrische Quelfassungen notwendig. Der berechnete Versinterungshohlraum von ca. 443 Liter pro Laufmeter Tunnel entspricht in etwa den vor Ort gewonnenen Erfahrungen.

Beispiel 2:

Isla-Bella-Strassentunnel
 $Q = 20 \text{ l/s}$
 SI (Schnitt aus 10 Proben) = 6,3
 $V_R = \text{ca. } 3 \text{ }^\circ\text{dH}$ entspricht $53,4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$
 Es ergibt sich ein $V_H = 623 \text{ l/m'}$.

In diesem Bauwerk verteilt sich das anfallende Bergwasser relativ gleichmässig über die Strecke L. Der Versinterungshohlraum von 625 Litern pro Laufmeter Tunnel scheint auch hier vernünftig. Bei diesem Bauwerk befinden wir uns wie überall im Kanton Graubünden im Einzugsgebiet saurer Bergwässer. Dieser Bergwassertyp neigt in Verbindung mit Kalksedimenten und Betonkontakt zu sehr starken Ablagerungen.

Die Beispiele haben gezeigt, in welchen Bandbreiten ein angemessener Versinterungshohlraum in etwa anzusiedeln ist. Für die Projektierung eines Tunnelbauwerks muss man von einem geeigneten Richtwert für den notwendigen Versinterungshohlraum ausgehen (siehe **Table 2**).

Table 2 Richtwerte für den notwendigen Versinterungshohlraum. Die Werte gelten für 1 Laufmeter Tunnelröhre. In Zonen ohne Bergwasser kann gegebenenfalls auf die Ausbildung des Versinterungshohlraums zugunsten der verbleibenden wasserführenden Zonen verzichtet werden. Der gesamte Hohlraum V_H · Tunnellänge muss aber immer gewährleistet sein.

Table 2 Guidelines for the required scaling cavity. The values apply to 1 linear metre of tunnel pipe. In areas without groundwater, the formation of the scaling cavity may be avoided in favour of the remaining water-bearing areas. However, the entire cavity V_H · tunnel length must always be guaranteed.

Versinterungshohlraum	V_H erforderlich
Kein Versinterungshohlraum	· Weiche Bergwässer ohne Spritzbetonkontakt · Na-HCO ₃ -Wässer ohne Spritzbetonkontakt
0–200 Liter/m'	· Wenig Bergwasser · Junges oberflächennahes Wasser ohne Druck · Keine pH-Wert-Verschiebung
200–600 Liter/m'	· Kalkwässer mit Bergwasserdruck · Spritzbetonbauweise
600–1000 Liter/m'	· CO ₂ -haltige Wässer in Kalksedimenten · CO ₂ -haltige Wässer und Spritzbetonbauweise
> 1000 Liter/m'	· Chemikalieninjektionen · Kalkmilch · Extrem starke Kalkwässer mit hohem Druck und hoher Temperatur

well collectors are required. The calculated scaling cavity of approx. 443 litres per linear metre of tunnel is roughly in line with on-site experiences.

Example 2:

Isla Bella Road Tunnel
 $Q = 20 \text{ l/s}$
 SI (average of 10 samples) = 6.3
 $V_R = \text{approx. } 3 \text{ }^\circ\text{dH}$ corresponds to $53.4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$
 The result is $V_H = 623 \text{ l/m'}$.

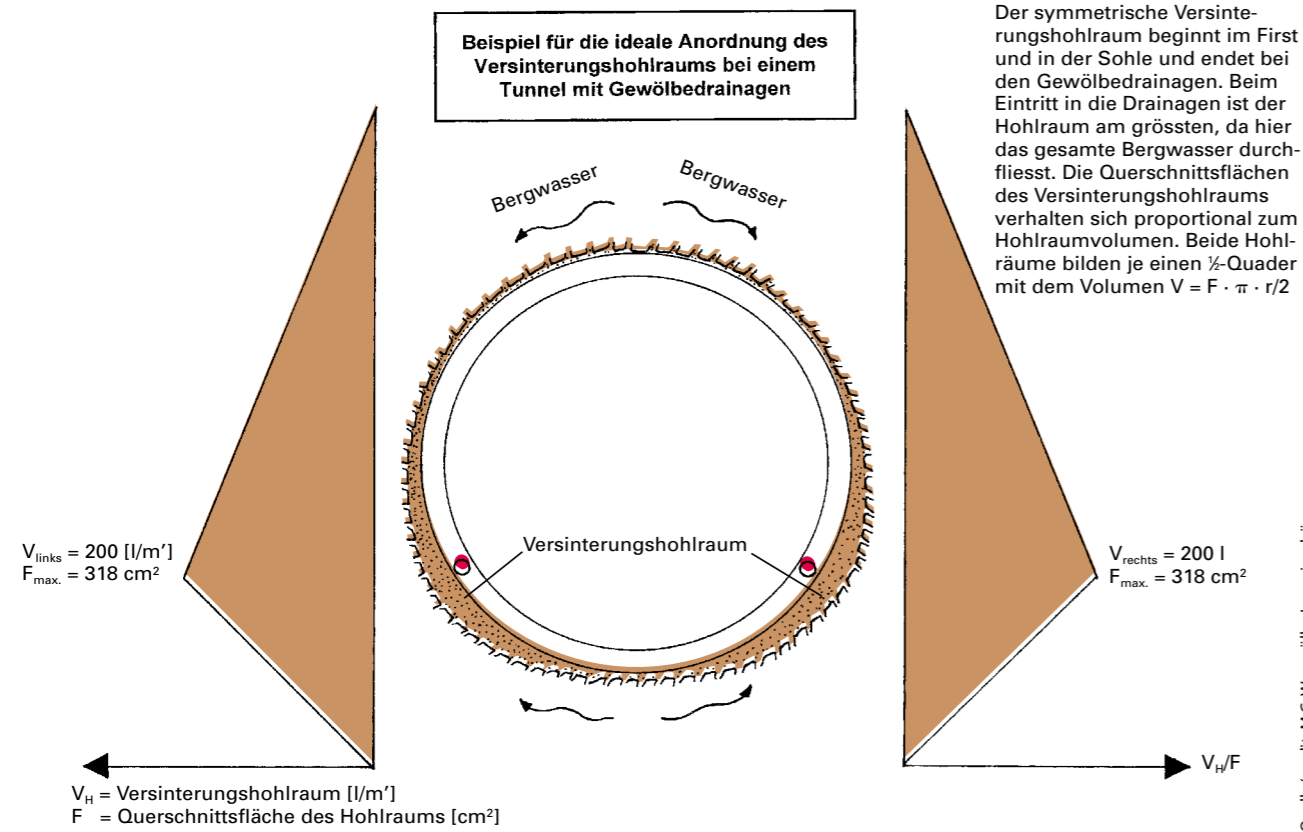
In this structure, the groundwater is distributed relatively equally over a length L. The scaling cavity of 625 litres per linear metre of tunnel also appears to be sound here. For this structure, like everywhere in the canton of Grisons, in an area where groundwater is acidic. This type of groundwater tends to form lots of deposits in combination with lime sediments and concrete contact.

The examples have shown roughly in which ranges an appropriate scaling cavity should be placed. Plans for a tunnel structure must be based on a suitable value for the necessary scaling cavity (see **Table 2**).

3.1 Arrangement and Formation of the Scaling Cavity V_H

The aim of the scaling cavity is to maintain the functionality of the primary draining system. The secondary draining system must not be included when calculating the scaling cavity! The arrangement of the scaling cavity must satisfy a few basic principles:

- The scaling cavity must be cohesive!
- The scaling cavity begins in the crown and potentially the



1 Ausbildung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Gewölbedrainagen.
Formation of the scaling cavity for a tunnel with vault drainage.

3.1 Anordnung und Ausbildung des Versinterungshohlraums V_H

Das Ziel des Versinterungshohlraums ist die Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit des primären Entwässerungssystems. Bei der Berechnung des Versinterungshohlraums darf das sekundäre Entwässerungssystem nicht mitgezählt werden! Die Anordnung des Versinterungshohlraums muss einigen wenigen Grundsätzen genügen:

- Der Versinterungshohlraum muss zusammenhängend sein!
- Der Versinterungshohlraum beginnt im First und evtl. in der Sohle und endet bei den Sickerleitungen.
- Der Versinterungshohlraum muss direkt an das sekundäre Entwässerungssystem anschliessen.
- Die Querschnittsfläche des Versinterungshohlraums soll im First und evtl. in der Sohle beginnend gegen die Sickerleitungen hin stetig zunehmen. Beim Anschluss an das sekundäre Entwässerungssystem ist die Querschnittsfläche am grössten.
- Die Langzeitstabilität des Versinterungshohlraums muss gewährleistet sein (Bergdruck, Eigengewicht der Konstruktion).
- Kann kein ausreichender Versinterungshohlraum ausgedehnt werden, so sind Alternativen einzuplanen (z.B. Schutz des Versinterungshohlraums mit Depotsteinen).

Die Skizzen 1 und 2 zeigen die ideale Anordnung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Gewölbedrainage und einem Tunnel mit Sohl drainagen.

- invert and ends at the seepage lines.
- The scaling cavity must be directly connected to the secondary draining system.
- The cross-section of the scaling cavity should increase continually, beginning in the crown and potentially the invert and ending at the seepage lines. The cross-section is at its largest when it connects to the draining system.
- The long-term stability of the scaling cavity must be safeguarded (rock pressure, structure's own weight).
- If it is not possible to separate a large enough scaling cavity, plans must be made for alternatives (e.g. protecting the scaling cavity with sustained-supply stones).

The two outlines 1 and 2 show the ideal arrangement of the scaling cavity in a tunnel with vault drainage and a tunnel with invert drainage.

Sample calculations for both outlines (see Figs. 1 and 2):

The necessary scaling cavity is 400 l/m. How large must the cross-section of the cavity be at the point where the groundwater enters the seepage line?

V_{total} = total volume of a random 1/2-cuboid scaling cavity.

If we consider only half of the tunnel, we see the cavity with V = 200 l/m and only one single drainage pipe. The cross-section of the cavity on entry into the drainage should be at

Rechenbeispiel zu den beiden Skizzen (vgl. dazu Bild 1 und 2):

Der notwendige Versinterungshohlraum beträgt 400 Liter/m. Wie gross muss die Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt des Bergwassers in die Sickerleitung sein?

V_{total} = Gesamtvolumen eines beliebigen 1/2-quadrigen Versinterungshohlraums.

Betrachten wir nur die Hälfte des Tunnels, so sehen wir den Hohlraum mit V = 200 l/m und nur eine einzige Drainageleitung. Die Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt in die Drainage sollte maximal sein. Den Hohlraum bilden zwei Quader, die diagonal halbiert sind. Es gilt für das Hohlraumvolumen

F_{max.} = Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt in die Drainage, r = Tunnelradius = 4 m

Lösung (nur rechte Seite):

$$V = \frac{F_{max.} \cdot \pi \cdot r}{2} \quad F_{max.} = \frac{V \cdot 2}{\pi \cdot r} = 318 \text{ cm}^2$$

Die Lage der Drainageröhre hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die notwendige totale Querschnittsfläche von 318 cm² muss sowohl im rechten wie auch im linken Versinterungshohlraum vorhanden sein. Dies entspricht je

a maximum. The cavity is formed of two cuboids which are halved diagonally. For the cavity volumes,

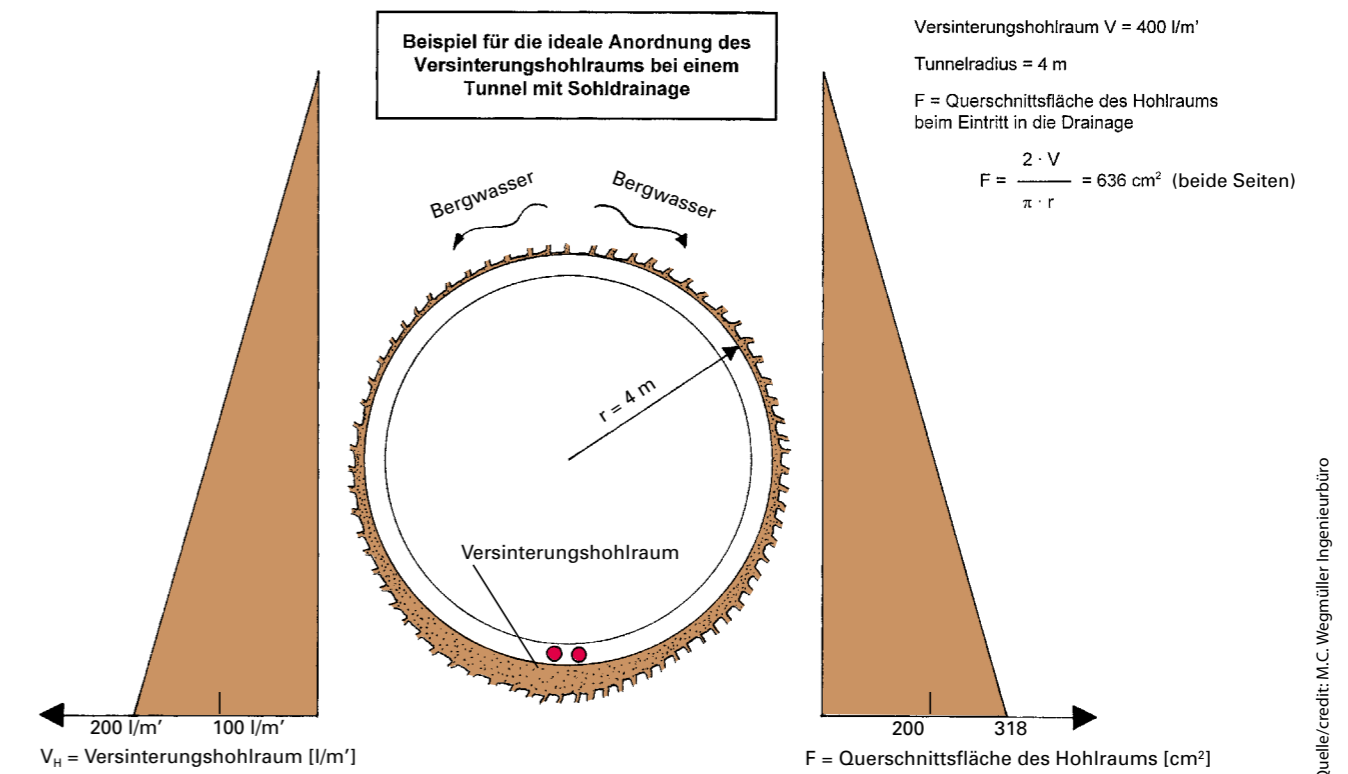
F_{max.} = cross-section area of the cavity at the point of entry into the drainage, r = tunnel radius = 4 m

Solution (right side only):

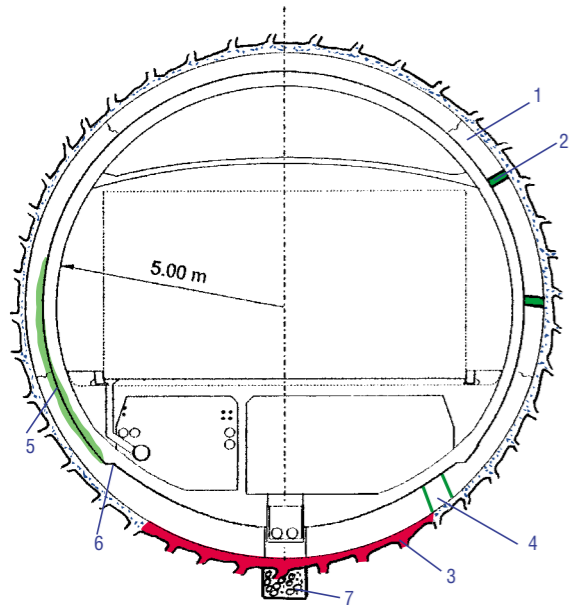
$$V = \frac{F_{max.} \cdot \pi \cdot r}{2} \quad F_{max.} = \frac{V \cdot 2}{\pi \cdot r} = 318 \text{ cm}^2$$

The position of the drainage pipes has no impact on the outcome. The total cross-section of 318 cm² is required in both the right and left sides of the cavity. This corresponds to a rectangle of approx. 3.2 cm in width and 1 m in length each. The dimensions of the scaling cavity therefore correspond to a 1/2-cuboid body of surface F = r = 12,6 m in height. These requirements do not seem very high but can only be achieved through skilful tunnel profile planning.

Difficulties are posed not only by the formation of the scaling cavity but also its transition to the drainage pipes, as this is where the scaling cavity comes to an end. The scaling cavity can then only be fully used when it is cohesive and increases in volume and cross-section area continually. This means that the drainage pipe openings must have the same total area as the scaling cavity at the end. The drainage pipes currently used cannot meet these requirements as their openings are too small.



2 Ausbildung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Sohl drainagen.
Formation of the scaling cavity for a tunnel with invert drainage.



Quelle/Credit: M.C. Wegmüller Ingenieurbüro

3 Tunnelprofil bei TBM-Vortrieb mit Tübbingausbau.
Tunnel profile in TBM excavation with tubbing lining.

einem Rechteck von ca. 3,2 cm Breite und 1 m Länge. Die Abmessungen der Versinterungshohlräume entsprechen also einem 1/2-quadrigen Körper der Grundfläche $F = 3,2 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm}$ und der Höhe $H = \pi \cdot r = 12,6 \text{ m}$. Diese Anforderungen scheinen nicht sehr hoch, lassen sich aber nur durch geschickte Planung des Tunnelprofils bewerkstelligen.

Schwierigkeiten bereitet nicht allein die Ausbildung des Versinterungshohlraums, sondern auch dessen Übergang zu den Drainagerohren, denn hier endet der Versinterungshohlraum. Der Versinterungshohlraum kann nur dann voll ausgenutzt werden, wenn er zusammenhängend ist und kontinuierlich an Volumen und Querschnittsfläche gewinnt. Dies bedeutet, dass die Öffnungen der Drainagerohre die gleiche Gesamtfläche aufweisen müssen wie der Versinterungshohlraum am Ende. Die zurzeit eingesetzten Drainagerohre können diese Anforderungen nicht erfüllen, denn sie weisen zu kleine Öffnungsflächen auf.

Die notwendige Anschlussfläche des Versinterungshohlraums an die Drainagerohre beträgt in der Regel (bei Strassen und Bahntunnels) zwischen 500 und 1000 cm². Im Normalfall liefern Sickerrohre (2 Stück) nur 100 cm² bis 300 cm², wobei deren Öffnungen durch die Kieshinterfüllung und/oder Anschlüsse (KDB) reduziert werden. Die einzigen Möglichkeiten, die Funktionstüchtigkeit des gesamten Entwässerungssystems aufrechtzuerhalten, bestehen darin,

- periodische Spülarbeiten durchzuführen, um die Öffnungen offen zu halten (gelochte Rohre lassen sich besser spülen, haben aber weniger Eintrittsfläche).
- Einbau von Depotsteinen zum Schutz der Drainageöffnungen vor Versinterungen. Insbesondere während der ersten 5–10 Jahre verhindern Depotsteine zementbedingte Ablagerungen in den Sickerpackungen und allen nachfolgenden Teilen des Entwässerungssystems. Gleichzeitig kann

The required connecting surface between the scaling cavity and the drainage pipe is usually (for road and rail tunnels) between 500 and 1,000 cm². Usually, seepage pipes (x2) only supply 100 cm² to 300 cm², at which point their openings are reduced by gravel backfilling and/or connections (GL). The only options for maintaining the functionality of the entire draining system are as follows:

- Performing periodic flushing works in order to keep the openings open (perforated pipes are easier to flush but have smaller entry areas).
- Installing sustained-supply stones to protect the drainage openings from scaling. In the first 5-10 years in particular, supply stones prevent deposits caused by cement in seepage packing and all subsequent parts of the draining system. At the same time, the supply stones can reduce the scaling cavity required, whereby 1 kg of sustained-supply stones can replace approx. 60 litres of scaling cavity.
- Installation of the return feedback system (RFS) to protect the scaling cavity from deposits over the long term.

3.2 Examples of Scaling Cavity Formation

- Gravel backfill between segment ring and rock (ensure connection to the secondary draining system)
- Gravel packing in drill and blast excavation in the invert/abutment
- Pressure-resistant drainage mats or dimpled membrane sheets
- Seepage packing/seepage layers of all kinds
- Drilling and cavities in rock
- Leaving recesses open
- Porous inserts in concrete
- Widened joints as 'flow channels'
- Draining channels in the invert

Here are a few suggestions:

TBM excavation with segmental lining (Fig. 3)

- Layer of gravel between rock and segment ring
- Leaving segment recesses open
- As little grout in the invert as possible
- Extremely strong fleeces and/or drainage mats between the tubbing ring and inner ring are the best option for ensuring a lasting scaling cavity (long-term resistance to pressure!)

3.3 Scaling Cavity/Draining System Optimisation

When planning the scaling cavity, it is recommended not to put all your eggs in one basket, but to create a suitable combination of various options. For example, it does not make sense to make the entire scaling cavity from drainage membranes that will then be filled with mud, polluted with cement slurry or compressed during the construction phase. It does not make sense to furnish the entire scaling cavity with sustained-supply stones either, as the lifespan of the stones is currently around 10 years, not 100. Combinations are the most useful approach. Here is an example:

- The scaling cavity should be furnished with surface-covering drainage (fleeces, drainage mats etc.). (Caution:

durch die Depotsteine der notwendige Versinterungshohlraum reduziert werden, wobei 1 kg Depotsteine ca. 60 Liter Versinterungshohlraum ersetzen.

- Einbau des Rückführungssystems (RFS), um den Versinterungshohlraum dauerhaft vor Ablagerungen zu schützen.

3.2 Beispiele für die Ausbildung des Versinterungshohlraums

- Kiesfüllung zwischen Tübbingring und Fels (Anschluss an das sekundäre Entwässerungssystem beachten)
- Kiespackungen beim Sprengvortrieb in der Sohle/im Widerlager
- Druckfeste Drainagematten oder Noppenplatten
- Sickerpackungen/Sickerschichten aller Art
- Bohrungen und Hohlräume im Fels
- Aussparungen offen lassen
- Durchlässige Einlagen im Beton
- Verbreiterte Fugen als «Fließkanäle»
- Entwässerungskanäle in der Sohle

Hier ein paar Vorschläge:

TBM-Vortrieb mit Tübbingausbau (Bild 3)

- Kiesschicht zwischen Fels und Tübbingring
- Tübbingaussparungen offen lassen
- Mörtel in der Sohle so sparsam wie möglich
- Extrem starke Vliese und/oder Drainagematten zwischen Tübbingring und Innenring bieten die beste Möglichkeit, um einen bleibenden Versinterungshohlraum zu schaffen (Langzeitdruckfestigkeit!)

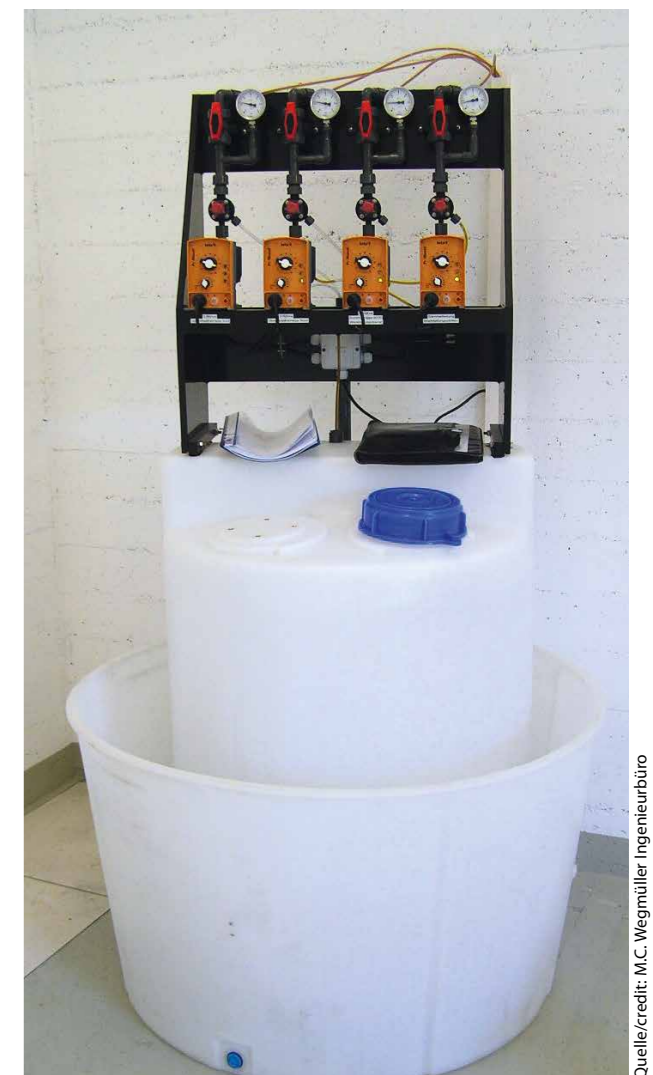
3.3 Optimierung des Versinterungshohlraums/ Entwässerungssystems

Bei der Projektierung des Versinterungshohlraums empfiehlt es sich, nicht «alles auf eine Karte» zu setzen, sondern eine geeignete Mischung verschiedener Möglichkeiten zusammenzustellen. Es hat beispielsweise keinen Sinn, den gesamten Versinterungshohlraum aus Noppenbahnen bereitzustellen, die dann während der Bauphase mit Schlamm gefüllt oder mit Zementmilch verdreckt oder zusammengepresst werden. Ebenso hat es keinen Sinn, den gesamten Versinterungshohlraum nur mit Depotsteinen zur Verfügung stellen zu wollen, denn die Einsatzzeit der Steine beträgt zurzeit ca. 10 Jahre und nicht 100 Jahre. Am sinnvollsten sind Kombinationen, hier ein Beispiel:

- 1/3 des Versinterungshohlraums sollte mit flächendeckenden Drainagen (Vliese, Drainagematten usw.) zur Verfügung gestellt werden (Vorsicht, während des Einbaus kommt es zu einer Komprimierung durch Betonierdruck).
- 1/3 des Versinterungshohlraums kann mit Bohrungen, Öffnungen zwischen den Fugen, Kieskoffern, Liniendrainagen in regelmässigen Abständen bereitgestellt werden.
- 1/3 des Versinterungshohlraums kann durch Depotsteine ersetzt werden. Bei hohem Kalkgehalt des Bergwassers (> 25 °dH) und ruhigem Wasserfluss gilt 1 kg Depotstein ~ 100 Liter Versinterungshohlraum. Gleichzeitig bleiben die Sickerpackungen und Öffnungen der Drainagerohre

compression from concreting pressure will occur during installation.)

- The scaling cavity can be furnished with drill holes, openings between the joints, gravel beds, line drainage at regular intervals.
- The scaling cavity can be replaced with sustained-supply stones. For groundwater with high lime content (> 25 °dH) and a smooth flow of water, 1 kg supply stone corresponds to approx. ~ 100 litres of scaling cavity. At the same time, the seepage packing and openings in the drainage pipes are kept clear and maintenance costs for all subsequent parts of the draining system are reduced over this period by approx. 65–75% (suitable usage quantities of 0.5–2 kg supply stone/m tunnel length). Installation of the return feedback system as a guarantee.
- Installation of landfill seepage pipes with large openings/slits to enlarge the entry area. Regular flushing to keep the openings clear.
- Providing additional scaling cavity space for wells (empty pipes, cavities).



4 Härtestabilisationsanlage zur flüssigen Dosierung.
Hardness stabilisation system for dispensing fluid.

Quelle/Credit: M.C. Wegmüller Ingenieurbüro

frei und die Unterhaltskosten aller nachfolgenden Teile des Entwässerungssystems reduzieren sich während dieser Zeit um ca. 65–75% (geeignete Einsatzmengen 0,5–2 kg Depotsteine/m Tunnellänge). Einbau des Rückführungssystems als Garantieabsicherung.

- Einbau von Deponiesickerrohren mit grossen Öffnungen/Schlitzten zur Vergrößerung der Eintrittsfläche. Regelmässige Spülarbeiten zur Freihaltung der Öffnungen.
- Bereitstellen von zusätzlichem Versinterungshohlraum bei Quellen (Leerrohre, Hohlräume).

4 Verhinderung von Ablagerungen

Die bisherigen Verfahren zur Konditionierung von Bergwässern können in zwei Gruppen eingeteilt werden: einerseits die flüssigen Härtestabilisationsanlagen und andererseits der Einsatz von Depotsteinen. Die Härtestabilisierung steuert den Versinterungsvorgang, indem durch Konditionierung des Bergwassers eine Ausfällreaktion verhindert wird. Das Wasser wird auf seinem Fließweg so früh als möglich mit dem Härtestabilisator geimpft. Schon kleinste Konzentrationen reichen aus, um Ablagerungen zu verhindern.

Die Zugabe des Härtestabilisators kann grundsätzlich in flüssiger oder fester Form erfolgen. Bei der Flüssigdosierung wird der Härtestabilisator in einer Anlage über Dosierpumpen dem Entwässerungswasser zugegeben. Die Dosierung wird dabei auf die mittlere Wassermenge am Ende des zu behandelnden Abschnitts ausgelegt. Die Vermischung mit dem laufend zutretenden Sickerwasser reicht aus, um die gewünschte Wirkung zu erzielen. Im Allgemeinen ist die Dosierung unabhängig von der aktuell vorhandenen Wasserführung.

Bei der Projektierung von Anlagen zur Flüssigdosierung ist neben den Platzverhältnissen (Tank), der Nachfüllbarkeit und der Wartbarkeit auch das dauernde Vorhandensein einer Wasserführung zu prüfen.

Bei der Verwendung des Härtestabilisators in fester Form werden sogenannte Depotsteine in Tabletten- oder Stangenform im Entwässerungssystem ausgelegt. Sie enthalten den härtestabilisierenden Wirkstoff, gemischt mit einer schwerlöslichen Trägersubstanz. Durch den Kontakt des Bergwassers mit den Steinen lösen sich diese langsam auf und geben so den Wirkstoff frei. Depotsteine können an fast allen Orten des EWS ausgelegt werden (z. B. in Schächten, Bohrlöchern, Drainagehohlräumen, Sickerpackungen und EWS-Leitungen). Depotsteine können auch in den Sickerschichten oberhalb und rund um eine Sickerleitung eingebracht werden. Damit kann das Wasser schon vor dem Eintritt ins Entwässerungssystem behandelt und einem Versintern der Sickerlöcher oder -schlitze vorgebeugt werden. Depotsteine sind insbesondere bei kleinen und sporadischen Wasserführungen interessant.

5 Das Rückführungssystem

Der erste Kontakt von Berg- oder Sickerwasser mit einem Bauwerk findet in den Sickerpackungen statt, womit sich die

4 Preventing Deposits

Previous procedures for conditioning groundwater can be divided into two groups: liquid hardness stabilisation systems and the use of sustained-supply stones respectively. Hardness stabilisation controls the scaling process, as conditioning the groundwater prevents a precipitation reaction. The water is injected with hardness stabiliser as early as possible on its flow path. Even the smallest concentrations are enough to prevent the formation of deposits.

In principle, the hardness stabiliser can be added in liquid or solid form. In liquid form, the hardness stabiliser is added to the draining water in a system using a dispensing pump. Dispensation is adapted to the average amount of water in the section to be treated. Mixing with the leachate occurring constantly is sufficient to achieve the desired effect. In general, dispensing is not affected by the current water supply.

When planning liquid dispensing systems, it is crucial to examine the available space (tank), the potential for refilling and maintenance and the ongoing availability of a water supply.

When using the hardness stabiliser in solid form, so-called 'sustained-supply stones' are laid in the draining system in tablet or rod form. They contain the hardness stabilising substance, mixed with a vehicle which is difficult to dissolve. Contact between the groundwater and the stones slowly dissolves these, thus releasing the substance. Supply stones can be laid almost anywhere in the draining system (e.g. in shafts, drill holes, drainage cavities, seepage packing and draining system lines). Supply stones can also be used in the upper seepage layers and around a seepage line. This allows the water to be treated before it enters the draining system and prevents seepage holes or slits from scaling. Supply stones are particularly useful for small and sporadic flows of water.

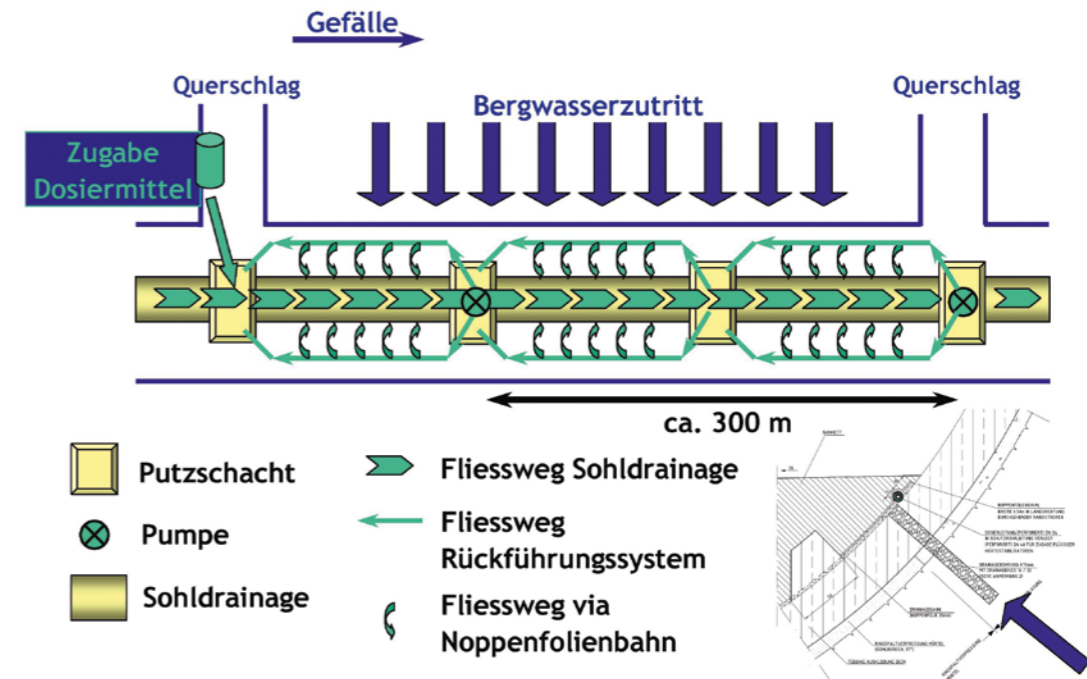
5 The Return Feedback System

The first contact between groundwater or leachate and a structure occurs in the seepage packing, raising the question of how the procedure of hardness stabilisation can be used in the seepage packing to avoid lime deposits on a lasting basis.

In addition to the supply stones, the return feedback system can also be used. The advantage of this is that only small quantities of sustained-supply stones need to be installed in the seepage packing during tunnel construction. Only at a later stage, if necessary, is groundwater which has already been conditioned removed from the draining system and pumped back into the seepage packing.

Experiences from other structures have shown that it is not possible to precisely predict the point at which scaling will first cause closure of the seepage packing and drainage line

Prinzip Rückführungssystem



5 Schema des Rückführungssystems.
Diagram of return feedback system.

Frage stellt, wie das Verfahren der Härtestabilisierung in den Sickerpackungen angewendet werden kann, um Kalkablagerungen dauerhaft zu verhindern.

Als Ergänzung zu den bekannten Depotsteinen bietet sich das Rückführungssystem an. Es bietet den Vorteil, dass während des Rohbaus nur kleine Mengen an Depotsteinen in die Sickerpackung eingebaut werden müssen. Erst später wird, bei Bedarf, bereits konditioniertes Bergwasser aus dem Entwässerungssystem entnommen und zurück in die Sickerpackung gepumpt.

Die Erfahrungen aus anderen Bauwerken haben gezeigt, dass es vor dem Bau des Entwässerungssystems nicht möglich ist, eine exakte Aussage darüber zu machen, an welcher Stelle die Versinterungen zuerst zu einem Verschluss der Sickerpackungen und der Drainageleitung führen werden. Deshalb ist es sinnvoll, ein System zu installieren, mit dessen Hilfe man jederzeit dort eingreifen kann, wo sich starke Ablagerungen bilden. Dies soll das Rückführungssystem ermöglichen.

Den Ausgangspunkt des Rückführungssystems bildet eine «konventionelle» Härtestabilisationsanlage, die das Bergwasser der Gewölbedrainage behandelt. Damit dieses Bergwasser nicht in die Hauptdrainage entweicht und dauernd neu dosiert werden muss, werden die Schächte der Gewölbedrainage «kurzgeschlossen», sodass das behandelte Berg-

water before the draining system is built. That is why it is useful to install a system which can be used to access the places where lots of deposits are formed at any time. The return feedback system should enable this to occur.

The return feedback system is based on a 'conventional' hardness stabilisation system which treats the ground-



6 Einbau von Depotsteinen und des Rückführungssystems in die Sickerpackungen der Gewölbedrainagen beim Bau des Ceneri-Basistunnels.
Installation of sustained-supply stones and the return feedback system in seepage packing for vault drainage in the construction of the Ceneri Base Tunnel.

wasser über grosse Abschnitte weiterfliesst. In Zonen mit starken Versinterungen wird das behandelte Bergwasser mit einer Tauchpumpe aus den Schächten der Gewölbedrainage entnommen und über die Schlauchleitungen in die Sickerpackungen zurückgeführt. Zur optimalen Verteilung weist die Schlauchleitung alle 5–10 m Löcher auf, aus welchen das behandelte Bergwasser in die Sickerpackungen entweichen kann. Um die Pumpenzahl so klein wie möglich zu halten, sind die Schlauchleitungen in den Schächten der Gewölbedrainage durchzuführen.

Zum Zeitpunkt des Rohbaus müssen lediglich die perforierten Schlauchleitungen verlegt werden. Diese Massnahme dient gleichzeitig als Vorinvestition und als Rückfallebene für den gesamten Tunnel. Die Installation der Pumpen und die notwendige Vorbehandlung des Bergwassers in den Gewölbedrainagen erfolgen erst später und nur bei effektivem Bedarf, d. h., wenn sich in diesen Abschnitten starke Versinterungen im Entwässerungsrohr bilden. Zum Schutz der Öffnungen der Dosierleitungen (vor Steinen der Sickerpackungen, Schlamm usw.) werden sog. Clips angebracht, die analog einem Fingerring die Schlauchleitungen umfassen und die Dosieröffnungen schützen.

6 Fazit

Versinterungen können dem Bauwerk grossen Schaden zufügen und verursachen die zum Teil grössten Unterhaltskosten während des Betriebs der Anlage. Versinterungen lassen sich aber beherrschen, wenn vor dem Bau der Anlage ihr Ausmass abgeschätzt wird und entsprechende Massnahmen ergriffen werden. Dazu gehören neben der Optimierung des Querschnitts des Bauwerks auch vorbeugende Massnahmen wie der Einbau von Depotsteinen und/oder des Rückführungssystemen.

water from vault drainage. To ensure that this water does not leak into the main drainage and constantly need to be redispensed, the vault drainage shafts are 'cut short' to ensure the treated groundwater flows on through large sections. In areas where significant scaling has occurred, the groundwater treated is removed from the vault drainage shafts using an immersion pump and returned to the seepage packing via the hoses. For optimum distribution, the hose is perforated at intervals of every 5–10 m. The treated groundwater can escape through these perforations into the seepage packing. To keep the number of pumps as low as possible, the hoses must be passed through the vault drainage shafts.

During tunnel construction, only the perforated hoses must be laid. This measure serves as both a pre-investment and a fallback measure for the entire tunnel. The installation of the pumps and the necessary pre-treatment of the groundwater in the vault drainage only occur later and where effectively required, i.e. when significant scaling occurs in the drainpipe in these sections. To protect the openings in the dosing pipes (from stones from seepage packing, mud etc.), so-called clips are used. These surround the hoses like a ring on a finger and protect the dispensing openings.

6 Conclusion

Scaling can cause major damage to the structure and incurs some of the highest maintenance costs during operation of the facility. However, scaling can be managed if its extent is estimated before the facility is built and corresponding measures are taken. These include optimising the cross-section of the structure and preventive measures such as the installation of sustained-supply stones and/or the return feedback system.

Thomas Gruber, Dipl.-Ing.(FH), Streng Plastic AG, Niederhasli/CH

Rohrmaterial für Tunnelentwässerungen

Kunststoffrohre – die flexible Lösung

Die Entwässerung eines Tunnels gehört zu den Komponenten des Bauwerks, welche diskret über seine gesamte Lebensdauer funktionieren müssen. Ausser der turnusgemässen Reinigung dürfen keine weiteren Wartungsarbeiten anfallen. Eine detaillierte Planung, hohe Qualitätsstandards und ein sorgfältiger Einbau stellen die Grundlage einer langen Nutzungsdauer dar.

Pipe Material for Tunnel Draining Systems

Plastic Pipes – the Flexible Solution

The draining system of a tunnel is an aspect of the structure which has to function discretely throughout its entire lifespan. No additional maintenance work should be required, other than regular cleaning. Detailed planning, a high standard of quality and careful installation are the basis for a long service life.

1 Der Werkstoff

Am Anfang des Planungsprozesses steht, neben der Evaluation der anfallenden Wassermenge, die Auswahl des geeigneten Rohrwerkstoffs.

Grundsätzlich können Rohre auf Grundlage des Werkstoffs in zwei Klassen aufgeteilt werden:

- biegeweiche Rohre (thermoplastische Kunststoffe)
- biegesteife Rohre (Beton, duktiler Guss, Steinzeug, Faserzement, faserverstärkte Kunststoffe ...)

1.1 Kunststoff als idealer Werkstoff im Tunnelbau

Im Tunnelbereich haben sich Kunststoffrohre aufgrund ihrer in der Summe besseren Eigenschaften weitestgehend durchgesetzt (siehe Bild 1). Die Vorteile im Einzelnen sind wie folgt [1]:

- **Dichtheit:** Im Vergleich zu anderen Rohrwerkstoffen ist Kunststoff gas- und wasserdicht. Auch die Rohrverbindungen sind so ausgelegt, dass sie meist bis weit über die zulässige 5%-Verformung rechtwinklig zur Rohrachse gemäss SIA 190 noch wasserdicht bleiben. Für noch höhere Dichtheitsanforderungen können PE-HD- und PP-Rohre zudem verschweisst werden, im Muffen- oder im Spiegelschweissverfahren.
- **chemische Beständigkeit:** Kunststoff ist ein chemisch sehr stabiles Material und daher gegen sehr wenige chemische Substanzen anfällig. Selbst sehr aggressive Abwässer können Kunststoffrohren keinen Schaden zufügen. Ausserdem ist die biogene Schwefelsäurekorrosion, welche bei Betonrohren auftreten kann, bei Kunststoffrohren kein Thema.
- **Abriebfestigkeit:** Die Abriebfestigkeit ist im Vergleich zu anderen Rohrwerkstoffen am geringsten, was sich wiederum positiv auf die Lebensdauer auswirkt.

1 The Material

At the beginning of the planning process, the amount of water accumulated must be evaluated and the suitable pipe material must be selected.

Pipes can essentially be divided into two categories, based on material:

- flexible pipes (thermoplastics)
- rigid pipes (concrete, ductile iron, earthenware, fibre cement, fibre-reinforced plastics, etc.)

1.1 Plastic: an Ideal Material for Tunnelling

Plastic pipes have come to dominate in the tunnelling industry (see Fig. 1) due to their properties, which are better overall. Their specific benefits are as follows [1]:

- **Impermeability:** In comparison to other pipe materials, plastic is gas- and watertight. The pipe connections are also equipped to usually remain watertight up to well over the 5% deformation permitted perpendicular to the pipe axis in accordance with SIA 190. PE-HD and PP pipes can also be welded using a socket or mirror weld procedure in cases where greater impermeability is required.
- **Chemical stability:** Plastic is a material with a great deal of chemical stability and is therefore vulnerable to very few chemical substances. Even highly abrasive wastewater cannot inflict damage on plastic pipes. Biogenic sulphide corrosion, which can occur in concrete pipes, is also not a concern for plastic pipes.
- **Abrasion resistance:** The abrasion resistance is the lowest in comparison to other pipe materials, which in turn has a positive impact on lifespan.

Matériau des tubes pour le drainage du tunnel

Tubes en plastique – la solution de la flexibilité

Outre l'évaluation du volume d'eau qui s'accumule, le choix du matériau des tubes occupe une place essentielle dans le processus de planification. Les tubes, mais aussi les puits en plastique constituent une solution idéale dans le contexte de la construction de tunnels. Les tubes en plastique souples sont parfaitement adaptés aux exigences statiques, tandis que la flexibilité du matériau et le faible poids les rendent économiques à poser. Le respect et le contrôle des dispositions et normes en vigueur revêtent une importance particulière. Seuls des matériaux absolument irréprochables garantissent une exploitation durable et sans incident. Cela vaut pour les tubes, mais aussi pour les joints utilisés.

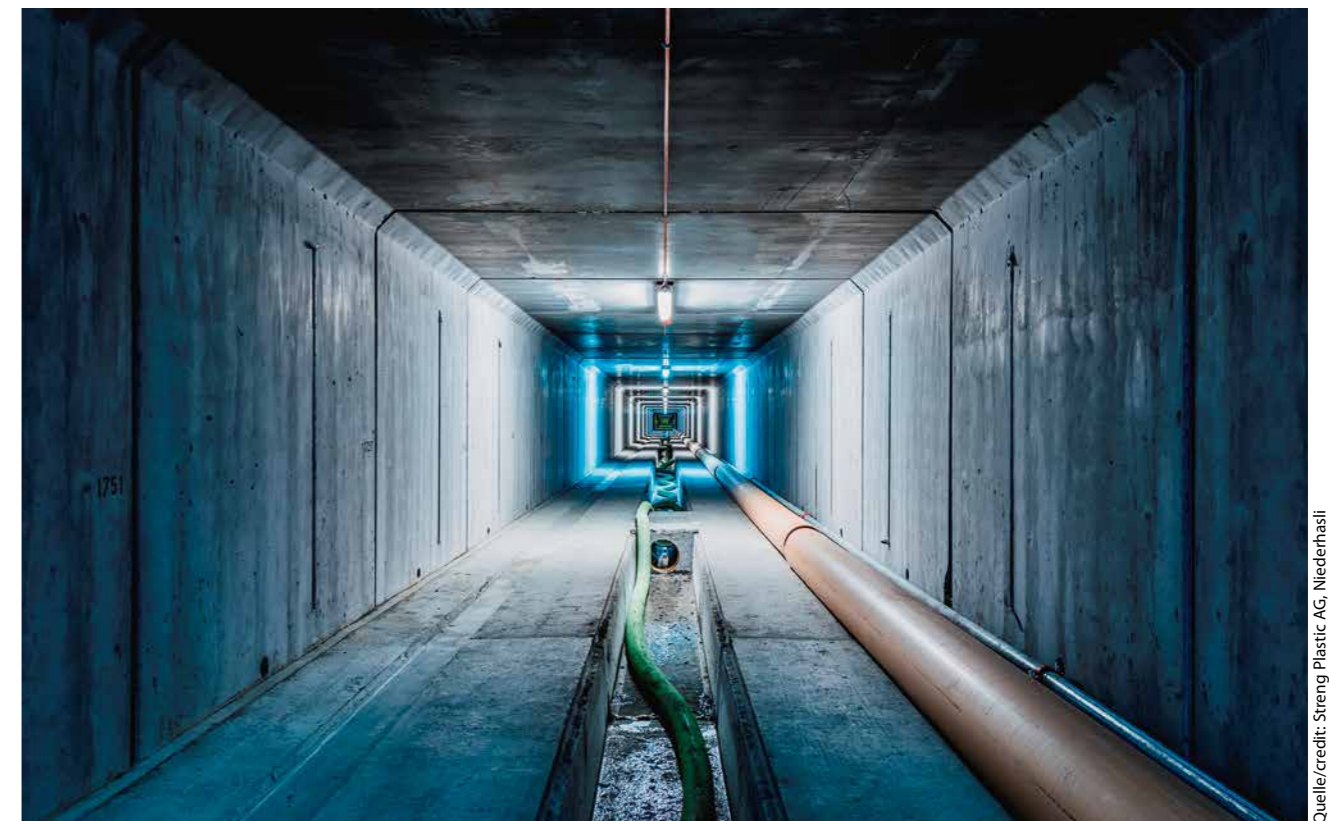
Materiale dei tubi per i drenaggi delle gallerie

Tubi di plastica – la soluzione flessibile

Oltre alla valutazione della quantità d'acqua prevedibile, anche la scelta del materiale dei tubi svolge un ruolo decisivo nel processo di progettazione. I tubi di plastica - e anche i pozzetti - rappresentano una soluzione ideale nella costruzione di gallerie. I tubi di plastica mobili sono adatti al meglio a soddisfare i requisiti statici, mentre la flessibilità del materiale e il peso ridotto rendono possibile una posa economica. Il rispetto e il controllo delle norme e delle disposizioni vigenti sono molto importanti - solo i materiali dei tubi impeccabili garantiscono un funzionamento lungo e privo di disturbi. Questo vale tanto per i tubi quanto anche per le guarnizioni in essi impiegate.

- **hydraulische Leistungsfähigkeit:** Kunststoffrohre sind innen nahezu hydraulisch glatt, daraus folgt eine hohe Abflussleistung und dementsprechend geringe Rohrquerschnitte.
- **hohe Lebensdauer:** Zwar wurden die ersten Kunststoffrohre erst in den 30er-Jahren des letzten Jahrhunderts einge-

- **Hydraulic capacity:** Plastic pipes are almost hydraulically smooth inside, leading to a high discharge output and accordingly low pipe cross sections.
- **Long lifespan:** Although the first plastic pipes were installed in the 1930s, they have also stayed in operation without damage until now. Ongoing inspections of in-



1 Servicetunnel Belchen
Belchen service tunnel

Quelle/Credit: Streng Plastic AG, Niederhasli

baut, jedoch sind diese aber auch bis heute schadenfrei in Betrieb. Daueruntersuchungen an eingebauten Rohren und ständige Verbesserungen am Werkstoff lassen heute den Schluss zu, dass bei ordnungsgemäsem Einbau und bestimmungsgemäßer Verwendung von einer Lebensdauer von weit mehr als 100 Jahren ausgegangen werden kann.

- Anschaffungs- und Betriebskosten: Bei den Anschaffungs- und Verlegekosten kann man zumindest feststellen, dass Kunststoffrohre nicht teurer als andere Systeme sind, jedoch ergeben sich bei den Betriebskosten deutliche Vorteile. So ergeben sich beispielsweise durch die glatte Innenfläche deutlich längere Reinigungsintervalle als bei anderen Werkstoffen.
- Auf die guten statischen Eigenschaften wird im späteren Textverlauf näher eingegangen.

Diese nicht abschliessende Auflistung in Kombination mit der einfachen, flexiblen und kostengünstigen Verlegung hat dazu geführt, dass Tunnelentwässerungen heute weitestgehend mit Kunststoffrohren durchgeführt werden.

1.2 Hauptwerkstoffe Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)

In der Schweiz werden überwiegend die beiden Rohrwerkstoffe Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) verwendet (siehe Bild 2).

PE ist gegenüber PP deutlich zäher und schlagfester. PE zeichnet sich durch ein sehr elastisches Verhalten aus und ist beinahe unzerbrechlich. Dies bedeutet, dass der Werkstoff bei der Verlegung im harten Baustellenalltag als sehr verzeihlich bezeichnet werden kann, auch unvorhergesehene Belastungen führen kaum zum Integritätsversagen. Dieser Vorteil setzt sich auch im Betrieb fort. Gerade im Tunnel, wo Sanierungen extrem kostspielig sein können, weist PE sehr grosse Reserven auf.

Hingegen ist PP gegenüber PE deutlich härter, steifer und fester und hat eine höhere Einsatztemperatur. Auch PP ist schlagzäh und elastisch, jedoch erreicht es durch die höhere Härte nicht die Robustheit von PE. Durch die höhere Härte des Werkstoffs werden andererseits die geforderten Ringsteifigkeitsklassen bei geringerer Wanddicke erreicht, was das Rohr insgesamt leichter und günstiger macht, der Ablaufquerschnitt ist bei gleichem Aussendurchmesser höher.

Obwohl in der Schweiz rezykliertes PE im Kabelschutzrohrebereich erlaubt ist und auch eingesetzt wird, ist bei der Entwässerung darauf zu achten, dass hier kein Rezyklat verwendet wird. Da aufgrund möglicher Qualitätsschwankungen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich Abschnitte mit schlechteren Eigenschaften bilden können, ist bei der Entwässerung darauf zu achten, dass ausschliesslich einwandfreie und homogene Neuware verwendet wird. Diese Forderung ist auch in den Anforderungen des Qplus Swiss Quality System enthalten.



2 Polyethylen- und Polypropylenrohre
Polyethylene and polypropylene pipes

stalled pipes and constant improvements in the material allow us to conclude today that a lifespan of well over 100 years, based on proper installation and intended use, can be expected.

- Procurement and operating costs: When it comes to procurement and laying costs, it can be established at least that plastic pipes are not more expensive than other systems. However, there are clear benefits in terms of operating costs. For example, the smooth inner surface means cleaning intervals are much longer than for other materials.
- We will take a closer look at the good static properties at a later stage.

This non-exhaustive list, combined with the easy, flexible and cost-effective laying process, means that the majority of tunnel draining systems now use plastic pipes.



3 Ausschnitt Tunnelentwässerung
Section of tunnel draining system

2 Rohrtypen und Rohreigenschaften

Im Tunnelbau müssen zwei Arten von Wasser entsorgt werden. Zum einen ist es das Wasser, welches auf der Verkehrsfläche anfällt, zum anderen muss das eventuell anfallende Bergwasser abgeführt werden (siehe Bild 3).

Wasser in der Verkehrsfläche wird, wie ausserhalb des Tunnels auch, mittels Einlaufrippen und Schächten gesammelt und dann in einer geschlossenen Sammelleitung abtransportiert.

Bergwasser wird in Sickerpackungen mit Drainageleitungen gesammelt und abgeführt.

2.1 Entwässerungsröhre und Drainageröhre

2.1.1 Entwässerungsröhre

Entwässerungsröhre, im Sinne von geschlossenen Sammelleitungen, werden im Tunnel im Allgemeinen als Freispiegelleitung verlegt. Dies bedeutet, dass der Rohrdurchmesser so geplant wird, dass das Rohr nicht vollständig gefüllt wird und somit auch nicht unter Innendruck gerät. Hilfreich zur Dimensionierung sind hier Nomogramme (siehe Bild 4), welche auf Grundlage der Fließformel nach Prandtl-Colebrook, meist vom Rohrproduzenten selbst, erstellt wurden. In Abhängigkeit von Gefälle und anfallender Wassermenge kann schnell der benötigte Rohrdurchmesser bei Vollfüllung be-

1.2 Main Materials Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP)

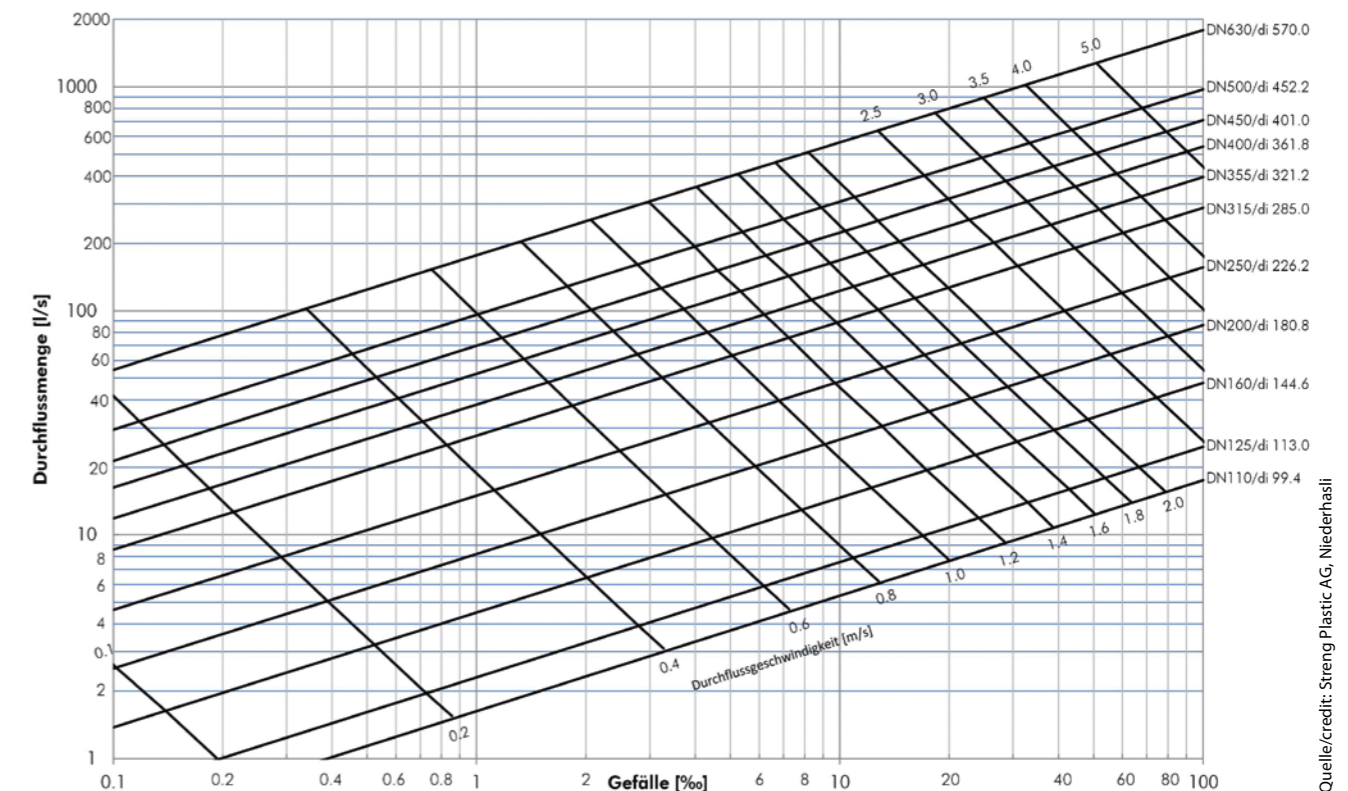
In Switzerland, polyethylene (PE) and polypropylene (PP) are mostly used as pipe materials (see Fig. 2).

PE is much tougher and more shock-resistant than PP. PE is very elastic and almost unbreakable. Accordingly, this material can be described as very forgiving when it comes to laying pipes in the tough everyday conditions on the construction site. Even unanticipated loads hardly ever lead to a collapse in integrity. This benefit continues to be felt during operation. In the tunnel itself, where renovation can be extremely cost-intensive, PE still has plenty in reserve.

In comparison, PP is much harder, stiffer and firmer than PE and has a higher operating temperature. PP is also tough and elastic, but the fact that it is harder means it is not as robust as PE. On the other hand, as the material is harder, the required annular rigidity grades are achieved with a lower wall thickness, making the tube lighter and less expensive overall. The outlet cross section is higher for the same outer diameter.

Although recycled PE is permitted and used in cable conduits in Switzerland, note that no recycled material is used

Nomogramm PE - Rohre SN 8



4 Nomogramm PE-Rohre - SN 8
Nomogram for PE pipe - SN 8



Quelle/Credit: Streng Plastic AG, Niederhasli

5 Geschlitzte und gelochte Drainagerohre
Slotted and perforated drainage pipes

stimmt werden. Eine sinnvolle Teilfüllung stellt eine Füllung mit maximal 70% der Rohrhöhe dar, hier können immer noch 85% der Vollfüllungsmenge transportiert werden, und es bestehen noch Reserven gegenüber unvorhergesehenen Ereignissen.

Die Klassifizierung von Entwässerungsrohren erfolgt über die Ringsteifigkeit (gemäss ISO EN 9969) in die SN-Klasse. Diese Klassifizierung beschreibt, welche Kraft benötigt wird, um einen Rohrquerschnitt um 3% stauchen zu können. So wird beispielsweise bei einem Rohr der Steifigkeitsklasse SN8 eine Kraft von 8 kN pro projiziertem Quadratmeter Rohrfläche benötigt, um das Rohr um 3% deformieren zu können.

Eine weitere Einstufung erfolgt über die Geometrie, die Einteilung in Rohrserien und SDR-Klassen. Hier wird als Index das Verhältnis von Rohrdurchmesser zu Rohrwanddicke angegeben:

Die Rohrserie S wird aus Rohrdurchmesser und Wandstärke wie folgt berechnet:

$$\text{Serie S} = (\text{DN} - s) / 2 \cdot s$$

(DN = Aussendurchmesser; s = Wandstärke)

Der SDR-Wert (Standard Dimension Ratio) wird folgendermassen bestimmt:

$$\text{SDR} = \text{DN} / s$$

Die Umrechnung des älteren Wertes der Rohrserie in den neueren SDR-Wert funktioniert wie folgt:

$$\text{SDR} = (2 \cdot S) + 1$$

Entwässerungsrohre sollten mit einem Durchmesser von mindestens DN/OD 160 eingesetzt werden [2].

for draining systems. As it is not possible to rule out some sections having poorer properties due to potential variations in quality, it is important to ensure that impeccable and uniform new materials only are used in draining systems. This request is also included in the Qplus Swiss Quality System requirements.

2 Pipe Types and Properties

In tunnelling, there are two types of water for disposal. The first is the water which accumulates on the traffic surface. The second is any groundwater that accumulates (see Fig. 3).

Just like outside the tunnel, water in the traffic surface is collected using inflow channels and shafts, before being removed in a closed collecting pipe.

Groundwater is collected in dry packing with drainage pipelines and removed.

2.1 Draining Pipes and Drainage Pipes

2.1.1 Draining Pipes

Draining pipes, as in closed collection pipes, are generally laid in the tunnel as free-flow pipes. This means that the pipe diameter is designed so that the pipe does not fill up completely and is therefore not subject to internal pressure. In this case, nomograms (see Fig. 4) have been created based on Prandtl-Colebrook's formula for flowing, mostly by the pipe manufacturers themselves, and are useful for dimensioning. Depending on gradient and the amount of water that accumulates, the required pipe diameter for filling until full can be determined. A reasonable part-filling is up to 70% of the height of the pipe. In this case, 85% of the full filling amount can still be taken, and there are still reserves for unanticipated events.

Draining pipes are divided into SN classes based on their annular rigidity (in accordance with ISO EN 9969). This classification describes the force required to compress a pipe cross section by 3%. For example, for a pipe in rigidity class SN8, a force of 8 kN per projected square metre of pipe surface is required to deform the pipe by 3%.

Geometry, pipe series classification and SDR classes are also used to categorise pipes. In this case, the ratio of pipe diameter to pipe wall thickness is stated as the index:

Pipe series S is calculated from the pipe diameter and wall thickness as follows:

$$\text{Series S} = (\text{DN} - s) / 2 \cdot s$$

(DN = outer diameter; s = wall thickness)

The SDR (Standard Dimension Ratio) value is determined as follows:

$$\text{SDR} = \text{DN} / s$$

2.1.2 Drainagerohre

Drainagerohre werden meist so ausgeführt, dass dafür normale Entwässerungsrohre verwendet werden, welche dann werkseitig gelocht oder geschlitzt werden (siehe Bild 5).

Bei Drainagerohren sollte der Durchmesser mindestens DN/OD 200 betragen, der Einlaufquerschnitt sollte mindestens 150–200 cm² pro Laufmeter betragen, bei Schlitzbreiten von mindestens 8–10 mm. Bei gelochten Rohren sollte der Lochdurchmesser mindestens 12–16 mm betragen und ebenfalls 150–200 cm² Einlaufquerschnitt vorhanden sein. Die Schlitzung/Lochung erstreckt sich zwischen mindestens einem Drittel (120°) bis maximal etwas mehr als der Hälfte (220°) des Rohrquerschnitts [2].

Bei Qualitätsanbietern, welche das Qplus Swiss Quality System voll umsetzen, werden die Ringsteifigkeiten durch die grossen Reserven des Vollrohres auch im gelochten oder geschlitzten Zustand immer noch erreicht. Bei geschlitzten Rohren spielt die Ausführung der Schlitzung eine wesentliche Rolle. Um sicherzustellen, dass die statische Schwächung so gering wie möglich bleibt, und um einen möglichst grossen Einlaufquerschnitt sicherzustellen, sollte darauf geachtet werden, dass die Schlitzwandungen durchweg senkrecht zur Rohrachse ausgeführt sind.

Bei den Drainagen gilt, wie bei allen anderen Entwässerungsrohren auch, dass unbedingt nur Rohre aus Neumaterial verwendet werden sollen (Qplus R 292 012-2). Rezykliertes Material weist aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung nicht die notwendigen Eigenschaften auf und kann zum Versagen des Rohrs führen.

2.2 Anforderungen an die Reinigungsfähigkeit

Sowohl geschlossene Rohre als auch Drainagerohre müssen ein hohes Mass an Widerstandskraft gegenüber der Reinigung aufbringen. Moderne Reinigungssysteme arbeiten mit einem Spüldruck von bis zu 200 bar an der Austrittsöffnung der Spüldüse. Zusätzlich zu einem Rotationskopf wird in stark verschmutzten Abschnitten oft noch eine Ketten-schleuder eingesetzt. Dieser Belastung müssen die Rohre zu jedem Zeitpunkt der Einsatzdauer standhalten.

Die oben genannten Anforderungen stellen die Mindestanforderungen der AQP Tunnelentwässerung dar, auf die sich die Schweizer Rohrerhersteller eingestellt haben und dementsprechend produzieren. Darüber hinausgehende Anforderungen sollte der Bauherr, am besten in Absprache mit dem Hersteller, definieren, da diese zu Änderungen an der Wanddicke oder in der Materialwahl führen können.

2.3 Rohrstatik

Ein Rohr unterscheidet sich, statisch gesehen, nicht von einem Tunnelbauwerk.

Massgebliche Einflussfaktoren hinsichtlich der Rohrstatik sind [3]:



Quelle/Credit: Streng Plastic AG, Niederhasli

6 Muffe mit Elastomerdichtung
Socket with elastomer seal

The previous value for the pipe series is converted into the new SDR value as follows:

$$\text{SDR} = (2 \cdot S) + 1$$

Draining pipes with a diameter of at least DN/OD 160 should be used [2].

2.1.2 Drainage Pipes

Drainage pipes are usually designed so that normal draining pipes which are then perforated or slotted by the manufacturer (see Fig. 5) are used.

For drainage pipes, the diameter should be at least DN/OD 200, the inflow cross section should be at least 150–200 cm² per linear metre, and the slot widths should be at least 8–10 mm. For perforated pipes, the perforation diameter should be at least 12–16 mm and there should also be an inflow cross section of 150–200 cm². The slotting/perforation ranges between at least a third (120°) to a maximum of just over half (220°) of the pipe cross section [2].



Quelle/Credit: Streng Plastic AG, Niederhasli

7 Elektroschweissmuffe
Electro-weld socket



8 Spiegelschweissvorrichtung
Mirror welding equipment

- Überdeckungshöhe
- Auflast und Verkehrslasten
- Bettungs- und Überschüttungsbedingungen (Materialgüte und Verdichtungsgrad)
- Grundwasserstand

Aus diesen Einflussgrößen werden die Belastungen ermittelt, welche auf das Rohr wirken. Mit den Ergebnissen kann dann die geeignete Rohrwandstärke in Bezug auf das verwendete Material und den Rohrdurchmesser ausgewählt werden.

Ein wesentlicher Unterschied zum Tunnelbauwerk besteht darin, dass es sich bei Kunststoffrohren um biege weiche Rohre handelt. Durch die viskoelastischen Eigenschaften des Werkstoffs passt sich das Rohr den Veränderungen im Gefüge des umgebenden Materials an. Das Rohr verformt sich in dem Umfang, in dem sich das umgebende Erdreich verformt. Durch diese Verformungen werden Spannungen abgebaut, das Rohr bleibt intakt. Bei biegesteifen Rohren können solche Spannungen schnell zu Beschädigungen führen, welche dann Undichtigkeiten nach sich ziehen können.

Somit setzt sich die statische Berechnung eines Kunststoffrohres zusammen aus einer erweiterten Setzungsberechnung, woraus die Rohrdeformation resultiert, und einer

For quality providers that implement the Qplus Swiss Quality System fully, annular rigidity is still attained through the large reserves of the full pipe even in perforated or slotted condition. For slotted pipes, the design of the slot plays a key role. To ensure that the static is weakened as little as possible, and to ensure an inflow cross section that is as large as possible, the slotted walls must be kept perpendicular to the pipe axis throughout.

For drainage pipes, as for all other draining pipes, only pipes made from new material must be used (Qplus R 292 012-2). Due to its non-uniform composition, recycled material does not have the required properties and may cause the pipe to malfunction.

2.2 Requirements for Cleanability

Closed pipes and drainage pipes must have a high degree of resilience towards cleaning. Modern cleaning systems operate with a cleaning pressure of up to 200 bar at the cleaning nozzle outlet. In sections which are highly polluted, a chain flail head is also used, as well as a rotation head. The pipes must be able to withstand this load throughout use.

The above requirements constitute the minimum requirements of the design and quality provisions, or AQV, for the

Integritätsberechnung in Bezug auf die maximal zulässige Beulspannung. In der Schweiz erfolgt die Dimensionierung nach Vorgabe der Norm SIA 190.

3 Das Verbindungssystem

3.1 Muffenverbindung mit Elastomerdichtungen

Muffenverbindungen mit Elastomerdichtungen sind das Standardverbindungssystem für Entwässerungsleitungen, welche als Freispiegelleitungen funktionieren (siehe Bild 6). Das System ist also so konzipiert, dass es nicht unter Wasserdruck steht, weder von innen noch von aussen. Dabei kommt eine Lippendichtung zum Einsatz, welche für die Dichtigkeit der Rohrverbindung sorgt. Die Dichtigkeit der Rohrverbindung wird gemäss Norm mit einem inneren Überdruck von 500 mbar mit Wasser oder 200 mbar mit Luft abgeprüft.

Als Werkstoff für die Lippendichtung kommt EPDM zum Einsatz. Dieser Werkstoff ist beständig gegen die meisten chemischen Angriffe inklusive einer erhöhten Ozonkonzentration. Bei der Lippendichtung ist darauf zu achten, dass der eingesetzte Werkstoff der SN EN 681 entspricht.

3.2 Verschweisste Rohrverbindungen

Falls hohe Anforderungen an das Verbindungssystem bestehen (Entwässerung steht unter Innen- oder Aussendruck oder ist anderweitig hoch beansprucht), kann mittels Verschweissen eine druckdichte Verbindung der Rohre hergestellt werden. Dabei werden hauptsächlich die folgenden zwei Verbindungstechniken eingesetzt:

3.2.1 Elektroschweissmuffen

Über die beiden Rohrenden wird eine Muffe (siehe Bild 7) gestülpt, welche mit einem Heizwendeldraht ausgestattet ist. Durch Aufbringung einer elektrischen Spannung werden diese Heizwendel so aufgeheizt, dass sowohl die Oberfläche der Muffe als auch die der Rohre schmilzt, die beiden Oberflächen verbinden sich so und gehen anschliessend eine stoffschlüssige Verbindung ein. Bei sachgemässer Verschweissung ist die Verbindung mindestens so stabil wie das Rohr selbst.

3.2.2 Spiegelschweissen

Beim Spiegelschweissen (siehe Bild 8) werden die beiden glatten Rohrenden an einer heissen Metallplatte, dem Schweiss-Spiegel, erhitzt und anschliessend mit einem definierten Druck, dem Fügedruck, gegeneinander gedrückt. Auch hier verbinden sich die beiden aufgeschmolzenen Rohrenden zu einer stoffschlüssigen Schweissverbindung, bei sachgemässer Verarbeitung ist diese Schweissverbindung ebenfalls mindestens so belastbar wie das Rohr selbst.

3.3 Flanschverbindungen/verschraubte Kupplungen

Flanschverbindungen oder verschraubte Kupplungen sind eine Alternative zu Schweissverbindungen, besonders dann,

tunnel draining system to which Swiss manufacturers have adapted and in line with which they produce. The client should define any further requirements, ideally in agreement with the manufacturer, as these may lead to changes to the wall thickness or choice of material.

2.3 Pipe Statics

From a static perspective, a pipe is no different from a tunnel structure.

Applicable factors influencing the pipe statics are as follows [3]:

- Cover height
- Self weight and traffic loads
- Bedding and cover fill requirements (material quality and degree of compaction)
- Groundwater conditions

These influencing factors are used to calculate the loads which impact the pipe. The results can then be used to select the suitable pipe wall thickness with regard to the material used and the pipe diameter.

A significant difference from the tunnel structure is that plastic pipes are pliable. The viscoelastic properties of the material make the pipe adapt to the changes in the structure of the surrounding material. The pipe deforms to the same extent that the surrounding soil becomes deformed. Deforming relieves tension and the pipe remains intact. For rigid pipes, this type of tension can quickly lead to damage, which may lead to leaks.

Thus, the static calculation of a plastic pipe consists of an expanded settlement calculation, which results in the pipe deformation, and an integrity calculation with regard to the maximum permissible buckling stress. In Switzerland, dimensioning takes place in accordance with the SIA 190 standard.

3 The Connection System

3.1 Socket Connection with Elastomer Seals

Socket connections with elastomer seals are the standard connection system for draining pipelines, which act as free-flow pipelines (see Fig. 6). The system is therefore designed to ensure that it is not under either inner or outer water pressure. A lip seal is used, ensuring that the pipe connection is impermeable. The impermeability of the pipe connection is checked according to the standard with an inner pressure of 500 mbar with water or 200 mbar with air.

EPDM is used as a material for the lip seal. This material resists most chemical aggression including an increased ozone concentration. For the lip seal, it must be ensured that the material used complies with SN EN 681.

3.2 Welded Pipe Connections

If there are a lot of demands on the connection system (draining is under internal or external pressure or is otherwise under high strain), welding can produce a pressure-

wenn es sich um provisorische Leitungen handelt. Die Verbindung ist dicht und zugfest, die Montage ist schnell und preisgünstig. Allerdings stellen Flanschverbindungen bei den Materialkosten die teuerste Verbindungsart dar.

4 Verarbeitung und Verlegung von Rohren

Gerade im Tunnelbau ist aufgrund der beengten Platzverhältnisse (siehe Bild 9) vom Rohrmaterial zum einen eine hohe Genauigkeit, zum anderen aber auch eine hohe Flexibilität gefordert. Der Innenausbau eines Tunnels kommt der industriellen Fertigung so nahe wie kaum ein anderer Sektor der Bauindustrie. Kunststoffrohre unterstützen diese Art des Bauens sehr gut, wie sich am Beispiel der Verlegung der Rohre in Radien zeigt:

Kunststoffrohre lassen sich bis zu einem gewissen Biegeradius mechanisch biegen (kaltbiegen) und können dann so in dieser Form fixiert werden. So lassen sich kleine Richtungsänderungen sehr gut und ohne grossen Aufwand bewerkstelligen. Der Anhaltswert für diese mechanische Biegung ist:

- Bei 20° C sollte der maximale Biegeradius für PE ca. das 100-Fache des Rohrdurchmessers betragen, für PP das 200-Fache.

Dieser Wert variiert in Abhängigkeit von Temperatur und Wandstärke, bei grösserer Wandstärke und bei höheren Temperaturen können die mechanischen Biegeradien verkleinert werden.

Übersteigt der erforderliche Radius den oben angegebenen, so können die Rohre auch problemlos mittels Warmbiegen in die gewünschte Form gebracht werden. Dazu werden die Rohre auf die erforderliche Temperatur erhitzt und dann in den gewünschten Radius gebogen. Enge Richtungswechsel werden mit Formstücken durchgeführt.

Die Hersteller stellen in der Regel ein umfangreiches Formstückprogramm zur Verfügung, dieses beschränkt sich jedoch nicht nur auf Richtungswechsel. Auch andere Notwendigkeiten im Rohrleitungsbau können mit Formstücken bewältigt werden. Folgende Formstücke befinden sich üblicherweise im Angebot von Rohrleitungsherstellern:

- Rohrbogen 15°, 30°, 45° und 90°
- Abzweiger mit einem Abgang in 45°, entweder mit gleichem oder mit reduziertem Durchmesser
- Einzelreduktionen, um Durchmesseränderungen durchführen zu können
- Doppelmuffen mit mittigem Anschlag oder Überschiebemuffen ohne Anschlag
- Rohrabschlussdeckel

Neben den in der Aufzählung erhaltenen Formstücken sind noch viele andere für besondere Erfordernisse erhältlich. Viele Hersteller verfügen darüber hinaus über die Möglichkeit, Spezialanfertigungen herzustellen und somit individuell auf die Erfordernisse vor Ort einzugehen.

tight connection for pipes. The following two connection techniques are mostly used:

3.2.1 Electro-welding Sockets

A socket is placed over both ends of the pipe (see Fig. 7). The socket is equipped with a heating coil wire. Supplying an electrical current heats the coil so that the surface of the socket and the pipes melt and both surfaces join and then form a bonded connection. If welded properly, the connection is at least as stable as the pipe itself.

3.2.2 Mirror Welds

In mirror welding (see Fig. 8), both smooth pipe ends are heated on a hot metal plate, the welding mirror, and then pressed together with a set pressure, the joining pressure. In this case, too, both melted pipe ends are bonded in a bonded connection. If processed properly, this connection is also at least as resilient as the pipe itself.

3.3 Flange Connections/Screwed Couplings

Flange connections or screwed couplings are an alternative to welded connections, especially when it comes to provisional pipelines. The joint is tight with high tensile strength. Assembly is quick and inexpensive. However, flange connections are the most expensive type of connection in terms of material costs.

4 Processing and Laying Pipes

In tunnelling, the lack of space (see Fig. 9) for the pipe material requires a high degree of accuracy but also a great deal of flexibility. The internal construction of a tunnel is closer to industrial manufacture than almost any other sector of the construction industry. Plastic pipes provide excellent support to this form of construction, as in the example of the laying of pipes in radii:

Plastic pipes can be bent mechanically up to a certain bending radius (cold bending) and can then be fixed in this shape accordingly. This allows small changes in direction to be achieved very effectively and without a great deal of outlay. The guide value for this mechanical bending is as follows:

- At 20° C, the maximum bending radius for PE should be approx. 100x the pipe diameter, 200x in the case of PP.

This value varies depending on temperature and wall thickness. For higher wall thickness and temperatures, the mechanical bending radii may be reduced.

Should the required radius exceed that stated above, the pipes may also be easily bent into the desired shape by means of warm bending. The pipes are heated to the required temperature and then bent to the desired radius. Narrow changes in direction are achieved using moulded pieces.

Manufacturers usually provide a comprehensive range of moulded pieces. However, this is not only limited to a change in direction. Other pipeline construction requirements can be dealt with using moulded pieces. The following moulded



9 Schachtanschluss im Tunnel
Shaft connection in tunnel

Quelle/credit: Streng Plastic AG, Niederhasli

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Einbettungs- und Umhüllungsbedingungen, unter welchen das Rohr eingebaut wird. Sickerrohre sollten mit einer Schicht aus Sickerkies (z. B. Körnung 16/32) umhüllt werden. Alternativ können die Rohre auch bis zur Schlitzung/Lochung einbetoniert werden und dann mit Sickerkies umhüllt werden. Wenn statisch erforderlich, können auch zementgebundene Sickerpackungen verwendet werden, es muss aber darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit gewährleistet ist.

Geschlossene Rohre sollten mit gut gestuftem, verdichtbarem Kies umhüllt werden. Es können auch andere Materialien verwendet werden, jedoch sollten diese unter Beachtung der Anforderungen der EN 1610 ausgewählt und überwacht werden.

Sollen geschlossene Leitungen einbetoniert werden, so ist darauf zu achten, dass die Rohre während der Betonage mit Flüssigbeton Auftriebskräfte entwickeln, welche durch geeignete Auftriebssicherungen im Abstand von etwa 1,5–2,0 m abgefangen werden müssen. Um die Auftriebskraft zu verringern, können die Rohre während der Betonage mit Wasser gefüllt werden.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Auftriebskraft pro Laufmeter während der Betonage:

Rohrdurchmesser [mm]						
160	200	250	315	400	500	630
Auftriebskraft [kN/m]						
0,48	0,74	1,18	1,87	3,02	4,70	7,50

- pieces are usually on offer from pipeline manufacturers:
- 15°, 30°, 45° and 90° pipe bends
 - Splitter with an outflow in 45°, either with the same or reduced diameter
 - Individual reductions to alter diameter
 - Double sockets with a centre stop or transfer socket without stop
 - Pipe connection cover

As well as the moulded pieces listed, there are many others which are available for special requirements. Many manufacturers are also able to produce custom parts and deal individually with the requirements on-site.

Another important aspect is the bedding and covering conditions in which the pipe is installed. Dry pipes should be covered with a layer of drying gravel (e.g. grain size 16/32). Alternatively, the pipes can also be set in concrete up to slotting/perforation and then covered with drying gravel. If required from a static perspective, cement-bound dry packing can be used. However, sufficient water permeability must be ensured.

Closed pipes should be covered with solidifiable gravel classified as good. Other materials can also be used, but these should be selected and monitored taking EN 1610 requirements into account.

If closed pipelines are set in concrete, it must be ensured that the pipes develop lift forces (floating) during concreting with liquid concrete. These must be caught by suitable lift

5 Qualitätsanforderungen

Entwässerungsleitungen gehören, wie bereits eingangs erwähnt, zu den Komponenten des Bauwerks, welche diskret über seine gesamte Lebensdauer funktionieren müssen. Daher sollten die Qualitätsanforderungen im Tunnelbereich auch kompromisslos hoch sein.

Das Qplus Swiss Quality System hat seine Anforderungen hierauf abgestimmt. Entwässerungsrohre, welche das Qplus-Zeichen tragen, erfüllen vollumfänglich alle Anforderungen an ein hochqualitatives Produkt und können bedenkenlos eingesetzt werden.

Zwar gibt es für Drainagerohre selbst keine Qplus-Klassifizierung, da diese Rohre aber im Tunnel meist sehr schwer zugänglich sind, muss hier ebenfalls darauf geachtet werden, dass die Qualität einwandfrei ist. Basisrohre, welche das Qplus-Zeichen tragen, besitzen genügend Reserven, sodass sie auch bedenkenlos als Drainagerohre eingesetzt werden können.

6 Massgebliche Normen und Vorschriften

Nachfolgend aufgeführte Normen und Vorschriften sind für Rohrleitungen in Tunnels massgebend, wobei die Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt:

- SIA 197: Projektierung von Tunnels – Grundlagen
- SIA 198: Untertagbau – Ausführung
- SIA 270: Abdichtungen und Entwässerungen – Allgemeine Grundlagen und Schnittstellen
- SIA 272: Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagbau
- SIA 118/271: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen
- VKR RL 02: Verband Kunststoff-Rohre und -Rohrleitungsteile: Richtlinie/Leitfaden für erdverlegte PE-Druckrohrleitungen in der Gas- und Wasserversorgung
- VKR RL 03: Verband Kunststoff-Rohre und -Rohrleitungsteile: Erdverlegte, drucklos betriebene Rohrleitungen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC-U) – Leitfaden und Verlegerichtlinie
- SN EN 12666: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen – Polyethylen (PE) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem
- SN EN 1852: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Polypropylen (PP) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem
- SN EN 681: Elastomer-Dichtungen – Werkstoff-Anforderungen für Rohrleitungs-Dichtungen für Anwendungen in der Wasserversorgung und Entwässerung – Teil 1: Vulkanisierter Gummi
- R 592 012–2: Qplus-Richtlinien für biegeeweiche Rohre und Formstücke
- SIA 190: Kanalisationen

controls about 1.5–2.0 m apart. To reduce the lift, the pipes can be filled with water during concreting.

The following table provides an overview of the lift per linear metre during concreting:

Pipe diameter [mm]						
160	200	250	315	400	500	630
Lift [kN/m]						
0.48	0.74	1.18	1.87	3.02	4.70	7.50

5 Quality Requirements

As mentioned above, draining pipelines are an aspect of a structure which must function discretely throughout its entire lifespan. Quality requirements in the tunnelling sector should therefore also be uncompromisingly high.

The Qplus Swiss Quality System has adapted its requirements accordingly. Draining pipes bearing the Qplus mark meet every requirement of a high-quality product and can be used without concern.

Although there is no Qplus classification for drainage pipes themselves, as these pipes are mostly very difficult to access in the tunnel, it must be ensured that the quality is impeccable in this case. Basic pipes which bear the Qplus mark have enough in reserve to allow them to be used as drainage pipes without concern too.

6 Applicable Standards and Provisions

The following (non-exhaustive) list of standards and provisions apply to pipelines in tunnels:

- SIA 197: Tunnel project planning – bases
- SIA 198: Underground construction – execution
- SIA 270: Waterproofing and drainage – general bases and interfaces
- SIA 272: Waterproofing and drainage of underground structures and underground construction
- SIA 118/271: Laying and inspection of wastewater pipelines and channels
- VKR RL 02: Connecting plastic pipes and pipeline parts: Guidelines/instructions for underground PE pressure pipelines in gas and water supply
- VKR RL 03: Connecting plastic pipes and pipeline parts: Underground pipelines made from polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC-U) operated without pressure – guidelines and laying instructions
- SN EN 12,666: Plastic pipeline systems for underground wastewater channels and pipelines – polyethylene (PE) – Part 1: Requirements for pipes, moulded pieces and the pipeline system
- SN EN 1852: Plastic pipeline systems for underground

- SN EN 1610: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen
- SBB CFF FFS: Ausführungs- und Qualitätsvorschriften (AQV) für die Tunnelentwässerung, SBB Bern
- Bundesamt für Strassen ASTRA: 24001 Fachhandbuch Tunnel/Geotechnik (FHB T/G)

Literatur/References

- [1] Wehage, Claus: Kunststoffrohrsysteme in der Abwassertechnik, S. 113–117. Kunststoffrohrverband e.V., Bonn 2003.
- [2] SBB CFF FFS: Ausführungs- und Qualitätsvorschriften der Tunnelentwässerung. Bern 2013.
- [3] SIA 190, Ausgabe 2000, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2000.

- wastewater channels and pipelines without pressure – polypropylene (PP) – Part 1: Requirements for pipes, moulded pieces and the pipeline system
- SN EN 681: Elastomer seals – material requirements for pipeline seals for use in water supply and draining – Part 1: Vulcanised rubber
- R 592 012–2: Qplus guidelines for pliable pipes and moulded parts
- SIA 190 Channelling
- SN EN 1610: Installation and inspection of wastewater pipelines and channels
- SBB CFF FFS: Design and quality provisions (AQV) for the tunnel draining system, SBB Berne
- Federal Roads Office (FEDRO): 24001 Fachhandbuch Tunnel/Geotechnik (FHB T/G)

Peter Hufschmied, Dr. sc. techn., Dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Inhaber und CEO ExTechNa GmbH,
Spiegel bei Bern/CH

Nutzung von Tunnelabwasser im Tropenhaus Frutigen

Der Lötschberg-Basistunnel drainiert auf seiner Nordseite rund 80 Liter pro Sekunde 18°C warmes Bergwasser, das im Tropenhaus Frutigen in einer Fischzucht mit Tropengarten und Erlebnisausstellung sowie zur Beheizung von Gebäuden mit geothermischer Energie genutzt wird. Eigentümer und Betreiber des Projektes ist die Firma Tropenhaus Frutigen, heute eine Division der Genossenschaft Coop.

Utilisation of Tunnel Groundwater in Tropenhaus Frutigen

On its northern side, the Lötschberg Base Tunnel drains around 80 litres per second of groundwater at a temperature of 18°C. The geothermal energy provided by this water is utilised by Tropenhaus Frutigen to run a fish farm with a tropical garden, an exhibition, and heating its buildings. The company Tropenhaus Frutigen, today a division of the cooperative society Coop, owns and operates the enterprise.

1 Einleitung

Der Lötschberg-Basistunnel drainiert auf seiner Nordseite heute rund 100 Liter pro Sekunde im Durchschnitt rund 18°C warmes Wasser aus dem Gebirge. 80 Liter pro Sekunde davon werden als Bergwasser in einem separaten Drainagesystem abgeleitet, während 20 Liter pro Sekunde den Stetslauf des Abwassersystems im Innenraum des Tunnels speisen. Das Bergwasser wird vom Tropenhaus Frutigen in einer Fischzucht und als Wärmequelle einer Wärmepumpe genutzt, während das Abwasser über einen Ölabscheider fliesst. Beide Wasserströme werden in den lokalen Vorfluter, die Kander, eingeleitet.

Im Rahmen des Baus des Lötschberg-Basistunnels haben die Fischereibehörden des Kantons Bern gefordert, dass die Einleitung des warmen Bergwassers die Kander um nicht mehr als 0,5°C erwärmen darf. Begründet wurde diese Anforderung mit der grossen Bedeutung der Kander als Aufstiegs- und Laichgewässer für die Seeforellen im Thunersee, welche als eine gefährdete Art gilt. Normalerweise gilt für Gewässer der Forellenregion ein gesetzlicher Erwärmungsgrenzwert bei Einleitung von Warmwasser von 1,5°C.

Je nach Bergwassermenge, Wassertemperatur und Abflussmenge der Kander bedingt die oben genannte Vorgabe, dass das Bergwasser vor der Einleitung in die Kander um bis zu 10°C abgekühlt werden muss. Eine der Schwierigkeiten bei der Erfüllung der Forderung bestand darin, dass weder die Menge noch die Temperatur des dem Tunnel zuströmenden Bergwassers in der Planungs- und Bau-

1 Introduction

On its northern side, the Lötschberg Base Tunnel currently drains approximately 100 litres per second of warm groundwater (average temperature 18°C) emerging from the rock. 80 litres per second are discharged as groundwater in a specific drainage system, while 20 litres per second feed the permanent waste water system inside the tunnel. The groundwater is used by the fish farm of Tropenhaus Frutigen. It acts as energy source for a heat pump, while the waste water passes through an oil trap. Both water streams are eventually discharged into the local receiving watercourse, the Kander.

Permission for constructing the Lötschberg Base Tunnel by the Canton of Bern depended on the request of the Division of Fisheries to avoid heating the water of the river Kander by more than 0.5°C by the discharged groundwater. This request was based on the great importance of the Kander as spawning waters for the ascending Lake Trout (*salmo trutta lacustris*), which is an endangered species in the adjacent Lake of Thun. Normally, a legal limit for warm water discharge of +1.5°C applies to all waterways in trout regions.

Depending on the groundwater volume, flow and temperature, as well as the discharge rate of the river Kander itself, the tunnel groundwater must be cooled by as much as 10°C before being discharged into the river Kander. One of the difficulties in fulfilling this request was that neither the volume nor the temperature of the groundwater flow-

Utilisation de l'eau de drainage du tunnel pour la Maison tropicale de Frutigen

Le tunnel de base du Lötschberg draine côté nord quelque 80 litres par seconde d'une eau de montagne à 18 °C. Cette dernière est utilisée pour l'élevage piscicole de la Maison tropicale de Frutigen qui abrite également un jardin tropical et une zone d'exposition vivante, mais aussi pour le chauffage des bâtiments par géothermie. Ce site est détenu et exploité par l'entreprise Tropenhaus Frutigen, aujourd'hui une division de la société coopérative Coop. Inauguré en 2009, il accueille chaque année entre 50 000 et 100 000 visiteurs et emploie pas moins de 50 salariés. L'eau de la montagne est ramenée à environ 10°C dans la Maison tropicale.

Uso delle acque di scarico della galleria nella serra tropicale di Frutigen

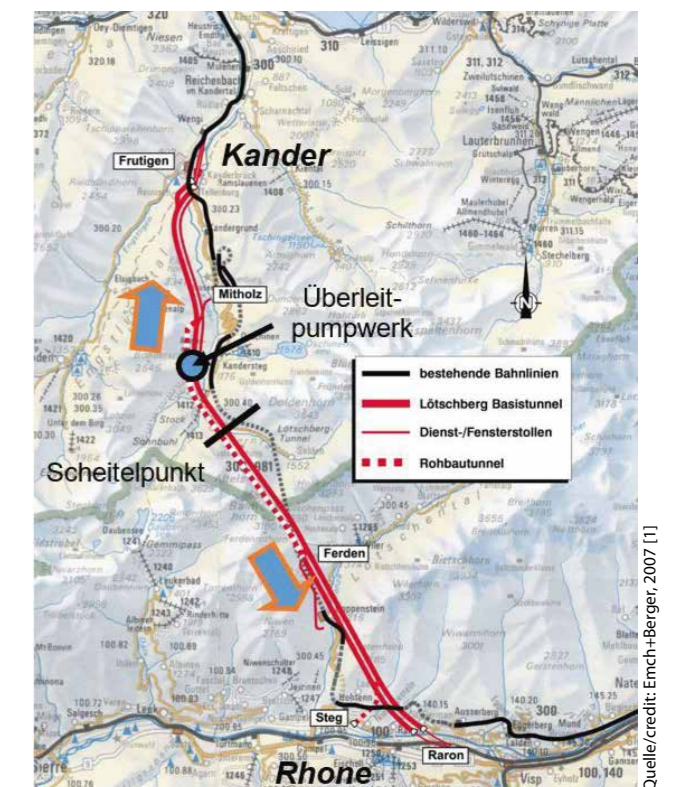
La galleria di base del Lötschberg, sul suo lato settentrionale, drena circa 80 litri al secondo di acqua di falda a 18°C, che viene utilizzata nella serra tropicale di Frutigen in una piscicoltura con giardino tropicale ed esposizione interattiva, oltre che per il riscaldamento degli edifici con l'energia geotermica. Proprietaria ed esercente del progetto è l'azienda Tropenhaus Frutigen, che oggi è una divisione della cooperativa Coop. Il progetto, inaugurato nel 2009, accoglie ogni anno da 50'000 a 100'000 visitatori e dà lavoro a oltre 50 lavoratori. L'acqua di falda, nella serra tropicale, è raffreddata fino a 10°C.

phase des Lötschberg-Basistunnels genau bekannt waren. Die eigentlichen Bergwasserzuflussmengen konnten erst während des Vortriebs bestimmt werden. Sie hingen zudem vom Erfolg von Gebirgsinjektionen ab. Weiter war zu erwarten, dass die Zuflussmengen zum Tunnel durch die Ausbreitung der Druckabsenkung mit der Zeit signifikant zurückgehen würden, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand der Bergwasserströmung mit dem tieferen Vorflutniveau des Basistunnels als neuem Drainageniveau des Bergwassers einstellt.

Wie **Abbildung 1** zeigt, fliesst das Bergwasser nördlich des Scheitelpunktes nach Frutigen, wo es in die Kander eingeleitet wird, während es südlich des Scheitelpunktes der Rhone zufliesst. Um den Stetslauf im Abwassersystem zu gewährleisten, werden diesem pro Tunnelröhre am Scheitelpunkt je 5 Liter pro Sekunde Bergwasser nach Norden und Süden zugeführt. Die 20 Liter pro Sekunde Bergwasser für den Stetslauf werden nördlich des Scheitelpunktes gefasst und mit einem Überleitpumpwerk zum Scheitelpunkt geführt.

Für die Abkühlung des Bergwassers wurden vom Bauherrn des Lötschberg-Basistunnels (LBT), der BLS Alptransit AG, umfangreiche Studien gemacht [1]. Die untersuchten Massnahmen umfassten 1) die Reduktion der Bergwassermengen durch Gebirgsinjektionen, 2) die Einleitung des Bergwassers in einen Abschnitt der Kander mit höherer Wasserführung (nach dem Zusammenfluss der Kander mit der Engstlige), 3) die Überleitung eines Teils des Wassers in die Rhone und 4) die Abkühlung mit Abkühlteichen, Kühltürmen und Kältemaschinen. Die Massnahmen 1) bis 3) wurden von der BLS AG umgesetzt. Die Massnahmen unter Punkt 4) wurden verworfen, weil sie entweder einen hohen Flächenbedarf aufwiesen oder im Betrieb zu teuer waren. Mit den Massnahmen 1) bis 3) war zum Zeitpunkt von Planung und Bau des Basistunnels eine ausreichende Ab-

ing from the Lötschberg Base Tunnel were precisely known during the planning and construction phase. The real volume of groundwater flowing into the tunnel could only be determined during drilling. Furthermore, the inflow was dependent of the efficiency of tunnel grouting. In addition, it was anticipated that the flow into the tunnel would decrease significantly over time towards a new groundwater flow equilibrium determined by a decrease of water pressure and the new drainage level produced by the tunnel.



1 Lötschberg-Basistunnel mit Bergwasserdrainage
Lötschberg Base Tunnel with groundwater drainage

Massnahmen	Umsetzung
BLS AT: Reduktion des Bergwasserzuflusses durch Gebirgsinjektionen	Abdichtung der Störungszone km 26'100. Reduktion des Zuflusses von > 100 l/s auf 5 l/s
BLS AT: Einleitung des Bergwassers in einen Gewässerabschnitt mit höherer Wasserführung	Bau einer Freispiegelleitung von 1 km Länge für die Einleitung in die Engstlige
BLS AT: Überleitung von Bergwasser über den Scheitelpunkt in die Rhone	Überleitpumpwerk bei QV 38, Nutzung freier Abflusskapazität in der Bergwasserleitung Süd. Kostengünstige Lösung
BLS AT: Künstliche Abkühlung (Abkühlteiche, Kühlturm, Kältemaschinen) Diese Variante wurde durch Privatinitiativen ersetzt.	Ist verbunden mit hohen Investitions- und Betriebskosten und/oder grossem Flächenbedarf.
Privatinitiative: Projekt Tropenhaus Frutigen	Abkühlung des Bergwassers im Rahmen einer Produktion von wärmeliebenden Fischen und tropischen Früchten
Privatinitiative: Nahwärmeverbund im Bahnhofquartier Frutigen	Abkühlung des Bergwassers mit einer Wärmepumpe zur Gebäudeheizung

Quelle/credit: Emch+Berger, 2007 [1]

2 *Untersuchte Massnahmen zur Gewährleistung der Einhaltung des Erwärmungsgrenzwertes in der Kander*

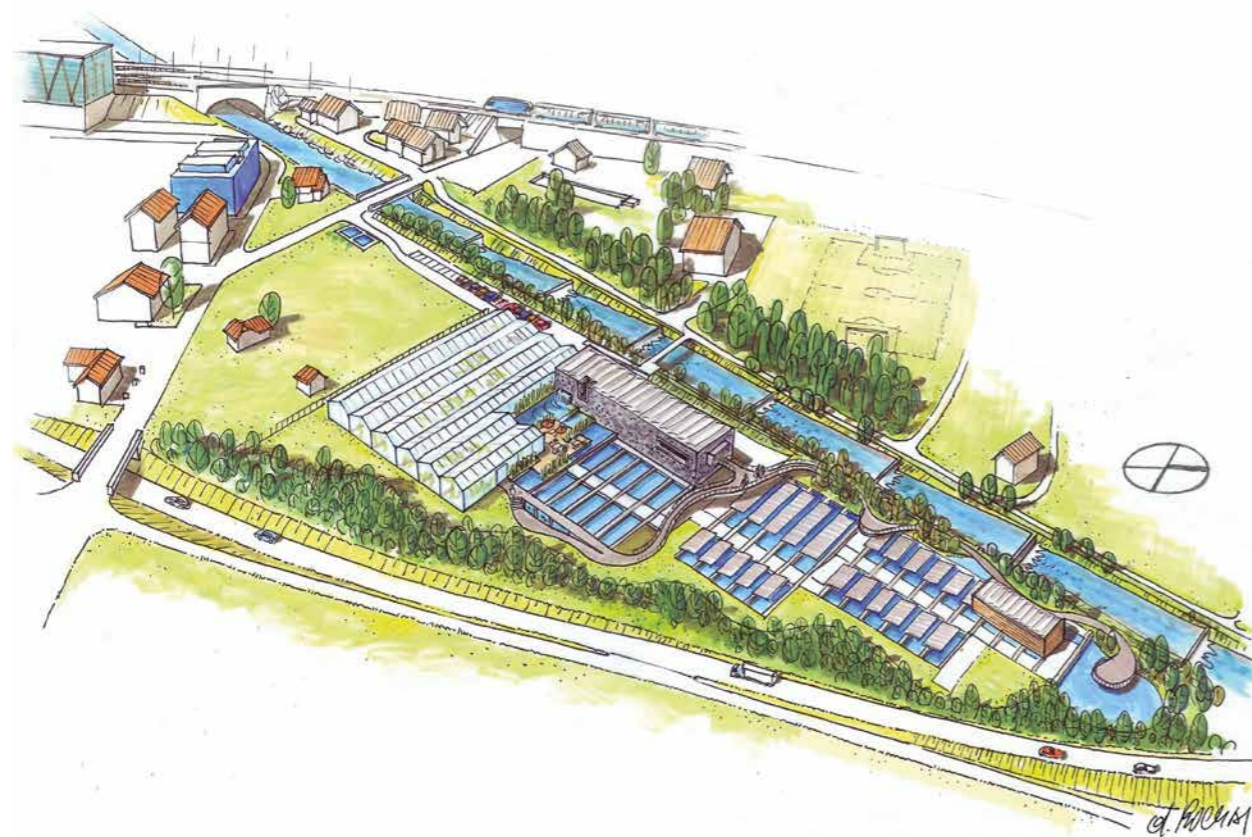
Measures investigated to ensure compliance with the warming limit in the Kander

kühlung des Bergwassers vor der Einleitung in die Kander jedoch nicht gewährleistet.

Um die zusätzlich notwendige Abkühlleistung sicherzustellen, wurde durch den Chef der Planung und Oberbauleitung auf der Nordseite des LBT, Dr. Peter Hufschmied,

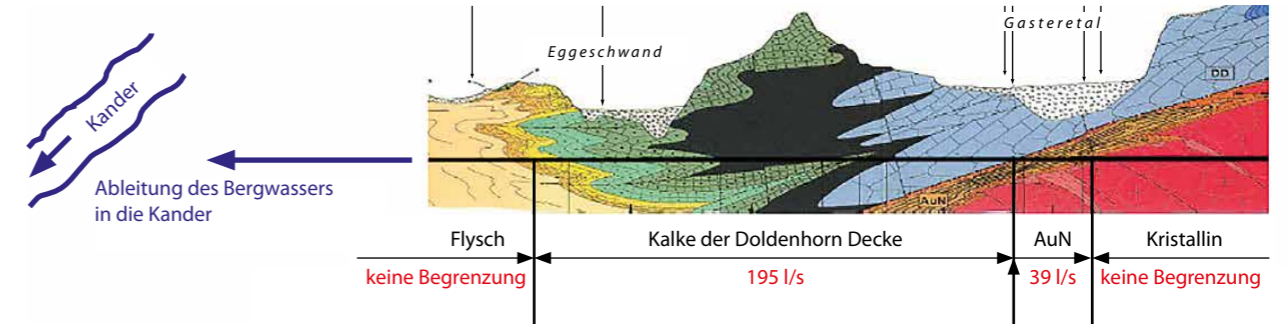
As shown in Figure 1, groundwater flows north of the tunnel apex towards Frutigen, where it is discharged to the river Kander (as explained above), and south of the apex into the river Rhone. To ensure continuous flow in the waste water system, 5 litres per second of groundwater are fed into each waste water drainage at the apex towards the north and the south. The 20 litres per second of groundwater necessary for continuous flow in the waste water system are collected north of the apex and transferred to the apex by a transfer pumping station.

The Lötschberg Base Tunnel (LBT) client, BLS Alptransit AG, extensively studied potential concepts of groundwater cooling [1]. Potential solutions included: 1. Reduction of groundwater flow by rock grouting (sealing); 2. Groundwater discharge into a section of the river Kander with high flow (downstream of confluence of the rivers Kander and Engstlige); 3. Transfer of part of groundwater into the river



3 *Ursprüngliches Layout des Tropenhauses Frutigen*
Original layout of Tropenhaus Frutigen

Quelle/credit: Emch+Berger, 2007 [1]



Quelle/credit: Emch+Berger, 2007 [1]

4 *Maximal zulässige Drainage von Bergwasser auf der Nordseite des Lötschberg-Basistunnels aus ökologischen Gründen. AuN: Autochthon Nord*
Maximal ecologically allowable drainage of groundwater on the northern side of the Lötschberg Base Tunnel. AuN: Autochthon Nord

im Jahr 2002 die Idee des Tropenhauses Frutigen lanciert. Mit tatkräftiger Unterstützung seiner Ehefrau, Dr. Elena Hufschmied, in den Bereichen Produktentwicklung, Marketing und Architektur sowie eines kompetenten Projektteams für Planung und Bau konnte die Idee umgesetzt werden.

Basis der Idee war, das warme Wasser in einer Fischzucht zu nutzen und es gleichzeitig abzukühlen. Ziel war, sowohl das Bergwasser als auch die Wärmeenergie nachhaltig zu nutzen. Das Projekt sollte ohne öffentliche Gelder auskommen, musste jedoch ausreichende finanzielle Erträge abwerfen, damit private Investoren gefunden werden konnten.

Das ursprüngliche Konzept des Tropenhauses Frutigen ist in **Abbildung 3** dargestellt. Es umfasst eine Aquakultur mit 40 Freilandbecken, ein Aufzuchtgebäude, ein Gewächshaus mit Plantage und Indoor-Fischzucht, ein Betriebsgebäude und Besucherzentrum und ein biologisches Ausgleichsbecken. Das Bergwasser wird dem Tropenhaus direkt im freien Gefälle zugeleitet, wo es zuerst in den Freilandbecken genutzt und dann von einer Wärmepumpe zusätzlich abgekühlt wird, bevor es über das Ausgleichsbecken in die Engstlige und von dort in die Kander eingeleitet wird.

2 Herkunft und Temperatur des Bergwassers

Das Bergwasser stammt aus dem nördlichen Bereich des Lötschberg-Basistunnels, insbesondere aus den wasserführenden und verkarstungsfähigen Kalken der Doldenhorn-Decke. Das Bergwasser wurde während des Vortriebs der beiden Tunnelröhren vom Zwischenangriff Mittholz aus nach Süden schrittweise erschlossen.

Als maximal zulässige Werte für die dauerhafte Drainage von Bergwasser wurden von den Behörden aus Gründen des Schutzes von Feuchtgebieten im Kandertal 195 Liter pro Sekunde aus den Kalken der Doldenhorn-Decke sowie 39 Liter pro Sekunde aus dem Autochthon Nord, also total 234 Liter pro Sekunde, planrechtlich festgelegt.

Wegen der Verkarstung der Kalkgesteine und der sehr hohen prognostizierten Wasserdrücke auf Tunnelniveau von bis zu 40 bar wurde bei dem Vortrieb der beiden Tunnelröhren in

Rhone; and 4. Cooling using ponds, cooling towers and chillers. Measures 1 to 3 were implemented by BLS AG. Measures corresponding to point 4 were rejected, because they were either associated with a high ground requirement or too costly in operation. However, with measures 1 to 3 in place, sufficient groundwater cooling prior to discharge into the river Kander was not guaranteed at the time of planning and construction of the base tunnel.

To ensure the necessary additional cooling, Dr Ing. Peter Hufschmied, head of planning and construction management on the north side of the LBT, presented the Tropenhaus Frutigen concept in 2002. Subsequently the concept was implemented with the active support of his wife, Dr Elena Hufschmied, expert in the fields of product development, marketing and architecture, and a competent project team.

The idea was based on the warm water being used for a fish farm as an energy source, thereby producing the necessary cooling effect. The goal was to sustainably use the groundwater as both water and energy source. The project was planned to operate without public funding, but had to generate sufficient returns to attract private investors.

The original Tropenhaus Frutigen concept is shown in **Figure 3**. It comprises an aquaculture unit with 40 outdoor pools, a hatching facility, an indoor fish farm, a greenhouse hosting tropical plants, an administration building, a visitor centre, and a pool serving as intermediate water storage. The groundwater is supplied directly to the Tropenhaus by gravity, where it is first used in the outdoor pools and then additionally cooled by the heat pump. Discharge occurs via the intermediate pool to the Engstlige river, and eventually into the Kander river.

2 Groundwater Origin and Temperature

The groundwater originates in the northern section of the Lötschberg Base Tunnel. To a large extent it stems from the water-bearing and karstifiable limestones located in the Doldenhorn nappe. The groundwater was gradually collected during drilling the two tunnels southwards from the intermediate Mittholz access.

der Doldenhorn-Decke eine umfassende Vorauserkundung mit Bohrungen sowie teilweise umfangreiche Gebirgsinjektionen in wasserführenden Störungszonen durchgeführt. Diese Massnahmen sind in [1] diskutiert.

Bei der Prognose von Störungszonen hat sich neben den Vorausb Bohrungen auch die Beobachtung der Gebirgstemperaturen als hilfreich erwiesen. Aktive wasserführende Fließsysteme mit Temperaturanomalien zeichnen sich bereits vor dem Auffahren durch veränderte Temperaturen des Gebirges über Distanzen von einigen 10 bis 100 Meter ab.

Abbildung 5 zeigt die aufgrund der Felsüberdeckung über dem Basistunnel mit Hilfe eines durchschnittlichen geothermischen Gradienten prognostizierten Felstemperaturen auf Niveau des Basistunnels als gestrichelte Linie. Bei der Prognose wurden auch die seitlichen Überdeckungen berücksichtigt, was durch die schwarze strichpunktierte Linie im geologischen Profil dargestellt ist.

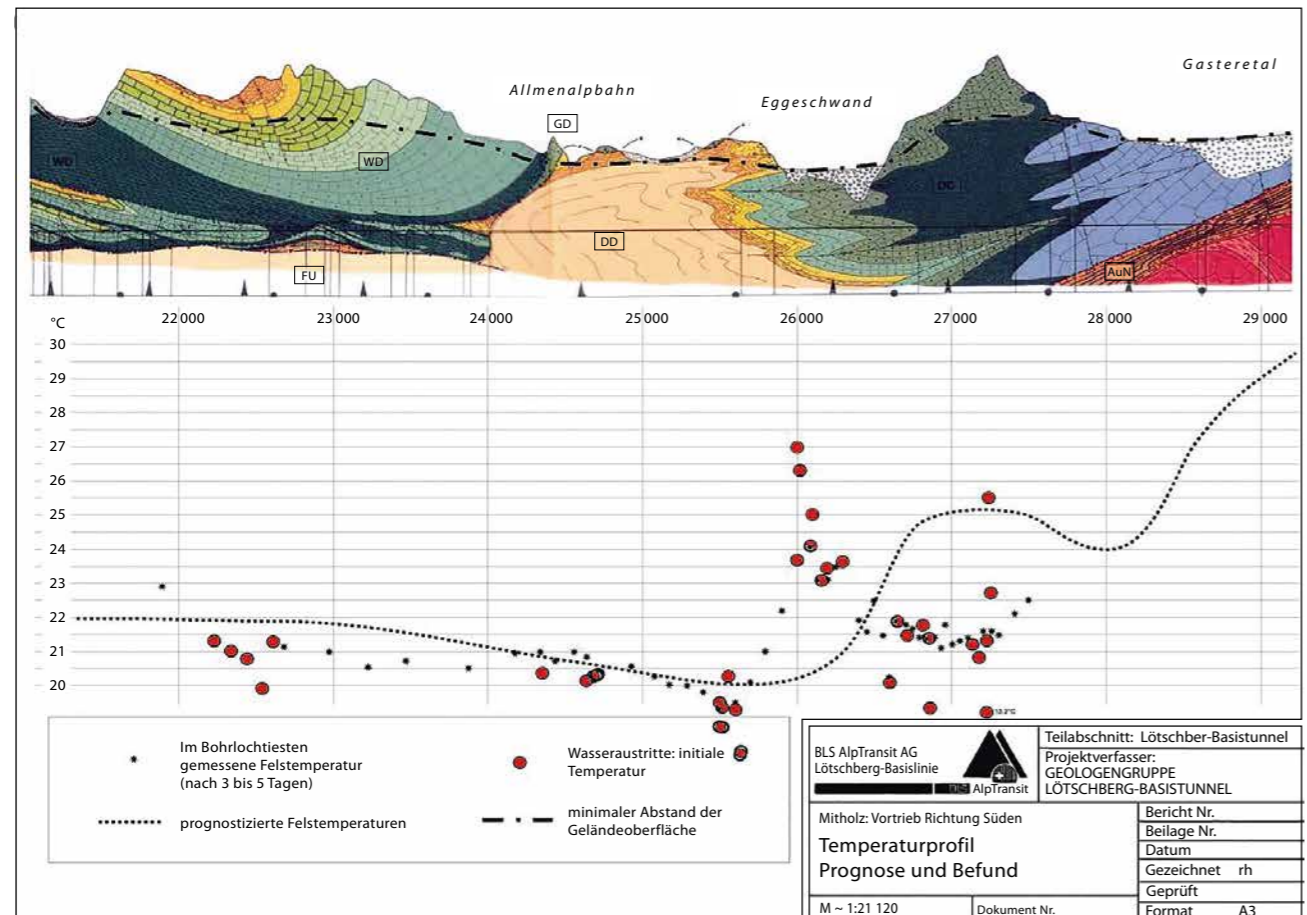
Mit schwarzen Punkten sind die unmittelbar nach dem Ausbruch der Tunnelröhren in kurzen seitlichen Bohrungen gemessenen Felstemperaturen dargestellt. Die roten Punkte zeigen dagegen die Temperaturen des zufließenden Berg-

To protect the wetlands in Kander valley, the political authorities fixed maximum permissible values for permanent groundwater drainage to 195 litres per second from the limestones of the Doldenhorn nappe and 39 litres per second from Autochthon Nord, summing up to a total of 234 litres per second.

Drilling the two tunnels in the Doldenhorn nappe was preceded by a preliminary exploration using boreholes and occasional extensive rock grouting in water-bearing fault zones. This was necessary due to limestone karstification and the very high predicted water pressures of up to 40 bar at tunnel level. These measures are discussed in [1].

In addition to explorative drilling, monitoring rock temperatures proved helpful in predicting fault zones. Actively flowing, water-bearing systems producing temperature anomalies become apparent even without drilling due to changes in the rock temperature over distances of 10 to 100 m.

Figure 5 shows the predicted rock temperatures as a dashed line calculated from the type of rock covering the base tunnel, with the help of an average geothermal gradient at base



5 Prognostizierte und tatsächliche Felstemperaturen sowie Temperaturen der Bergwasserzuflüsse
Predicted and actual rock temperatures and groundwater inflow temperatures

wassers unmittelbar nach dem Ausbruch der Tunnelröhren. Interessant sind die Verhältnisse in den wasserdurchlässigen Kalken der Doldenhorn-Decke zwischen Eggeschwand und Gasterntal. Dort unterquert der Basistunnel das Kandertal südlich von Kandersteg.

Die gemessenen Temperaturen des Gebirges und des Bergwassers weichen teilweise erheblich von den prognostizierten Felstemperaturen ab. Südlich der Querung des Basistunnels mit dem Kandertal liegen die Felstemperaturen bis zu 4 °C tiefer als die Prognosewerte, während unter dem Kandertal die Temperaturen des Gebirges und des Bergwassers bis zu 6 °C höher sind als prognostiziert. Diese Beobachtung kann mit dem Strömungssystem des Bergwassers erklärt werden, welches in der Doldenhorn-Decke südlich der Querung des Basistunnels in die Tiefe strömt und unter dem Kandertal, welches bis zum Bau des Basistunnels den Vorfluter für diese Wässer dargestellt hat, wieder aufsteigt. Das Bergwasser folgt dabei Störungszonen und Karstsystemen.

Durch den Bau des Basistunnels haben sich die Strömungsverhältnisse des Bergwassers grundlegend verändert, indem der tiefer liegende Basistunnel zur neuen Vorflut des Bergwassers in dem Bereich der Doldenhorn-Decke geworden ist. Diese Verhältnisse zeigen die Messwerte der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung des Bergwassers in Abbildung 6, welche einige Zeit nach dem Bau des Tunnels aufgenommen wurden.

Das Warmwasser in der Störungszone bei km 27 218 entspricht nach wie vor einem unterhalb des Kandertals aus der Tiefe aufsteigenden Bergwasser mit erhöhter Temperatur von 26 °C und chemischen Parametern, welche mit ihrer erhöhten Mineralisation auf eine lange Verweildauer im Untergrund hinweisen. Das Kaltwasser, welches von einer anderen Zutrittsstelle in der gleichen Störungszone stammt, zeigt dagegen kaltes Bergwasser mit 10,6 °C, welches nun nach dem Bau des Basistunnels diesem aus dem Lockergesteins- Grundwasserleiter des Kandertals zuströmt. Die chemischen Parameter mit der geringen Mineralisation weisen auf eine kurze Verweilzeit des kalten Wassers im Untergrund hin.

Das Bergwasser Frutigen (Helke) in Abbildung 6 entspricht weitgehend dem Wasser, welches heute vom Projekt Tropenhaus genutzt wird. Es ist eine Mischung von Warm- und Kaltwasser aus den vielen Zutrittsstellen entlang des Basistunnels. Mengenmässig dominieren dabei die Wässer aus der Doldenhorn-Decke. Die chemische Zusammen-

Parameter	Messgrösse	Warmwasser km 27'218	Kaltwasser km 27'218	Bergwasser Frutigen (Helke)
Schüttung	l/s	0.2	3.5	ca. 120
Temperatur	°C	26.00	10.60	17.50
pH		7.28	7.92	8.10
Sauerstoff	mg/l	0.80	9.70	8.80
Alkalinität	mmol/l	2.07	1.81	2.72
Gesamthärte	mmol/l	5.68	1.33	1.83
TOC	mg/l C _{org}	0.60	0.60	0.60
Na	mg/l	110.00	2.13	26.60
K	mg/l	3.90	0.37	2.20
Ca	mg/l	140.70	44.10	54.50
Mg	mg/l	59.00	8.26	13.60
Sr	mg/l	3.60	0.30	1.05
Cl	mg/l	61.00	1.30	5.40
SO ₄	mg/l	580.00	46.00	93.00
NO ₃ -N	mg/l	< 0.25	< 0.25	< 0.25

6 Schüttung, Temperatur und chemische Parameter von drei typischen Bergwässern
Discharge, temperature and chemical parameters of three typical groundwaters

tunnel level. The forecast also took into account the lateral overburden, which is indicated by the black dotted line in the geological profile.

Black dots show the rock temperatures measured in short lateral boreholes measured immediately following excavation of the tunnel tubes, whereas the red dots represent the temperature of the inflowing groundwater shortly after excavation of the tunnels. The data in the permeable limestones of the Doldenhorn nappe between Eggeschwand and Gaster valley are very interesting. At this location, the base tunnel passes underneath the Kander valley south of Kandersteg.

At certain locations, the measured rock and groundwater temperatures differ considerably from the predicted rock temperatures. South of the point where the base tunnel crosses the Kander valley, the rock temperatures are up to 4°C lower than the predicted values, while below the Kander valley the rock and groundwater temperatures are up to 6°C higher than predicted. This observation is explained by the groundwater flow, which is directed downwards in the Doldenhorn nappe south of the base tunnel crossing and rises again beneath the Kander valley, which represented the receiving watercourse for these waters until construction of the base tunnel. Here, the groundwater follows fault zones and karst systems.

Groundwater flow patterns became fundamentally altered after construction of the base tunnel. This is because the low level base tunnel represents a new groundwater receptacle in the region of Doldenhorn nappe. This is shown in Figure 6 depicting the temperature and chemical groundwater composition measured after the completion of the tunnel.

The warm water in the fault zone at km 27,218 corresponds to groundwater rising from the depth underneath the Kander valley. The elevated temperature of 26 °C and



Quelle/Credit: Tropenhaus Frutigen AG

7 Geschäftsmodell Tropenhaus Frutigen. Ertragspfeiler Tropenhaus Frutigen business model. Revenue pillars

setzung des Mischwassers zeigt durch den erhöhten pH-Wert den Kontakt mit Beton auf dem Weg im Drainagesystem aus dem Tunnel, welcher den Bergwasserzuflüssen fehlt.

3 Konzept Tropenhaus Frutigen

Bei der Erstellung des Konzeptes für das Tropenhaus im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden folgende Rahmenbedingungen berücksichtigt:

- Eine traditionelle Fischzucht von Forellen war wegen des zu warmen Wassers nicht möglich. Wärmeliebende Fische wie Karpfen waren dagegen wirtschaftlich wenig interessant. Die Zucht anderer einheimischer Arten wie Flussbarsche und Zander (Perciformes) steckte noch in den Kinderschuhen. Zudem war die Eignung des Bergwassers mit seiner chemischen Zusammensetzung für eine Fischzucht unbekannt.
- Neu in der Fischzucht aufkommende Arten wie der Stör (Acipenseridae) waren zwar insbesondere wegen des Kaviars wirtschaftlich interessant, brauchten jedoch viele Jahre bis zur Geschlechtsreife, verbunden mit Kosten und fehlenden Erträgen. Die Marktrisiken mit einem einzelnen Produkt waren erheblich.
- Die Unsicherheit bezüglich der langfristigen Entwicklung der Bergwassermengen und -temperaturen bedingte ein flexibles Konzept, was die verfügbare Wärmeenergie und die Wassermengen sowie die notwendige Abkühlleistung betrifft. Zudem war mit einem Ausfall des Bergwassers durch Störfälle im Basistunnel und mit Stromausfällen zu rechnen. Das hatte Auswirkungen auf die Wahl der Fischarten, welche auch kaltwasserverträglich sein muss-

chemical composition (showing increased mineralisation) indicate an extended period of equilibration in deep layers. The cold water, however, which comes from another entry point within the same fault zone, shows cold groundwater at 10.6°C, which now flows in from the Kander valley's soft ground aquifer after the construction of the base tunnel. The temperature and chemical composition (low degree of mineralisation) indicate a short equilibration period in the subsurface.

The Frutigen (Helke) groundwater in Figure 6 generally corresponds to the water used today in the Tropenhaus project. It is a mixture of warm and cold water from the numerous points of entry along the base tunnel. In terms of volume, waters from the Doldenhorn nappe dominate. The contact with concrete on its way out of the tunnel, is reflected by its changing chemical composition (higher pH) relative to its composition at the inflow site.

3 Tropenhaus Frutigen Concept

The following boundary conditions were taken into consideration as components of a feasibility study when preparing the Tropenhaus concept:

- The possibility of traditional trout fish farming had to be discarded due to the excessively warm water. Thermophilic fish such as carp, on the other hand, were economically less interesting. Breeding other native species such as perch and zander (Perciformes) was still in its technologic infancy. In addition, the feasibility of the tunnel ground-

ten, aber auch auf die Standortwahl für das Tropenhaus, welche eine Zuführung des lebenswichtigen Bergwassers ohne Pumpen bedingte.

Das Geschäftsmodell umfasst sieben unterschiedlich bedeutsame Ertragspfeiler:

- Forschung, Entwicklung, Ausbildung waren wichtige Treiber während der Projektentwicklung.
- Aus wirtschaftlicher Sicht ist vor allem die Fischzucht wichtig. Die Plantage trägt vor allem zur Attraktivität für Besucher bei und ist damit ein indirekter Ertragspfeiler.
- Die Ausstellung und der Besucherrundgang sowie das Aquarium generieren Erträge aus Eintritten.
- Das Kälte- und Wärmecontracting ist ausgelagert. Es spielt jedoch eine grosse Rolle bei der Versorgung des Tropenhauses mit Heizenergie (Wärmepumpe nutzt Bergwasser).
- Verarbeitung und Veredelung spielen eine grosse Rolle im Zusammenhang mit dem Verkauf hochwertiger Produkte aus Eigenproduktion (Kaviar, Fischfilets und tropische Früchte).
- Die Gastronomie ist ein wesentlicher Teil der Attraktivität für Besucher und generiert Erträge durch den Verkauf von selbst produzierten und anderen lokalen Produkten.
- Der Verkauf basiert auf dem Direktverkauf im Shop sowie dem externen Verkauf von Produkten über die Verkaufskanäle von Coop.

water for fish farming, with its specific chemical composition, was not known.

- New species emerging in fish farming, such as the sturgeon (Acipenseridae), were of economic interest in particular because of the caviar, but took many years to reach sexual maturity, associated with costs and missing revenue. Thus, market risks of a single product were considerable.
- The uncertainty pertaining to long-term evolution of groundwater levels and temperatures asked for a flexible concept in terms of the available thermal energy and water volumes, as well as the necessary cooling capacity. In addition, potential hazards with complete absence of groundwater following incidents in the base tunnel and power outages needed to be anticipated. This had an impact on the choice of fish species (tolerance to warm and cold water), and to the placement of the Tropenhaus, which needed a supply of vital groundwater without the need for pumps for hazard scenario.

The business model comprises seven revenue targets of different importance:

- Research, development and training were important drivers during project development.
- From an economical point of view, fish farming is particularly important. The plantation predominantly contributes to visitor attractiveness and thus represents an indirect revenue pillar.
- The exhibition, the visitor's tour, and the aquarium, generate revenues from admission fees.
- The cold and heat contracting are outsourced. However,

4 Umsetzung des Projektes

4.1 Pilotprojekt zu der Fischzucht

Mit Unterstützung der KTI und in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Fisch- und Wildtiermedizin der Universität Bern konnte bereits im Jahre 2005 ein Pilotprojekt zu der grund-



8 Layout Tropenhaus Frutigen Tropenhaus Frutigen layout

Quelle/Credit: Tropenhaus Frutigen AG

sätzlichen Eignung des Bergwassers für die Fischzucht, zur kombinierten Aufzucht von Stören und Flussbarschen sowie zum Wachstum und zur Gesundheit der Fische durchgeführt werden. Das Projekt zeigte, dass das Bergwasser geeignet ist und eine kombinierte Zucht sogar zu höheren Wachstumsraten führt als bei einer getrennten Zucht der beiden Spezies. Zudem zeigten die Untersuchungen, dass die Fische im Bergwasser völlig gesund und ohne Einsatz von Medikamenten heranwachsen.

4.2 Layout der Anlage

Das Layout der Anlage wird durch den Besucherrundgang (Tour) vorgegeben. Dieser beginnt im Eingangsbereich, wo die Eintritt zahlenden Besucher empfangen werden, führt durch eine Ausstellung (Expo), welche die Herkunft des Wassers sowie die Gründe für die Wärme des Bergwassers (Geothermie) erklärt, verläuft dann entlang einer Fischzucht zu einem Aquarium, in dem die im Tropenhaus gezüchteten Fische bestaunt werden können, bis hin zur tropischen Plantage. Der Rundgang endet vor dem Eingang des Tagesrestaurants (Gastronomie).

4.3 Planung und Bau

Die Planung des Projektes erstreckte sich über einen Zeitraum von rund sieben Jahren bis zur Eröffnung im Jahre 2009.

Nachdem die Projektidee und erste Konzepte erstellt waren, hat die Ingenieurunternehmung Emch+Berger AG, Bern, als Träger des Projektes die Aktiengesellschaft Tropenhaus

they play a major role in supplying the Tropenhaus with heating energy (heat pump utilises groundwater).

- Processing and refinement of products play a major role in conjunction with the sale of high-quality in-house products (caviar, fish filets and tropical fruits).
- Catering is an essential component of visitor's attractiveness. It generates revenue through the sale of self-produced and further local products.
- Sales are based on direct sales in the shop and sales through the intermediate of the Coop sales channels.

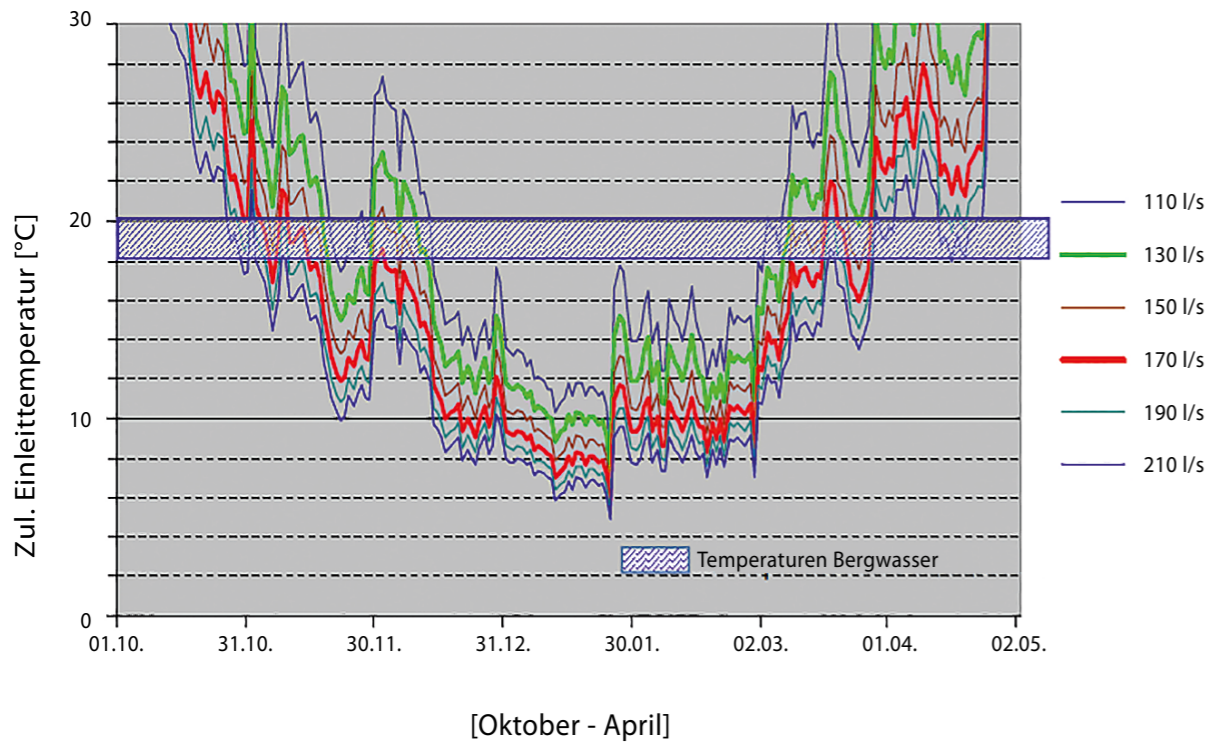
4 Project Implementation

4.1 Fish Farm Pilot Project

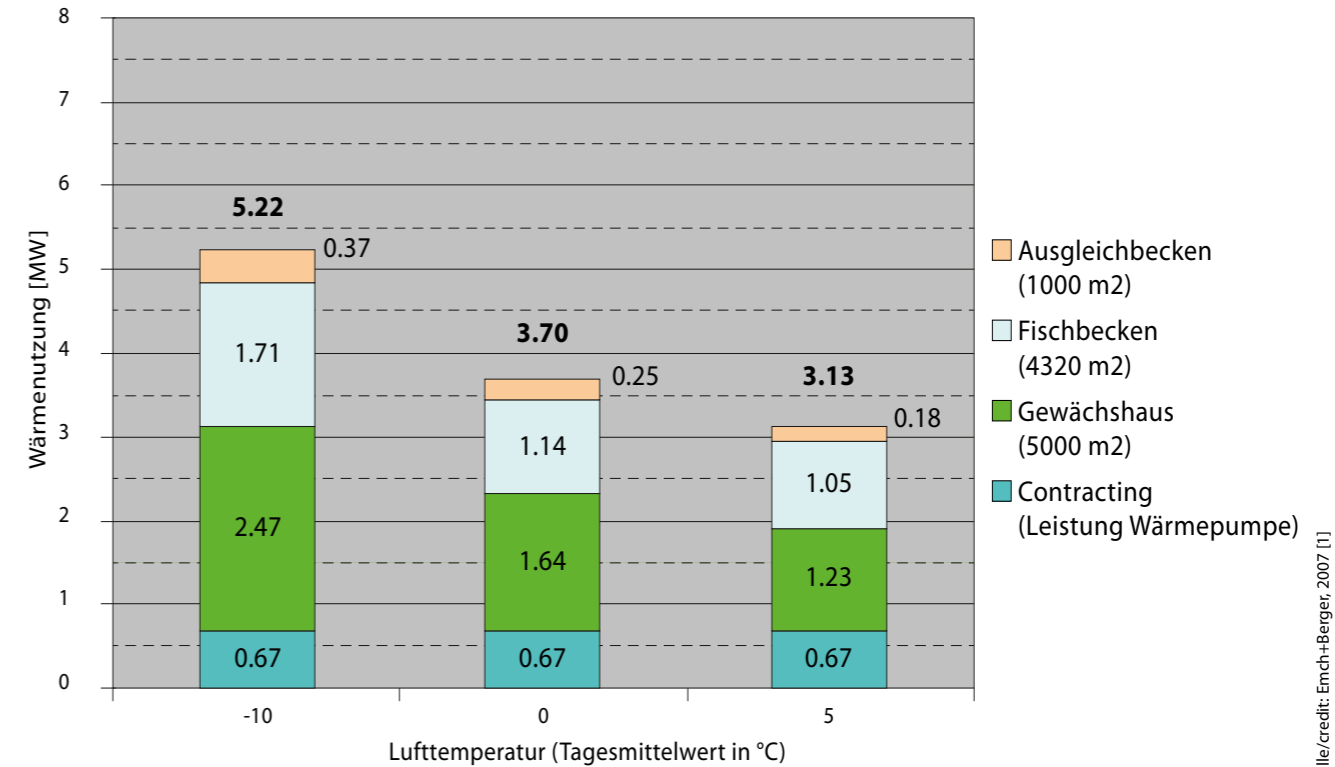
A pilot project to study the general suitability of groundwater for fish farming was implemented in 2005. It was supported by the KTI and by a cooperation with the Centre of Fish and Wildlife Medicine of the University of Bern (Zentrum für Fisch- und Wildtiermedizin). The goals were to study the effect of groundwater on growth and health of fish in general, and on joint breeding of sturgeon and perch. The project demonstrated that groundwater breeding is feasible, and that combined breeding even leads to greater growth rates than separate breeding of the two species. In addition, the study revealed growth of fish to an adult stage in full health without the need to add medication.

4.2 Facility Layout

The layout of the facility is determined by the visitor tour. The tour begins in the entrance area, where the



9 Zulässige Einleittemperatur des Bergwassers in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Bergwassermenge
Allowable groundwater discharge temperature as a function of the season and groundwater volume



10 Wärmebedarf des Projektes bei unterschiedlicher Lufttemperatur
Project heat demand for different air temperatures

Frutigen AG gegründet. Daraufhin wurden die regionalen und kantonalen Behörden sowie die Öffentlichkeit über die Projektidee informiert. Das Projekt stiess trotz der etwas exotischen Idee eines Tropenhauses in den Bergen auf viel Zustimmung und Unterstützung.

Die Suche nach einem geeigneten Grundstück war nach der Untersuchung verschiedener Varianten und dank des Verständnisses einer Bauernfamilie erfolgreich. Die Stimmbürger der Gemeinde Frutigen haben im Jahre 2005 mit überwältigendem Mehr eine Zonenplanänderung mit Umzonung der Parzelle von der Landwirtschafts- in die Industriezone genehmigt.

Der Bau der Anlage verlief weitgehend ohne Probleme. Die Baukosten der ersten Bauetappe von rund 30 Millionen Franken wurden eingehalten. In der Zwischenzeit konnten bereits verschiedene Erweiterungen und Modernisierungen geplant und umgesetzt werden. So wurden eine Fischzucht-halle mit einer leistungsfähigen Kreislaufanlage und eine Quarantänestation für eingekaufte Jungfische errichtet, um die Aufzucht-kapazität zu steigern.

Das Projekt zeichnet sich durch eine einzigartige architektonische Konzeption aus. Das Betriebsgebäude symbolisiert mit einer Fassade aus vorgehängten Betonelementen das geklüftete Gebirge der Doldenhorn-Decke. Bergwasser fließt aus der Fassade und sammelt sich in einem Wasserbecken. Auf dem Dach des Gebäudes sind Fotovoltaik-Module aufge-

admission-paying visitors are welcomed. Subsequently it leads through an exhibition (Expo), where the origin of the water and the generation of geothermal energy as the cause of the water warming are explained. Afterwards the visitor is guided through the fish farm and to an aquarium, where fish breeding in the Tropenhaus can be closely observed. Towards the end the visitor walks through to the tropical plantation and enters the restaurant (catering) opened during daytime.

4.3 Planning and Construction

Project planning extended over a period of approximately seven years until the opening in 2009.

Once the project idea and first concepts had been created, the engineering company (Emch + Berger AG, Bern) founded the public limited company Tropenhaus Frutigen AG as the owner of the project. Subsequently, regional and cantonal political authorities as well as the public were informed about the project. The project was met with much approval and support, despite the somewhat exotic concept of a tropical greenhouse in the mountains.

After studying different possibilities and thanks to the support of a farming family, the search for a suitable plot of land was successful. In 2005, the electorate of Frutigen approved with an overwhelming majority a change of construction zones in its community, consisting of the plot being changed (rezoned) from the agricultural to the industrial zone.

stellt. Die tropische Plantage befindet sich in einem grossen Gewächshaus mit computergesteuerten Wärmeschirmen zur optimalen Nutzung der Sonneneinstrahlung und zur Vermeidung von Wärmeverlusten während der Nacht.

5 Betrieb des Projektes

Der Betrieb des Projektes hat das ursprüngliche Konzept weitgehend bestätigt. Die Fischzucht und die Plantage funktionieren ohne grosse Probleme. Nach wie vor kann das Projekt auf 50 000 bis 100 000 Besucher pro Jahr zählen, welche die Ausstellung, den Rundgang und das Tagesrestaurant frequentieren. Das Tropenhaus ist insbesondere bei Familien mit Kindern und als Ziel von Ausflügen für Firmen und Vereine beliebt.

6 Einhaltung des Erwärmungsgrenzwertes der Kander

Das Tropenhaus Frutigen erfüllt mit der Abkühlung des Bergwassers die Anforderung der Fischereibehörden, dass die Kander als Folge der Einleitung des warmen Bergwassers um nicht mehr als 0,5 °C erwärmt werden darf.

Massgebend für die Ermittlung der zulässigen Einleittemperatur ist das Winterhalbjahr. Denn in diesem Zeitraum sind die Abflussmengen in der Kander klein und die Wassertemperatur tief. Im Gegensatz zu dem Wasser in der Kander ist der Bergwasserzufluss zum Basistunnel heute mengen- und temperaturmässig mit rund 100 Litern pro Sekunde und 18 °C jahreszeitlich praktisch konstant.

Die zulässige Einleittemperatur und damit der Abkühlbedarf des Bergwassers werden kalorimetrisch durch eine Mischrechnung bestimmt [2]. Dabei wird die theoretische Temperatur der Kander nach der Einleitung des Bergwassers ermittelt. Sie darf nicht mehr als 0,5 °C höher sein als die Temperatur der Kander oberhalb der Einleitstelle.

Wie **Abbildung 9** zeigt, muss das Bergwasser bei typischen Januarverhältnissen und minimalen Abflüssen in der Kander von 18 °C auf rund 12 °C abgekühlt werden.

Abbildung 10 zeigt den Wärmeleistungsbedarf des Tropenhauses und des Nahwärmeverbundes. Je nach Lufttemperatur schwankt er zwischen 5,22 und 3,18 MW.

7 Bisherige Erfahrungen mit dem Projekt Tropenhaus

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Projekt Tropenhaus Frutigen können aus Sicht des Initianten des Projektes wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Konzept der Fischzucht hat sich bewährt und bisher keine nennenswerten Probleme erfahren.
- Das Projekt ist auch nach bald zehn Jahren Betrieb ein Publikumsmagnet geblieben. Es gewährleistet 50 Vollzeitstellen und beschäftigt mehr als 80 Personen.

Construction of the facility ran largely without problems. The construction costs of around 30 million Swiss francs for the first construction phase corresponded to the budget. In the meantime, various extensions and modernisations have already been planned and implemented. For example, a fish breeding facility with an efficient closed-loop unit and a quarantine station for purchased juvenile fish were built to increase breeding capacity.

The project is characterised by its unique architectural concept. The architecture of the facility building symbolises the fissured mountain range of the Doldenhorn nappe with a facade consisting of suspended concrete elements. Groundwater flows down the facade and is collected in a basin. Photovoltaic modules are installed on the roof of the building. The tropical plantation is growing in a large greenhouse with computer-controlled heat shields to optimise exposure to the sun and prevent heat loss during the night.

5 Project Operation

In general, the project operation confirmed the validity of the original concept. The fish farm and the plantation function without major problems. The project continues to attract 50,000 to 100,000 people per year visiting the exhibition, the tour and the day restaurant. The Tropenhaus is particularly enjoyed by families with children and is a destination for company and club outings.

6 Compliance with the Kander Heating Limits

With the cooling of the groundwater, the Tropenhaus Frutigen meets the fishing authorities' requirement that the Kander river must not be heated by more than 0.5°C as a result of the discharge of warm groundwater.

The crucial factor for determining the permissible discharge temperature is the winter season. It is during this period that water flow in the Kander river is small and its water temperature low. In contrast to the water in the Kander river, the inflow of groundwater to the base tunnel today is practically constant in terms of volume and temperature at around 100 l/s and 18°C during the seasons.

The allowable discharge temperature and thus the groundwater cooling demand are determined calorimetrically by a mixed calculation [2]. Here, the theoretical temperature of the Kander river following groundwater discharge is determined. It may be no greater than 0.5°C more than the temperature of the Kander river upstream of the discharge point.

As shown in **Figure 9**, during typical January conditions and minimal runoff to the river Kander, the groundwater needs to be cooled from 18°C to around 12°C.

- Die weltweit massive Ausweitung der Störzucht führte zu hohem Preisdruck auf Kaviar. Das Projekt entgegnete dieser Entwicklung mit einer vermehrten Produktion von Flussbarschen und Zandern.
- Die Anforderungen an die zulässige Temperaturerhöhung der Kander können durch das Projekt problemlos eingehalten werden.
- Mit der Genossenschaft Coop hat das Tropenhaus Frutigen einen starken Partner gefunden, welcher das Projekt erfolgreich in die Zukunft führt.

Literatur/References

- [1] Hufschmied, P. (2007): Nutzung und Abkühlung des Bergwassers am Lötschberg-Basistunnel. XI. Internationaler Geologenkongress, Bozen, 25.–27. Januar 2007.
- [2] Hufschmied, P.; Brunner, A. (2010): The exploitation of warm tunnel water through the example of the Lötschberg Base Tunnel in Switzerland (Nutzung warmer Tunnelwässer am Beispiel des Lötschberg-Basistunnels in der Schweiz). *Geomechanics and Tunneling* 3(2010), October 2010, No. 5, pp 647–657.

Figure 10 shows the heating requirement of the Tropenhaus and the district heating network. This fluctuates between 5.22 and 3.18 MW, depending on air temperature.

7 Experience with the Tropenhaus Project to Date

From the project initiator's perspective, experience with the Tropenhaus Frutigen project as of today can be summarised as follows:

- The fish farming concept has proven itself valid and has not experienced any significant problems so far.
- The project continues to be a crowd puller even after almost ten years of operation. It provides 50 full-time positions and employs more than 80 people.
- The massive global expansion of sturgeon breeding led to high pressure on caviar prizes. The project countered this development with increased production of perch and zander.
- The request to limit the temperature increase in the Kander river can be easily met.
- Tropenhaus Frutigen has found a strong partner in the Coop cooperative, successfully leading the project into the future.

Aeberli, Martin	Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf/CH
Aeschbach, Markus	IG VALBT c/o SRP Ingenieur AG, Brig/CH
Biaggio, Guido	Bundesamt für Strassen, Ittigen/CH
Brino, Lorenzo	TELT SAS, Turin/IT
Carrera, Eric	Amberg Engineering AG, Regensdorf-Watt/CH
Chabert, Alain	Bourget du Lac/F
Crapp, Remo	Lombardi SA, Minusio/CH
Deschamps, Nicolas	BG Ingénieurs Conseils, Ivry-sur-Seine/F
Di Paola, Fabrizio Paolo	Metro C, Rome/IT
Erzinger, Oliver	Implenia Schweiz AG, Wallisellen/CH
Ferrari, Alessandro	B+S AG, Bern/CH
Fonyo, Balazs	Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen/CH
Fuoco, Stefano	BBT-SE, Bolzano/IT
Ganzmann, Jürgen	Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH
Gruber, Thomas	Streng Plastic AG, Niederhasli/CH
Haase, Oliver	Sika Schweiz AG, Zürich/CH
Herdina, Johann	TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck/AT
Holstein, Uwe	AF Toscano AG, Chur/CH
Hufschmied, Peter,	ExTechNa GmbH, Spiegel bei Bern/CH
Insam, Romed	BBT SE, Innsbruck/AT
Irgartinger, Stefan	BLS Netz AG, Bern/CH
Keller, Martin	SikaBau AG, Schlieren/CH
Kumpusch, Valentina	Bundesamt für Strassen, Bellinzona/CH
Malva, Oscar	Basler & Hofmann AG, Zürich/CH
Marini, David	BBT-SE, Bolzano/IT
Massignani, Sergio	Marti Tunnelbau AG, Moosseedorf/CH
Parisi, Maria Elena	TELT SAS, Turin/IT
Pixley, Daniel	BLS Netz AG, Bern/CH
Rengshausen, Rainer	PORR Tunnelbau, Wien/AT
Romani, Eliano	Metro C, Rome/IT
Röthlisberger, Jürg	Bundesamt für Strassen, Ittigen/CH
Spring, Daniel	Regionalverkehr Bern-Solothurn AG, Worblaufen/CH
Wegmüller, Marcel Christian	Ingenieurbüro M.C. Wegmüller, Riehen/CH
Winter, Angela	Basler & Hofmann AG, Zürich/CH
Witschi, Tobias	B+S AG, Bern/CH
Zurlo, Raffaele	BBT-SE, Bolzano/IT

Hauptsponsoren • Main Sponsors

AF TOSCANO

**Neue Dimensionen
bewährte Qualität**

toscano.ch

Arma
Spez Schweiz AG
Swiss Power Team

Arma Spez Schweiz AG
Swiss Power Team

Wir entwickeln für den Tunnelbau optimale Bewehrungslösungen nach den Vorgaben der Kunden, zeit- und kostensparend. Das beherrschen wir. Termingerechte Produktion und Lieferung mit den geeigneten Transportmitteln, per Camion oder per Bahn.

Der Unterschied zwischen Mittel-mass und Perfektion liegt im Detail. Wir wissen das.

„Einen Vorsprung im Leben hat, wer da anpackt, wo andere erst einmal reden.“
John F. Kennedy

... hier beginnt der Tunnelbau

Contributing to a smart use of space

AMBERG GROUP

Tunnels & Shafts
Caverns
Nuclear Waste
Metro
Logistics Infrastructure
Infrastructure Galleries
Underground Spaces
Water & Hydro
Roads
Rails

Logistic solutions - Real-time monitoring
Surveying - BIM-Engineering
Building materials - Research & Development

amberggroup@amberg.ch +41 44 870 95 95 www.amberggroup.com

Wir verstehen Tunnelbau.

Jahrzehntelange Erfahrung im Tunnelbau rund um die Welt sowie das neue Bohrtechnik-Entwicklungszentrum machen Sandvik zum klaren Vorläufer in der Tunnelindustrie.

SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION CENTRAL EUROPE GMBH
HAFENSTRASSE 280 D-45356 ESSEN DEUTSCHLAND TEL +49 (0) 201-1785-300
www.construction.sandvik.com

AVESCO AG HASENMATTSTRASSE 2 CH-4900 LANGENTHAL SCHWEIZ TEL +41 (0) 848 832 832
www.avesco.ch

AVESCO AG ÖSTERREICH ANZING 33 AT - 4413 ST.MARTIN IM MÜHLKREIS TEL +43 (0) 7232 299 44 90
www.avesco-tec.at

SANDVIK

avesco TEC



Intelligente Ingenieurösungen für eine lebenswerte Zukunft.
Dafür setze ich mich persönlich ein, mit Herz, Verstand und Leidenschaft.

www.bs-ing.ch

B+S
INGENIEURE UND PLANER



Exzellenz im Tunnelbau

Wir sind die Spezialisten für anspruchsvolle Tunnelbauprojekte: im Fels, im dicht besiedelten Gebiet, im Grundwasser und Lockergestein. Basler & Hofmann bearbeitet Tunnelprojekte von der Machbarkeitsstudie bis zur Bauleitung, vom Sicherheitskonzept und -plan bis zum Logistikkonzept. Unsere Spezialisten sind von Bern bis Göteborg im Einsatz. Gut, sich auf einen erfahrenen Partner verlassen zu können.



www.baslerhofmann.ch

Basler & Hofmann

MASTER BUILDERS SOLUTIONS

BASF
We create chemistry

MasterSeal 345

Damit Sie im Tunnel keinen Regenschirm brauchen!

BASF Schweiz AG • Geschäftsbereich Admixture Systems
Im Schachen • 5113 Holderbank • T +41 (0)58 958 22 44 • F +41 (0)58 958 32 55
info-as.ch@basf.com • www.master-builders-solutions.basf.ch

belloli

- Diesel- und E-Loks, Plattformwagen, Personenwagen, Schutterwagen, Nachmischer usw.
- Schienen und Schwellen, Weichen, California-Weichen
- Dumper
- Ventilationslütten, Ventilatoren
- Selbstbohranker, Reibrohranker, SN-Anker usw.
- Mikropfähle
- Mörtel- und Hochdruck-Pumpen
- Einbaubögen, Gitterträger, TH-Profile
- Pipelines

SICHERN IST UNSER BUSINESS

Belloli SA
CH-6537 Grono (Switzerland)
Tel. +41 91 820 38 88
Fax +41 91 820 38 80
info@belloli.ch
www.belloli.ch

Belloli Italia S.r.l.
Via XXV Aprile 59
IT-22070 Guanzate (Italy)
Tel. +39 031 9780000
Fax +39 031 3529089
info@belloli-italia.it
www.belloli-italia.it

BG

**DIE NATUR IST
UNSER VORBILD,
DAS VERNETZTE
DENKEN UNSERE
STÄRKE.**

www.bg-21.com

BG Ingenieure und Berater ■ INGENIOUS SOLUTIONS

**Emch+
Berger**

Gesamtlösungen sind unser Plus.

Wir planen und beraten engagiert, kompetent und verantwortungsvoll. Mit 630 Mitarbeitenden an über 20 Standorten sind wir national und international präsent und nahe bei unseren Kunden.

www.emchberger.ch

Map locations: Copenhagen, Basel, Baden, Zürich, St. Gallen, Altenrhein, Altstätten/Rüti, Zofingen, Pfäffikon ZH, Solothurn, Cham, Bern, Luzern / Ebikon / Emmenbrücke / Kriens, Samnaun, Spiez, Sarnen, Lausanne, Brig.

CSC | IMPRESA COSTRUZIONI SA
ENTREPRISE DE CONSTRUCTIONS SA
BAUUNTERNEHMUNG AG

ÜBER 50 JAHRE SPITZENLEISTUNG

www.csc-sa.ch

BAUEN FÜR MORGEN

Jedes Projekt, jeder Berg stellt die Frutiger Gruppe vor neue Herausforderungen. Seit über 80 Jahren im Tunnelbau tätig, sind wir an jedem Projekt kontinuierlich gewachsen. Dank unserem umfassenden Know-how sind wir in der Lage, Untertagprojekte für unsere Kunden kompetent zu realisieren.

frutiger.com

Frutiger



SCHNELL VERBUNDEN

PLANUNG GOTTHARD-BASISTUNNEL

ERFOLGREICH PLANEN

GÄHLER UND PARTNER AG | SONNENBERGSTRASSE 1 | CH-5408 ENNETBADEN | TEL +41 56 200 95 11 | INFO@GPAG.CH | WWW.GPAG.CH

**INSPIRIEREND
FÜR HERAUSRAGENDE
LEISTUNGEN.**

**INSPIRÉ
POUR DES PERFORMANCES
D'EXCEPTION.**

**INNOVATIV
FÜR DIE WELT
VON MORGEN.**

**INNOVANT
POUR LE MONDE
DE DEMAIN.**

Tunnelbau und Tunnelsanierung:
Fundierte Spezialkenntnisse und grosse Erfahrung
für Ihren Projekterfolg.

Construction de tunnels et assainissement de tunnels:
Des connaissances spécialisées approfondies et une vaste expérience
pour la réussite de votre projet.

An über 30 Standorten — weltweit.
Sur plus de 30 sites — dans le monde entier.

www.gruner.ch www.stucky.ch

gruner > stucky >
a Gruner company



Gasser Felstechnik AG | 6078 Lungern | T 041 679 77 77 | felstechnik.ch

Schachtbau ALIMAK | Stollen- und Tunnelbau | Profilaufweitungen

HEITKAMP
Construction Swiss GmbH

Heitkamp Construction Swiss
Kompetenz aus Tradition – Zukunft durch Innovation

Teamwork

Achieving greatness together: In more than **3,700 projects** globally, high-class infrastructure has been built, using Herrenknecht tunnelling technology.

Pioneering Underground Technologies

www.herrenknecht.com

A member of LafargeHolcim

Wir arbeiten eng mit unseren Kunden zusammen und setzen so höchste Anforderungen in beste Qualität um.

Entdecken Sie verschiedene Referenzen und den neuen E-Shop auf unserer digitalen Plattform HolcimPartner.net: www.holcimpartner.net

Strength. Performance. Passion.

www.ilf.com

ENGINEERING EXCELLENCE

ILF Beratende Ingenieure AG
 Flurstraße 55
 8048 Zürich, Schweiz
 Telefon: +41 44 435 37 50
 Telefax: +41 44 435 37 51
 Email: info.zrh@ilf.com
 Web: www.ilf.com/ch

ILF unterstützt ihre Kunden bei der erfolgreichen Realisierung bedeutender Infrastrukturprojekte und bietet gesamthafte Ingenieur- und Beratungsleistungen an.

IHR ZUVERLÄSSIGER PARTNER

Bewährt bei:

- 3. Röhre Belchentunnel
- 4-Spurausbau Olten-Aarau, Eppenbergtunnel
- ZEB Chestenbergertunnel
- Pumpspeicherwerk Linth-Limmern
- Gotthard- und Ceneri-Basistunnel
- Nordumfahrung Zürich (BSA/Tunnellüftung)
- SBB Brüttenertunnel
- Leitungstunnel Heiligberg (Fernwärme)
- Studie Geologische Tiefenlager, Nagra
- Tunnellüftung Gubrist 1.-3. Röhre

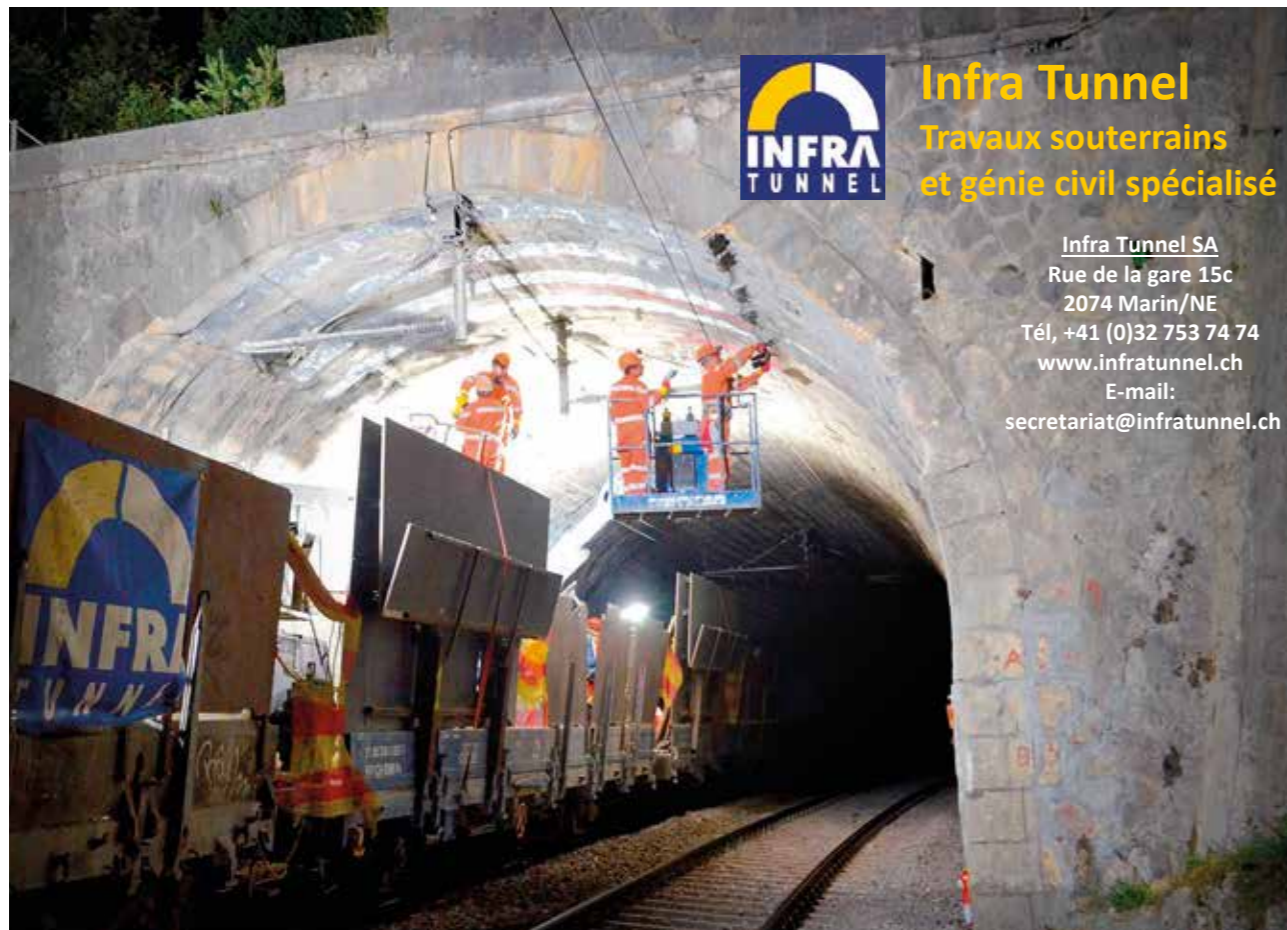
ILF Zürich ist Mitglied der ILF Gruppe mit weltweit mehr als 2.000 Mitarbeitern.

Implenia® Die Tunnelbauspezialisten

Durchschlag am neuen Bözbergtunnel: Das Team von Implenia vor dem Bohrkopf der Tunnelbohrmaschine, die am 29. November 2017 das letzte Stück Fels durchschlag und damit den Hauptvortrieb erfolgreich abschloss.

Implenia denkt und baut fürs Leben. Gern.

www.implenia.com



INFRA TUNNEL
Infra Tunnel
 Travaux souterrains
 et génie civil spécialisé

Infra Tunnel SA
 Rue de la gare 15c
 2074 Marin/NE
 Tél, +41 (0)32 753 74 74
 www.infratunnel.ch
 E-mail:
 secretariat@infratunnel.ch



**JURA CEMENT –
 NATÜRLICH**

Jura-Cement-Fabriken AG 5103 Wildegg Fon 062 887 76 66 www.juracement.ch



N4 Galgenbuckeltunnel Neuhausen

Ingenieurskunst – unsere Leidenschaft
 Gesamtlösungen für Energie, Infrastruktur und Umwelt.
 Wir sind Spezialisten in den Bereichen Kraftwerk-, Untertag-, Verkehrswegebau, Tief- und Hochbau sowie bei Ausrüstungen von Infrastrukturbauten.
 Beratung, Studien, Projektierung, Bau- und Montageleitung, Expertisen und Projektmanagement.

IM Engineering | **IUB** Engineering

IM Maggia Engineering AG · via Stefano Francini 5 · 6600 Locarno · Tel. +41 91 756 68 11 · info@im-maggia.ch · www.im-maggia.ch
 IUB Engineering AG · Belpstrasse 48 · 3007 Bern · Tel. +41 31 357 11 11 · info@iub-ag.ch · www.engineering-group.ch



Lombardi

Ausführungsplanung und Fachbauleitung der Bergstation Eigergletscher

Lombardi verbindet
 Lombardi steht seinen Kunden über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks mit Kompetenz zur Seite. Unsere Dienstleistungen umfassen alle Tätigkeiten ab der Machbarkeitsstudie mit anschliessender Planung über die Ausführung bis zur Begleitung in der Betriebsphase.

Seit 60 Jahren bauen unsere Kunden auf unsere technische und wirtschaftliche Kompetenz für Verkehrsanlagen unter Tage. Ihre Ansprüche sind unsere Herausforderung.

Lombardi SA Ingegneri Consulenti | Via R. Simen 19, 6648 Minusio
Lombardi AG Beratende Ingenieure | Winkelriedstrasse 37, 6003 Luzern
Lombardi SA Ingénieurs Conseils | Rte des Grives 4, 1763 Granges-Paccot

www.lombardi.group



We know our business

Many years of experience in the planning and production of simple to complex conveyor systems make us your reliable global partner.

Transport and logistic systems are tailored to your individual needs. We produce custom-made, practical solutions based on our construction site experience.

Contact us. We provide professional and precise advice and know all of the options which can be implemented for the best fulfilment of your project.

We also have developed concepts for gravel plants, electrical engineering, formwork and special construction systems.

Marti Technik AG Lochackerweg 2 CH-3302 Moosseedorf
Fon +41 31 858 33 88 Fax +41 31 858 33 89 info@martitechnik.com

www.martitechnik.com



Logistic solutions for tunnelling and mining



since 1907

www.muhlhauser.group

SOLUTIONS[®]

Innovative developments and a full-range of products and services.



MARTI BAUT

Marti verfügt in sämtlichen Sparten des Tunnelbaus über qualifizierte und erfahrene Mitarbeiter. Der hochmoderne Maschinenpark beinhaltet u.a. Teilschnittmaschinen, Bohrjumbos und Tunnelbohrmaschinen mit verschiedenen Durchmessern.

Marti Tunnelbau AG
Seedorffeldstrasse 21 CH-3302 Moosseedorf
Tel. +41 31 388 75 10 tunnel@martiag.ch www.marti-tunnel.ch



Leading civil engineering
in innovation and sustainability

Tunnelling and Underground works

- Design
- Site supervision
- Project management
- Client support services
- Consulting

Key projects:

- AlpTransit Ceneri Railway Base Tunnel
- BBT Brenner Railway Base Tunnel
- TELT Lyon – Turin Railway Base Tunnel
- BLS Lötschberg Railway Base Tunnel
- SBB Refurbishment of 4m corridor
- AXPO Linth-Limmern Hydroelectric Power Plant
- CERN High Luminosity LHC Project

Zürich – Lugano – Milano – Paris – Innsbruck www.piniswiss.com

Intelligentes Bauen verbindet Menschen.

Bauen mit Herz und Verstand. Jedes Projekt ist anders und muss individuell geplant und ausgeführt werden. Das Können und der Einsatz jedes Einzelnen entscheiden hier über den Erfolg. Seit mehr als 145 Jahren steht die PORR für höchste Kompetenz in allen Bereichen des Bauwesens – denn Fachwissen, Engagement und Teamgeist machen sich immer bezahlt. porr-group.com

powered by **PORR**

Schneller, sicherer und wirtschaftlicher bauen 

Tunnel du Mont Blanc (France / Italia)
Sanierung der Fahrbahn mittels vorgefertigter Betonelemente Einsatz von zwei fahrenden Portalkranen während Nachtsperren

www.rowa-ag.ch

RL Rothpletz | Lienhard

100 Jahre
feiert **planen + bauen**

2018

1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925
1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933
1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941
1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949
1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957
1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965
1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973
1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981
1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989
1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997
1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005
2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013
2014 2015 2016 2017

SFS

**Befestigungs-
lösungen im
Tunnelbau**

fischer Befestigungslösungen mit SFS Anwendungskompetenz
Gekoppelt mit dem Anwendungs- und Beratungs-Know-how von SFS sorgen die Befestigungssysteme von fischer für höchste Sicherheit im Tunnelbau.

www.sfs.ch



FÜR JAHRHUNDERTBAUWERKE ENTWICKELT

NEUBAU | INSTANDSETZUNG | UNTERHALT

Betonherstellung | Spritzbeton | Abdichtung | Betonsanierung | Brandschutz | Anstrich | Maschinen



www.sika.ch

BUILDING TRUST



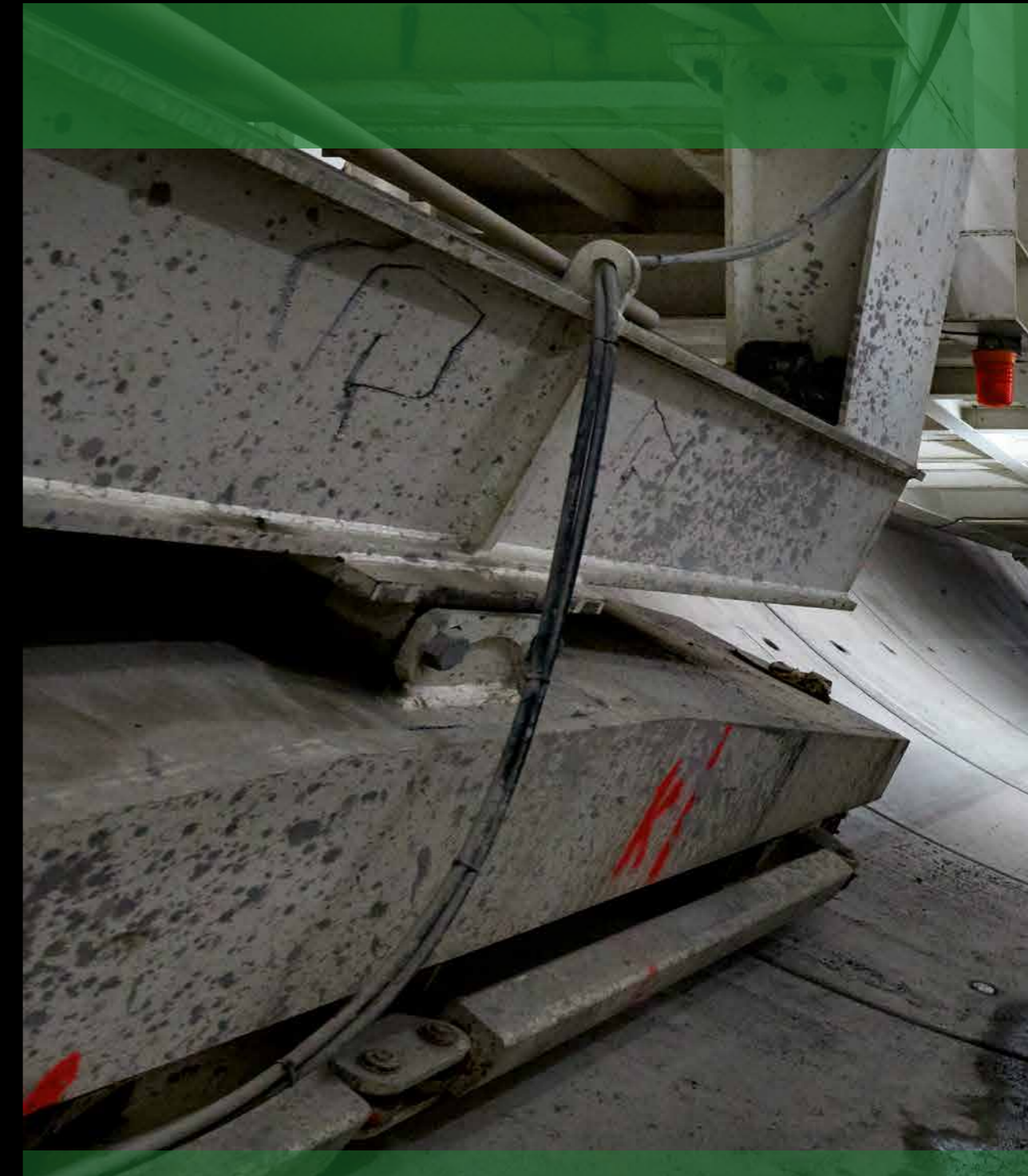
Tunnel de Pinchat

Walo Bertschinger - Ihr Partner für alle Bauwerke.

Walo Bertschinger AG
Untertagbau
Postfach, CH-8953 Dietikon 1
Telefon +41 44 745 23 11
untertagbau@walo.ch - www.walo.ch

WALO

Walo Bertschinger



FGU Fachgruppe für Untertagbau
GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains
GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo
STS Swiss Tunnelling Society