

Band 19

2020

SWISS TUNNEL CONGRESS

Fachtagung
für Untertagbau



Kongress &
Kolloquium

3. Juni 2020

Webinar



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

SWISS TUNNEL CONGRESS 2020



Organizing Committee

Stefan Maurhofer, Dipl. Ing.	President Swiss Tunnelling Society
Stefan Moser, Dr. sc. techn., Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Congress
Adrian Müller, 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

Gérard Seingre	Chairman, STS
Davide Fabbri	STS
Pedro Ramírez Rodríguez	AETOS
Robert Galler, Prof. Dr.	ITA Austria
Roland Leucker, Dr.	STUVA/DAUB
Giuseppe Lunardi	SIG
Emmanuel Humbert	AFTES

© 2020 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, Christian Ippach, 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: 400 Exemplare

ISBN 978-3-033-07750-8

Swiss Tunnel Congress 2020 – Fachtagung für Untertagbau
Umschlagfoto: CERN, mit Genehmigung der Implen AG

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

SWISS TUNNEL CONGRESS 2020

Fachtagung für Untertagbau

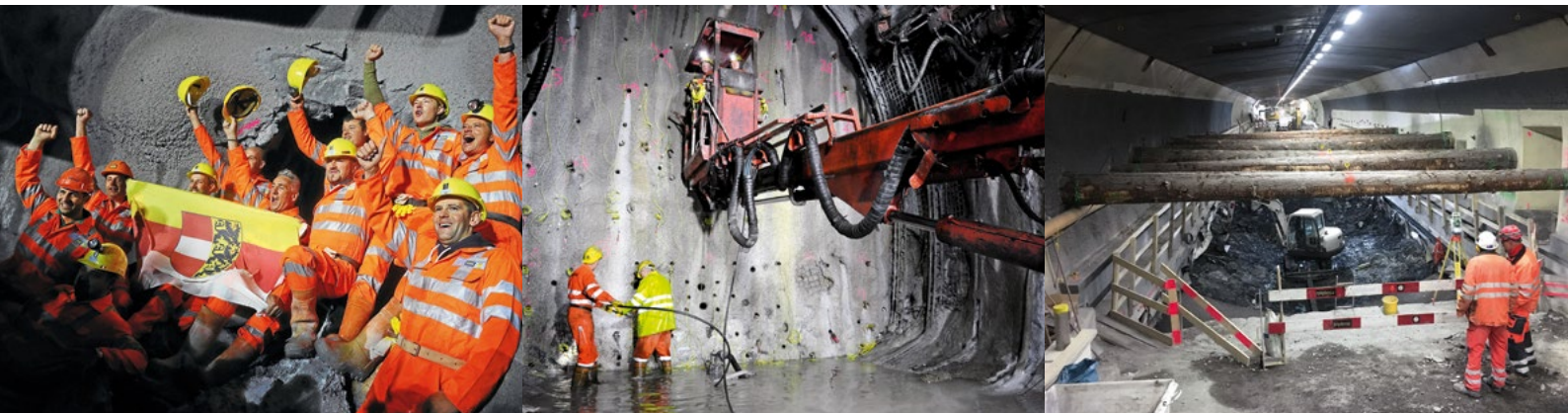
3. Juni 2020



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	Brunner, Andreas	Tunnel verbinden die Schweiz – Bahn-Infrastruktur der SBB als Rückgrat <i>Connecting Switzerland with Tunnels – SBB Rail Infrastructure Is the Backbone of Swiss Public Transport</i>
20	Wimmer, Albert	Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München – Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München <i>Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route – Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich</i>
30	Seith, Oliver Suter, Erich	Instandsetzung Gotschnatunnel – Herausforderungen und Erfahrungen <i>Repairing the Gotschna Tunnel – Challenges and Experiences</i>
41	Schneider, Klaus Egger, Jürgen	Die Koralmbahn – Ingenieurskunst aus Österreich <i>The Koralm Railway – Engineering Expertise From Austria</i>
51	Diewald, Martin	Baublauf KAT3 – Trotz intensiver Erkundung ist Flexibilität erforderlich <i>Construction Process KAT3 – Despite Extensive Exploration, Flexibility Is Required</i>
61	Giunta, Filippo Meistro, Nicola	Asbestos Risk Management in Tunnels Excavated by Conventional Methods
69	Perner, Reinhard Eder, Klaus	Neubau Albulatunnel II – Herausforderungen beim Vortrieb aus der Sicht des Unternehmers <i>New Construction of the Albula Tunnel II – Excavation Challenges From the Contractor's Perspective</i>
80	Osborne, John Tudora, Alexandra	Tunnelling for CERN's Future Circular Collider – Feasibility Studies for 100 km Tunnel in the Geneva Region
88	Heim, Alexander	Paris – Verlängerung der Métro-Linie 11 – Herausforderungen beim Bau eines hybriden Grossprojektes im Grossraum Paris <i>Paris – Extension of Métro Line 11 – Challenges During the Construction of a Major Hybrid Project in the Greater Paris Area</i>
102	Kloth, Thomas Frey, Daniel Stebler, Jürg	Gesamtsystem Bypass Luzern – Projektübersicht und bautechnische Herausforderungen <i>Bypass Luzern Overall System – Project Overview and Structural Challenges</i>
117	Hey, Oliver	Nouveau tunnel LEB – Défis d'un chantier en plein coeur de Lausanne <i>New LEB Tunnel – The Challenges of a Site in the Heart of Lausanne</i>
131	Ramoni, Marco Reiling, Stephan Lerch, Simon	Ausbau Bahnhof Bern RBS – Herausfordernder städtischer Tunnelbau <i>Expansion of Bern RBS Station – Challenging Urban Tunnel Construction</i>



- 155** Comin, Gianluca Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works – The First TBM Drive on the Axis of the Future
 Martin, Florent Mont-Cenis Tunnel
 Acquista, Calogero
 Giacomini, Giovanni
- 166** Cornaz, Philippe Tunnel de Ligerz – Une longue histoire
 Maillard-Duc, Marie-France *Ligerz Tunnel – A Story That Goes Far Back*

Kolloquium

Materialtechnologische Innovationen im Tunnelbau

Material Technology Developments in Tunnel Construction

- 176** Amberg, Felix Entwicklung im Untertagbau – Rückblick und Ausblick
Tunnel Excavation – Review and Outlook
- 190** Freudiger, Paul Roboterunterstützte Tübbingproduktion – Erfahrungsbericht, Vor- und Nachteile, Grenzen des
 Medel, Stefan aktuell Machbaren
 Hamm, Kuno *Robot-Assisted Production of Tunnel Segments – Progress Report, Advantages and Disadvantages,
 Limits of Current Feasibility*
- 200** Belloli, Alberto Innovationen im Bereich Logistik
 Jenni, Heinz *Innovations in Logistics*
- 208** Meier, Joachim Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb – Innovationen beim Bau der U5 in Berlin
 Leible, Christian *Drilling Technique and Measurement Technology for Excavation in Frozen Ground – Innovations in
 Construction of the U5 in Berlin*
- 224** Wieser, Paul Digitalisierung und BIM bei der Ausführung am Beispiel des Neubaus des Bözbergtunnels SBB
 Schmid, Werner *Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB
 Zieger, Thomas Bözberg Tunnel*
- 236** Schwager, Inga-Leena Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial –
 Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau
*Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design? – Innovations from the
 High-Rise Sector for the Underground Sector*
- 248** Kumli, Frank Healthcare Innovation! – Building Ecosystems for Healthcare 4.0





Vorwort • Preface

Stefan Maurhofer

Präsident der Fachgruppe
für Untertagbau

President of the Swiss
Tunnelling Society

Sehr geehrte Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Ich begrüße Sie ganz herzlich zum 19. Swiss Tunnel Congress (STC), der dieses Jahr am 3. Juni zum ersten Mal in seiner langjährigen Geschichte rein digital durchgeführt wird. Die derzeitigen Umstände stellen eine neue Herausforderung dar, die wird gerne für Sie – liebe Freunde des Untertagbaus – angenommen haben. Wir freuen uns deshalb sehr auf Ihre Teilnahme am Webinar! Nach wie vor ist der STC eine der bedeutendsten Plattformen für alle am Tunnelbau interessierten Gruppen. Wo sonst können sich die verschiedenen Vertreter der internationalen Tunnelbauindustrie so einfach und kompetent in angenehmer und lockerer Atmosphäre über die neusten technischen Entwicklungen informieren oder sich über ausgewählte Tunnelprojekte austauschen? Leider können wir dieses Jahr keine Freunde und Bekannte aus der Tunnelbauwelt wieder treffen oder neue Kontakte knüpfen. Aber ich hoffe, dass wir Sie dennoch in einer angenehmen und lockeren Atmosphäre erreichen.

Im Rahmen des Swiss Tunnel Congress 2019 in Luzern hatten sich die Präsidenten der DACH- und BEFIPS-Nationen (Austria – ITA Austria, Belgium – ABTUS, France – AFTES, Germany – DAUB, Italy – SIG, Portugal – CPT, Spain – AETOS, Switzerland – STS) zu einem ersten gemeinsamen Gespräch getroffen, um sich bezüglich einer engeren Zusammenarbeit der mitteleuropäischen Länder abzustimmen. Diese Gespräche wurden danach sehr intensiv und konstruktiv weitergeführt. Als Ergebnis haben die Vertreter der Länder in ihrer zweiten gemeinsamen Sitzung am 17. Oktober 2019 in Lissabon beschlossen, sich im «European Underground & Tunnel Forum (EUTF)» zusammenzuschliessen. Dieses Forum wird die Interessen der europäischen Tunnel-Community im Allgemeinen vertreten und die Positionierung und die Einflussnahme innerhalb der europäischen Normen- und Richtlinienkommissionen sicherstellen. Der Zusammenschluss bringt den europäischen Tunnelbau in eine gute Ausgangsposition und eröffnet speziell auch dem Schweizer Untertagbau grosse Chancen für eine stärkere internationale Positionierung. Die Konstituierung des EUTF ist ein Beispiel für die Bedeutung von Kongressen wie dem STC. Sie erlauben den einfachen Meinungs-austausch über alle Landesgrenzen hinweg. Nicht nur deshalb gehört der STC

Dear Attendees,

A warm welcome to the 19th Swiss Tunnel Congress (STC) which this year is being held on 3 June exclusively online for the first time in the society's long history. The current circumstances pose a big challenge – dear friends of the Swiss Tunnelling Society – but we have taken it up gladly for you. We therefore hope to see you participating in large numbers in the webinar! The STC continues to be one of the most important platforms for all parties interested in tunnel construction. Where else can various representatives of the international tunnel construction industry easily catch up on expert information about the latest technical developments and discuss specific tunnel projects – all in a pleasant and relaxed environment? Unfortunately, it is not possible this year to meet friends and acquaintances from the world of tunnelling or to establish new contacts. I surely hope though that you enjoy the congress in a relaxed and casual atmosphere.

During the Swiss Tunnel Congress 2019 in Lucerne, the presidents of the DACH and BEFIPS nations (Austria – ITA Austria, Belgium – ABTUS, France – AFTES, Germany – DAUB, Italy – SIG, Portugal – CPT, Spain – AETOS, Switzerland – STS) met for an initial joint discussion to coordinate a closer cooperation between the Central European countries. These discussions were then continued subsequently in a very intensive and constructive manner. As a result, the representatives of those countries decided at their second joint meeting, on 17 October 2019 in Lisbon, to form the “European Underground & Tunnel Forum (EUTF)”. This forum will represent the interests of the European tunnel community as a whole and help to safeguard its position and impact within the European standard and guideline committees. This alliance puts European tunnel construction on a good footing and provides huge opportunities, especially for Swiss tunnel construction, for an even stronger international position. The formation of the EUTF is an example of the importance of congresses such as the STC. They make it easy to exchange views across all national borders. These are just some of the reasons why STC is one of the leading conferences in Europe and should be considered the event of the year by all those in the tunnel construction industry.

zu den führenden Kongressen in Europa und sollte im Kalender eines jeden Tunnelbauers entsprechend vermerkt sein.

Der Titel des diesjährigen Swiss Tunnel Kolloquiums lautet «Innovationen in der Bauausführung von Tunneln». Felix Amberg, Gewinner des STUVA-Preises 2019 für bemerkenswerte Innovationen auf dem Gebiet des unterirdischen Bauens, wird Sie mit dem Titel «Entwicklung im Untertagbau» in dieses spannende Thema einführen. In den darauf folgenden Referaten erhalten Sie detaillierte Informationen über die roboterunterstützte Tübbingfertigung, Innovationen in den Bereichen Logistik, Bohr- und Messtechnik bei der Vereisung sowie aktuelle Beispiele der Digitalisierung/BIM in der Ausführung. Zudem wird Ihnen aufgezeigt, wie Innovationen aus dem Hochbau auf den Tunnelbau übertragen werden können. Abgerundet wird das Kolloquium mit einem Blick in das Innovationsmanagement im Bereich «Health-Care». Wie in den letzten Jahren schon wurde das Kolloquium in Zusammenarbeit mit den STS young member (STSym) organisiert. Die stetig steigenden Teilnehmerzahlen beim Kolloquium zeigen, dass wir auf dem richtigen Weg sind, und ermutigen uns, unsere jungen, ambitionierten Tunnelbauerinnen und Tunnelbauer auch weiterhin zu fördern.

In Zusammenarbeit mit dem STC Advisory Board ist es uns gelungen, für den Kongresstag ein interessantes Programm zusammenzustellen. Eine ausgewogene Palette an Schweizer und internationalen Tunnelbauprojekten, mehrheitlich mit Beteiligung von Schweizer Know-how, garantiert einen spannenden fachtechnischen Erfahrungsaustausch. Aktuell stehen in der Schweiz zahlreiche grosse Tunnelbauwerke in der Planung oder in der Bauausführung. Mit Referaten über die Tunnel Gotschna, Albula II, Bypass Luzern, LEB Lausanne, RBS Bern und Ligerz informieren wir Sie eindrücklich über den derzeitigen Stand dieser Projekte. Zudem erfahren Sie Neues über das FCC-Projekt am CERN. Europäische Grossprojekte wie die zweite S-Bahn-Stammstrecke in München, der Koralmtunnel, die High Capacity Railway Milano–Genova, Grand Paris und Mont-Cenis Tunnel bilden weitere Highlights.

Alle Referate des Kolloquiums und des Kongresses wurden, wie immer, im vorliegenden Tagungsband ausführlich festgehalten und eindrücklich illustriert. Die mittlerweile 19 Tagungsbände des Swiss Tunnel Congress bilden ein ausserordentliches Nachschlagewerk, welches in keiner Tunnelbauer-Bibliothek fehlen sollte. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Referenten für das Engagement und die Bereitschaft die Vorträge digital zu halten herzlich bedanken. Unseren treuen Sponsoren danke ich, dass sie den STC auch in dieser schwierigen Zeit unterstützen. Auch der STC Organisation danke ich, dass sie mit ihrem grossen Einsatz den ersten digitalen STC zum Leben erweckt haben.

Ich wünsche Ihnen interessante Stunden und anregende Diskussionen. Ich bin überzeugt, dass Ihnen der erste digitale STC auch wieder zahlreiche positive Impulse geben wird.

Ihr
Stefan Maurhofer, Präsident

The title of this year's Swiss Tunnel Colloquium is "Innovations in the Construction of Tunnels". Felix Amberg, winner of the 2019 STUVA Prize for exceptional innovations in the field of underground construction, will give you an insight into this exciting topic under the heading of "The Evolution of Underground Construction". In subsequent presentations, you will be given detailed information about the use of robots in tubbing segment production, innovations in the fields of logistics and drilling and measurement technology in frozen ground, and current examples of digitisation/BIM in operation. You will also be shown how innovations from the field of building construction can be used in tunnel construction. The colloquium will be rounded off with a look at innovation management within the healthcare sector. As in previous years, the colloquium has been organised in partnership with the STS young members (STSym). The fact that the number of attendees at the colloquium is steadily rising shows that we're on the right track and gives us the motivation to continue encouraging our ambitious young tunnellers.

In partnership with the STC Advisory Board, we have managed to put together an interesting programme for the congress day. A balanced selection of both Swiss and international tunnel construction projects, the majority of which relied on Swiss expertise, guarantees an exciting exchange of technical experience. Switzerland currently has numerous large tunnel projects in the design phase or under construction. During the presentations on the Gotschna, Albula II, Bypass Luzern, LEB Lausanne, RBS Bern and Ligerz tunnels, we will provide you with impressive information about the current status of all these projects. You will also find out the latest about the FCC project at CERN. Other highlights will include major European projects such as the double-track commuter rail tunnel ("zweite S-Bahn Stammstrecke") in Munich, the Koralm Tunnel, the Milan–Genoa High Capacity Railway, the Grand Paris and the Mont-Cenis Tunnel.

As always, all the presentations held during the colloquium and the congress have been collected and documented in detail in these conference proceedings and accompanied by impressive illustrations. The various editions of the Swiss Tunnel Congress conference proceedings, which now number 19 in total, together make up an extraordinary reference work, which should take pride of place in every tunnellers construction library. I hope that you will find these conference proceedings a stimulating read.

I would like to take the opportunity to thank our speakers for their commitment and willingness to record their speech digitally. I would also like to cordially thank our loyal sponsors for supporting STC in these hard and difficult times. Finally, I would like to thank the STC organisation team for their big effort to bring the first ever digital STC to life.

I hope that you find the sessions interesting and that you have thought-provoking discussions. Ultimately, I'm confident that the first ever digital STC will again be a great source of inspiration for you.

Yours,
Stefan Maurhofer, President

Hauptsponsoren • Main Sponsors



AFRY Schweiz AG, Zürich



Emch+Berger Gruppe, Bern



Amberg Engineering AG
Amberg Loglay AG
Amberg Technologies AG
VersuchsStollen Hagerbach AG



Frutiger AG, Thun



Avesco AG, Langenthal



Gähler und Partner AG,
Ennetbaden



B+S AG, Bern



Gasser Felstechnik AG,
Lungern



BASF Schweiz AG,
Holderbank



Heitkamp Construction
Swiss GmbH, Dierikon



Basler & Hofmann AG, Zürich



Herrenknecht AG,
Schwanau (DE)



Belloli SA, Grono
Rowa Tunnelling Logistics AG,
Wangen SZ



Holcim (Schweiz) AG, Zürich



BG Ingénieurs Conseils SA
BG Ingenieure und Berater AG,
Lausanne



ILF Beratende Ingenieure AG,
Zürich

Sponsoren • Sponsors



Implenia Schweiz AG,
Wallisellen



Marti Tunnel AG, Moosseedorf



Infra Tunnel SA, Marin



PORR Suisse AG, Altdorf



IM Maggia Engineering AG,
Locarno
IUB Engineering AG, Bern



Renzo Tarchini Cantieri &
Contratti SA, Lugano



Lombardi AG, Giubiasco,
Luzern, Fribourg



SABAG Biel/Bienne Stahlcenter



Marti Technik AG, Moosseedorf



Walo Bertschinger AG,
Dietikon 1

Co-Sponsoren • Co-Sponsors

A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG, Basel
ACO Passavant AG, Netstal
AGIR Aggregat AG, Affoltern am Albis
Bekaert (Schweiz) AG, Baden
Doka Schweiz AG, Niederhasli
EBP Schweiz AG, Zürich
GIPO AG, Seedorf
JAUSLIN STEBLER AG, Muttenz

Liebherr Baumaschinen AG, Reiden
Locher Ingenieure AG, Zürich
MAPEI SUISSE SA, Sorens
MC-Bauchemie AG, Dintikon
MEVA Schalungs-Systeme AG, Seon
Pini Swiss Engineers SA, Zürich
Promat AG, Münchwilen
Robert Aebi AG, Regensdorf

Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Aarau
Sika Schweiz AG, Zürich
Société Suisse des Explosifs (SSE), Brig
Stucky SA, Renens et Gruner AG, Basel



Tunnel verbinden die Schweiz Bahn-Infrastruktur der SBB als Rückgrat

Andreas Brunner, Dipl. Ingenieur ETH, Leiter Ausbau- und Erneuerungsprojekte SBB, Mitglied der Geschäftsleitung SBB Infrastruktur, Bern/CH

Tunnel verbinden die Schweiz

Bahn-Infrastruktur der SBB als Rückgrat

Damit die 1,25 Millionen Reisenden und 205 000 Tonnen Güter jeden Tag pünktlich an ihrem Ziel ankommen, unterhalten die Schweizerische Bundesbahnen (SBB) ein über 3000 Kilometer langes Schienennetz mit 282 Eisenbahntunneln. Damit verbinden wir die Schweiz und ihre Regionen. Der dichte Fahrplan sowie das steigende Bauvolumen stellen die SBB vor die Herausforderung, Fahren und Bauen in Einklang zu bringen.

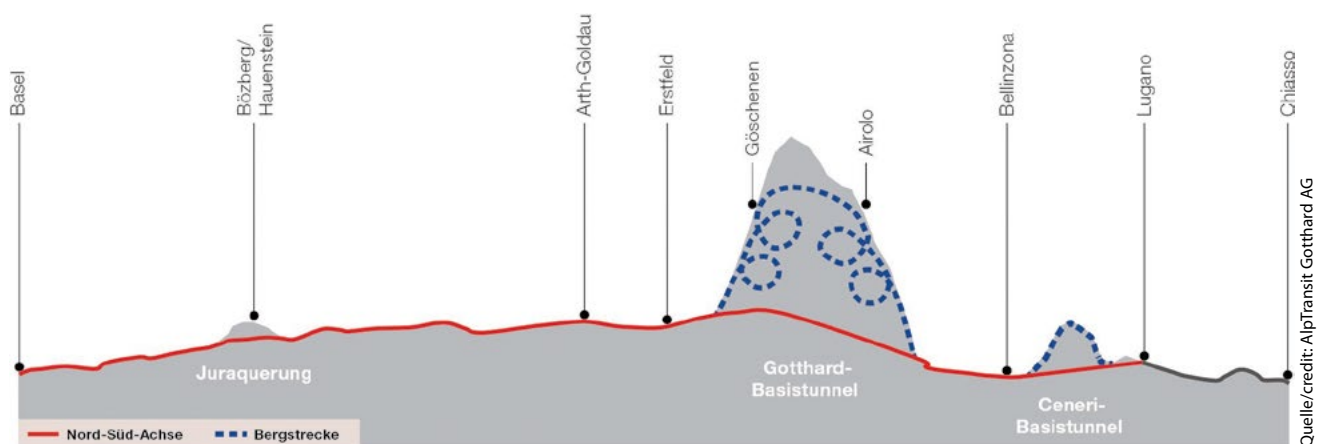
Connecting Switzerland with Tunnels

SBB Rail Infrastructure Is the Backbone of Swiss Public Transport

Swiss Federal Railways (SBB) maintains a rail network over 3,000 kilometres in length with 282 railway tunnels, transporting 1.25 million passengers and 205,000 tonnes of freight to their destination on time every day. This is how we connect Switzerland and all of its cantons. SBB is faced with the challenge of reconciling operations and construction work in the midst of a dense timetable and an increasing amount of construction projects.

Wer im 19. Jahrhundert von Luzern nach Mailand reiste, nahm dafür in Luzern das Dampfschiff nach Flüelen und von dort die Postkutsche über den Gotthardpass. Dort übernachtete er, bevor er am nächsten Tag mit Postkutsche und Zug nach Mailand weiterreiste. Die Übernachtung nicht eingerechnet, dauerte die Reise über 30 Stunden. Durch den Gotthardtunnel, der 1882 eröffnet wurde, verkürzte sich die Reisezeit auf 10 Stunden. Bis vor Kurzem benötigte man für die Strecke Luzern–Mailand immer noch rund 4 Stunden. Heute ist man von Luzern in nur noch 3,5 Stunden in Mailand. Und ab Ende des Jahres wird sich die Reisezeit dank dem Ceneri-Basistunnel noch mal um 10 Minuten verkürzen.

To reach Milan from Lucerne in the 19th century, travellers would first take the steamship to Flüelen in Lucerne and then travel over the Gotthard Pass by stagecoach. A night would then be spent there before the onward journey with stagecoach or train to Milan. The entire trip took 30 hours, not including the overnight stay. The opening of the Gotthard tunnel in 1882 shortened the journey time to 10 hours. Until recently, it still took around 4 hours to travel between Lucerne and Milan. Today the journey only takes 3.5 hours to complete. The opening of the Ceneri Base Tunnel by the end of 2020 will lead to an additional ten-minute reduction in the journey time. We have almost reached our goal of achiev-



1 Zwischen Basel und Lugano wird die Nord-Süd-Achse bald frei von Gefälle
The new flat north-south route between Basel and Lugano

Les tunnels connectent la Suisse

L'infrastructure ferroviaire des CFF, véritable colonne vertébrale

Le réseau ferré des CFF constitue la colonne vertébrale du transport public en Suisse. Nos 282 tunnels ferroviaires sont aujourd'hui en bon état. Pour qu'ils le restent, les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) investissent massivement dans des projets de maintien de la qualité et d'entretien des tunnels. En outre, de nombreux travaux d'extension et de construction sont prévus. Afin de trouver le juste équilibre entre exploitation et construction, les CFF ont besoin de partenaires solides dans le secteur de la construction, notamment pour l'avenir. Il faut donc être disposé à développer de façon conjointe des solutions durables, innovantes et anticipatives.

Wir sind heute kurz vor dem Ziel, dass die Nord-Süd-Verbindung fast frei von Gefälle befahrbar ist, als ob es keine Berge geben würde.

Das Beispiel zeigt: Ein gutes Bahnnetz ist das Rückgrat des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz. Damit die 1,25 Millionen Reisenden und 205 000 Tonnen Güter jeden Tag pünktlich an ihrem Ziel ankommen, unterhält die SBB ein über 3000 Kilometer langes Schienennetz und unter anderem 282 Eisenbahntunnel (Gesamtobjekte). Schon heute ist das Schweizer Schienennetz eines der meistbefahrenen der Welt. Und die Anzahl der Reisenden und die Menge an transportierten Gütern nehmen laufend zu. Gemäss Prognosen werden bis 2040 knapp zwei Millionen Menschen pro Tag mit der Bahn fahren. Wir von der SBB bauen im Auftrag des Bundes. Mit unserer Infrastruktur wie den Tunneln leisten wir einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit und zur Lebensqualität in der Schweiz und in ihren Regionen.

1 Zahlen – Daten – Fakten

TUNNEL-PORTFOLIO DER SBB (STAND ENDE 2019)

Anzahl (Gesamtobjekte)
282

Tunnellänge gesamt
~383 km

Ältester Tunnel (Inbetriebnahme)
Tunnels du Mormont, 1854

Neuster Tunnel (Inbetriebnahme)
Cornavin–Eaux-Vives–Annemasse (CEVA), 2020

Kürzester Tunnel
Tunnel de Moutier III: 7 m

Le gallerie uniscono la Svizzera

L'infrastruttura ferroviaria delle FFS quale spina dorsale

La rete ferroviaria delle FFS è la spina dorsale del trasporto pubblico svizzero. Le nostre 282 gallerie ferroviarie sono oggi in buone condizioni. Per fare in modo che rimangano in questo stato, le Ferrovie Federali Svizzere (FFS) investono molto in progetti di risanamento e manutenzione delle gallerie. Inoltre, sono in programma numerose misure di potenziamento e nuove costruzioni. Per poter mantenere il giusto equilibrio tra circolazione ferroviaria e lavori di costruzione, le FFS avranno bisogno anche in futuro di forti partner nel settore edile. Sono necessarie soluzioni sostenibili, innovative e lungimiranti, unite alla disponibilità a sviluppare queste soluzioni in comune.

ing a flat route between northern and southern Switzerland, finally overcoming the geographical obstacles presented by the mountains.

As the example shows: a strong rail network is the backbone of public transport in Switzerland. SBB maintains a rail network over 3,000 kilometres in length with, amongst other things, 282 railway tunnels (total amount of tunnels), transporting 1.25 million passengers and 205,000 tonnes of freight to their destination on time every day. The Swiss rail network is one of the busiest in the world. The number of passengers and the amount of goods transported is ever-increasing. Forecasts predict that by 2040 almost two million people will travel by train every day. SBB is constructing rail networks on behalf of the federal government. SBB infrastructure, such as our tunnels, makes a considerable contribution to competitiveness and quality of life in Switzerland and its cantons.

1 Numbers – Data – Facts

SBB TUNNEL PORTFOLIO (STATUS AS OF THE END OF 2019)

Number (total amount of tunnels)
282

Railway tunnels: total length
~383 km

Oldest tunnel (commissioning)
Tunnels du Mormont, 1854

Newest tunnel (commissioning)
Cornavin–Eaux-Vives–Annemasse (CEVA), 2020

Shortest tunnel
Tunnel de Moutier III: 7 m

TUNNEL-PORTFOLIO DER SBB (STAND ENDE 2019)
Längster Tunnel Gotthard-Basistunnel: 2 × 57 km (ohne Sondertunnel)
Wiederbeschaffungswert* 15 640 Millionen Schweizer Franken
Zustandsmittelwert 2019 Ist* 2,0 (gut)
Durchschnittsalter* 60,0 Jahre
Gesamtnutzungsdauer (Durchschnitt)* 130,3 Jahre
* Inkl. Sondertunnel, gewichtet mit Wiederbeschaffungswert

SBB TUNNEL PORTFOLIO (STATUS AS OF THE END OF 2019)
Longest tunnel Gotthard Base Tunnel: 2 × 57 km (not including service tunnels)
Replacement costs* 15,640 million Swiss francs
Current average condition for 2019* 2.0 (good)
Average age* 60.0 years
Total service life (average)* 130.3 years
* incl. service tunnels, weighted by the replacement costs

Quelle/credit: SBB I-NAT-KBN-IB

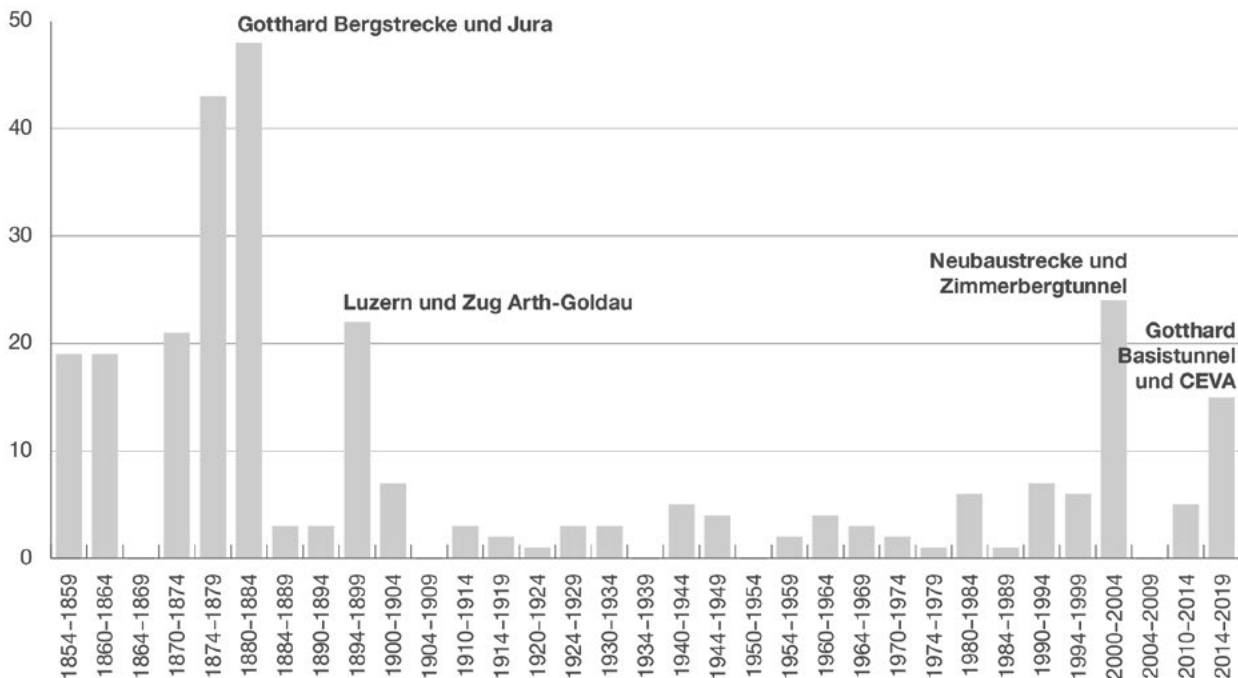
Tabelle 1 Zahlen und Fakten zur SBB-Tunnelinfrastruktur

Table 1 Facts and figures on SBB tunnel infrastructure



Quelle/credit: SBB I-NAT-KBN-IB

2 Tunnel-Portfolio der SBB (Stand Ende 2019)
SBB Tunnel Portfolio (status as of the end of 2019)



Quelle/credit: SBB I-NAT-KBN-IB

3 Anzahl Tunnel nach Inbetriebnahmehjahr
Number of tunnels by year of opening

2 Rückblick der letzten Jahre

Die SBB hat in den letzten Jahren zahlreiche Tunnelprojekte erfolgreich abgeschlossen. Eine Auswahl:

Annemace–Cornavin (CEVA): Inbetriebnahme 2019

CEVA ist die Zugverbindung nach Genf und in die Agglomeration, welche Ende 2019 eröffnet wurde. Durch diese Verbindung entsteht ein schweizerisch-französisches Bahnnetz. Die Strecke verläuft mehrheitlich unterirdisch, was den Bau von zwei Tunneln und mehreren Tagbautunneln erforderlich machte.

Sanierung Axentunnel: 2017–2020

Im Rahmen der Instandstellung wurden zwischen Brunnen und Flüelen insgesamt neun Tunnel mit einer Länge von insgesamt 5380 m saniert. Zudem wurde der Morschach-Tunnel für den 4-m-Korridor ausgebaut. Damit wird die gesamte Axenstrecke 4-m-tauglich.

Modernisierung Simplontunnel: 2012–2015

Noch vor dem Zugbrand (2011) war geplant, den Simplontunnel umfassend zu sanieren und die Tunnelsicherheit zu erhöhen (Brandnotbeleuchtung, Einbau der Selbstrettung). Zudem wurde die Entwässerung saniert, die Stromversorgung umgerüstet und eine neue Tunnelfunkanlage eingebaut.

Durchmesserlinie Zürich: 2007–2015

Die Durchmesserlinie entlastet die Stadt Zürich mit Zusatzgleisen von Altstetten über den Hauptbahnhof und den neuen, etwa 4,8 km langen Weinbergtunnel bis nach Oerlikon. Der Aushub wurde zur Renaturierung einer Kiesgrube in Wilchingen SH benutzt.

2 Summary of Recent Years

SBB has successfully completed numerous tunnel projects in recent years. For example:

Cornavin–Eaux-Vives–Annemasse (CEVA): Opened in 2019

CEVA is the rail line connecting Geneva and its suburban areas, which was opened at the end of 2019. CEVA connects the Swiss and French networks. The majority of the rail line was built underground, which required the construction of two tunnels and several cut-and-cover tunnels.

Renovation of the Axen Tunnels: 2017–2020

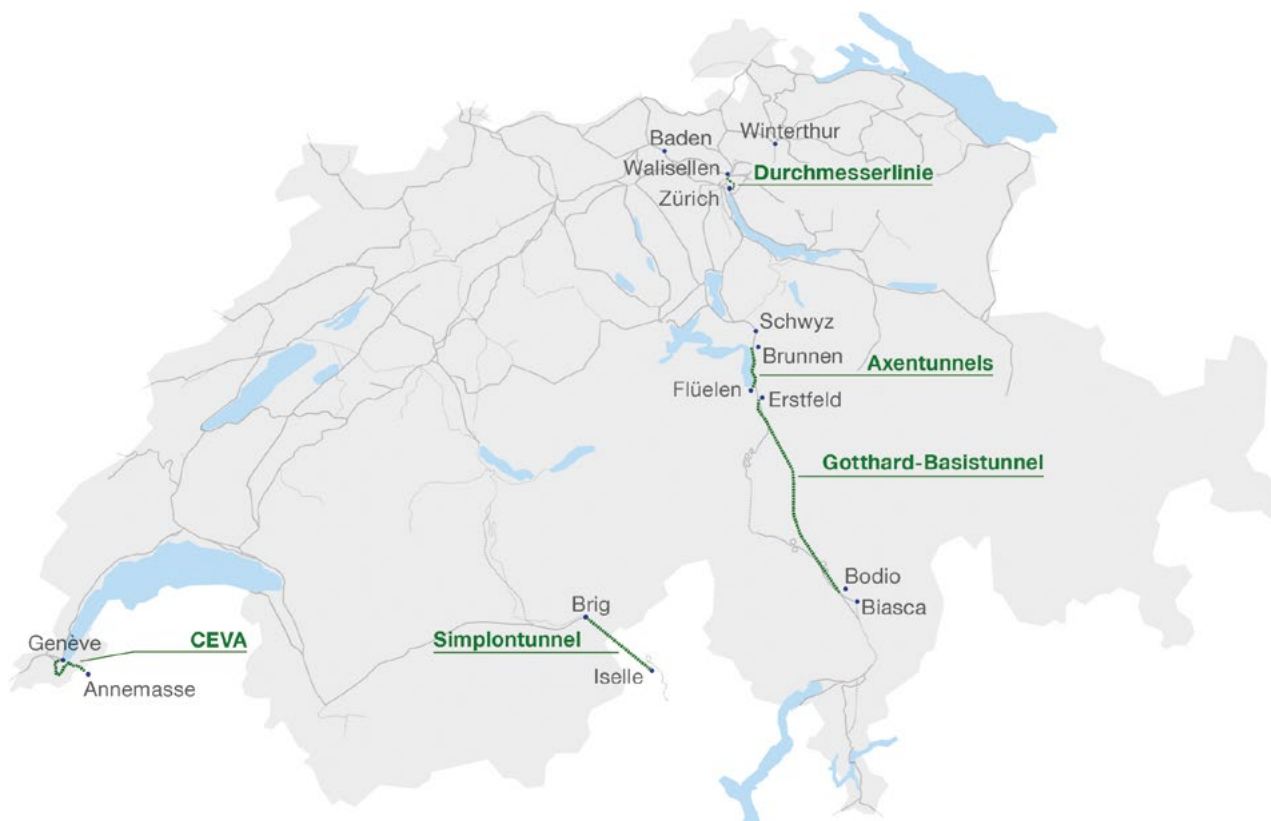
As part of the renovation process, a total of nine tunnels with a total length of 5,380 metres were redeveloped between Brunnen and Flüelen. The Morschach tunnel was modified to facilitate the four-metre corridor height. The entire Axen route is now suitable for the transportation of four-metre-high loads.

Modernisation of the Simplon Tunnel: 2012–2015

Extensive renovations for the Simplon tunnel and increasing tunnel safety (emergency lighting, installation of the self-rescue system) were planned prior to the train fire in 2011. The drainage system was upgraded, the power supply was converted and a new tunnel radio system was installed.

Zurich Cross-City Link: 2007–2015

The cross-city line is relieving the city of Zurich by adding supplementary tracks from Altstetten via the main railway station and the new, approximately 4.8-kilometre-long Weinberg tunnel all the way to Oerlikon. The excavated material was used to renature a former gravel pit in Wilchingen, Schaffhausen.



Quelle/credit: SBB Infrastruktur Projekte

4 Abgeschlossene Projekte der SBB (Auswahl)
Completed SBB projects (selection)

Gotthard-Basistunnel: 1999–2016

Der Gotthard-Basistunnel (GBT) ist mit 57 Kilometern der längste Eisenbahntunnel der Welt und bildet das Herzstück der neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT). Bauherrin des Tunnels ist die AlpTransit Gotthard AG, eine Tochtergesellschaft der SBB. Mit dem Ceneri-Basistunnel und dem 4-m-Korridor steigt die Wettbewerbsfähigkeit auf der Nord-Süd-Achse für die Schiene deutlich.

Gotthard Base Tunnel: 1999–2016

With a length of 57 kilometres, the Gotthard Base Tunnel (GBT) is the longest railway tunnel in the world and the jewel in the crown of the New Rail Link through the Alps (NEAT). The SBB subsidiary AlpTransit Gotthard AG was tasked with constructing the tunnel. Competitiveness will significantly increase along the north–south rail links with the opening of the Ceneri Base Tunnel and the four-metre corridor.

3 Nachhaltig – auch im Tunnelbau

Infrastrukturbauten haben stets einen grossen langfristigen Einfluss auf die Landschaft. Als grösste Anbieterin nachhaltiger Mobilität in der Schweiz verpflichtet sich die SBB zu einer umfassenden Nachhaltigkeit – wirtschaftlich, ökologisch und sozial. Sie berücksichtigt Nachhaltigkeitskriterien konsequent entlang der ganzen Wertschöpfungskette – von der Beschaffung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung. Auch im Tunnelbau spielt Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle.

3 Sustainability in Tunnel Construction

Infrastructure projects always significantly impact the surrounding landscape in the long-term. As the largest provider of sustainable mobility in Switzerland, SBB is committed to comprehensive sustainability – on an economic, ecological and social level. SBB resolutely follows sustainability criteria along the entire supply chain – from procurement, production and use to waste. Sustainability also plays a crucial role in the construction of tunnels.

Für die Verankerung der Nachhaltigkeit in der Beschaffung wird die SBB mit EcoVadis zusammenarbeiten. Die internationale kollaborative Plattform bewertet die Nachhaltigkeitsleistung einer Firma und stellt entsprechende Corporate-Social-Responsibility-Ratings von Lieferanten bereit. Die SBB hat sich zum Ziel gesetzt, dass künftig mindestens alle Anbieter von Risikowarengruppen Mitglied von EcoVadis sind, und plant, die Mitgliedschaft künftig in ihren Ausschreibungen zu verankern. Dieses Bekenntnis zur Nachhaltigkeit kann nur erfolgreich sein, wenn die Tiefbaubranche ihrerseits bereit ist,

SBB is working with EcoVadis to promote sustainability in the procurement phase. EcoVadis is an international collaborative platform that rates business sustainability performance and provides corresponding corporate social responsibility ratings for supply chains. In the future, SBB intends to only work with EcoVadis members for the supply of high-risk product groups. Membership will also be a stipulation in invitations to tender. The successful implementation of this commitment to sustainability requires support from the civil engineering sector in partnership with SBB and measures to boost sustainability to the required level.

diese Bemühungen partnerschaftlich mitzutragen und der Nachhaltigkeit den Stellenwert einzuräumen, den sie verdient.

4 Woran wir heute und morgen arbeiten

Im Fahrplanjahr 2020 stehen einige wichtige Inbetriebnahmen an. Zudem starten einige spannende Projekte.

4.1 Laufende Projekte

Ceneri-Basistunnel (ATG)

Der Ceneri-Basistunnel ist der drittgrösste Tunnel der Schweiz. Er verbindet den nördlichen und den südlichen Teil des Kantons Tessins. Für den Güterverkehr bedeutet die Realisierung einen weiteren Schritt Richtung Flachbahn durch die Alpen. Für den Personenverkehr ermöglicht der Ceneri-Basistunnel ein attraktives S-Bahn-Netz zwischen den Städten Locarno, Lugano und Bellinzona. Bauherrin des Tunnels ist die AlpTransit Gotthard AG, eine Tochtergesellschaft der SBB.

Eppenbergtunnel: Vierspurausbau Olten–Aarau

Mit dem zweispurigen, 3114 m langen Eppenbergtunnel verdoppelt sich die Zahl der durchgängig befahrbaren Gleise zwischen Däniken und Wöschnau. Der Ausbruch des Tunnels erfolgte mit einer mobilen 100 m langen und 2400 t schweren Tunnelbohrmaschine.

4 Things We Are Working On Today and Tomorrow

2020 will mark a number of key opening ceremonies in the SBB timetable. Other exciting projects are also under way.

4.1 Current Projects

Ceneri Base Tunnel (ATG)

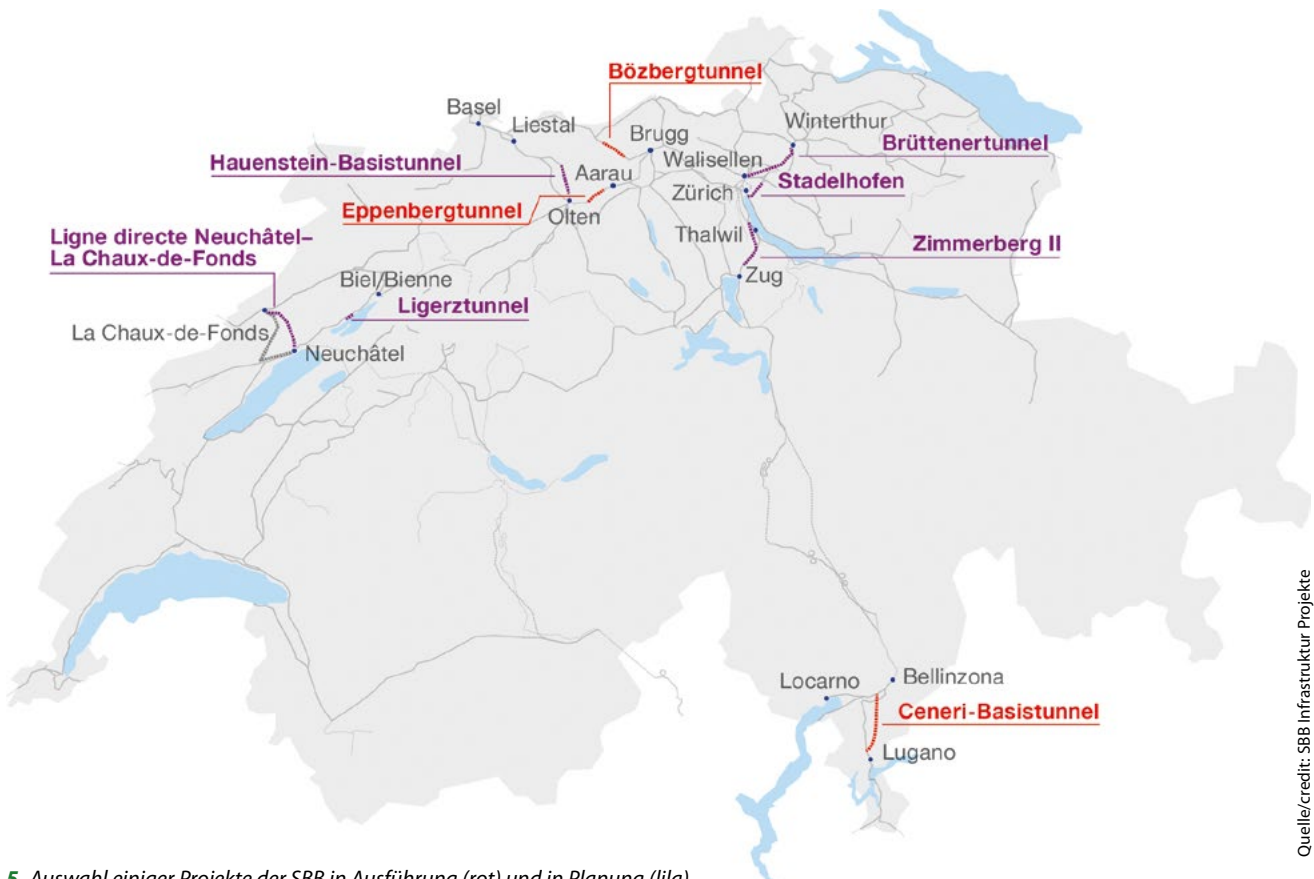
The Ceneri Base Tunnel is set to become the third-largest tunnel in Switzerland. The tunnel will connect the northern and southern parts of the canton of Ticino. The project marks a key development in the provision of a transalpine flat route for freight trains. The Ceneri Base Tunnel will provide an attractive rail network for passengers travelling between the cities of Locarno, Lugano and Bellinzona. The SBB subsidiary AlpTransit Gotthard AG was tasked with constructing the tunnel.

Eppenbergtunnel: Four-Track Expansion of the Olten–Aarau Route

The two-lane Eppenbergtunnel with a length of 3,114 m underwent a four-track expansion to double the number of continuously passable tracks between Däniken and Wöschnau. The tunnel was excavated with a mobile tunnel-boring machine measuring 100 metres in length and 2,400 tonnes in weight.

Four-metre Corridor for the New Bözberg Rail Tunnel

SBB was commissioned by the federal government to build a four-metre corridor on the Gotthard axis by 2020. A new



5 Auswahl einiger Projekte der SBB in Ausführung (rot) und in Planung (lila)
 Selection of some of the SBB projects currently in the construction (red) and planning (purple) phases

Quelle/credit: SBB Infrastruktur Projekte

Bözberg und 4-m-Korridor

Die SBB realisiert im Auftrag des Bundes bis 2020 einen 4-m-Korridor auf der Gotthard-Achse. Der bestehende zweispurige Bözbergtunnel ist nicht 4-m-tauglich, deshalb wurde parallel dazu eine neue, 2,7 km lange Doppelspur-Röhre gebaut.

4.2 Projekte morgen

Minimalsanierung Neuchâtel–La Chaux-de-Fonds: 2020–2021

Insbesondere die Gewölbe der diversen Tunnel auf der Einspurstrecke Neuchâtel–La Chaux-de-Fonds werden saniert und die Sicherheit verbessert bis zum Bau der Neubausstrecke «Ligne directe».

Ligerztunnel: 2021–2026

Die Bahnstrecke zwischen dem Weiler Poudeille-Schafis und dem Dorf Twann im Kanton Bern ist der letzte Einspurabschnitt auf der Linie Lausanne–Biel. Dieses Nadelöhr soll mit dem Neubau eines Doppelspurtunnels und der Anpassung der bestehenden Bahninfrastruktur behoben werden.

Sanierung Hauenstein-Basistunnel: 2023–2027

Die SBB will den Hauenstein-Basistunnel vollumfänglich sanieren. Die Nutzungsdauer der Gleisfahrbahn ist in den nächsten Jahren erreicht und der Unterhaltsbedarf wird ansteigen. Um einen sicheren, störungsfreien Bahnbetrieb über die nächsten 25 Jahre gewährleisten zu können, ist eine Grundinstandsetzung unumgänglich.

Stadelhofen: ab 2026 (frühestens)–2035

Der Bahnhof ist ein Nadelöhr im Netz der Zürcher S-Bahn. Bund und SBB planen den Bau eines vierten Gleises im Bahnhof sowie eines zweiten Riesbachtunnels bis Zürich-Tiefenbrunnen. Damit kann die Leistungsfähigkeit des Bahnhofs Zürich-Stadelhofen (Anzahl Züge, die den Bahnhof täglich befahren) um 50 % gesteigert werden.

Brüttenertunnel: ab 2026 (frühestens)–2035

Bund und SBB evaluieren den Bau eines 9 km langen Brüttenertunnels. Mit dieser zusätzlichen Doppelspur kann der Kapazitätsengpass zwischen Zürich und Winterthur behoben werden und auf der Strecke können rund 900 Züge pro Tag verkehren.

Zimmerberg II: ab 2027 (frühestens)–2035

Bund und SBB wollen den Engpass zwischen Zürich und Zug langfristig mit dem Zimmerberg-Basistunnel II zwischen Thalwil und Zug beheben. Im Auftrag des Bundes erstellt die SBB bis Ende 2020 dafür eine Konzeptstudie.

Ligne directe Neuchâtel–La Chaux-de-Fonds: 2028 (frühestens)–2035

Realisierung einer Direktverbindung zwischen Neuchâtel und La Chaux-de-Fonds. Verkürzung der Fahrzeit. Kernstück wird der Neubau eines Tunnels sein, der dann die bisherige Strecke weitgehend ersetzt. Diese wird danach für den Bahnbetrieb geschlossen.

double-track tunnel with a total length of 2.7 kilometres was built to ensure the existing Bözberg tunnel can facilitate the four-metre corridor.

4.2 Planned Projects

Minimal Renovation Works for the Rail Link between Neuchâtel and La Chaux-de-Fonds: 2020–2021

Prior to the construction of the direct railway link between Neuchâtel and La Chaux-de-Fonds, the vaults in the existing single-track line will be renovated and measures will be implemented to improve safety.

Ligerz Tunnel: 2021–2026

The railway line between the hamlet of Poudeille-Schafis and the village of Twann in the canton of Bern is the last single-track section of the Lausanne–Biel line. The construction of a new double-track tunnel and improvement of the existing railway infrastructure is intended to remove this bottleneck on the line.

Renovation of the Hauenstein Base Tunnel: 2023–2027

SBB intends to completely renovate the Hauenstein Base Tunnel. In the coming years, the service life of the track will expire and maintenance requirements are projected to increase. Complete renovation of the tunnel is crucial to ensure safe and fault-free rail operation for the next 25 years.

Stadelhofen: from 2026 (at the Earliest) to 2035

Stadelhofen station is a bottleneck for public transportation in Zurich. Plans are under way between the federal government and SBB to build a fourth track in the station and a second Riesbach tunnel to Zurich Tiefenbrunnen. This is projected to increase the capacity of Zurich-Stadelhofen station (number of trains that pass through the station daily) by 50 %.

Brüttenertunnel: from 2026 (at the Earliest) to 2035

The construction of a nine-kilometre-long Brütten tunnel is currently under review by the federal government and SBB. This additional double track would eliminate the capacity bottleneck between Zurich and Winterthur and enable around 900 trains to use this line on a daily basis.

Zimmerberg II: from 2027 (at the Earliest) to 2035

The federal government and SBB intend to eliminate the bottleneck between Zurich and Zug by constructing a second Zimmerberg Base Tunnel between Thalwil and Zug. SBB is currently preparing a conceptual study for the tunnel which will be submitted by the end of 2020 on behalf of the federal government.

Direct Line between Neuchâtel and La Chaux-de-Fonds: 2028 (at the Earliest) to 2035

Establishment of a direct rail link between Neuchâtel and La Chaux-de-Fonds with the intention of reducing the travel time. The centrepiece of this project will be the construction of a new tunnel to largely replace the existing line. The existing line will then no longer be used for railway operations.

Tiefbahnhof Genf: 2028 (frühestens)–2035

Der Bahnhof stösst deutlich an seine Kapazitätsgrenzen. Der Ausbau des Knotens Genf ist nötig, damit unsere Kunden von den zukünftigen Entwicklungen profitieren können. Dazu planen wir aktuell den Bau eines Tiefbahnhofs mit zwei Gleisen von/nach Lausanne und einem Mittelperron unter dem bestehenden Bahnhof.

4.3 Ausbau übermorgen

Bund und SBB überlegen bereits heute, was die Bedürfnisse unserer Kunden in Zukunft sein werden. 2040 werden fast zwei Millionen Menschen pro Tag mit der Bahn fahren – 50 % mehr als heute. Auch im Schienengüterverkehr steigt nach Prognosen des Bundes der Verkehr um rund 45 %. Über den nächsten Ausbauschritt wird das Parlament in einigen Jahren abstimmen. In der Botschaft zum Ausbauschritt 2035 wurden bereits Projekte für den nächsten Ausbauschritt vorgeschlagen.

Durchgangsbahnhof Luzern

Gegen 100 000 Menschen steigen werktags in Luzern ein, aus oder um. Die Infrastruktur des Bahnhofs hat indes die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit erreicht. Deswegen wollen der Bund, die Kantone Luzern, Nidwalden und Obwalden, die Stadt Luzern und die SBB das Bahnnetz und das Angebot mit dem Durchgangsbahnhof Luzern ausbauen.

Herzstück Basel

Das Projekt sieht eine unterirdische S-Bahn-Durchmesserlinie in der Stadt Basel zwischen den beiden dezentralen Knotenpunkten Bahnhof SBB und Badischer Bahnhof vor. Damit soll die Lücke im trinationalen S-Bahn-Netz der Region Basel geschlossen und Richtungswechsel sowie das Umsteigen in den beiden Bahnhöfen vermieden werden.

5 Herausforderung Unterhalt/Substanzerhalt

Wir haben ein sehr dichtes Netz: Rund 150 Züge verkehren pro Strecke pro Tag. Und wir haben einen Mischverkehr: Schnellzüge im Fernverkehr, langsamere Regionalzüge und Güterzüge. Diese müssen wir an den Baustellen vorbeibringen. Der dichte Fahrplan sowie das steigende Bauvolumen stellen die SBB vor die Herausforderung, Fahren und Bauen noch besser in Einklang zu bringen.

Pro Jahr investieren wir aktuell rund 2,2 Milliarden Schweizer Franken in den Substanzerhalt des gesamten SBB-Netzes: 1,5 Milliarden Schweizer Franken für die Erneuerung der Anlagen nach Ablauf ihrer Lebensdauer (z. B. Schienen wechseln), 730 Millionen Schweizer Franken für den Unterhalt während ihrer Lebensdauer (z. B. Schienen schleifen). Letztes Jahr entfielen davon für die Erneuerung und den Substanzerhalt 65 Millionen auf Tunnels.

Um das Bahnangebot für die Reisenden möglichst nicht zu beeinträchtigen, baut und unterhält die SBB ihr Netz primär unter laufendem Betrieb, sozusagen unter dem rollenden Rad. Dafür weicht die SBB auf Randstunden aus, was die ver-

Geneva Underground Station: 2028 (at the Earliest) to 2035

The current station has reached its capacity limits. Expansion of the Geneva transport hub is required to ensure our customers are able to benefit from future developments. We are currently planning the construction of an underground station with two tracks travelling to and from Lausanne and a central platform under the existing station.

4.3 Planned Future Expansions

Along with the federal government, SBB is already anticipating its customer's future needs. It's predicted that by 2040 almost two million people will travel by train every day – 50 % more than today. Federal government forecasts also predict that rail freight traffic will increase by around 45 %. Parliament is scheduled to vote on the next expansion step over the coming years. Projects for the next expansion step were proposed in the statement delivered on the 2035 strategic expansion programme.

Lucerne Through-Station

Every weekday, around 100,000 people board, alight or change trains in Lucerne. The infrastructure of the station has reached its capacity limit. The federal government, the cantons of Lucerne, Nidwalden and Obwalden, the city of Lucerne and the Swiss Federal Railways (SBB) consequently intend to expand the rail network and services with the Lucerne through-station.

The Jewel in Basel's Crown

This project proposes an underground cross-city link in the city of Basel between the two decentralised hubs: the SBB railway station and the Badischer Bahnhof. The line will close the gap in the trinational public transport network in the canton of Basel and avoid changes of direction and changing trains at the two stations.

5 Maintenance and Substance Preservation Challenges

SBB runs a very dense network: approximately 150 trains operate per route on a daily basis. We also facilitate mixed traffic: high-speed long-distance trains, slower regional trains and freight trains. These all need to safely travel through the construction sites. SBB is faced with the challenge of balancing travel and construction presented by a dense timetable and the increasing construction volume.

Around CHF 2.2 billion is funnelled into maintaining the entire SBB network every year: CHF 1.5 billion for the renewal of equipment once it reaches the end of its service life (e.g. changing tracks) and CHF 730 million for maintenance during its service life (e.g. grinding tracks). Last year, CHF 65 million went towards the renewal and substance preservation of tunnels.

In order to minimise rail disruptions for passengers as much as possible, SBB is primarily building and maintaining its network within the scope of normal operations while

fügbare Bauzeit einschränkt. Pro Bauschicht kann die SBB oft lediglich drei Stunden bauen. Dies aus dem Grund, dass nach Betriebsschluss erst die Gleise gesperrt, die Fahrleitung geerdet und das Material zur Baustelle transportiert werden muss. Morgens wird die Fahrleitung wieder eingeschaltet und das Gleis für den Betrieb freigegeben. Faktoren wie das Bauen im risikoreichen Starkstromumfeld und Zuschläge für Nacht- und Wochenendarbeiten erhöhen zudem die Kosten für den Unterhalt.

Damit die finanziellen Mittel effizienter eingesetzt werden können, setzt die SBB vermehrt auf längere Streckensperrungen. Dadurch können die Mitarbeitenden sechs Stunden arbeiten, was auch den Einsatz der Baumaschinen optimiert. Teilweise werden Strecken komplett während mehrerer Tage gesperrt, damit die Unterhaltsarbeiten im Bündel ausgeführt werden können – in sogenannten Clusterings. Damit baut die SBB produktiver und effizienter.

6 Wie wir morgen arbeiten

Die Investitionen der SBB ins Bahnnetz werden allein von 2020 bis 2022 um mehr als 13 % zunehmen. Wir stehen vor der Herausforderung, dass wir teilweise zu wenig eigene Ressourcen haben. Unser Ziel ist es deshalb, Bauprojekte effizient und mit möglichst wenig Eigenleistungen auszuführen. Angesichts des steigenden Bauvolumens und unserer knappen Ressourcen sind wir in Zukunft noch mehr auf starke Partner angewiesen.

6.1 Neues Vertragsmodell GU+

Um die Partnerschaft zwischen SBB und Unternehmen zu stärken, arbeiten wir bereits heute bei einigen Projekten mit dem neuen Vertragsmodell Generalunternehmer Plus (GU+). Erstmals haben wir dieses im Jahr 2015 beim Auftrag für den Tunnelneubau Bözberg erfolgreich durchgeführt. Thomas Zieger von der SBB hat dieses Modell letztes Jahr an diesem Kongress vorgestellt. Die Implenia Schweiz AG, die diesen Auftrag erhalten hat, ist bei diesem Bauprojekt verantwortlich für alle Leistungen von der Ausführungsplanung über die eigentlichen Bauleistungen des Tunnelvortriebs und der Rohbauarbeiten sowie den Einbau der Bahntechnik bis hin zur Übergabe des «schlüsselfertigen» Tunnels an die SBB Ende August 2020. Die Rolle des Unternehmers wandelt sich mit GU+ vom Ausführenden zum Gesamtdienstleister. Wir wollen weitere Projekte in dieser Form abwickeln. Wir brauchen dazu wiederum Partner: Planer, welche das neue Verständnis haben, die Rolle des Owner's Engineer umfassend wahrzunehmen. Und wir brauchen Unternehmer, welche innovativ sind und die Verantwortung in einem Gesamtleistungsmandat mit eigenem Planer mittragen und gemeinsam im Sinne der Projektoptimierung Potenziale ausschöpfen.

6.2 BIM verpflichtend ab 2025

Das Building Information Modeling (BIM) eröffnet für uns völlig neue Möglichkeiten in der Projektierung und Bauaus-

führung. To facilitate this, SBB is limiting construction projects to off-peak hours, which limits the available construction time. SBB is consequently often only able to build for three hours per shift. After the end of normal daily operations, the tracks must first be closed, the overhead line needs to be earthed and materials are transported to the construction site, all of which takes time. In the morning, the overhead line is switched on again and the track is ready for operation. Maintenance costs are also increased by factors such as construction in high-risk high-voltage environments and surcharges for night and weekend work.

To ensure the efficient use of funding, SBB intends to close lines for longer periods. This will enable employees to work for six hours and thus optimise the use of construction machinery. In some cases, lines will be completely closed for several days to enable maintenance work to be carried out in bundles – so-called clusterings. SBB is building more productively and efficiently than ever.

6 How We Will Work in the Future

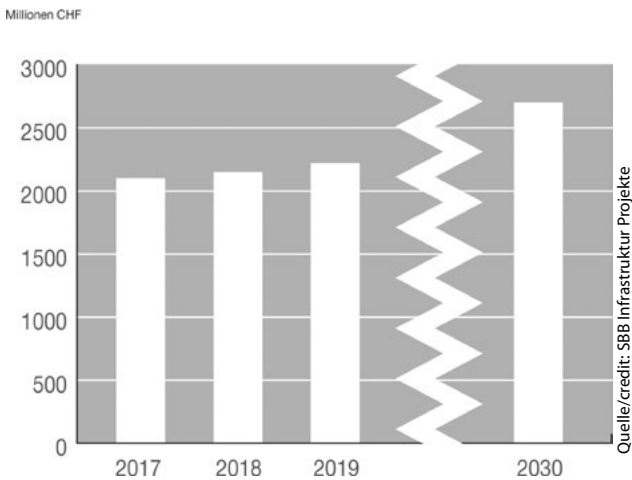
SBB's investment in the rail network will increase by over 13 % between 2020 and 2022 alone. We sometimes face the issue that we lack our own internal resources. We therefore aim to carry out future construction projects in an efficient manner with as little reliance on internal resources as possible. To increase our construction output and supplement our lack of resources, we intend to increase our dependence on strong partners in the future.

6.1 New Contract Model GU+

To strengthen partnerships between SBB and contractors, we have already implemented the new General Contractor Plus (GU+) contract model for a number of projects. We successfully used this model for the first time in 2015 for the contract to build the new Bözberg tunnel. This model was presented by Thomas Zieger from SBB at last year's congress. The winner of the contract, Implenia Schweiz AG, is responsible for all services related to this construction project, from the planning to the actual construction work for the tunnel drilling and the structural work, as well as the installation of the rail technology and the handover of the turnkey tunnel to SBB at the end of August 2020. With the GU+ contract model, the contractor is no longer the executor of the project, but the comprehensive service provider. We intend to use this contract form for future projects. To implement this, we need new partners: planners who are familiar with the role of an owner's engineer. We also need innovative contractors to share the responsibility in a comprehensive performance mandate with their own planners and jointly unleash potential for project optimisation.

6.2 BIM Compulsory as of 2025

Building Information Modelling (BIM) provides us with a breadth of new possibilities for project planning, construc-



6 Investitionsvolumen SBB Infrastruktur Projekte (Ausbau und Erneuerung inkl. Drittaufträgen)
Investment volume for SBB Infrastructure projects (expansion and renewal, including third-party contracts)

führung, aber auch im Anlagenmanagement. BIM ist nur ein Teil des Digitalisierungsbestrebens der SBB und quasi als i-Tüpfelchen davon zu verstehen. Eines der strategischen Ziele des BIM@SBB-Programms ist die Effizienzsteigerung. Damit verbunden wollen wir eine Kostenreduktion und eine Qualitätssteigerung im Planen, Bauen und Betreiben der Bahninfrastruktur und der Immobilien bewirken. Konkret streben wir innerhalb der Division Infrastruktur bei einem Investitionsvolumen von bis zu 3,5 Milliarden Schweizer Franken jährliche Kosteneinsparungen in dreistelliger Millionenhöhe an. Wir wollen die BIM-Methode bis 2025 für sämtliche Infrastrukturanlagen verpflichtend anwenden.

Aktuell sind wir daran, einige Bauvorhaben in BIM-Pilotprojekten abzuwickeln. Die ersten Erfahrungen sind sehr vielversprechend. BIM wird grossen Einfluss auf bekannte Organisationsformen haben: Die Zusammenarbeit zwischen Planer und Unternehmer wird sich verändern, der Austausch zwischen allen Baubeteiligten wird intensiver. Dies wird auch Auswirkungen haben auf die Beauftragung und das Vertragswesen im Verhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer.

7 Fazit

Das Schweizer Bahnnetz ist heute das Rückgrat des öffentlichen Verkehrs. Unsere 282 Tunnel sind ein wesentlicher Bestandteil davon. Das soll auch in Zukunft so bleiben.

Wir stehen vor grossen Herausforderungen: Wir werden unsere Projekte in Zukunft mit neuen technischen Methoden und in neuen Zusammenarbeitsmodellen ausführen. Wir sind zuversichtlich, dass wir nachhaltige, innovative und vorausschauende Lösungen finden und diese gemeinsam mit Partnern entwickeln können. Die SBB dankt allen Unternehmen für die bisherige gute und partnerschaftliche Zusammenarbeit.

tion and facility management. BIM only forms one component of SBB's overall digitisation efforts; it's the icing on the cake. One of the strategic goals of the BIM@SBB programme is to increase efficiency. We consequently want to reduce costs and increase quality for the planning, construction and operation of rail infrastructure and real estate. Within the infrastructure division, we aim to achieve triple-digit million annual cost savings on an investment volume of up to CHF 3.5 billion. We intend to make the BIM method mandatory for all infrastructure facilities by 2025.

We are currently carrying out a number of construction projects using BIM pilot projects. The first experiences have proven successful and promising. BIM will greatly influence currently used forms of organisation: the cooperation between planners and contractors will change and communication between all parties involved in the construction project will become much more intensive. This will also affect commissioning and contracting between SBB and its contractors.

7 Conclusion

The rail network is the backbone of public transport in Switzerland. Our 282 tunnels form an integral part of this. This will remain the case in the future.

We currently face major challenges: in the future, our projects will be carried out with state-of-the-art technical and cooperation models. We are confident that we will find sustainable, innovative and visionary solutions and develop these with our partners. SBB would like to take this opportunity to thank all of its contractors for the fruitful and cooperative collaborations we have enjoyed thus far.



7 Digitalisierung auf der SBB-Baustelle des Bözbergtunnels
Digitisation at the SBB construction site for the Bözberg tunnel

Quelle/credit: SBB



Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München

*Albert Wimmer, Dipl.-Geol. (Univ.),
Deutsche Bahn Netz AG, München/DE*

Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke soll die bestehende S-Bahn-Stammstrecke entlasten, im Störfall eine Ausweichmöglichkeit bieten und gleichzeitig die Einführung eines neuen Express-S-Bahn-Systems ermöglichen. Kernstück sind drei neue unterirdische Stationen, welche durch die neuen Tunnel verbunden werden. Die Gesamtkosten des Projekts betragen 3,8 Milliarden Euro, und es soll bis 2028 fertiggestellt werden.

Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route

Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich

The second S-Bahn core route is intended to relieve the load on the existing S-Bahn route, offer an alternative in the event of a failure and at the same time enable the introduction of a new express S-Bahn system. Key to the project are three new underground stations which will be connected by new tunnels. The total cost of the project will amount to 3.8 billion euros, and it is expected to be completed by 2028.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Die Metropolregion München ist eine dynamisch wachsende Wirtschaftsregion und eines der Top-Wachstumszentren in Deutschland. Die direkte Verbindung des Umlands mit der Münchner Innenstadt hat ganz wesentlich zur Dynamik der gesamten Region beigetragen. Die S-Bahn München befördert täglich bis zu 840 000 Fahrgäste und legt im Jahr über 20 Millionen Kilometer zurück. Sie ist damit eines der grössten S-Bahn-Systeme in Deutschland. Durch den Zuwachs der Bevölkerung in der Metropolregion München gerät die im Jahre 1972 zu den Olympischen Spielen eröffnete Stammstrecke, die für 250 000 Fahrgäste am Tag ausgelegt wurde, an ihre Kapazitätsgrenzen (Bild 1), insbesondere, da alle S-Bahnen die Münchner Innenstadt durch einen von Ost nach West verlaufenden Tunnel, die sogenannte Stammstrecke, unterqueren müssen. In der Hauptverkehrszeit fährt alle zwei Minuten eine S-Bahn durch die bestehende Stammstrecke.

Um dieses Nadelöhr zu beseitigen, wird auf rund zehn Kilometern zwischen den Bahnhöfen Laim im Westen und Leuchtenbergring im Osten eine neue, 2. Stammstrecke gebaut. Diese soll die bestehende Stammstrecke entlasten, im Störfall eine Ausweichmöglichkeit bieten und gleichzeitig die Einführung eines neuen Express-S-Bahn-Systems ermöglichen. Kernstück ist ein sieben Kilometer langer Tunnel, der den Hauptbahnhof und den Ostbahnhof miteinander ver-

1 Introduction

1.1 Background

The Munich Metropolitan Region is an economic area experiencing dynamic growth, and one of the top growth centres in Germany. The direct connection between Munich city centre and the surrounding countryside has significantly contributed to the dynamics of the entire region. Munich's S-Bahn carries up to 840,000 passengers a day and travels more than 20 million kilometres a year. It is one of the largest S-Bahn systems in Germany. Owing to the growth of the population in the Munich Metropolitan Region, the S-Bahn route that was opened in 1972 for the Olympic Games, designed for 250,000 passengers per day, is reaching its capacity limits (Fig. 1), particularly given that all S-Bahn trains have to pass under Munich city centre via a tunnel that runs from east to west, the "core route". During rush hour, an S-Bahn train passes through the existing core route every two minutes.

To eliminate this bottleneck, a new, second S-Bahn route of around ten kilometres will be constructed between Laim station in the west and Leuchtenbergring in the east. This is intended to relieve the load on the existing S-Bahn core route, offer an alternative in the event of a failure and enable the introduction of a new express S-Bahn system. The core element of this project is a seven-kilometre tunnel which will connect the central station ("Hauptbahnhof") to the east

Grand projet : 2^e tronçon principal du RER de Munich

Le 2^e tronçon principal du RER – construction d'un tunnel au cœur de Munich

Le 2^e tronçon principal du RER à Munich doit désencombrer le tronçon principal existant, offrir une solution d'évitement en cas d'incident et permettre le lancement d'un nouveau système de RER express. Au cœur du projet figurent trois nouvelles gares souterraines qui seront reliées par un tunnel réalisé mécaniquement. Pour les gares Hauptbahnhof et Marienhof, une partie du quai doit être réalisée en méthodes conventionnelles. Le coût global du projet s'élève à 3,8 milliards d'euros en tenant compte d'une réserve de 600 millions d'euros pour les risques. La fin des travaux est prévue pour 2028.

Il grande progetto della 2^a linea principale del treno suburbano di Monaco di Baviera

La 2^a linea principale del treno suburbano – costruzione di gallerie nel cuore di Monaco di Baviera

La 2^a linea principale del treno suburbano dovrebbe decongestionare la linea principale esistente, offrire una possibilità alternativa in caso di guasti e, allo stesso tempo, rendere possibile l'introduzione di un nuovo sistema di treno suburbano espresso. Il cuore del progetto è costituito da tre stazioni sotterranee, collegate da gallerie costruite a macchina. Presso la stazione centrale e la stazione di Marienhof, una parte della piattaforma sarà realizzata con la tecnica del calcestruzzo spruzzato. I costi totali del progetto saranno pari a 3,8 miliardi di euro, compresa una riserva a copertura dei rischi di 600 milioni di euro. La conclusione è prevista per il 2028.

bindet. Die Trasse verschwindet von Laim kommend kurz vor der Donnersbergerbrücke unter die Erde und taucht zwischen Ostbahnhof und Leuchtenbergring wieder an der Oberfläche auf. Neben den beiden Umsteigestationen Laim und Leuchtenbergring, die unter laufendem Betrieb umgebaut werden, werden die drei neuen unterirdischen Stationen Hauptbahnhof, Marienhof und Ostbahnhof komplett neu gebaut (Bild 2 und Bild 3).

1.2 Projekthistorie und Optimierung

Seit den 1990er-Jahren herrscht bei Politik, Verwaltung und Bahn darüber Einigkeit, dass die vorhandene Stammstrecke in München entlastet werden muss.

Die Verwirklichung des Projektes zog sich jedoch über mehr als eineinhalb Jahrzehnte hin – vom Beginn der ersten vom Freistaat Bayern in Auftrag gegebenen Studie bis zur Unterzeichnung der Finanzierungsvereinbarung im Jahr 2016. Damals wurde schliesslich die Durchfinanzierung beschlossen, sodass der offizielle Baubeginn im April 2017 stattfinden konnte.

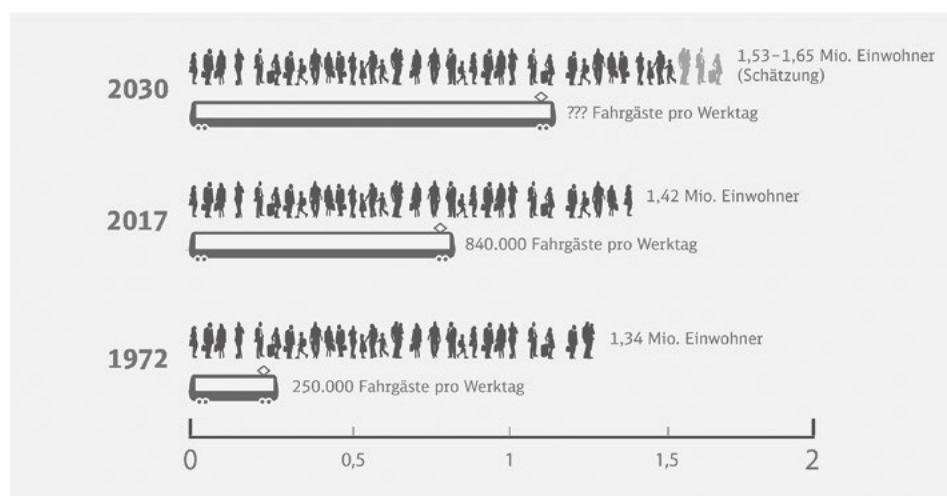
In diesem Zeitraum hat der Grossraum München hinsichtlich Bevölkerungswachstum und wirtschaftlicher Entwicklung eine zusätzliche, nicht prognostizierte Dyna-

station ("Ostbahnhof"). Travelling away from Laim, the line will disappear underground shortly before Donnersbergerbrücke, and re-emerge between Ostbahnhof and Leuchtenbergring. In addition to the two interchange stations Laim and Leuchtenbergring, which will be rebuilt under normal operation, the three new underground stations Hauptbahnhof, Marienhof and Ostbahnhof will be completely rebuilt (Fig. 2 and 3).

1.2 Project History and Optimisation

Since the 1990s there has been a consensus among politicians, administrators and railway managers that Munich's current core route is in need of relief.

München: Bevölkerungszahl und Nutzung des ÖPNV



Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/augensturm

1 München: Bevölkerungsentwicklung und Nutzung der S-Bahn-Stammstrecke
Munich: Population development and use of the S-Bahn main route

Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München •

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München



Quelle/credit: Copyright: DB Netz AG

2 Trassenverlauf der 2. S-Bahn-Stammstrecke
Route of the second core S-Bahn line

mik entwickelt, sodass die geschaffenen Planungsgrundlagen nochmals auf den Prüfstand gestellt und optimiert wurden, um die künftig benötigten Kapazitäten bereitzustellen.

Die Optimierungen umfassen im Wesentlichen folgende Bereiche:

- die Verlagerung der Station Ostbahnhof vom Orleansplatz auf die Seite der Friedenstrasse und damit eine optimale Anbindung des neu entstehenden Werksviertels (mit neuem Münchner Konzerthaus);
- am Münchner Hauptbahnhof die gemeinsame Abwicklung des Neubaus der S-Bahn-Station der 2. Stammstrecke, eines Vorhaltebauwerks für die künftige Linie U9 sowie des Neubaus des Empfangsgebäudes als einer integrierten Gesamtlösung (Bild 4);
- ein neues Flucht- und Rettungskonzept mit der Errichtung eines Erkundungs- und Rettungstunnels mittig zwischen den Verkehrstunnelröhren; dadurch können fünf Rettungsschächte in Innenstadtlage entfallen, die während der Bauphase für massive Beeinträchtigungen gesorgt hätten.

Für die optimierte Planung im Osten ist ein neues Planfeststellungsverfahren notwendig. Die Unterlagen dafür wurden im November 2019 beim Eisenbahnbundesamt (EBA) eingereicht. Durch das damit entstehende Zeitfenster von voraussichtlich rund zwei Jahren kann das neue elektronische Stellwerk München Ost bereits vorgezogen in Betrieb gehen und der bestehenden Stammstrecke und damit der Stabilität des Systems zugutekommen.

1.3 Projektpartner und Finanzierung

Grundlage für das Projekt 2. S-Bahn-Stammstrecke ist die im Oktober 2016 vom Bund und vom Freistaat Bayern beschlossene gemeinsame Finanzierung. Im Interesse einer zügigen Realisierung der 2. Stammstrecke finanziert der Freistaat Bayern fehlende Bundesanteile vor. Zugrunde lagen die von der Deutschen Bahn für die 2. Stammstrecke ermittelten Ge-

Nevertheless, it took more than a decade and a half to make the project a reality – from the start of the first study commissioned by the Free State of Bavaria to signature of the financing agreement in 2016. In that moment, full financing was finally agreed so that construction could officially begin in April 2017.

Over this time, the greater Munich area has developed additional, unpredicted dynamics with regard to population growth and economic development, so the original planning basis was put to the test again and optimised in order to meet the capacities required for the future.

The optimisations essentially include the following:

- relocation of Ostbahnhof station from Orleansplatz to the Friedenstrasse side, and therefore optimal connection to the newly emerging factory district (with the new Munich concert hall);
- joint construction of the new S-Bahn station for the second core route at Munich Hauptbahnhof, a temporary building for the future U9 line and construction of the new station building as an integrated overall solution (Fig. 4);
- a new emergency and rescue concept with the construction of an exploration and rescue tunnel halfway between the traffic tunnels; this means that five rescue shafts in the city centre, which would have caused major disruption during the construction phase, are no longer required.

A new planning approval procedure is required for optimised planning in the east. The documents for this were submitted to the Federal Railway Authority (EBA) in November 2019. Owing to the anticipated time frame of around two years, the new electronic signal box at Munich East can be brought into operation early, benefiting the existing core route and therefore the stability of the system.

1.3 Project Partners and Financing

The basis for the project to construct Munich's second S-Bahn core route is the joint financing from the federal government

Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route •

Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich

samtkosten von 3,849 Milliarden Euro einschliesslich eines Risikopuffers von rund 600 Millionen Euro (3,176 Milliarden Euro ohne Risikopuffer). Zusätzlich zur Finanzierung von Bund und Freistaat treten Eigenmittel der Deutschen Bahn und Mittel der Landeshauptstadt München (Bild 5).

Wesentliche Projektpartner sind:

- DB Netz AG als zukünftiger Eigentümer der Anlage (ausser den Bahnhöfen und der Anlagen zur Stromversorgung) und zudem zuständig für das Projektmanagement,
- DB Station & Service AG als zukünftiger Eigentümer der Stationen,
- DB Energie GmbH als zukünftiger Eigentümer der Anlagen zur Bahnstromversorgung,
- Freistaat Bayern als Auftraggeber für das Projekt,
- Bundesrepublik Deutschland als Projektpartner der Bahn und des Freistaats insbesondere bezüglich der Finanzierung,
- Landeshauptstadt München als Finanzierungspartner.

2 Projektbeschreibung

2.1 Grundlagen

Die Münchner Innenstadt ist im Untergrund von vielen Leitungen, Kanälen und Röhren durchzogen. So führen nicht nur die Versorgungsleitungen für Fernwärme und -kälte, Strom und die Kanalisation unter den Gebäuden hindurch, sondern auch die vorhandene Stammstrecke und die U-Bahn-Röhren verlaufen im Münchner Untergrund. Dies bedeutet für den Bau der 2. Stammstrecke, dass die Tunnel in sicherem Abstand von den vorhandenen Röhren eine Ebene tiefer geführt werden müssen – die neuen Stationen entstehen in einer Tiefe von circa 35 bis 40 m (Bild 6).

2.2 Geologie und Hydrogeologie

Die Tunnel der 2. S-Bahn-Stammstrecke werden überwiegend in den Gesteinen der Oberen Süsswassermolasse (OSM) errichtet. Die OSM besteht im Projektraum in der Regel aus einer Wechsellaagerung von mergeligen Ton-Schluffen und Sanden, wobei bereichsweise Verfestigungen zu Sandsteinen und Mergelstein bzw. Ton-Schluffstein vorkommen. Daneben werden bei den Portalbereichen und westlich und östlich der Station Ostbahnhof die die OSM überlagernden quartären eiszeitlichen Kiese durchfahren.

Wesentlich für den Tunnelbau sind die Grundwasserhältnisse in den tertiären Lockergesteinsschichten. Die tertiären Sande werden unterschieden nach ihren

and the Free State of Bavaria. In the interest of prompt implementation of the second core route, the Free State of Bavaria is pre-financing the outstanding contribution from the federal government. This is based on the total costs for the second core route of 3.849 billion euros including a risk buffer of some 600 million euros (3.176 billion euros without the risk buffer) calculated by Deutsche Bahn. In addition to the financing from the federal government and the Free State of Bavaria, Deutsche Bahn has its own funds, and there are funds from the state capital of Munich (Fig. 5).

The main project partners are:

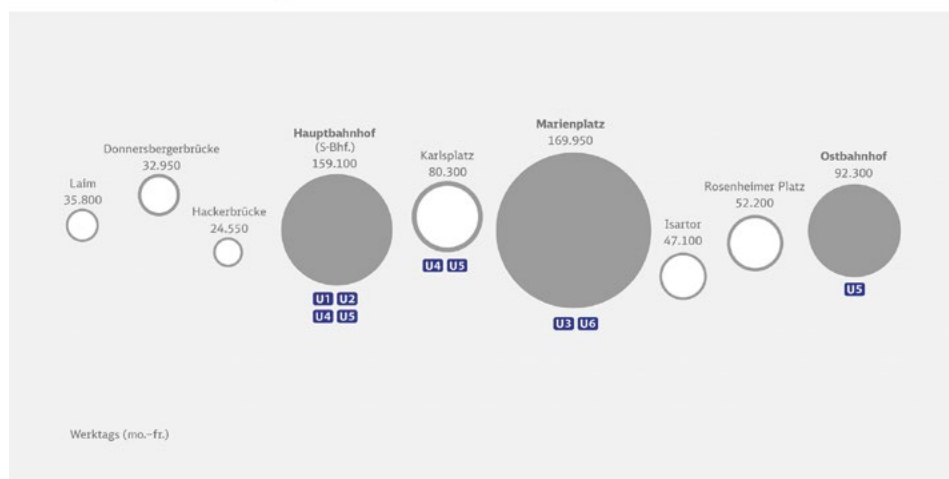
- DB Netz AG, as future owner of the system (apart from the railway stations and the power supply systems), and also as the company responsible for project management,
- DB Station & Service AG, as future owner of the stations,
- DB Energie GmbH, as future owner of the railway power supply systems,
- the Free State of Bavaria, as contracting authority for the project,
- the Federal Republic of Germany, as project partner of the rail service and the Free State of Bavaria, in particular with regard to financing,
- Bavaria's state capital Munich, as financing partner.

2 Project Description

2.1 Bases

A large number of cables, channels and pipes pass underground through Munich city centre. Not only do the supply lines for district heating and cooling, electricity and the sewage system run under the buildings, but the existing core route and the U-Bahn tunnels also run under Munich. For the construction of the second core route, this means that the tunnels must run at a safe distance one level lower than the existing tunnels – the new stations will be built at a depth of approximately 35 to 40 m (Fig. 6).

Anzahl der Fahrgäste an den Münchner Bahnhöfen

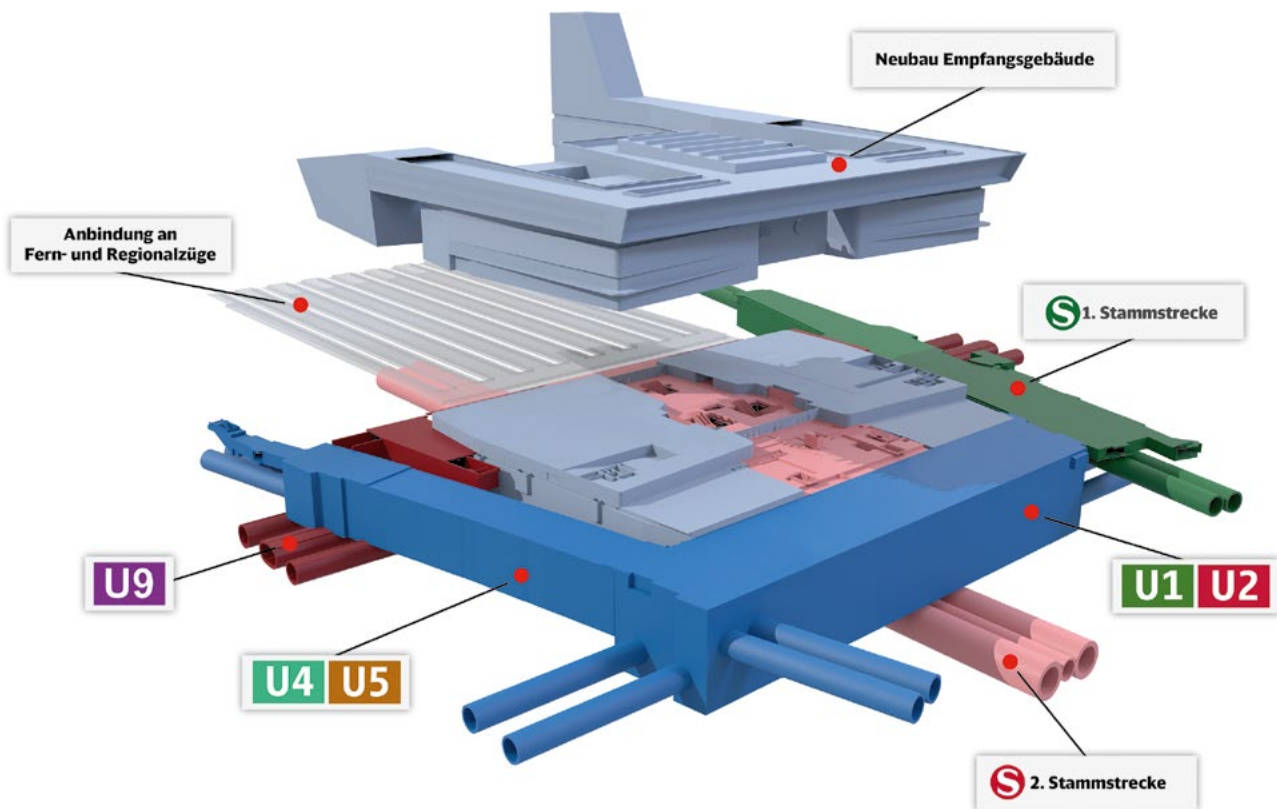


3 Anzahl der Fahrgäste an den Bahnhöfen der Stammstrecke
Number of passengers at the stations on the core route

Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/augensturm

Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München •

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München



Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/Fritz/Stoiber Productions GmbH

4 Bild der zukünftigen Station Hauptbahnhof mit den weiteren öffentlichen Nahverkehrseinrichtungen und dem Empfangsgebäude
Figure of the future Hauptbahnhof station with the other public transport facilities and the station building

verschiedenen, wenn auch recht ähnlichen hydraulisch gespannten Grundwasserdruckniveaus. Dabei werden die Sande im projektrelevanten Bereich nach den Grundwasserleitern TI bis TIV unterschieden (Bild 7).

Die tertiären Grundwasserleiter liegen sowohl als durchgängige Sandlagen als auch als abgeschlossene Sandlinsen vor.

2.3 Projektübersicht unterirdischer Abschnitt

2.3.1 Verkehrstunnelröhren in maschineller Bauweise

Die beiden Verkehrstunnelröhren mit einer Länge von 7,1 km und einem Aussendurchmesser von 8,4 m bei einer Tübbingdicke von 45 cm werden jeweils von Osten und Westen kommend mit je zwei Tunnelvortriebsmaschinen in Tiefen von 7 bis 40 m (Überlagerung über Firste) aufgeföhren. Von der Startbaugrube im Westen, westlich der Donnersbergerbrücke, tauchen die beiden Tunnelbohrmaschinen ab und unterfahren das Gleisvorfeld bis zum Erreichen der Gleishalle des Münchner Hauptbahnhofs. Durch die fertig ausgehobene Baugrube der Station Hauptbahnhof werden die Maschinen durchgezogen, um von der Baugrube aus erneut anzuföhren. Sie unterqueren dann die Station der U-Bahn U1/U2 mit einem Abstand von 4,5 m und fahren dann weiter unter der ersten S-Bahn-Stammstrecke, dem Justizpalast, dem Stachus und der Station der U4/U5 hindurch. Die südliche Maschine fährt am Wahrzeichen Münchens, der Frauenkir-

2.2 Geology and Hydrogeology

The tunnels of the second S-Bahn core route will primarily be constructed in the rocks of the Upper Freshwater Molasse (UFM). In general, the project area of the UFM consists of alternating strata of marly clay/silt and sand, with solidification into sandstone, marlstone or clay and siltstone in certain areas. In the portal areas and west and east of Ostbahnhof station, the quaternary ice age gravel overlaying the UFM will also be dug through.

Groundwater conditions in the tertiary loose rock layers are essential for tunnel construction. The tertiary sands are differentiated according to their different, albeit very similar, hydraulically tensioned groundwater pressure levels. The sands in the project area are differentiated according to the aquifers TI to TIV (Fig. 7).

The tertiary aquifers are present both as continuous layers of sand and as closed sand lenses.

2.3 Project Overview for the Underground Section

2.3.1 Traffic Tunnels Using Mechanised Tunnelling Methods

The two traffic tunnels coming from the east and west, 7.1 km long with an outer diameter of 8.4 m and a segment thickness of 45 cm, will each be constructed using two tunnel boring machines at depths of 7 to 40 m (cover over the

Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route •

Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich

che, mit einem horizontalen Abstand von 14,5 m zwischen der Tunnelachse und der Aussengrenze des Gebäudes und einem vertikalen Abstand von 30 m zwischen Unterkante Bauwerk und Firste Tunnel vorbei und endet an der Station Marienhof (Streckenverlauf siehe Bild 2).

Die beiden östlichen Tunnelvortriebsmaschinen starten südwestlich des Haidenauplatzes, unterfahren das Gleisfeld östlich des Ostbahnhofs und fahren in die Baugrube der Station Ostbahnhof ein. Dort fahren sie wieder an, überqueren die U-Bahn-Linie U5 im Abstand von 3,3 m und fahren unter dem Stadtteil Haidhausen durch, wobei die erste S-Bahn-Stammstrecke und die zu Beginn des Ersten Weltkriegs erbaute evangelisch-lutherische St.-Johannes-Kirche unterfahren werden. Im Weiteren unterqueren die Tunnel den Auer Mühlbach und die Isar in einer Tiefe von 15 m. Die Vortriebe enden dann ebenso an der Station Marienhof (Streckenverlauf siehe Bild 2).

Ausgeschrieben für den Vortrieb sind im Westabschnitt aus Gründen der maximalen Vortriebssicherheit Tunnelvortriebsmaschinen mit vollflächiger Ortsbruststützung mittels Stützflüssigkeit bzw. in Wartungszuständen mittels Druckluft und Stützflüssigkeit (SM-V4 gem. DAUB (10/2010)) in der Vortriebsklasse VS 2 gemäss VOB DIN 18312. Alternativ zulässig wären ebenfalls sogenannte Multi-Mode-Maschinen, bei denen der Umbau zwischen den Betriebsmodi weniger als einen halben Arbeitstag beansprucht. Für die Vorbeifahrt an der Frauenkirche ist die hydraulische Stützung zwingend vorgegeben.

Um für die Vorbeifahrt an der Frauenkirche Basisdaten über das Gebäudeverhalten zu haben, findet seit 2006 im Auftrag der Deutschen Bahn ein kontinuierliches geodätisches Monitoring der Bewegungen des Kirchengebäudes durch den Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München statt.

roof). The two tunnel boring machines will go underground at the start excavation pit in the west, west of Donnersbergerbrücke, and continue beneath the rail yard until they reach the train shed at Munich Hauptbahnhof. The machines are driven through the already excavated pit at Hauptbahnhof station in order to start excavating again from there. They then pass under the U1/U2 U-Bahn station at a distance of 4.5 m and continue under the first S-Bahn core line, Justizpalast, Stachus and the U4/U5 station. The machine in the south drives past Munich's landmark the Frauenkirche, with a horizontal distance of 14.5 m between the tunnel axis and the building's external borders and a vertical distance of 30 m between the lower edge of the structure and the roof tunnels, and ends at Marienhof station (for the route, see Fig. 2).

The two eastern tunnel excavation machines will start southwest of Haidenauplatz, travel under the rail yard east of Ostbahnhof and drive into the excavation pit at Ostbahnhof station. They will continue from there, cross the U5 underground line at a distance of 3.3 m and pass underground through the Haidhausen district, passing under the first core S-Bahn route and the Evangelical Lutheran St. Johannes Kirche built at the beginning of the First World War. In addition, the tunnels will cross the Auer Mühlbach and the Isar at a depth of 15 m. The excavation will then end at Marienhof station (for the route, see Fig. 2).

For maximum excavation safety, tunnel boring machines with full tunnel face support using slurry or, in the case of maintenance, compressed air and slurry (SM-V4 in accordance with the DAUB (10/2010)) in excavation class VS 2 in accordance with VOB DIN 18312 will be tendered for the excavation in the western section. Alternatively, "multi-mode machines", which take less than half a working day to switch between operating modes, would also be permissible. Hydraulic support is mandatory for driving past the Frauenkirche.

Kostenaufteilung der 2. Stammstrecke ohne Risiken [in Mio. €]



Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/augensturm

To obtain basic data about the building's behaviour for passing under the Frauenkirche, the Department of Geodesy at the Technical University of Munich has been carrying out continuous geodetic monitoring of the movements of the church building on behalf of Deutsche Bahn since 2006.

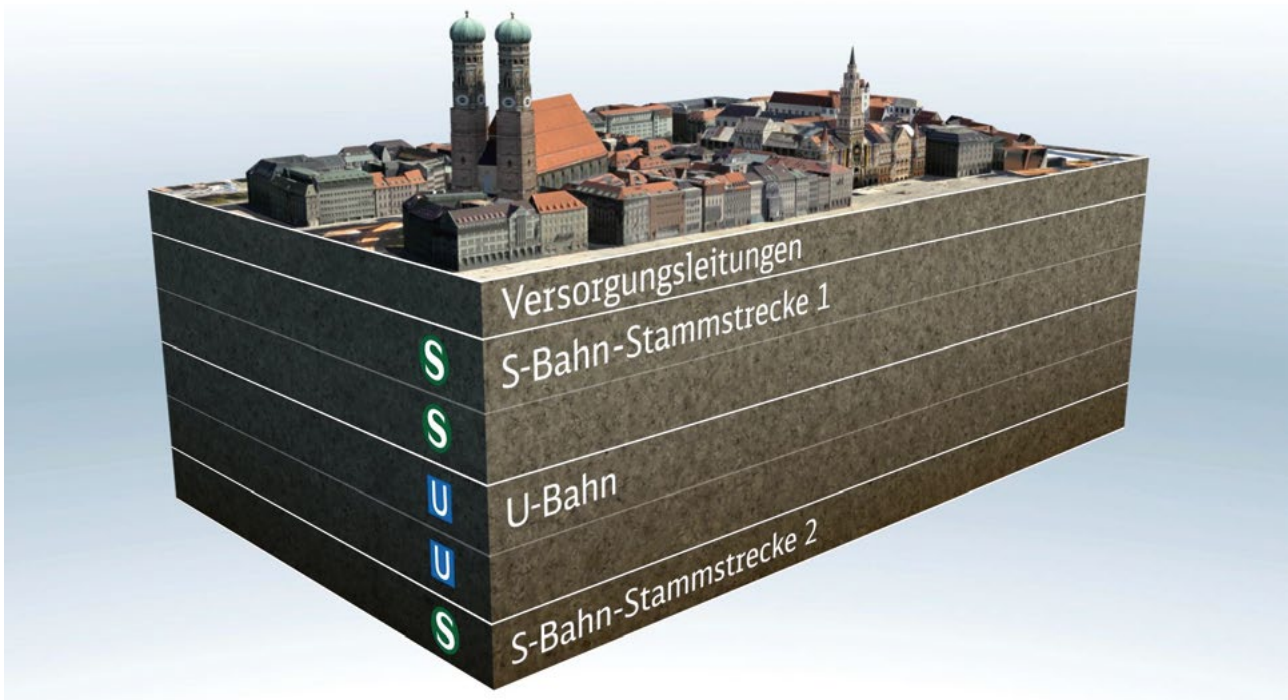
2.3.2 Hauptbahnhof and Marienhof Stations by Conventional Tunnelling Methods

The Hauptbahnhof and Marienhof stations will be built top-down using diaphragm walls. From the construction

5 Kostenaufteilung der 2. S-Bahn-Stammstrecke ohne Risiko
Cost distribution for the second core S-Bahn route without risk

Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München •

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München



Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/Fritz Stoiber Productions GmbH

6 Schematisches Bild der Infrastruktur im Münchner Untergrund
Schematic picture of the infrastructure in the Munich underground

2.3.2 Stationen Hauptbahnhof und Marienhof mit Tunnel in Spritzbetonbauweise

Die Stationen Hauptbahnhof und Marienhof werden in Schlitzwand-Deckelbauweise hergestellt. Aus den Baugruben heraus erfolgt die Herstellung der restlichen Bahnsteigbereiche und die Herstellung der Verbindungsstollen an der Station Marienhof zur U3/U6 in Spritzbetonbauweise. Aufgrund der beschriebenen gespannten Grundwasserverhältnisse in den tertiären Sandschichten ist sowohl für die Erstellung der Baugruben als auch für die Spritzbetonvortriebe eine Grundwasserabsenkung der Horizonte T1, TII und TIV notwendig. Da die Sande jedoch nicht vollständig entwässert werden können, finden die Vortriebsarbeiten unter Druckluft statt (1,0 bar).

Aufgrund des zu erwartenden grösseren Passagieraufkommens wurde im Zuge der Planungsoptimierungen entschieden, die seitlichen Ausstiegsbahnsteige zu verbreitern. Ebenso wird auf Vortriebe aus kleinen Schächten heraus verzichtet, alle Vortriebe werden aus den grossen Stationsbaugruben heraus durchgeführt. Ein weiteres Ziel der Optimierungen ist der Verzicht auf Schrägstollen und kleine Querschnitte für die Fluchtstollen. Stattdessen wurden die Fluchtmöglichkeiten für die Bahnsteige seitlich an die Ausstiegsbahnsteige bzw. über den Einstiegsbahnsteig angelegt. Als Folge dieser Optimierungen ergab sich an beiden Stationen ein fünfschiffiger Querschnitt (Bild 8), wobei zuerst die äusseren Querschnitte für die Fluchtstollen hergestellt und mit einer Innenschale versehen werden. Am Marienhof ist im nächsten Schritt geplant, die Mittelröhre im Ulmenstollenvortrieb aufzufahren und in der Folge ebenfalls die

pits, the remaining platform areas and the tunnels connecting Marienhof station to the U3/U6 will be made by conventional tunnelling methods. Owing to the tensioned groundwater conditions in the tertiary sand layers described above, the groundwater of the T1, TII and TIV horizons will need to be lowered both for the excavation of the pits and for the tunnelling. Since the sands cannot be completely drained, the excavation work will take place under compressed air (1.0 bar).

Owing to the anticipated increase in passenger volume, it was decided during planning optimisation phase to widen the lateral exit platforms. Moreover, there will be no excavation from small shafts; all excavation will be carried out from the large station pits. Another objective of the optimisations is to avoid inclined tunnels and small cross-sections for the escape tunnels. Instead, the platform escapes were installed at the side for exit platforms respectively over the boarding platforms. The optimisations resulted in a five-cell cross-section at both stations (Fig. 8), where the outer cross sections for the escape tunnels is excavated first and provided with an inner lining. At Marienhof, the next step is to excavate the middle tunnel by means of the sidewall drift method and then to install the inner lining (including the rows of supports on the later platform and temporary wall panels in between). Only then will the intermediate cross sections be constructed for the S-Bahn tracks. Another challenge at Marienhof station is that the tunnels of the U3/U6 U-Bahn line will be underpassed at a distance of 4.2 m. Elevation injections are planned to compensate any settlements between the individual excavation processes. In the buildings

Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route •

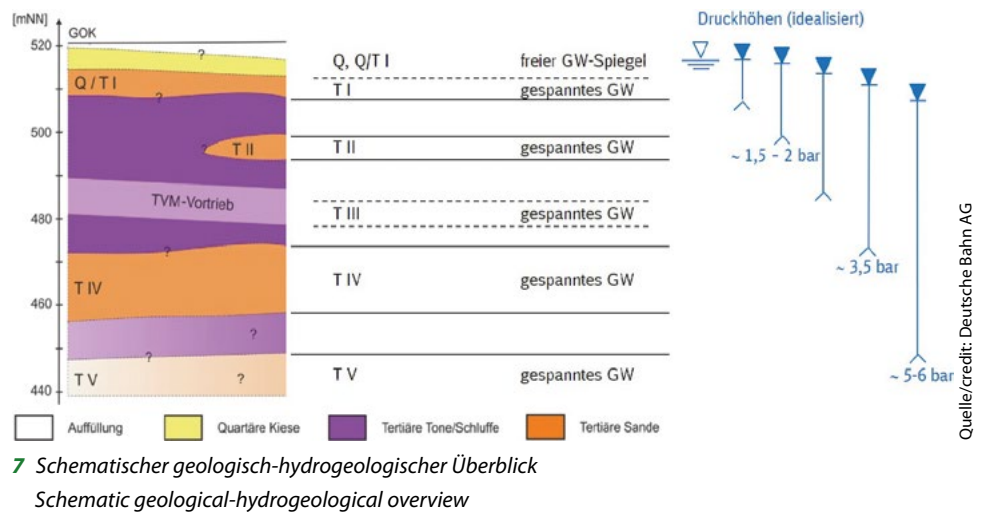
Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich

Innenschale einzubauen (u. a. bestehend aus den Stützenreihen auf dem späteren Bahnsteig und temporären zwischenliegenden Wandscheiben). Erst danach werden die zwischenliegenden Querschnitte für die S-Bahn-Gleise erstellt. Als Besonderheit kommt am Marienhof noch hinzu, dass die Röhren der U-Bahn-Linie U3/U6 in einem Abstand von 4,2 m unterfahren werden. Zum Ausgleich möglicher Setzungen zwischen den einzelnen Vortriebsvorgängen sind Hebungsinjektionen geplant. Auch bei der den Marienhof umgebenden Bebauung sind für deren Untertunnelung durch die Bahnsteigröhren Hebungsinjektionen vorgesehen.

Am Hauptbahnhof weicht die Vortriebsabfolge von der der Station Marienhof ab, da nach derzeitigem Planungsstand vorgesehen ist, die Bereiche der Bahnsteigröhren zuerst mit den maschinellen Vortrieben zu durchfahren, diese im Anschluss ganz oder teilweise zu verfüllen und dann erst in Spritzbetonbauweise aufzuweiten. Auch hier ist vorab die Herstellung der Fluchtstollen mit Innenschale vorgesehen. Im nächsten Schritt erfolgt die Herstellung der Hauptröhren und erst nach dem Einbau der Innenschale in den Hauptröhren schliesslich die Herstellung der Mittelröhre mit dem zentralen Bahnsteigbereich.

2.3.3 Rettungskonzept mit Rettungsschächten und Rettungsstollen in maschineller und Spritzbetonbauweise

Das bisherige Rettungskonzept der 2. S-Bahn-Stammstrecke sah Rettungsschächte im Abstand von ca. 600 m vor, in die aus den beiden Verkehrstunnelröhren heraus im Ereignisfall evakuiert werden könnte. Diese Rettungsschächte sind mit erheblichen Eingriffen in die obertägige Infrastruktur im innerstädtischen Bereich verbunden und bedeuten während der Bauzeit massive Beeinträchtigungen für die Anwohner. Durch die Änderung einer EU-Richtlinie wurde es nun möglich, ein alternatives Rettungskonzept zu entwickeln, das eine zusätzliche sogenannte dritte Röhre als Flucht- und Rettungsstollen mit einem Aussendurchmesser von 4,7 m bei einer Tübbingdicke von

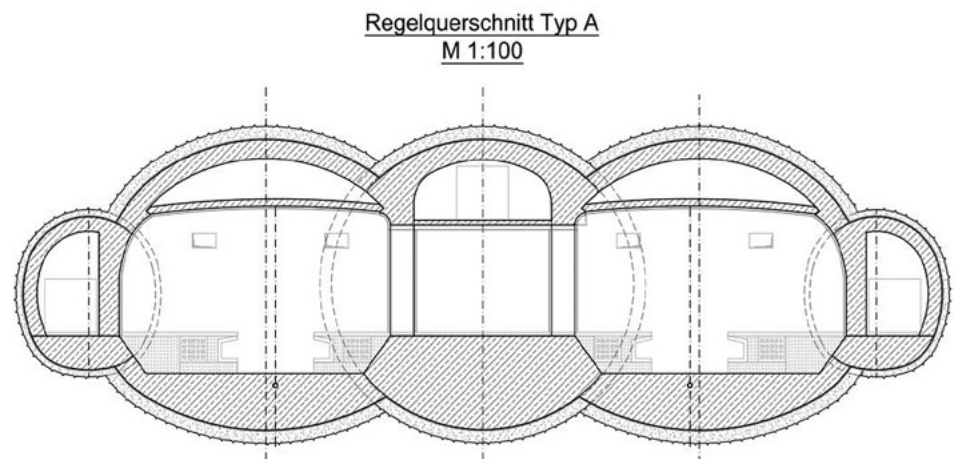


surrounding Marienhof, compensation injections are also planned during tunnelling of the platform tunnels.

The excavation sequence at Hauptbahnhof differs from that of Marienhof station because the plan is currently to excavate the platform tunnel areas first by the TBMs, then to fill them back in partially or completely, and only then to widen them with conventional tunnelling methods. Here, too, construction of escape tunnels with an inner shell is planned. The next step is to construct the main tunnels. Only after the inner shell has been installed in the main tunnels will the central tunnel with the central platform area be constructed.

2.3.3 Rescue Concept with Rescue Shafts and Rescue Tunnels using Mechanised and Conventional Tunnelling Methods

The previous rescue concept for the second S-Bahn core route planned for rescue shafts at a distance of approx. 600 m into which could be escaped from the two traffic tunnels in the event of an emergency. These rescue shafts would have involved major interventions in the infrastruc-

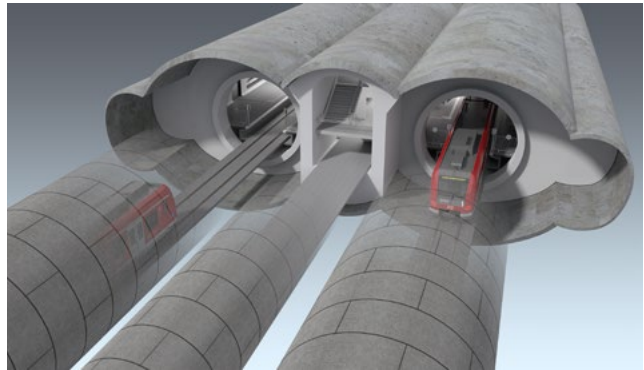


Quelle/credit: Deutsche Bahn AG

Quelle/credit: Project document: plan VE30-A3-3-22-5-5c;
Copyright: Deutsche Bahn AG/Engineering association
planning Munich's second core S-Bahn route

Grossprojekt 2. S-Bahn-Stammstrecke München •

Die 2. S-Bahn-Stammstrecke – Tunnelbau im Herzen von München



Quelle/credit: Deutsche Bahn AG/
Fritz Stoiber Productions GmbH

9 Anbindung Rettungsstollen an Station
Connection of rescue tunnels to the station

35 cm zwischen den beiden Verkehrstunnelröhren vorsieht (Bild 9). Zwischen dieser «dritten Röhre» und den Verkehrstunneln befinden sich im Abstand von circa 300 m Querschläge. Die maximale Fluchtweglänge im Verkehrstunnel beträgt dadurch nur noch rund 150 m. Der Flucht- und Rettungsstollen bindet an die drei Stationen, die Ausstiegswerke an den Tunnelportalen und die verbliebenen Rettungsschächte an (Bild 10).

Dieser Rettungsstollen soll vorab mit je einer Tunnelbohrmaschine von West und von Ost analog zu den Verkehrstunnelröhren als Erkundungsstollen aufgeföhren werden.

3 Ausblick

In zwei von drei Planfeststellungsabschnitten laufen bereits die Hauptbaumassnahmen. Sowohl am Hauptbahnhof als auch an der Station Marienhof finden die Spezialtiefbauarbeiten mit der Errichtung der Schlitzwände und begleitender Bauwasserhaltung statt. Nicht nur im unterirdischen, sondern auch im oberirdischen Bereich an der Station Laim sind die Bauarbeiten unter rollendem Rad in vollem Gange. Im dritten Planfeststellungsabschnitt sind die Unterlagen für das neue Planfeststellungsverfahren eingereicht.

ture above ground in the inner-city area, and would have caused serious disruptions for the residents for the duration of the construction. Owing to the amendment of an EU directive, it has now become possible to develop an alternative rescue concept that provides an additional “third” tunnel between the two traffic tunnels as an escape and rescue tunnel, with an outer diameter of 4.7 m and a segment thickness of 35 cm (Fig. 9). There will be cross-passages between this “third tunnel” and the traffic tunnels at a distance of approximately 300 m. Consequently, the maximum escape route length in the traffic tunnel will only be around 150 m. The escape and rescue tunnel will connect to the three stations, the exit structures to the tunnel portals and the other rescue shafts (Fig. 10).

This rescue tunnel will be excavated in advance as an exploration tunnel, with one tunnel boring machine from the west and one from the east, similar to the traffic tunnels.

3 Outlook

The main construction measures are already under way in two out of three planning approval phases. The special civil engineering works with the construction of the diaphragm walls and accompanying groundwater management are



10 Übersicht Entfall Rettungsschächte im Stadtgebiet
Overview, no rescue shafts in the city area

Quelle/credit: DB Netz AG/Geobase data: Bavarian State
Office for Survey and Geoinformation

Large Scale Project: Munich's Second S-Bahn Core Route •

Munich's Second S-Bahn Core Route – Tunnel Construction in the Heart of Munich

Die Tunnelarbeiten sind momentan noch in der Vorbereitung und beginnen mit dem Bau der «dritten Röhre», dem Erkundungsstollen, der später zur Flucht- und Rettungsröhre ausgebaut wird. Anschliessend werden die beiden Verkehrstunnel maschinell aufgeföhren.

Die Inbetriebnahme der 2. S-Bahn-Stammstrecke ist für den Fahrplanwechsel im Jahr 2028 geplant.

Bibliography/references

- [1] Boley Geotechnik: Second core S-Bahn route in Munich, section open construction from West to Marienhof including the Hauptbahnhof stop. Geotechnical report – interim report, version dated 14 June 2018 – Index A

taking place at both the Hauptbahnhof and the Marienhof station. The construction works with continued rail operation are in full swing, not only underground, but also above ground at Laim station. In the third planning approval phase, the documents for the new planning approval procedure have been submitted.

The tunnel works are currently in preparation and begin with the construction of the “third tunnel”, the exploration tunnel, which will later be expanded into an escape and rescue tunnel. The two traffic tunnels will then be excavated mechanically.

Commissioning of the second S-Bahn core route is planned for the timetable change in 2028.

PROJEKTDATEN	
Region München, Freistaat Bayern, Deutschland	
Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung DB Netz AG	
Planung und Bauleitung	
<ul style="list-style-type: none"> • Ingenieurgemeinschaft Planung 2. S-Bahn-Stammstrecke München, atelier 4d, BPR, ILF, VÖSSING, SWECO, SSF • Ingenieurgemeinschaft Bauüberwachung 2. S-Bahn-Stammstrecke München Hp Hauptbahnhof, Hp Marienhof und Tunnel West BERNARD GRUPPE, GEOCONSULT, ARCADIS, FCP • Bauüberwachung Tunnel Ost und Hp Ostbahnhof: noch nicht vergeben 	
Ausführung	
Hp Hauptbahnhof und Tunnel West: Arbeitsgemeinschaft Tunnel Hauptbahnhof – Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Max Bögl Stiftung & Co. KG, Ed. Züblin AG und Bauer Spezialtiefbau GmbH	
Hp Marienhof: Arbeitsgemeinschaft Marienhof – Implen AG, HOCHTIEF Infrastructure	
Hp Ostbahnhof und Tunnel Ost: noch nicht vergeben	
Kenndaten	
Bauzeit:	2018–2027
Inbetriebnahme:	2028
Gesamtlänge:	7,8 km
Ausbruchquerschnitt:	fünfschiffiger Querschnitt Bahnsteigröhren: 283 m ² ; Verkehrstunnel: 55 m ²

PROJECT DATA	
Region Munich, Free State of Bavaria, Germany	
Client, project management and senior site management DB Netz AG	
Planning and site management Emch+Berger AG, Bern	
Excavation	
<ul style="list-style-type: none"> • Engineering association planning Munich's second core S-Bahn route, Atelier 4d, BPR, ILF, VÖSSING, SWECO, SSF • Engineering association supervising construction of Munich's second core S-Bahn route Hp Hauptbahnhof, Hp Marienhof and west tunnel BERNARD GRUPPE, GEOCONSULT, ARCADIS, FCP • Supervision of east tunnel and Hp Ostbahnhof construction: not yet assigned 	
Construction	
Hp Hauptbahnhof and west tunnel: Arbeitsgemeinschaft Tunnel Hauptbahnhof – Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Max Bögl Stiftung & Co. KG, Ed. Züblin AG and Bauer Spezialtiefbau GmbH	
Hp Marienhof: Arbeitsgemeinschaft Marienhof – Implen AG, HOCHTIEF Infrastructure	
Hp Ostbahnhof and east tunnel: not yet assigned	
Key data	
Construction period:	2018–2027
Commissioning:	2028
Total length:	7.8 km
Excavation	
cross-sectional area:	5-cell cross-section of platform tunnels: 283 m ² ; traffic tunnel: 55 m ²



Instandsetzung Gotschnatunnel Herausforderungen und Erfahrungen

*Oliver Seith, Dipl. Bau-Ing. ETH, ASTRA-Filiale Bellinzona, Thusis/CH
Erich Suter, Dipl. Bau-Ing. HTL, Implenia Schweiz AG,
Civil Engineering – Tunnelbau Schweiz, Wallisellen/CH*

Instandsetzung Gotschnatunnel

Herausforderungen und Erfahrungen

Die Instandsetzung von 230 m Tunnelstrecke in zwei Zonen des 4,2 km langen Gotschnatunnels im Kanton Graubünden stellte Bauherr, Planer und Unternehmung vor zahlreiche Herausforderungen, und zwar in Bezug auf die Evaluation und den Umfang der Sanierungsmassnahmen an einem bestehenden Bauwerk, die Auswahl neuartiger Baumaterialien zur Aufnahme von Deformationen und die Bauausführung in drei kurzen Bauzeitfenstern mit Durchlaufbetrieb inkl. der umfangreichen Logistik.

Repairing the Gotschna Tunnel

Challenges and Experiences

The repair over a total length of 230 m within two zones of the 4.2 km long Gotschna Tunnel in the Canton of Graubünden posed numerous challenges for client, planner and contractor, specifically with regard to the evaluation and scope of the refurbishment measures for an existing structure, the selection of novel construction materials for rectifying deformations and the execution of construction work within three short construction phases with continuous operation, including the extensive logistics.

1 Einleitung

Die nicht richtungsgetrennte Nationalstrasse A28 verbindet Davos über die im Rheintal verlaufende A13 mit dem Mittelland und mit dem Bodensee. Der Gotschnatunnel ist ein Umfahrungstunnel der A28 und dient zusammen mit der Sunnibergbrücke (Bild 1) der Entlastung von Klosters. Er wurde zwischen Frühling 1997 und Winter 2001 mittels Sprengvortrieb ausgebrochen. Die Inbetriebnahme erfolgte im Dezember 2005. Der Tunnel ist 4207 m lang und weist einen Innendurchmesser von 10,2 m auf. In einem Abstand von rund 30 m verläuft parallel zum Haupttunnel ein Sicherheitsstollen. Der Tunnel unterquert den Gotschnagrät mit einer maximalen Überlagerung von rund 400 m. Für den Gotschnatunnel war grundsätzlich ein Hufeisenprofil mit Regenschirmabdichtung, beidseitiger Gewölbedrainage sowie einer Sohl drainage unter der Fahrbahn vorgesehen [1].

2 Geologie

Von Klosters/Serneus steigend durchfährt der Strassentunnel einen von der Gotschna-Rutschmasse überfahrenen, zunehmend tektonisierten Gebirgsdeckenstapel, der aus geotechnischer Sicht in einen Bündnerschiefer- und einen «Mélange»-Abschnitt unterteilt wird. Den Bündnerschiefer prägen Sandkalke und Phyllite. Dolomitschollen sowie wild verschuppte Gesteine wie bunte Schiefer, Kalkschiefer, Sandsteine, Dolomite, Quarzite, Sandkalke und Phyllite (Flysch) bilden die heterogene Mélange. In Scherzonen tritt vollständig zerbrochener Fels (Kakirit) auf. Im Übergangsbereich zwi-

1 Introduction

The A28 national road links Davos to the Swiss Central Plateau and Lake Constance via the A13, which runs through the Rhine Valley. The Gotschna Tunnel is a bypass tunnel of the A28 and, along with the Sunniberg Bridge (Fig. 1), serves to divert traffic away from the village of Klosters. It was tunnelled by means of drill and blast between the spring of 1997 and the winter of 2001. It was finally commissioned in December 2005. The tunnel is 4207 m long and has an inner diameter of 10.2 m. A safety gallery runs parallel alongside the main tunnel for approximately 30 m. The tunnel cuts under the Gotschnagrät mountain with a maximum depth of roughly 400 m. The tunnel was designed to have a horseshoe profile with a water membrane seal, roof drainage pipes on both sides and invert drainage underneath the roadway [1].

2 Geology

Going up from Klosters/Serneus, the road tunnel extends through increasingly tectonised mountain nappes crossed by a slide deposit. From a geotechnical point of view, these nappes are divided into two sections – one consisting of Bündner schist and the other consisting of a “mélange”. The Bündner schist is characterised by sandy limestones and phyllites. The heterogeneous mélange is formed of dolomite clods as well as wildly imbricated rocks such as coloured shale, calcareous shale, sandstones, dolomites, quartzites, sandy limestones and phyllites (flysch). In the shear zones, there is rock that has been completely broken up (fault

Réfection du tunnel de Gotschna

Défis et expériences

La minimisation des nuisances sur le site touristique de Klosters a abouti à la réalisation des travaux par périodes de deux à trois mois d'opérations continues avec interruption totale du trafic. Il a fallu une coordination intensive et une grande disponibilité de la part des entrepreneurs, fournisseurs et sous-traitants, même la nuit, les week-ends et jours fériés. De nombreux éléments constructifs ont été préfabriqués pour une mise en œuvre rapide et ponctuelle. Un haut niveau de qualité exigé devait être respecté sans effet de courbe d'apprentissage dans la réalisation des travaux. En ce sens, l'intervention du personnel du chantier par périodes représentait un vrai challenge.

Riparazione della galleria del Gotschna

Sfide ed esperienze

La minimizzazione delle immissioni nella località turistica di Klosters ha costretto a un'esecuzione dei lavori edili in una finestra temporale di soli due-tre mesi, con un servizio ininterrotto e con la galleria completamente chiusa. Questo ha richiesto una coordinazione intensa e un'alta disponibilità dell'impresa, dei fornitori e dei subappaltatori – anche durante la notte, nei fine settimana e nei giorni festivi. Molte parti dell'opera edile sono state prefabbricate per garantire una posa rapida e puntuale. L'ottenimento dell'alta qualità richiesta ha dovuto essere garantito senza poter contare sulla curva di apprendimento nell'esecuzione dei lavori. La gestione del personale di cantiere nel quadro della finestra temporale dei lavori è stata parimenti impegnativa.

schen Bündnerschiefer und Mélange erreichen die Kakirite Stärken bis zu 3 m [1].

gouge). In the transition region between the Bündner schist and the mélange, the fault gouge is up to 3 m thick [1].



Quelle/credit: Tiefbauamt Graubünden

1 Ansicht Gotschnatunnel, Seite Portal Drostobel mit Sunnibergbrücke
View of Gotschna Tunnel, Drostobel-side entrance with Sunniberg Bridge

2.1 Deformationen im Bau

Bereits während der Bauarbeiten wurden im Gotschnatunnel abschnittsweise Sohlhebungen und Risse in den Paramenten festgestellt. Anfänglich wurden als Ursache nicht Quellprozesse, sondern Gebirgsdruckerscheinungen vermutet. Im Rahmen der üblichen geologischen Erfassung während des Vortriebs konnten zudem auch keine quellfähigen Gesteine festgestellt werden. Die messtechnische Überwachung hatte dann aber ergeben, dass sich in drei ca. 160 m langen Deformationszonen (DZ I–III) im Haupttunnel sowie im Sicherheitsstollen (DZ IV) die Deformationen weiter ausbilden. Diese Deformationszonen liegen allesamt in der Mélange, wobei sich die DZ I im Übergangsbereich zu den Bündnerschiefern befindet. In der DZ III konnte schliesslich mit gezielten geologischen Untersuchungen (Kernbohrungen, Dünnschliffanalysen) Anhydrit als quellfähiges Mineral im umliegenden Fels nachgewiesen werden. Die durchsichtigen, farblosen Anhydritlinsen erreichen lediglich Stärken im Zentimeterbereich und wurden daher während des Tunnelvortriebs nicht erkannt. Im Einflussbereich des Tunnels wurden Anhydritlinsen in Gesteinswechsellagerungen in einer Stärke von bis zu 5 m vorgefunden. Die räumliche Heterogenität des Auftretens von Anhydrit im Gotschnatunnel ist gross und kann infolge der Gebirgszerscherung im Meterbereich wechseln. Der unterschiedliche Arbeitsfortschritt beim Ausbau sowie die anfängliche Ursachenanalyse führten dazu, dass in den Deformationszonen neben dem standardmässigen Hufeisenprofil insgesamt drei weitere Ausbautypen (unarmiertes Sohlgewölbe in DZ I, rückverankerte Bodenplatte in DZ II, stark armiertes Sohlgewölbe in DZ III) verbaut wurden. Die Tunnelparamente wurden während des Baus nicht zusätzlich verstärkt [1].

2.2 Deformationen im Betrieb und Schadenbildung

Nach Inbetriebnahme des Tunnels mussten als Folge der Quellerscheinungen trotz den während des Bauens getroffenen Verstärkungsmassnahmen Schäden am bestehenden Bauwerk verzeichnet werden. Die Ausprägung der Schäden in den Deformationszonen ist in Abhängigkeit von den Ausbautypen sehr unterschiedlich. Bei den Schadensbildern handelt es sich um Sohlhebungen, Gewölbekonvergenzen, Rissbildung und Abplatzungen, Schäden bei den Schächten und Werkleitungen (Bild 2) sowie teilweise nach Norm SIA 267 bereits überschrittene zulässige Ankerkräfte in der DZ II. Die Gewölbekonvergenzen, die auffällige, horizontale Rissbildung in den Paramenten sowie die seitlich eingebauten Gleitmikrometer weisen neben den primären Verformungen im Sohlbereich auch auf nicht vernachlässigbare horizontale Quellverformungen hin. Weiter zeigten die laufenden Messungen, dass sich kein Abklingen der Deformationen abzeichnet. Die fortschreitende Schädigung des Tunnels in den Deformationszonen und die damit verbundenen Gebrauchstauglichkeitsdefizite bewegten das Bundesamt für Strassen (ASTRA) im Jahre 2014 – rund zehn Jahre nach der Inbetriebnahme – dazu, ein Projekt zur Ertüchtigung des bestehenden Tunnels in den Deformationszonen zu erarbeiten [1].

2.1 Deformations during Construction

Even during construction work, invert heaving and cracks in the side walls were observed in parts of the Gotschna Tunnel. Initially, the cause was thought to be rock pressure phenomena as opposed to swelling processes. Furthermore, no swellable rocks were found during the usual geological survey during excavation. However, metrological monitoring then showed that the deformations extended further in three approx. 160 m long deformation zones (DZ I–III) in the main tunnel and in the safety gallery (DZ IV). These deformation zones are all located in the *mélange*, with DZ I being located in the transition region to the Bündner schists. Eventually, thanks to targeted geological investigations (core drilling, thin section analyses), anhydrite was identified as the swellable mineral in the surrounding rock of DZ III. The transparent, colourless anhydrite lenses are merely centimetres thick and were therefore not detected during tunnel excavation. Within the sphere of influence of the tunnel, anhydrite lenses up to 5 m thick were found in alternating layers of rock. The spatial heterogeneity of the anhydrite in the Gotschna Tunnel is great and can change within a matter of metres due to the amount of rock shearing present. The varying progress of lining work and the initial cause analysis resulted in a total of three other types of lining being installed in the deformation zones in addition to the horseshoe profile (non-reinforced invert in DZ I, back-anchored floor slab in DZ II, heavily reinforced invert in DZ III). The tunnel side walls were not provided with additional reinforcement during construction [1].

2.2 Deformations during Operation and Damage Formation

After the tunnel was commissioned, damage to the finished structure was recorded as a result of the swelling phenomena in spite of the reinforcement measures implemented during the construction phase. The extent of the damage in the deformation zones depends on the types of lining used and thus varies greatly. The images of damage show invert heaving, roof convergence, crack formation and spalling, damage to the shafts and service lines (Fig. 2), and anchor forces in regions of DZ II exceeding the permissible limit specified in the standard SIA 267. The roof convergence, the noticeable horizontal crack formation in the side walls and the sliding micrometers installed at the sides indicate non-negligible horizontal swelling in addition to the primary deformations in the invert region. The regular measurements also showed that the deformations were not becoming any less pronounced. The progressive damage to the tunnel in the deformation zones and the associated negative impact on the usability of the tunnel prompted the Federal Roads Office (FEDRO) to draft a project for strengthening the existing tunnel in the deformation zones in 2014 – roughly ten years after it was commissioned [1].



Quelle/credit: Bundesamt für Strassen (ASTRA), Filiale Bellinzona

2 Schubrisse in Kabelzugschacht
Thrust cracks in cable shaft

3 Lösungsfindung des Sanierungskonzeptes

Auf Basis des festgelegten Strategieansatzes – Fokus der Ertüchtigung auf zu definierende Bereiche in den Deformationszonen – wurden folgende Projektziele formuliert:

- Die vorhandenen, aktuell sichtbaren Schäden sind in den Deformationszonen I und II nachhaltig instand zu setzen. Eine (Rest-)Nutzungsdauer von 80 Jahren ist dabei anzustreben (ausgenommen Fahrbahnbelag). In den übrigen Bereichen – auch mit erhöhtem Quellpotenzial – wird bewusst auf Massnahmen verzichtet.
- Die Tunnelkonstruktion über der Fahrbahn (Parament, Gewölbe, Zwischendecke) soll möglichst nicht abgebrochen, sondern, wo nötig, lokal verstärkt werden.
- Weitere lokale Schäden an der Bausubstanz sind zu beheben mit dem Ziel eines interventionsfreien Betriebs von 15 Jahren.
- Mit geeigneten Überwachungsmassnahmen sind künftig eventuell neu auftretende Deformationen in potenziell gefährdeten Zonen frühzeitig zu erkennen.

Die Ertüchtigungsmassnahmen sind mit vernünftigem Aufwand nur bei gesperrtem Tunnel ausführbar. Als Randbedingung wurde vorgegeben, dass die Instandsetzung unter minimierter Beeinträchtigung des Verkehrs in den touristischen Nebensaisons im Frühling und Herbst zu erfolgen hat. Anhand eines Variantenvergleichs wurde eine Ertüchtigung während dreier Bauzeitfenster als Bestvariante bestimmt [1].

3 Refurbishment Concept Solution Finding

The following project aims were devised based on the strategy developed (focus of the works on regions of the deformation zones yet to be defined):

- The damage visible in deformation zones I and II has to be repaired with a view to achieving the (residual) service life goal of 80 years (road surface not included). In the other regions – even those with higher swelling potential – no measures are deemed necessary.
- If possible, the tunnel structure above the roadway (side walls, vault, smoke duct) should be left intact and only locally reinforced where necessary.
- Other areas of local damage to the structure should be repaired with the aim of ensuring operation for 15 years without the need for further intervention.
- Any new deformations that appear in the future should be detected early in zones at risk by means of suitable monitoring measures.

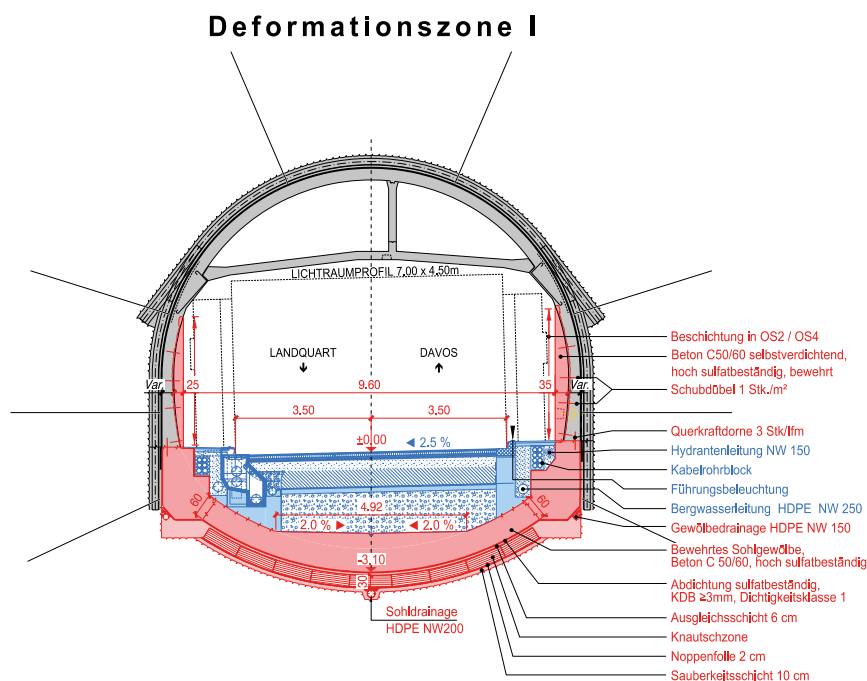
The strengthening measures may only be carried out when the tunnel has been closed and at reasonable cost. One of the conditions of the repair work is that it interfere as little as possible with traffic during the tourist low seasons of spring and autumn. Based on a comparison of different variants, it was concluded that works should ideally be carried out in three construction phases.

3.1 Sanierungskonzept

Im Rahmen eines Variantenstudiums wurden Verstärkungslösungen auf Basis des Widerstands- und des Ausweichprinzips analysiert und einander gegenübergestellt. Der Entscheid wurde letztlich zugunsten einer sogenannten Kombilösung getroffen (Bild 3). Den Kern dieses Konzepts bildet die Verstärkung der bestehenden Innenschale, dimensioniert nach dem Widerstandsprinzip. Die Verstärkung beinhaltet den Einbau eines robusten Sohlgewölbes auf insgesamt 230 m (inkl. Ersatz von Fahrbahn, Banketten und Werkleitungen) sowie das Vorbetonieren (200 m Paramentseite) resp. den Ersatz der Tunnelparamente (60 m Paramentseite) mit ungenügender Stärke. Die Ertüchtigungsmassnahmen sind so konzipiert, dass das Sohlgewölbe im Traglastfall vor den Paramenten versagt und es infolge der Quellprozesse nicht zu einem Tragsicherheitsproblem im Bereich des Fahrtraums (Tunnelgewölbe, Zwischendecke) kommen kann. Die Verstärkung des Normalprofils wurde auf Robustheit und auf die Elimination des Schwachpunktes im Fundamentbereich ausgelegt. Die gewählte Form des Sohlgewölbes mit einem Stichmass von 3,1 m unter der Fahrbahnachse stellt ein Optimum zwischen dem für den idealen Kräftefluss geeigneten Kreisprofil und der möglichst flachen Ausrundung im Hinblick auf eine minimale Bauzeit dar. Zusätzlich zu den Verstärkungsmassnahmen ist unterhalb des Sohlgewölbes eine vollflächige Knautschzone vorgesehen, welche die Quellhebungen bei vergleichsweise hohem, quasi konstantem Gegendruck zulässt und gleichzeitig ein grosses Stauchungsvermögen aufweist. Durch Kombination der Verstärkung mit einer Knautschzone wird der Zeitpunkt der Einwirkung des vollen Quelldruckes zeitlich hinausgezögert und lokal auftretende Spitzenquelldrücke ausgeglichen [1].

3.1 Refurbishment Concept

Within the scope of the variant study, reinforcement solutions were analysed and compared on the basis of the principle of resistance and the yield principle. The decision was ultimately made to adopt a so-called combo solution (Fig. 3). The heart of this concept is the reinforcement of existing inner linings sized according to the principle of resistance. The reinforcement work involves installing a sturdy invert over a total length of 230 m (incl. replacing carriageway, walkways and service lines) and increasing the thickness of (200 m of side walls) respectively replacing the tunnel side walls (60 m of side walls) that are too thin. The strengthening measures are conceived such that the invert fails before the side walls under excessive load and such that problems do not arise in the region of the roadway (tunnel vault, smoke duct) as a result of swelling processes. The reinforcement of the standard cross section was conceived with a view to improving sturdiness and eliminating the weak point in the region of the foundation. The shape selected for the invert, with a pitch of 3.1 m under the roadway axis, constitutes an optimal balance between a suitable circular profile for an ideal flow of forces and the flattest possible curvature in the interest of reducing construction time. In addition to the reinforcement measures, a yielding zone that allows swelling-induced heaving movements with comparatively high, almost constant counterpressure and that also has a high compression capacity is provided beneath the entire invert. By combining reinforcement with a yielding zone, the point in time at which the swelling pressure exerts its full effect is delayed and locally occurring peak swelling pressures are compensated [1].



3 Normalprofil Instandsetzung Gotschnatunnel
Repairing the Gotschna Tunnel, standard cross section

Quelle/credit: IG Gost: Aegerter & Bosshardt AG, Basel, und Lombardi AG, Luzern

4 Herausforderungen des Unternehmers

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) hat die Arbeiten für die Instandsetzung des Gotschnatunnels im November 2018 an die Implenia Schweiz AG vergeben. Die Werkvertragssumme beträgt 13,8 Millionen Schweizer Franken.

4.1 Instandsetzung Gotschnatunnel in drei Zeitfenstern

Die Sanierungsarbeiten am Gotschnatunnel wurden in sogenannten Bauzeitfenstern mit Vollsperrung realisiert. Bei der Wahl der Bauzeitfenster wurde mit Rücksicht auf die Tourismusregion Davos-Klosters darauf geachtet, dass sie in Perioden mit möglichst geringem Verkehrsaufkommen gelegt wurden.

Daraus haben sich folgende Bauzeitfenster ergeben:

1. Etappe Frühlingsbauzeitfenster 2019
Ende März–Mitte Juni
2. Etappe Herbstbauzeitfenster 2019
Anfang Oktober–Anfang Dezember
3. Etappe Frühlingsbauzeitfenster 2020
Ende März–Ende Juni

Die Disposition des Baustellenpersonals für diese Bauzeitfenster erwies sich als eine grosse Herausforderung. Das Ziel war es, alle drei Bauzeitfenster mit dem gleichen Personal, sowohl auf Stufe Baustellenkader als auch auf Stufe Arbeitnehmer, abzuwickeln.

Um das zu erreichen, waren grosse Anstrengungen dafür nötig, die Mitarbeiter in den je viermonatigen Zwischenphasen im Sommer 2019 und über den Winter 2019/2020 anderweitig einsetzen zu können.

Pünktlich zum Start der einzelnen Bauzeitfenster musste das Personal wieder vollzählig zur Verfügung stehen, um vom ersten Tag an die Arbeiten im Durchlaufbetrieb vorantreiben zu können. Ein 4/3-Schichtplanmodell (SECO-Schichtplan Nr. 402) hat der Implenia den 24-Stunden-Betrieb während sieben Tagen pro Woche ermöglicht.

Eine weitere Herausforderung war das Einbinden von Lieferanten und Subunternehmern in den Durchlaufbetrieb. Auch hier bereiteten die jeweils kurze Einsatzdauer von drei Monaten und die langen Unterbrüche zwischen den Bauzeitfenstern Probleme. Die tagesscharfe Organisation, die durch kurze Bauzeit bedingten Kleinmengen sowie die Sicherstellung des Know-hows für die nächsten Bauzeitfenster waren auch bei den regionalen Lieferanten und Subunternehmern analog dem Hauptunternehmer eine ständige zeit- und personalaufwendige Führungsaufgabe.

4.2 Kurze Abfolge von Ausbruch, Betonverkleidung und Innenausbau

Wie zu erwarten war, erforderte die kurze Abfolge der Arbeitsgattungen Ausbruch, Betonverkleidung und Innenausbau seitens der Unternehmung grösstes Augenmerk. So war im Herbstbauzeitfenster 2019 die Zeitspanne zwischen

4 Challenges for the Contractor

The Federal Roads Office (FEDRO) assigned the Gotschna Tunnel repair works to Implenia Schweiz AG in November 2018. The contract amount is CHF 13.8 million.

4.1 Repairing the Gotschna Tunnel in Three Phases

The refurbishment works to the Gotschna Tunnel were carried out in so-called construction phases, in which the tunnel was completely sealed off. The construction phases were selected so as to coincide with the periods of least traffic, in consideration of the fact that the Davos-Klosters region is frequented by tourists.

This produced the following three construction phases:

1. Stage Spring 2019 construction phase
End of March to mid-June
2. Stage Autumn 2019 construction phase
Start of October to start of December
3. Stage Spring 2020 construction phase
End of March to end of June

The availability of construction personnel for these construction phases proved to be a significant challenge. The aim was to use the same staff for all three construction phases, both at site management level and employee level.

In order to achieve this, considerable efforts were required to be able to provide them with other employment during the two four-month intermediate phases of summer 2019 and winter 2019/2020.

Timely availability of all personnel at the start of the individual construction phases was required in order to be able to forge ahead with the work in continuous operation from day one. A 4/3 shift model (SECO shift model no. 402) allowed Implenia to sustain operations 24 hours per day, seven days per week.

Another challenge was finding suppliers and subcontractors available for continuous operation. Here, too, the short individual periods of three months and the long gaps between construction phases caused problems. The day-to-day organisation, the small material quantities due to short construction times and preserving the knowledge and skills for the next construction phase also required constant time- and personnel-intensive management with the regional suppliers and subcontractors as with the main subcontractor.

4.2 Quick Succession of Excavation, Concrete Lining and Inner Lining

As expected, the quick succession of work tasks relating to the excavation, concrete lining and inner lining demanded the contractor's full attention. The window of time between the start of excavation work for the kicker and the end of

dem Beginn der Ausbrucharbeiten für den Kicker bis zum Abschluss der Innenausbauarbeiten nur gut sieben Wochen lang. In dieser kurzen Zeit wurden alle Kicker blockweise sowie das Sohlgewölbe als Linienbaustelle ausgebrochen und in Ortbetonbauweise neu erstellt. Weiter wurden der gesamte Strassen-Unterbau und die Bankette mit diversen Abwasser- und Wasser-Werkleitungen sowie Kabelblöcken und Kabelschächten neu gebaut.

Damit diese Arbeiten reibungslos abgewickelt werden konnten, mussten in einer intensiven mehrmonatigen Arbeitsvorbereitung sämtliche der 13 verschiedenen Bauphasen detailliert geplant werden. Das gesamte Inventar und Baumaterial wurde zum Teil Monate im Voraus tagesgenau disponiert, damit das enge Bauprogramm eingehalten werden konnte.

Um die Einbauzeit vor Ort so kurz wie möglich zu halten, wurden möglichst viele Bauteile vorgefertigt. So wurden unter anderem die Gewölbefuss- und die Sohlarmierung auf Vorschlag des Unternehmers in Absprache mit dem Projektverfasser umgeplant, damit Armierungskörbe vorgefertigt werden konnten. Durch diese Massnahme konnte das Sohlgewölbe weitgehend im Tagestakt erstellt werden, weil die Montagezeit für die Bewehrung auf sechs Stunden reduziert werden konnte (Bild 4).

the inner lining work was just over seven weeks during the autumn 2019 construction phase. Within this short time, all kickers were excavated in blocks and the invert was excavated as a linear construction site. The kickers and invert were then recast from concrete in-situ. Then, the entire road substructure and walkway were rebuilt with various water and waste water service lines as well as cable blocks and cable ducts.

In order to ensure that these works could be carried out without a hitch, all 13 construction stages had to be meticulously planned within the scope of an intensive preparation phase that lasted several months. Some of the equipment and construction materials were planned months in advance to the day in order to be able to adhere to the tight construction schedule.

As many of the components as possible were manufactured in advance in order to keep the on-site construction time as short as possible. For example, the plans for the reinforcements for the invert and the kickers were changed at the suggestion of the contractor in consultation with the project engineer such that reinforcement cages could be pre-manufactured. This meant that the invert could largely be constructed in daily cycles, because the installation time for the reinforcements could be reduced to six hours (Fig. 4).



Quelle/Credit: Implenia Schweiz AG

4 Verlegen der vorgefertigten Armierungskörbe im Sohlgewölbe
Laying the pre-manufactured reinforcement cages in the invert

4.3 Deformationen

Im Zuge der Instandstellungsarbeiten wurde das Verhalten der betroffenen und benachbarten Gewölbeblöcke hinsichtlich Verformungen überwacht. Ein entsprechendes Überwachungskonzept wurde vor Ausführungsbeginn durch den Projektverfasser festgelegt.

Für die Überwachung hat die Bauherrschaft ein automatisches Messsystem installiert, um das Verformungsverhalten des bestehenden Gewölbes im Stundentakt zu erfassen und bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte einen Alarm auszulösen. Die Verformungen wurden während der Bauphasen an Messquerschnitten jeweils am Blockanfang und -ende der 10 m langen Gewölbeblöcke gemessen.

Die Gefährdungen und entsprechend auch die Verformungen, welche im Zuge der geplanten Instandstellungsarbeiten auftreten, können vielfältig sein. Das bestehende Bauwerk oder Teile davon können so zum Beispiel «kippen» (nach vorne oder hinten in Tunnellängsrichtung), parallel zur Tunnelachse «rollen» (differenzielle Setzungen links und rechts) oder vollflächig «absacken» (gleichmässige Setzungen über den gesamten Grundriss eines Blockes). Auch kann es aufgrund der zwischenzeitlichen Entfernung des Gewölbefusses oder der Tunnelsohle zu einer horizontalen «Quetschung» des Profils kommen.

4.3.1 Deformationen im Frühlingsbauzeitfenster 2019

Die Überwachung bei den Instandstellungsarbeiten in der Deformationszone II hatte gezeigt, dass vor allem beim Ausbruch des Gewölbefusses (Kicker) im «Pilgerschrittverfahren» Deformationen an den Gewölbeblöcken aufgetreten sind, die sich dem oben beschriebenen «Kippen» und «Rollen» des Innengewölbes zuordnen liessen.

Die Deformationen hatten einen nahezu vertikalen Vektor und waren mit maximal 10 mm am Gewölbefuss vertretbar klein. Nach Erstellung des neuen Gewölbefusses in Ortbetonbauweise waren die Deformationen abgeklungen.

4.3.2 Deformationen im Herbstbauzeitfenster 2019

Bei den Sanierungsarbeiten an der Deformationszone I waren die Deformationen ebenfalls nach Ausbruch des Gewölbefusses erstmals aufgetreten. Im Gegensatz zu den Arbeiten vom Frühjahr sind die Verformungen nach Erstellung des neuen Gewölbefusses jedoch nicht abgeklungen. Die Bewegungen haben sich unvermindert fortgesetzt und zum Teil sogar noch verstärkt. Der Vektor der 3-D-Verformungen war auch nicht mehr mehrheitlich vertikal, sondern die horizontale Komponente hat zugenommen («Quetschung» des Profils) (Bild 5).

Als Massnahme wurde eine Abspriessung des neu erstellten Kickers mittels Schwerlastspriessen beschlossen. Diese Massnahme zeigte jedoch nur bedingt die gewünschte Wirkung. Als auch eine Systemankerung der Paramente mit zwei Ankerreihen die Bewegungen nicht stoppen konnte, wurde als Bauhilfsmassnahme eine Horizontalspriessung mittels Holzstämmen zwischen den Paramenten angeordnet (Bild 6).

4.3 Deformations

During the repair works, the behaviour of the affected vault blocks and the vault blocks adjacent thereto was monitored with regard to deformations. A corresponding monitoring concept was devised by the project engineer prior to commencement of the works.

The developers installed an automatic measuring system for the monitoring in order to record the deformation behaviour of the existing vault every hour and to trigger an alarm if specified threshold values were exceeded. The deformations were measured during the construction stages at measuring sections at the start and end of each 10 m vault block.

The hazards, and thus also the deformations that arise during planned repair work, can be manifold. The existing structure or parts thereof may for example “tilt” (forwards or backwards in the tunnel longitudinal direction), “roll” in parallel with the tunnel axis (differential settlements to the left and right) or “sink” completely (uniform settlements over the entire block). The profile can also become horizontally “squashed” on account of the temporary removal of the kickers or tunnel invert.

4.3.1 Deformations During the Spring 2019 Construction Phase

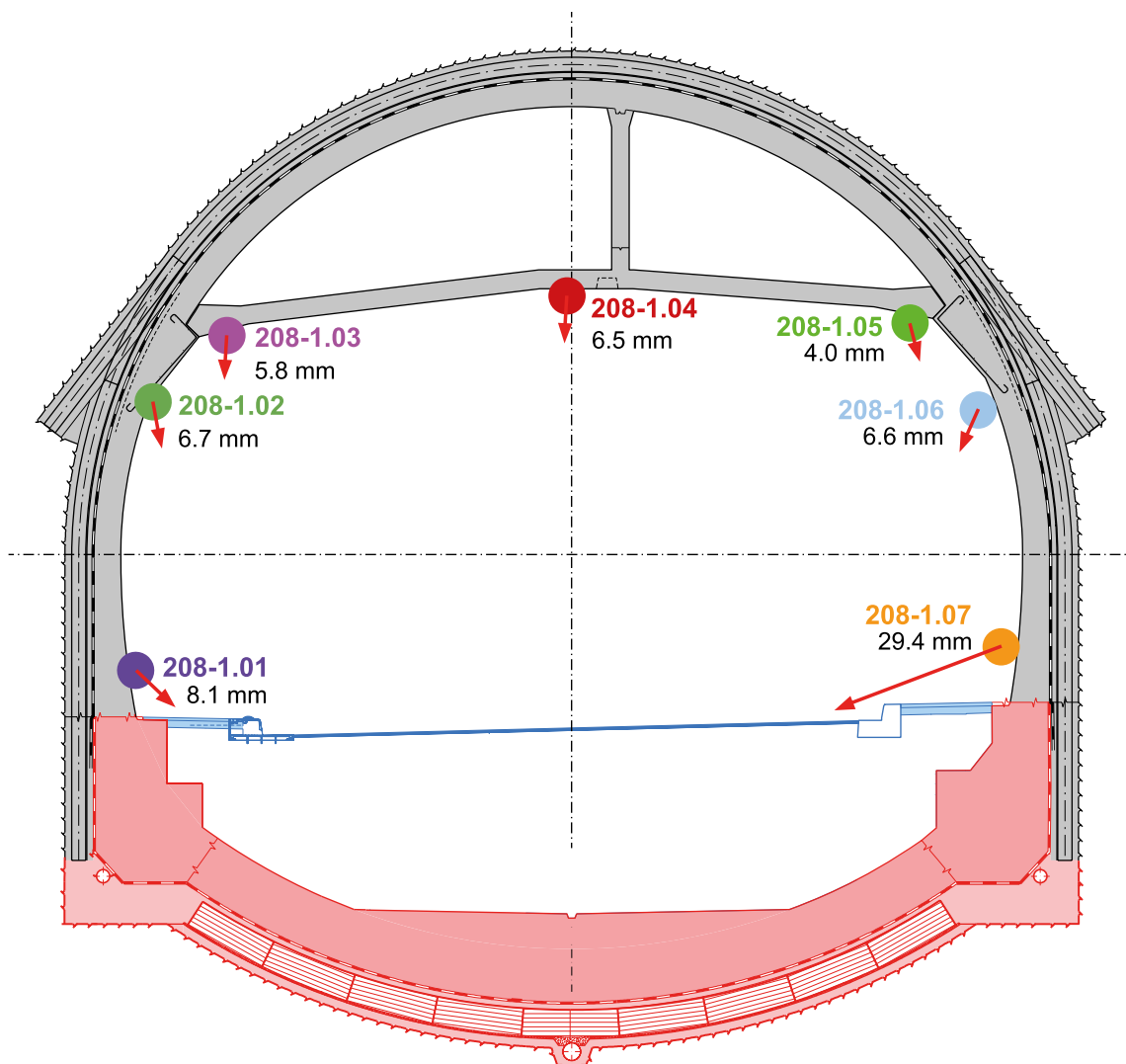
Monitoring activities during the repair works carried out in deformation zone II showed that deformations primarily occurred on the vault blocks during excavation of the kicker in the “step-back method”. These deformations correspond to the above-described “tilting” and “rolling” of the inner vault lining.

The deformations had an almost vertical vector and were reasonably small at a maximum of 10 mm on the kicker. After the new kicker was cast in-situ, the deformations decreased.

4.3.2 Deformations During the Autumn 2019 Construction Phase

During the refurbishment work to deformation zone I, the deformations also appeared for the first time after excavating the kicker. In contrast to the situation in the spring, the deformations did not disappear after constructing the new kicker. The movements continued at the same intensity and even became stronger in some cases. Furthermore, the vector of the 3D deformations was not predominantly vertical, but rather the horizontal component also increased (“squashing” of the profile) (Fig. 5).

In order to remedy this, a decision was made to brace the newly created kicker using heavy-duty struts. However, this only partially achieved the desired effect. When systematic bolting of the side walls consisting of two rows of rock bolts could not stop the movements either, horizontal struts in the form of tree trunks were arranged between the side walls



Quelle/credit: Implenia Schweiz AG, Amberg Technologies

5 Deformationsmessquerschnitt mit typischem Vektorbild
 Deformation measuring section with typical vector situation

Diese Massnahme bedeutete massive Erschwernisse beim Bau der Sohlgewölbe.

Wo und wie die Holzstämmen versetzt werden sollten, war Gegenstand eines intensiven Dialoges zwischen den Projektbeteiligten.

Bezüglich der Höhe mussten die Stämme so angeordnet sein, dass einerseits der Abbruch der alten Betonsohle, der Sohlensanhub und der Einbau des neuen Sohlgewölbes ablauftechnisch sinnvoll und innerhalb vernünftiger Zeitvorgaben ausgeführt werden konnten. Andererseits hatten die Holzstämmen die Aufgabe, die nach innen gerichteten horizontalen Deformationen des unteren Paramentbereichs aufzunehmen. Die tatsächliche Lage war schlussendlich ein Kompromiss zwischen Tunnelstatik und Ausführung.

Auch bezüglich des Einbaus der Spriessung in Tunnel-Längsrichtung war eine sinnvolle Abwägung zwischen den statischen Anforderungen an die Spriessung und der Zugäng-

as an an auxiliary measure (Fig. 6). This posed substantial problems for the invert construction phase.

Where and how the tree trunks had to be moved was a subject of intense discussions between those involved in the project.

In terms of the height, the trunks had to be arranged, on the one hand, such that the old concrete invert could be demolished and the new invert could be excavated and installed in a procedurally expedient manner and within a reasonable time frame. On the other hand, the tree trunks also had the task of rectifying the inwardly oriented, horizontal deformations of the lower region of the side wall. In the end, the actual position was a compromise between tunnel statics and work execution.

In the case of the longitudinal bracing, too, a sensible trade-off between the static requirements of the bracing and the accessibility to the work site was required. In this case, the

lichkeit zum Arbeitsort gefordert. Hier war das Verlegen der vorgefertigten Armierungskörbe der kritische Arbeitsgang.

Gesamthaft gesehen konnte mit einem überarbeiteten Gerätekonzept, einer blockweisen Ausführung statt der ursprünglichen Linienbaustelle und angepassten Abläufen das Sohlgewölbe doch noch termingerecht erstellt werden.

Die maximalen Bewegungen des Innengewölbes konnten mit diesem Konzept auf unter 30 mm begrenzt werden. Vollständig abgeklungen waren die Verformungen jedoch erst nach erfolgtem Ringschluss.

laying of the pre-manufactured reinforcement cages was the critical work step.

Ultimately, with a modified machine concept, construction in blocks as opposed to the original linear configuration, and adapted procedures, it was still possible to complete the invert on time.

With this approach, the maximum movement of the inner vault lining could be limited to under 30 mm. However, the deformations only disappeared fully after ring closure.



6 *Horizontalspriessung mittels Holzstämmen*
Horizontal bracing using tree trunks

Im Unterschied zum ersten Bauzeitfenster war die Geologie im zweiten Bauzeitfenster verantwortlich für die grossen Bewegungen der Innenschale. Einerseits verlaufen die aufgeschlossenen Kakiritzonen subparallel zur Tunnelachse, andererseits geht man aktuell von Umlagerungserscheinungen des umliegenden Gebirges entlang der schief liegenden Schichtung aus, beschleunigt und unterstützt durch zufließendes Bergwasser der letzten zehn Jahre.

In contrast to the first construction phase, the geology in the second construction phase was responsible for the pronounced movements of the inner lining. In the first case, the open fault gouge zones run sub-parallel to the tunnel axis, whereas in the second case, it is currently assumed that shifting processes of the surrounding mountain occurred along the oblique strata, accelerated and exacerbated by inflowing groundwater of the last ten years.

Quelle/credit: Implenia Schweiz AG

5 Ausblick

Für die Instandsetzung des letzten Bereiches im Frühlingsbauzeitfenster 2020 erwartet das Projektteam eine ähnliche geologische Konstellation wie zuletzt. Das Ausführungskonzept wurde deshalb aufgrund der Erfahrungen überarbeitet:

- Verstärkung der Paramente mittels Vorbetonieren vor den Ausbruchsarbeiten;
- massive Verstärkung der Ausbruchsicherung im Kickerbereich mittels mächtiger Spritzbetonschale und langer Selbstbohranker;
- Definition eines maximalen Offenbereiches für die Erstellung des Sohlgewölbes.

Mit diesen Massnahmen gehen die Projektbeteiligten davon aus, dass die Instandsetzungsarbeiten im Gotschnatunnel erfolgreich und termingerecht fertiggestellt werden können.

Literatur/References

- [1] Beeler P., Schädler B., Weishaupt R., Chiaverio F.
Tunnel Gotschna: Instandsetzung von Quellhebungen in einem bestehenden Strassentunnel – Konzept, Massnahmen, Materialanforderungen, STUVA-Tagung 2017

5 Outlook

With regard to the repair of the final tunnel section in the spring 2020 construction phase, the project team expects a similar geological situation to that seen in the second phase. For this reason, the execution concept has been altered based on their experiences:

- Reinforcement of the side walls by means of increasing the thickness of the existing side walls prior to excavation works;
- Solid reinforcement of the excavation support in the region of the kicker using a thick shotcrete lining and long self-drilling anchors;
- Definition of a maximum open area for creating the invert.

With these measures, the repair works to the Gotschna Tunnel are expected to be completed successfully and on time.

PROJEKTDATEN

Region

Prättigau, Graubünden, Schweiz

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

Bauherr: Bundesamt für Strassen (ASTRA),
Filiale Bellinzona
BHU: ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich

Planung und Bauleitung

IG Gost: Aegerter & Bosshardt AG, Basel, und
Lombardi AG, Luzern

Ausführung

Implenia Schweiz AG

Kenndaten

Bauzeit:	2019 + 2020
Inbetriebnahme:	2020
Gesamtkosten:	25 Mio. Schweizer Franken
Gesamtlänge:	230 m
Gesamtlänge Talröhre:	1181 km
Ausbruchquerschnitt:	30 m ²

Besondere Merkmale

Instandstellung Strassentunnel

PROJECT DATA

Region

Prättigau, Graubünden, Switzerland

Client, project management and senior site management

Client: Swiss Federal Roads Office (ASTRA),
Bellinzona branch
BHU: ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich

Planning and site management

IG Gost: Aegerter & Bosshardt AG, Basel, and
Lombardi AG, Luzern

Construction

Implenia Schweiz AG

Key data

Construction period:	2019 + 2020
Commissioning:	2020
Total costs:	25 million Swiss francs
Total length:	230 m
Gesamtlänge Talröhre:	1,181 km
Excavation cross-sectional area:	30 m ²

Special features

Repairing a road tunnel



Die Koralmbahn Ingenieurskunst aus Österreich

*Klaus Schneider, Referent, Dr., ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT
Jürgen Egger, Co-Autor, DI, ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT*

Die Koralmbahn

Ingenieurskunst aus Österreich

Die Koralmbahn zählt in ihrer Gesamtheit zu den grössten Eisenbahninfrastrukturprojekten in Europa. Sie ist wichtiger Bestandteil der Baltisch-Adriatischen Achse des EU-Kernnetzes und stellt national einen wesentlichen Beitrag zur Modernisierung der Südstrecke in Österreich dar. Am Weg zur fertigen Koralmbahn stehen dabei zahlreiche Innovationen und Herausforderungen.

The Koralm Railway

Engineering Expertise From Austria

As a whole, the Koralm railway is among Europe's largest railway infrastructure projects. It is an important part of the Baltic-Adriatic Corridor of the EU's core network and, on a national level, represents a key contribution to the modernisation of the Southern Line in Austria. There are numerous innovations and challenges along the way to completing the Koralm railway.

1 Projektbeschreibung und Nutzen

Die Koralmbahn ist eine zweigleisige, elektrifizierte Neubaustrecke zwischen den österreichischen Landeshauptstädten Graz in der Steiermark und Klagenfurt in Kärnten mit einer projektierten Streckenhöchstgeschwindigkeit von 250 km/h und konzipiert für Personen- und Güterverkehr. Die Länge beträgt knapp 130 km, die des Herzstücks – des zweiröhrigen Koralmtunnels – rund 32,9 km. An den 40 bzw. 50 km langen Zulaufstrecken zum Koralmtunnel werden weitere elf Tunnel errichtet. Mit dem Projekt werden überdies 23 Bahnhöfe bzw. Haltestellen, davon zwölf direkt an der Neubaustrecke, inklusive der Fernverkehrsbahnhöfe Weststeiermark und Lavanttal, realisiert.

Darüber hinaus wurden an den Zulaufstrecken im Vorfeld die grossen Knotenbahnhöfe Graz Hbf. und Klagenfurt Hbf. auf die Anforderungen dieser Neubaustrecke grundlegend umgebaut. In Graz wurden dabei mehr als 500 Millionen Euro investiert, um auch die Verknüpfungen mit den städtischen Infrastrukturen optimal anzupassen.

Durch die Realisierung der Koralmbahn als Flachbahn (maximale Längsneigung von 10 ‰) wird eine leistungsstarke Verkehrsachse geschaffen, die sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr international wie national den zukünftig zu erwartenden Anforderungen entspricht.

Als wesentlicher Abschnitt der Baltisch-Adriatischen Achse (Danzig–Ravenna) ist die Strecke Bestandteil des TEN-Kernnetzes (Bild 1) und übernimmt daher wichtige transeuropäische Aufgaben. Sie stellt die östlichste alpenquerende Nord-Süd-Verbindung dar und verbindet die Häfen und

1 Project Description and Benefits

The Koralm railway is a double-track, electrified new railway section between the Austrian provincial capitals of Graz in Styria and Klagenfurt in Carinthia with a projected maximum line speed of 250 km/h and is designed to carry goods and passengers. The length is just short of 130 km, while that of its centrepiece – the twin-tube Koralm tunnel – is around 32.9 km. On the 40 and 50 km access sections to the Koralm tunnel, a further eleven tunnels are under construction. Furthermore, the project will also see 23 stations/stopping points built, of which twelve will be directly on the new railway section, including the long-distance stations Weststeiermark and Lavanttal.

The large hub stations at Graz and Klagenfurt on the access sections have also undergone fundamental advanced renovations to meet the requirements of this new railway section. In Graz, more than 500 million euros were invested to ensure the connections were also optimally adapted to the local infrastructure.

Constructing the Koralm railway on a flat trajectory (maximum longitudinal incline of 10 ‰) has enabled the creation of a high-speed transport axis that meets anticipated future requirements for transporting both goods and passengers nationally and internationally.

As a key section of the Baltic-Adriatic Corridor (Danzig–Ravenna), the section is part of the TEN core network (Fig. 1) and therefore performs important trans-European tasks. It represents the eastern transalpine north-south link and connects the ports and regions in the north (Baltic Sea,

Le chemin de fer de Koralm

Chef d'œuvre d'ingénierie en Autriche

La ligne de chemin de fer à double voie électrifiée haute performance à grande vitesse doit permettre de relier les deux capitales régionales autrichiennes Graz et Klagenfurt à 250 km/h. Le tunnel de Koralpe et ses 32,9 km constituent le cœur du projet. Les premiers travaux dans les environs des deux capitales régionales ont commencé en 1999. Les opérations des principaux lots du tunnel à double galerie sont en court depuis 2008. L'une tubes des tunnel a été achevé s'est faite en 2018, tandis que sur l'autre, elle est prévue au premier semestre 2020.

La ferrovia della Koralpe

Arte ingegneristica austriaca

La tratta ferroviaria ad alta velocità elettrificata a doppio binario tra i due capoluoghi di stati federati austriaci di Graz e Klagenfurt è progettata con una velocità massima sulla tratta di 250 km/h. Il cuore dell'opera è rappresentato dalla galleria della Koralpe, lunga 32,9 km. Le prime misure edili nelle aree di prossimità dei capoluoghi di stati federati sono iniziate nel 1999. Dal 2008 si lavora al lotto edile principale della galleria a due canne della Koralpe. Nel 2018, in una delle canne della galleria della Koralpe, è stato abbattuto l'ultimo diaframma; per la seconda canna, si prevede che questo avvenga nel primo semestre del 2020. La conclusione dei lavori è prevista per il 2025.

Regionen im Norden (Ostsee, Baltikum, Polen) mit Zentral-europa sowie den Häfen und Regionen des oberen adriatischen Raumes.

Baltic region, Poland) with Central Europe and the ports and regions in the upper Adriatic area.

Darüber hinaus ist sie auch ein innerösterreichisch begründetes Projekt, das einen wesentlichen Beitrag zur Mo-

Furthermore, this is also a project initiated in Austria, which represents a key contribution to modernising and increasing the efficiency of so-called Southern Line (Fig. 2).



1 Baltisch-Adriatische Achse
Baltic-Adriatic Corridor

Quelle/credit: ÖBB/www.heiderklausner.at



Quelle/credit: ÖBB/www.heiderklausner.at

2 Die Koralmbahn

The Koralm railway

Modernisierung und Leistungssteigerung der sogenannten Südstrecke (Bild 2) darstellt. Der Güterverkehr kann dadurch zukünftig als ein wirtschaftlicher und konkurrenzfähiger Betrieb geführt werden. Für den Personenverkehr werden attraktive Reisegeschwindigkeiten – 45 Minuten Fahrzeit von Graz nach Klagenfurt – erreicht. Im Vergleich dazu benötigt man auf dem gut ausgebauten Strassennetz für dieselbe Strecke über 1,5 Stunden. Entsprechend der Siedlungsdichte entlang der Südstrecke können damit Verkehrskapazitäten mit konkurrenzfähiger Qualität erzielt werden.

Die Koralmbahn bringt überdies eine verbesserte Anbindung der regionalen Wirtschafts- und Lebensräume der Weststeiermark (Deutschlandsberg) und Unterkärntens (Bleiburg, St. Andrä, St. Paul im Lavanttal, Wolfsberg) an den überregionalen Bahnverkehr bzw. die Grossräume Graz und Klagenfurt. Das hat eine Verbesserung der Qualität und Attraktivität der Regionen entlang der Koralmbahn zur Folge. Langfristig werden die Wirtschaftsstandorte entlang der Achse und damit auch im Süden Österreichs sichergestellt und gestärkt.

Die Integration eines leistungsfähigen S-Bahn-Verkehrs in ein Hochleistungseisenbahnsystem war dabei eine besondere Herausforderung. Die Planungen richteten sich nach dem Grundsatz der grösstmöglichen Kundenorientiertheit, um die Gesamtreisezeiten so niedrig wie möglich zu halten und auch in Form neuer Bahnhöfe einen modernen und einfachen Zugang zum System Eisenbahn zu gewährleisten.

This will make goods transport a more economical and competitive enterprise in the future. For passenger transport, attractive travel speeds are achieved, e.g. 45-minute journey time from Graz to Klagenfurt. By comparison, it takes over an hour and a half to make the same journey on the well-developed road network. In accordance with the population density along the Southern Line, this will therefore add transport capacity of a competitive quality.

The Koralm railway will also improve connections between the regional business and residential areas in Western Styria (Deutschlandsberg) and Lower Carinthia (Bleiburg, St. Andrä, St. Paul im Lavanttal, Wolfsberg) and trans-regional rail links, and the greater Graz and Klagenfurt areas. This will consequently raise the quality and profile of the regions along the Koralm railway. In the long term, this will safeguard and strengthen the business locations along the corridor and therefore also in southern Austria as a whole.

Integrating an efficient suburban rail system into a high-speed rail system has proved a particular challenge here. The main principle behind the designs was maintaining the greatest possible level of customer focus, with a view to keeping the overall journey times as low as possible and ensuring modern and easy access to the railway system in the form of new railway stations.

2 Project History

The major project for the Koralm railway was given the green light in 1995, when the start of the planning phase

2 Projekthistorie

Den Startschuss für das Grossprojekt Koralmbahn stellte die Planungsübertragung durch Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr im Jahr 1995 dar. Die ersten bestandsnahen Baumaßnahmen im Bereich der Landeshauptstädte begannen 1999, sie wurden sukzessive auch in Betrieb genommen. Im Jahr 2008 begannen die Vortriebsarbeiten mit den Hauptbaulosen des zweiröhrigen Koralm-tunnels. Ursprünglich für den Abraumtransport vorgezogen errichtet, wurde 2010 im ersten Neubauabschnitt unter sehr hohem Kundenzuspruch der Teilbetrieb aufgenommen. 2018 wurde in der einen Röhre des Koralmtunnels der Durchschlag geschafft. Seit 2019 sind alle Abschnitte der Koralmbahn im Bau, im Rohbau fertiggestellt oder mit Bahntechnik ausgerüstet. Für die erste Jahreshälfte 2020 ist der letzte Durchschlag im Koralmtunnel prognostiziert. Die herausfordernde Ausrüstung des Koralmtunnels beginnt 2021. Parallel dazu läuft die Inbetriebnahmeplanung für die gesamte Hochleistungsstrecke, um die 50 Kilometer lange Zulaufstrecke von Klagenfurt bis zum Portal des Koralmtunnels in Kärnten im Dezember 2023 in Betrieb nehmen zu können. Die Gesamtfertigstellung des 5,4 Milliarden Euro teuren Gesamtprojektes ist für 2025 geplant.

3 Innovationen und Herausforderungen am Weg zur fertigen Koralmbahn

Eine besondere Charakteristik eines Projektes dieser Dimension ist die extrem lange Projektdauer und damit die Herausforderung, die grundlegenden Ziele des Projektes bei sich verändernden Rahmenbedingungen konstant zu halten. Im konkreten Fall der Koralmbahn wurden die Planungsaktivitäten nach der Beauftragung im Jahr 1995 gestartet und die umfangreichen Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahren und eisenbahnrechtlichen Baugenehmigungsverfahren Anfang der 2000er-Jahre durchgeführt. Somit wird das Projekt bei Inbetriebnahme eine Gesamtrealisierungszeit von ca. 30 Jahren erreicht haben.

Demgegenüber haben sich aber die technologischen Halbwertszeiten und Entwicklungszyklen in den letzten Jahren deutlich verkürzt. So werden zum Beispiel in der Telekommunikationstechnik zwei bis fünf Jahre als übliche Technologiezyklen gesehen. Parallel sind öffentliche Verkehrsinfrastrukturbauten von den jeweiligen Eigentümerinteressen und politischen Zielen abhängig, welche sich aber durch die demokratische Periodizität (vier bis fünf Jahre) auch in diesen Zeitintervallen ändern können.

Eine wesentliche Aufgabe und Herausforderung des Projektmanagements ist es daher, laufend abzuwägen, in welchem Mass Veränderungen im Projekt zugelassen werden, ohne die Grundsätze des Projektes und des Genehmigungsstandes zu verlassen. Der Anspruch, ein Projekt nach 20 bis 30 Jahren Planung und mit einem ebenso alten Genehmigungsstand, nach dem aktuellen Stand der Technik und mit einer Zukunftsvision von 150 bis zu 180 Jahren in Betrieb zu nehmen, erfordert daher in vielen Bereichen innovatives Denken.

was ordered by the Federal Minister for Public Economy and Transport. Construction began in 1999 on the existing infrastructure in the provincial capitals, with the systems then gradually being put into operation. In 2008, the excavation work began with the main sections of the twin-tube Koralm tunnel. Originally constructed in advance to transport muck, limited service began in the first newly constructed section in 2010, with an extremely high level of customer response. In 2018, a breakthrough was achieved in one of the Koralm tunnel's tubes. As of 2019, all sections of the Koralm railway are either under construction, have been equipped with rail technology, or the tunnel construction has been completed. A final breakthrough in the Koralm tunnel is anticipated to be achieved in the first half of 2020. The challenging installation work in the Koralm tunnel will begin in 2021. Parallel to this, planning for the commissioning of the entire high-speed line is in progress, with a view to putting the 50-kilometre access line from Klagenfurt to the portal of the Koralm tunnel in Carinthia into operation in December 2023. Overall completion for the entire 5.4-billion-euro project is planned for 2025.

3 Innovations and Challenges along the Way to Completing the Koralm Railway

One particular characteristic of a project of this scale is the extremely long project duration and therefore the challenge of staying on track with the fundamental objectives of the project in the face of changing conditions. In the specific case of the Koralm railway, planning activities began following the award of the project in 1995 and the comprehensive environmental impact assessment process and building permit process in line with railway law carried out in the early 2000s. This means that the project implementation will have taken approx. 30 years in total when it is put into operation.

On the other hand, technological half-life periods and development cycles have significantly reduced in recent years. For instance, in telecommunications technology, two to five years are considered normal technology cycles. At the same time, public transport infrastructure projects are dependent on the respective owner interests and political objectives, which can also change in these time intervals due to democratic periodicity (four to five years).

A key task and challenge of project management is therefore to assess on an ongoing basis the extent to which changes to the project can be permitted, without deviating from the fundamental principles of the project and the permit status. The task of putting a project into operation after 20 to 30 years of planning and with an equally old permit status, in line with the state of the art and with a future vision of 150 to 180 years, therefore requires innovative thinking in many areas.

3.1 Official Procedures and Public Involvement

Railway construction should be understood as an activity carried out by and for people. A prerequisite for this is regular and objective communication with all stakeholders.

3.1 Behördenverfahren und Bürgerbeteiligung

Der Eisenbahnbau ist als Tätigkeit von und für Menschen zu verstehen. Eine Voraussetzung dafür ist die regelmässige und sachliche Kommunikation mit allen Interessensvertretern. In Arbeitsforen (Regional- und Gemeindeforen), Informationsveranstaltungen und Broschüren wurden die Regionen über jede Planungsphase informiert und die Trassenplanung interaktiv erarbeitet (Ephesos-Modell). Die Wertehaltungen der Interessensvertreter zu entscheidungsrelevanten Themen wurden dabei direkt mit den fachlichen, objektivierbaren Kriterien verknüpft und dienen als Grundlage für die Trassenentscheidungen. Dadurch konnte eine hohe Akzeptanz der Bevölkerung und in sämtlichen Behördenverfahren positive Ergebnisse erzielt werden. Diese intensive Projektinformation wird auch während der gesamten Errichtung weitergeführt. Mithilfe fixer Ausstellungen in einzelnen Projektabschnitten, ergänzt durch die Möglichkeit organisierter Baustellenbesuche, werden Fragen zu allen Themen von der Projektidee bis zum Betrieb beantwortet.

3.2 Bauen unter Betrieb

In Teilbereichen der Koralmbahn verläuft die Strecke bestandsnah. Hier werden grosse Anstrengungen unternommen, um unter den strengen Auflagen zur Sicherung des Bahnbetriebs und zur Sicherstellung des Arbeitnehmerschutzes die Einschränkungen für den Kunden so gering wie möglich zu halten. Dieselben Herausforderungen, jedoch in wesentlich grösseren Dimensionen, wurden beim Umbau des Grazer Hauptbahnhofs bewältigt. Dabei wurden unter laufendem Betrieb (über 2000 Zug- und Verschiebfahrten täglich) Eisenbahnbrücken, Gleisanlagen und die Bahnsteigbereiche umgebaut.

3.3 Architektur

Bei der Koralmbahn handelt es sich um ein Gesamtbauvorhaben von knapp 130 km Länge mit einer Vielzahl von Kunstbauwerken und Bahnhöfen. Ein Vorhaben dieser Dimension wird daher das Landschafts- und Städtebild wesentlich neu prägen. Daher wurde bereits zu Beginn der Planungsaktivitäten auf eine einheitliche architektonische Linie Wert gelegt und ein eigenes Corporate Design für die Koralmbahn entwickelt. Diese Gestaltungsrichtlinien sollen eine gleichartige Wahrnehmbarkeit des Projektes gewährleisten und auch die hochwertige Qualität der technischen Bauwerke optisch untermauern (Bild 3).

3.4 Archäologie

Bereits im Planungsstadium der Koralmbahn wurden mit dem Bundesdenkmalamt und den archäologischen Landesstellen sogenannte Verdachtsflächen definiert, wo archäologische Funde wahrscheinlich sein würden. Rechtzeitig vor Baubeginn wurden diese Flächen untersucht, um historische Bodendenkmäler für die Nachwelt zu erhalten. Damit leisten Projekte wie die Koralmbahn einen wichtigen Beitrag zur Landesgeschichtsforschung, was auch zu einer Neubetrachtung des historischen Detailwissens führen kann. Archäologen entdeckten auf beiden Seiten der Koralm ein dichtes Netz aus Wegen und Fahrspuren, die Zeugnis dafür

The various regions involved were informed about each planning phase in working forums (regional and community forums), information events and brochures, and the route planning was worked upon in an interactive format (Ephesos model). This established a direct connection between the values of the stakeholders on subjects relevant to the decision-making process and the technical, objective criteria, and served as a basis for making decisions about the route. This resulted in a high level of acceptance among the population and enabled positive results to be achieved in all official procedures. This approach of providing extensive project information is continuing throughout the entire construction period. With permanent exhibitions in individual project phases, supplemented by the opportunity for organised site visits, questions on all subjects from the project conception through to operations can be answered.

3.2 Construction During Operation

Some sections of the Koralm railway run along existing lines. In these sections, great efforts are being made to minimise restrictions on customers while observing the strict requirements for safeguarding rail operations and ensuring employee protection. The same challenges, albeit on a significantly larger scale, were overcome when upgrading Graz main station. This involved upgrading railway bridges, track systems and platform areas (over 2,000 train and shunting journeys per day) during normal operations.

3.3 Architecture

For the Koralm railway, the overall construction project covers almost 130 km and includes various engineering structures and railway stations. A project of this scale will therefore considerably reshape the landscape and cityscape. For this reason, right from the start of planning activities, emphasis was placed on ensuring that a uniform architectural line was maintained, and a dedicated corporate design was developed for the Koralm railway. These design guidelines are intended to ensure the project has a homogeneous appearance and also to visually underpin the high quality of the technical constructions (Fig. 3).

3.4 Archaeology

Right from the planning stage for the Koralm railway, areas of potential concern where archaeological findings were likely to be found were identified in cooperation with the Federal Monuments Office and the provincial archaeological offices. In good time before the start of construction, these areas were examined in order to preserve historical archaeological monuments for posterity. In this way, projects like the Koralm railway make an important contribution to research into national history, which can also shed new light on detailed historical knowledge. On both sides of the Koralm, archaeologists discovered a dense network of trails and tracks, thus demonstrating that the route of the Koralm railway was used as a transport and trade route from the Bronze Age up to the early modern period.

sind, dass die Trasse der Koralmbahn bereits von der Bronzezeit bis in die frühe Neuzeit als Verkehrs- und Handelsweg verwendet wurde.

3.5 Kriegsrelikt- erkundung

Mit einer anderen Art von «Verdachtsflächen» sind Grossprojekte speziell in Nahbereichen bestehender Industrie- und Infrastrukturanlagen und Verkehrsverbindungen konfrontiert. Detailliert ausgewertete Luftbildaufnahmen, fotografiert während und nach dem Zweiten Weltkrieg, weisen Flächen mit potenzieller Kampfmittelbelastung aus. Auf der Koralmbahn wurden nach diesen Luftbildauswertungen Erkundungsmassnahmen wie Bohrlochgeophysik, Oberflächensondierung, Georadar, Geomagnetik sowie kampfmittelsicherheits-technische Baubegleitung angewendet, um ein kampfmittelfreies Bau-
feld sicherzustellen. Eine zusätzliche Besonderheit fand im Bereich der Drauerquerung bei Stein statt. Dort kamen Taucher zum Einsatz, um Brückenpfeiler sicher gründen zu können. Im Fall eines Kampfmittelfundes steht nicht nur die Bauzeit still: Im Normalfall werden Kampfmittel von der zuständigen Behörde geborgen und abtransportiert. Ist das, wie in einem Fall am Grazer Hauptbahnhof, nicht möglich, wird eine gezielte Sprengung mit weitreichenden Folgen wie Betriebseinstellung und Hausräumungen – in einem weiten Radius um die Fundstelle – veranlasst.

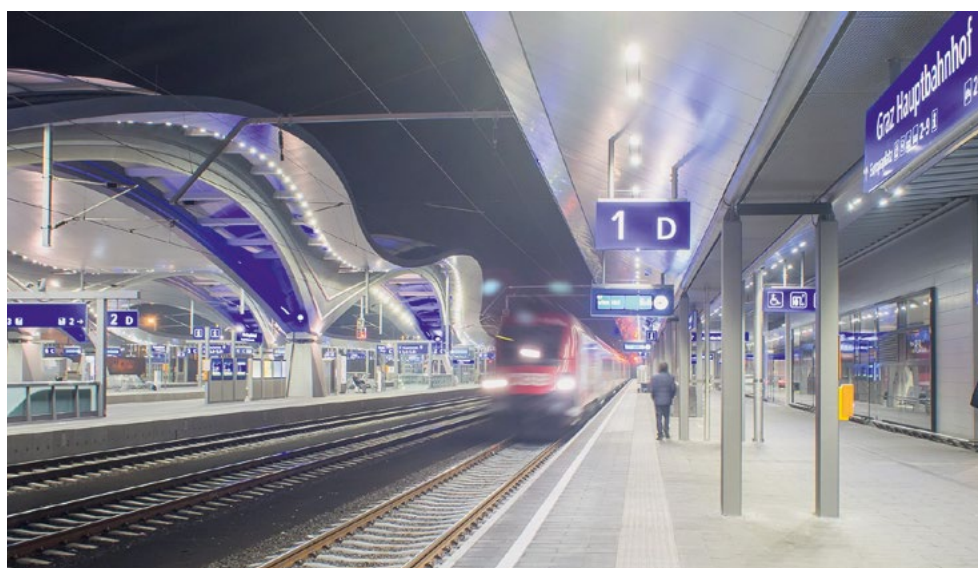
3.6 Brückenbau

3.6.1 Jauntalbrücke

Eines der auffälligsten Bauwerke der Koralmbahn ist die circa 430 m lange, zweigleisige Jauntalbrücke. Mit einer Höhe von rund 90 m wird die Drau an exakt derselben Stelle überquert wie mit der bestehenden eingleisigen Brücke aus dem Jahr 1964. Um Teile der Brücke zu erhalten, wurden die vier Brückenpfeiler eingehend untersucht und die Tragfähigkeit für die künftigen Beanspruchungen durch den Hochleistungsverkehr bestätigt. Das eingleisige Stahltragwerk wird durch eine neue, zweigleisige Stahlverbundkonstruktion ersetzt und dabei als Hilfskonstruktion für den Einschub des neuen Tragwerkes dienen.

3.6.2 Freiformschale

Für eine Wildbrücke im Kärntner Zulaufbereich wurde als innovative Methode die Herstellung einer Freiformschale gewählt. Das Bauwerk kann durch seine gewölbeähnliche Form die Lasten mit weniger Beton und weniger Bewehrung abtragen (Bild 4).



3 Bauen unter Betrieb, verbunden mit moderner Architektur
Construction during operation combined with modern architecture

Quelle/credit: ÖBB/Sigi Herzog

3.5 Discovery of War Relics

Major projects, specifically in the immediate vicinity of existing industrial and infrastructure facilities, are confronted with another type of area of potential concern. Aerial photographs taken during the Second World War were analysed in detail and show areas which may potentially harbour explosive ordnance. On the Koralm railway, exploratory measures such as borehole geophysics, surface probing, georadar, geomagnetics and explosive ordnance safety-related construction support were implemented based on these aerial photographs to ensure that the construction area was free of explosive ordnance. Another special feature was in the area of the Drau river crossing at Stein, where divers were deployed so that the bridge piers could be securely founded. If explosive ordnance is discovered, it is not only construction that comes to a halt: explosive ordnance is usually made safe and removed by the responsible authorities. Should this not be possible, as in one case at Graz main station, a controlled explosion is arranged, with far-reaching consequences, such as business shutdowns and evacuations in a wide radius around the location of the find.

3.6 Bridge Construction

3.6.1 Jauntal Bridge

One of the most striking structures on the Koralm railway is the approx. 430 m long, double-track Jauntal bridge. At a height of around 90 m, the bridge crosses the Drau at exactly the same location as the existing single-track bridge built in 1964. In order to preserve sections of the bridge, the four bridge piers were carefully examined and the load capacity verified for the future loads from high-speed rail traffic. The single-track steel bearing structure is being replaced by a new, double-track steel composite construction and also serves as an auxiliary structure for the insertion of the new support structure.



Quelle/credit: ÖBB/Erich Varth

4 *Wildbrücke als freie Formschale*
Wildlife viaduct in the form of a free-form shell

3.6.2 Free-Form Shell

An innovative free-form shell was selected as the method for the construction of a wildlife viaduct in the Carinthia access area. Thanks to its dome-like shape, the structure can disperse the loads with less concrete and less reinforcement (Fig. 4).

3.6.3 Drau River Crossing at Stein

At around 600 m, the Drau bridge at Stein is Carinthia's longest railway bridge. For the construction, the supporting structure was moved over the Drau by hydraulic presses using the incremental launch method (Fig. 5). Numerous accompanying

environmental protection measures were implemented in the sensitive areas of wetland alongside the Drau.

3.6.3 Drauquerung bei Stein

Mit rund 600 m ist die Draubrücke bei Stein die längste Eisenbahnbrücke Kärntens. Für die Errichtung wurde das Tragwerk im Taktschiebeverfahren mittels hydraulischer Pressen über die Drau vorgeschoben (Bild 5). Begleitend dazu wurden in den sensiblen Gebieten der Drauauen zahlreiche Umweltschutzmassnahmen umgesetzt.

3.7 Tunnelbau

3.7.1 Vorerkundungsstrategie

Der Vorerkundung des Koralmtunnels und der damit verbundenen Trassenfindung wurde bereits beim Projektstart ein besonders hoher Stellenwert beigemessen. Alle gängigen Erkundungsmethoden – ergänzt um eine Vielzahl innovativer Massnahmen – wurden stufenweise im Rahmen eines gesamthaften Erkundungsprogrammes eingesetzt, um den geologischen Aufbau der Koralpe möglichst vollständig räumlich zu erfassen. Insgesamt wurden rund 21 000 Laufmeter Kernbohrungen abgeteuft – die spektakulärsten davon in Tiefen von bis zu 1200 m. Von den Randbereichen aus wurde zusätzlich ein 10 km langes System von Erkundungstunneln und -schächten errichtet, das wichtige Aufschlüsse über die geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Verhältnisse im Berginneren gab. Diese Ergebnisse waren die Grundlage, um den Baugrund für die Bauausschreibung detailliert beschreiben zu können. Die Lage der Erkundungstunnel wurde nach ausgewerteten Kernbohrungen dabei bereits so gewählt, dass sie sich mit der Lage der zukünftigen Tunnelröhren decken würde.

3.7.2 Tunnelsysteme

Der 32,9 km lange Koralmtunnel und der 6,1 km lange Granitzaltunnel werden aufgrund ihrer Länge zweiröhrig-ein-

3.7 Tunnel Construction

3.7.1 Preliminary Exploration Strategy

The preliminary exploration of the Koralm tunnel and the associated route planning was given particularly high priority right from the start of the project. All common exploration methods – complemented by a variety of innovative measures – were phased in as part of an overall exploration programme, in order to record as much as possible about the geological structure of the Koralm in spatial terms. In total, around 21,000 linear metres of core drill holes were sunk – the most spectacular of which were at depths of up to 1,200 m. From the peripheral areas outwards, a 10 km long system of exploratory tunnels and shafts was constructed, yielding important information about the geological, hydrogeological and geothermal conditions inside the mountains. These findings were used as a basis for the detailed description of the construction ground for the construction tender. After core drilling had been carried out and assessed, the position of the exploratory tunnels was selected in such a way that they would be covered by the position of the future tunnel tubes.

3.7.2 Tunnel Systems

Due to their length, the 32.9 km long Koralm tunnel and the 6.1 km long Granitzaltunnel have a twin-tube/single-track construction and are interconnected by “cross-passages” every 500 m. The main reason for this is the significantly increased operational availability of the railway in comparison to a single-tube/double-track rail tunnel system.

gleisig und mit Querverbindungen, sogenannten Querschlägen, alle 500 m ausgeführt. Hauptgrund dafür ist eine deutlich erhöhte bahnbetriebliche Verfügbarkeit gegenüber einröhrig-zweigleisigen Bahntunnelsystemen. Darüber hinaus waren auch sicherheitstechnische, bau- und erhaltungstechnische Kriterien ausschlaggebend für die Wahl dieses Tunnelsystems. Alle übrigen Tunnelbauwerke der Koralmbahn, beginnend beim Flughafentunnel Graz bis hin zum Grüntunnel Grafenstein mit einer maximalen Länge von 3,2 km, werden einröhrig-zweigleisig ausgeführt.



Quelle/credit: ÖBB

5 Drauquerung im Taktschiebeverfahren
Drau river crossing – incremental launch method

3.7.3 Baumethoden im Tunnelbau

Entlang der Koralmbahn kommen in der Realisierung der Tunnelbauwerke unterschiedliche Bau- und Vortriebsmethoden, abhängig von den geologischen und örtlichen Bedingungen, zur Anwendung. Neben der offenen Bauweise wird vorwiegend die geschlossene Bauweise zum Einsatz gebracht. Dabei kann festgehalten werden, dass alle gängigen Tunnelbaumethoden (zyklischer Vortrieb – Lösemethode Baggern oder Sprengen und Stützung mittels Spritzbeton-/Anker Ausbau – sowie kontinuierlicher Vortrieb – Tunnelbohrmaschinen mit nachfolgendem Tübbingausbau) bei der Errichtung der Koralmbahn zum Einsatz gekommen sind. Insgesamt werden circa 45 km der total über 85 Tunnelkilometer mit drei TBM hergestellt. Alle drei Maschinen sind bzw. waren im Koralmtunnel im Einsatz (Bild 6). Im Zuge dessen hat eine Maschine die weltrekordverdächtige Gesamtleistung von 17 145 m (Bild 7) erbracht.

Eine Besonderheit stellt die Tunnelbohrmaschine im Baulos KAT 3 dar, welche für den Vortrieb im Neogen und in einer Störzone als Schildmaschine mit Erddruckkomponenten konzipiert war und nach etwa 4,5 km Vortrieb in eine Hartgesteinsmaschine (TBM-S) umgebaut wurde.

Bedingt durch die bis zu 1200 m hohe Überlagerung beim Koralmtunnel gibt es keine Zwischenangriffe, was zu sehr langen Bauabschnitten führt. Mit den Baulosen im Koralmtunnel sowohl im Rohbau als auch in der Ausrüstung sind damit grosse logistische Herausforderungen verknüpft.

Bei kürzeren Tunnelsystemen erfolgt die Herstellung im zyklischen Vortrieb. Besonders hervorzuheben sind die Tunnel im Bereich St. Kanzian am Klopeiner See, die grösstenteils in

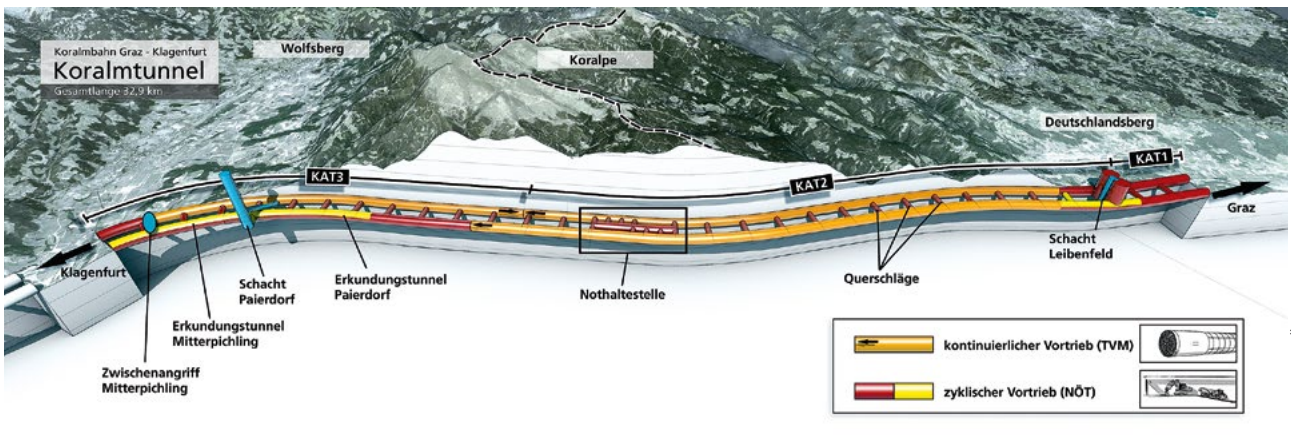
Furthermore, technical safety, construction and conservation criteria were also critical in selecting this kind of tunnel system. All other tunnels on the Koralm railway, starting with the airport tunnel at Graz through to the green tunnel at Grafenstein with a maximum length of 3.2 km, have a single-tube/double-track construction.

3.7.3 Tunnel Construction Methods

Along the Koralm railway, different construction and excavation methods are being used to construct tunnels, depending on the geological and local conditions. While the open-cut method is being used, closed construction is the main construction method. It should be noted here that all common tunnel construction methods (cyclical excavation – digging and blasting as breaking methods, with support in the form of shotcrete/rock bolting – as well as continuous excavation – tunnel boring machines with subsequent segmental lining) have been used during the construction of the Koralm railway. Overall, approx. 45 km of the total of over 85 kilometres of the tunnel were constructed using three TBMs. All three machines are or were in use in the Koralm tunnel (Fig. 6). During this work, one machine achieved a total output of 17,145 m (Fig. 7), which is suspected to be a world record.

The tunnel boring machine used in construction section KAT 3 is distinctive in that it was designed for excavating neogenic rock and for use in a fault zone as a shield machine with earth pressure components, and was converted into a hard-rock machine (TBM-S) after around 4.5 km of excavation.

Due to the overburden of the Koralm tunnel being up to 1,200 m deep, there is no intermediate access, which leads to



Quelle/credit: ÖBB/3D-Schmiede

6 Übersicht Koralmtunnel
Overview of Koralm tunnel

hydrogeologisch schwierigen Bedingungen des Seetons und mit Feinsandeinschlüssen errichtet wurden. Wie schon beim Koralmtunnel fanden in diesem Bereich vorlaufend umfangreiche Erkundungsmassnahmen statt. In einem Probefeld wurden dabei speziell für diese Seetone und Feinsande massgebliche Kennwerte des Baugrunds ermittelt wie auch die Machbarkeit von Spezialtiefbaumassnahmen (Bohrpfähle, Anker, DSV usw.) im Massstab eins zu eins erforscht. Dem folgend wurden Tunnel in offener Bauweise mit Vorlastschüttung, in Deckelbauweise als «schwimmendes» Bauwerk sowie im zyklischen Vortrieb unter dem Schutz von Bohrpfehlwänden sowie eines massiven Gewölbes – hergestellt im Düsenstrahlverfahren – gebaut.

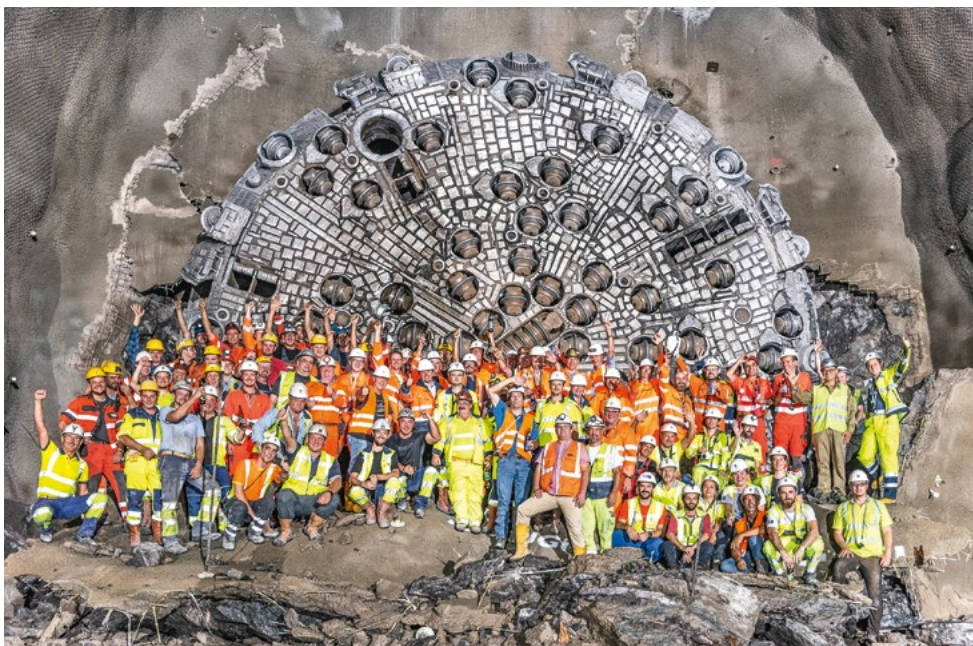
Im Bereich des Hauptbahnhofs Graz wurde schon 2004 ein rund 0,9 km langer Kollektor mittels Rohrvorpressung hergestellt. Mit einem Aussendurchmesser von 3,68 m handelte es

very long construction stages. The construction sections in the Koralm tunnel, both in tunnel construction and in terms of installation work, therefore involve huge logistical challenges.

For shorter tunnel systems, construction is carried out by way of cyclical excavation. The tunnels in the area of St. Kanzian am Klopeiner See are particularly worthy of mention, as they were largely constructed in difficult hydrogeological conditions involving lake clay and fine sand inclusions. As previously with the Koralm tunnel, extensive advance exploratory measures were taken in this area. In a test field, characteristic values specific to this lake clay and fine sand were determined, and the feasibility of special underground engineering measures (bore piles, rock bolts, jet grouting, etc.) investigated on a one-to-one

scale. For this reason, the tunnels were built using the open-cut method with pre-load, using the cut-and-cover method as a “floating” structure, and using cyclical excavation with the support of bored pile walls and a solid dome, produced using the jet grouting process.

In the area of Graz main station, an approx. 0.9 km collector was created using pipe jacking as early as 2004. With an external diameter of 3.68 m, at the time this was the largest cross section that had ever been implemented in this way in Austria. With extremely low overburden of around



Quelle/credit: ÖBB/Georg Piki

7 Tunneldurchschlag am 14. August 2018 – technische Superlative, aber die Menschen stehen im Vordergrund
Tunnel breakthrough on 14 August 2018 – a technical marvel but with a focus on people

sich zu diesem Zeitpunkt um den grössten Querschnitt, der in Österreich auf diese Art und Weise bis dahin ausgeführt worden war. Mit extrem geringer Überlagerung von teilweise nur circa 4 m unter den Gleisen des Grazer Bahnhofs und einer Vielzahl an Kampfmittelverdachtsflächen waren die Rahmenbedingungen für diesen erfolgreich abgeschlossenen Vortrieb extrem schwierig.

3.7.4 Tunnelausbruchmaterial

Das Ausbruchmaterial wird mit Förderbändern aus dem Tunnel transportiert. Dabei sind diese bis zu 20 km lang. Sorgfältig geplante Deponien in unmittelbarer Nähe der Portale sorgen für entsprechend kurze Transportwege. Überdies wird Material für die Verwendung als Dammkörper sowie als Zuschlagstoff für die Betonfertigung aufbereitet. So wurde erreicht, dass nur 10% des gesamten Ausbruchmaterial (gleisgebunden) verführt wurde.

3.8 Eisenbahntechnische Ausrüstung

Prinzipiell werden in allen Abschnitten der Koralmbahn ausschließlich mit aufwendigen Prozessen geprüfte und zugelassene Systemkomponenten eingebaut. Lange Tunnel sind jedoch nicht als Standardbauwerk zu sehen, und es müssen daher häufig individuelle Sonderlösungen gefunden werden. Insbesondere in dem Themenbereich Tunnelsicherheit, Telematik, Leit- und Sicherungstechnik (ETCS L2) sind Erfahrungen und Technologieentwicklungen laufend zu beobachten und in geeigneter Weise im Projekt zu integrieren.

3.9 Ökologie

Im Bewusstsein, dass jede Bautätigkeit einen Eingriff in die Natur darstellt, wurde und wird besonderer Wert auf Nachhaltigkeit in der Herstellung und im Betrieb gelegt. Antransporte mit der Bahn, aber auch kurze Wege für Materialien stehen dabei im Fokus. Mit dem Projekt wurden ausserdem bahnahe Flüsse und Gewässer gestaltet. Einige dieser Flächen sind mittlerweile ausgewiesene Natura-2000- und Naturschutzgebiete.

only 4 m in places beneath the tracks of Graz main station and various suspected explosive ordnance areas, the conditions for this successfully completed excavation were extremely difficult.

3.7.4 Excavated Tunnel Material

The excavated material is transported out of the tunnel using conveyor belts. These can be up to 20 km long. Carefully planned landfill sites in the immediate vicinity of the portals ensure appropriately short transport distances. Furthermore, material is also processed for use as dam bodies and as aggregate for concrete production. In this way, it was possible to ensure that just 10 % of all excavated material (rail-mounted) was transported.

3.8 Railway Equipment Installation

In principle, in all sections of the Koralm railway, only system components that have undergone extensive testing and approval are installed. However, long tunnels should not be viewed as standard constructions and therefore special individual solutions often need to be found. Particularly in the areas of tunnel safety, telematics, control and safety technology (ETCS L2), experience and technological developments must be monitored on an ongoing basis and integrated in the project in an appropriate manner.

3.9 Ecology

Given that each construction activity has an impact on nature, special emphasis is placed on sustainability in production and ongoing operations. The focus here is on transporting to the site by rail and also ensuring short paths for materials. The project also has an impact on the rivers and waterways around the railway. Some of these areas are now recognised as Natura 2000 and environmental protection areas.

PROJEKTDATEN

Region

Bundesländer Steiermark und Kärnten in Österreich

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

ÖBB-Infrastruktur AG, GB Projekte Neu-/Ausbau

Kenndaten

Inbetriebsetzung: Fahrplanwechsel 12/2025
 Gesamtlänge: 130 km
 Ausbruchquerschnitt
 Koralmtunnel : 79 m²
 Züge pro Tag: bis zu 256

Besondere Merkmale

Zweigleisig elektrifizierte Hochleistungsstrecke
 250 km/h mögliche Höchstgeschwindigkeit
 2,5 Stunden Fahrzeit von Wien nach Klagenfurt
 45 Minuten Fahrzeit von Graz nach Klagenfurt

PROJECT DATA

Region

Federal provinces of Styria and Carinthia in Austria

Client, project management and senior site management

ÖBB-Infrastruktur AG, GB Projekte Neu-/Ausbau

Key data

Planned service start: timetable change 12/2025
 Total length: 130 km
 Excavation cross section
 of Koralm tunnel: 79 m²
 Trains per day: up to 256

Special features

Double-track electrified high-speed line
 250 km/h possible high speed
 2.5 hours journey time from Vienna to Klagenfurt
 45 minute journey time from Graz to Klagenfurt



Bauablauf KAT3

Trotz intensiver Erkundung ist Flexibilität erforderlich

DI Martin Diewald, PORR Bau GmbH/Tunnelbau, Wien/AT

Bauablauf KAT3

Trotz intensiver Erkundung ist Flexibilität erforderlich

Beim Baulos KAT3 des Koralmtunnels erfolgt die projektgemässe Hohlraumherstellung über zyklische und kontinuierliche Vortriebe. Beim TVM-Vortrieb sollen neogene Gebirgsformationen, das harte Kristallin und mehrere Störungszonen mit einer umbaubaren TVM bewältigt werden. Es wird von den Aufgaben für den TVM-Vortrieb in den Störungszonen berichtet.

Construction Process KAT3

Despite Extensive Exploration, Flexibility Is Required

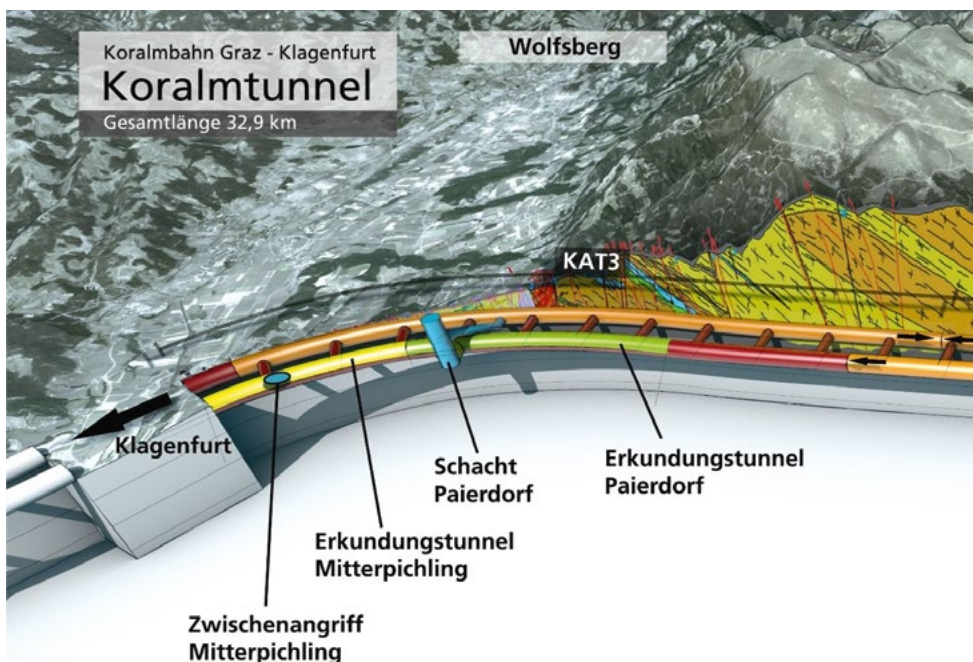
For construction section KAT3 of the Koralm tunnel, the cavities required for the project are created using cyclical and continuous excavations. The TBM excavation involved overcoming neogenic rock formations, hard crystalline rock and several fault zones with a convertible TBM. Here, we look at the tasks required for TBM excavation in the fault zones.

1 Einleitung

Für den Koralmtunnel wurden umfangreiche Erkundungsmassnahmen durchgeführt, um die Vortriebsarbeiten gewissenhaft vorzubereiten. Beim Baulos KAT3 auf der Kärntner Seite der Koralmpe mit 1200 m Überlagerung wurden Erkundungstunnel mit 8 km Länge hergestellt.

1 Introduction

Extensive exploration measures were carried out for the Koralm tunnel, to ensure rigorous preparation for the excavation work. For construction section KAT3 on the Carinthia side of the Koralm with 1,200 m of overburden, 8 km exploratory tunnels were created.



Quelle/Credit: ÖBB

1 Übersicht Baulos KAT3 des Koralmtunnels: Nordröhre (oben) mit kontinuierlichem Vortrieb und Südröhre (unten) mit zyklischem Vortrieb

Overview of construction section KAT3 of the Koralm tunnel: north tubes (top) with continuous excavation and south tubes (bottom) with cyclical excavation

As the contractor for Austrian Federal Railways, PORR Bau GmbH was faced with the task of extending and widening the south tubes, in whose cross section the exploratory tunnel was situated, to the full cross section. For the north tubes, the investigations indicated that machine excavation would be possible. A tunnel boring machine (TBM) was then designed in close cooperation with the contractual partners to carry out the excavation work in the Lavanttal main fault zone and the crystalline rock.

A further contribution is limited to the excavation work with the TBM in the north tubes. The extent to

Phases des travaux KAT3

Malgré un intense travail de recherche, une certaine flexibilité est nécessaire

Même après une préparation exemplaire sur un projet, la phase de construction requiert l'intervention des ingénieurs. L'élaboration conjointe des opérations à mener ne s'arrête pas à la rédaction du contrat. Au contraire, elle ne fait alors que commencer. L'exemple de deux importantes zones de faille doit permettre de montrer où se situent les limites et la pertinence d'un avancement par tunnelier. Les chapitres suivants entreront dans les détails d'un cas complexe d'avancement par tunnelier, tout en mettant en exergue des conseils utiles pour de nouveaux projets.

Fasi d'esecuzione KAT3

Nonostante le esplorazioni approfondite, la flessibilità è necessaria

Nonostante la preparazione esemplare di un progetto, nella fase dei lavori edili sono richieste delle prestazioni ingegneristiche. L'elaborazione comune dei compiti da svolgere non si conclude con la stesura del contratto, ma inizia piuttosto in quel momento. Sulla base dell'esempio di due grandi zone di faglia, si punta a dimostrare dove si raggiungono i limiti e la sensatezza di un avanzamento con una fresa meccanica a piena sezione. Nei successivi capitoli si affronteranno alcune tematiche dettagliate di un complesso avanzamento con una fresa meccanica a piena sezione e si forniranno degli spunti utili per i progetti futuri.

Die PORR Bau GmbH als Auftragnehmer der Österreichischen Bundesbahnen stand vor der Aufgabe, die Südröhre, in deren Querschnitt der Erkundungstunnel lag, zu verlängern und auf den vollen Querschnitt aufzuweiten. Für die Nordröhre haben die Untersuchungen ergeben, dass ein Maschinenvortrieb möglich ist. So wurde in enger Abstimmung der Vertragspartner eine Tunnelvortriebsmaschine (TVM) konzipiert, die im Neogen, in der Lavanttaler Hauptstörung und im Kristallin die Vortriebsarbeiten ausführen würde.

Der weitere Beitrag beschränkt sich auf die Vortriebsarbeiten mit der TVM in der Nordröhre. Die Grenzen der Sinnhaftigkeit eines TVM-Vortriebs unter komplexen Randbedingungen werden beispielhaft an zwei Störungszonen diskutiert. Beim Bauvorhaben KAT3 wurde der TVM-Vortrieb über zyklische Vortriebe unterstützt. So konnten die Stärken der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise genutzt werden. Ein solches wirtschaftliches Vorgehen setzt aber eine flexible Projektabwicklung voraus.

2 Erkundung und Vortriebskonzept Nordröhre

2.1 Geologischer Aufbau Baulos KAT3

Das Baulos KAT3 auf Kärntner Seite setzt sich geologisch gesehen aus drei stark differierenden Streckenabschnitten zusammen:

- Der erste Abschnitt beginnt am Westportal aus jungen neogenen Sedimenten.
- Anschliessend folgt im Übergang vom Neogen ins Kristallin die Querung einer etwa 420 m langen Störungszone, der Lavanttaler Hauptstörungszone.
- Der dritte Abschnitt des KAT 3 liegt im Kristallin, bestehend aus Abfolgen, in denen Gneise und Glimmerschiefer dominieren.

2.2 Erkundungsmassnahmen

Zusätzlich zum standardmässig auszuführenden geotechnischen Untersuchungsprogramm wurden zum dichten

which it is sensible to use TBM excavation under complex conditions is discussed using the example of two fault zones. For construction project KAT3, the TBM excavation was supported with cyclical excavations. This meant the strengths of the New Austrian Tunneling Method could be exploited. However, an economical procedure like this also requires flexible project management.

2 Exploration and Excavation Concept – North Tubes

2.1 Geological Composition of Construction Section KAT3

Construction section KAT3 on the Carinthia side is geologically composed of three greatly differing sections:

- The first section begins at the west portal with young neogenic sediment.
- After this, the rock transitions from neogenic to crystalline and the tunnel crosses an approx. 420 m long fault zone, the Lavanttal main fault zone.
- The third section of KAT3 lies in crystalline rock consisting of sequences dominated by gneiss and mica schist.

2.2 Exploratory Measures

In addition to the geotechnical investigation programmes to be carried out as standard, extensive preliminary investigations via shafts and exploratory tunnels (totalling 8 km in length) were carried out in order to obtain more comprehensive information. Among other things, the objective of the extensive exploratory work was to obtain information in order to assess whether or not the north tubes can be constructed using TBM excavation. The assessment was that the findings obtained from the exploratory tunnels would indeed support machine excavation.

2.3 Excavation Concept – North Tubes

The excavation concept derived from the experiences of excavation in the exploratory tunnels stipulated that a shield machine with earth pressure components, which could pro-

Aufschluss umfangreiche Vorerkundungen in Form von Schächten und Erkundungstunneln (in der Summe 8 km Länge) ausgeführt. Ziel der umfangreichen Erkundung war es unter anderem, Aufschlüsse zu bekommen, um abschätzen zu können, ob die Nordröhre als TVM-Vortrieb ausgeführt werden kann. Die Einschätzung war, dass die aus den Erkundungstunneln gewonnenen Erkenntnisse eine Durchgängigkeit des Maschinenvortriebs zulassen.

2.3 Vortriebskonzept Nordröhre

Das aus den Vortriebsverfahren der Erkundungstunnel abgeleitete Vortriebskonzept sah für das Auffahren des Neogenabschnitts und der Lavantaler Hauptstörungszone eine Schildmaschine mit Erddruckkomponenten vor, die bei Bedarf eine aktive Ortsbruststützung erlaubt. Der Kristallinabschnitt sollte nach dem Umbau der Maschine im Hartgesteinsmodus mit einem Bohrkopf durchörtert werden.

2.3.1 Grundanforderungen an die Schildmaschine

Die Grundanforderungen an die Struktur der Schildmaschine:

- Sie sollte einen möglichst kurzen, sich konisch verjüngenden Schild aufweisen.
- Eine umlaufende, geschlossene Felge soll das Einreißen des Gebirges minimieren und damit zur Vermeidung einer vorausseilenden Ortsbrust beitragen.
- Ein gelenkiges Schneidradlager soll Überschneiden ermöglichen.
- Der Bohrkopf ist mit möglichst geringem Öffnungsgrad auszubilden.
- Zur Lagestabilisierung der Maschine (Verrollung) sind Stabilisatoren einzuplanen.
- Vorauserkundungsbohrungen, Drainagebohrungen oder Dichtinjektionen sind über Öffnungen im Schildmantel und Freiflächen im Schneidrad bzw. Bohrkopf ausführbar.

2.3.2 Drei Vortriebs-Modi

Im Gegensatz zum weitestgehend standfesten Gebirge des Kristallins ist im Neogen die Möglichkeit einer aktiven Ortsbruststützung einzuplanen, die durch den Einsatz einer Schildmaschine mit Erddruckkomponenten abgedeckt werden soll. Die Schildmaschine soll in Abhängigkeit von den angetroffenen geologischen Verhältnissen in drei verschiedenen Modi betrieben werden können.

- Offener Modus: Die Erfahrungen aus dem Erkundungstunnel liessen darauf schliessen, dass über grössere Streckenabschnitte im offenen Modus gefahren werden kann (laut Prognose

vide active tunnel face support if required, should be used to excavate the neogenic section and the Lavanttal main fault zone. The crystalline section would be excavated with a cutterhead after converting the machine to hard-rock mode.

2.3.1 Basic Requirements for the Shield Machine

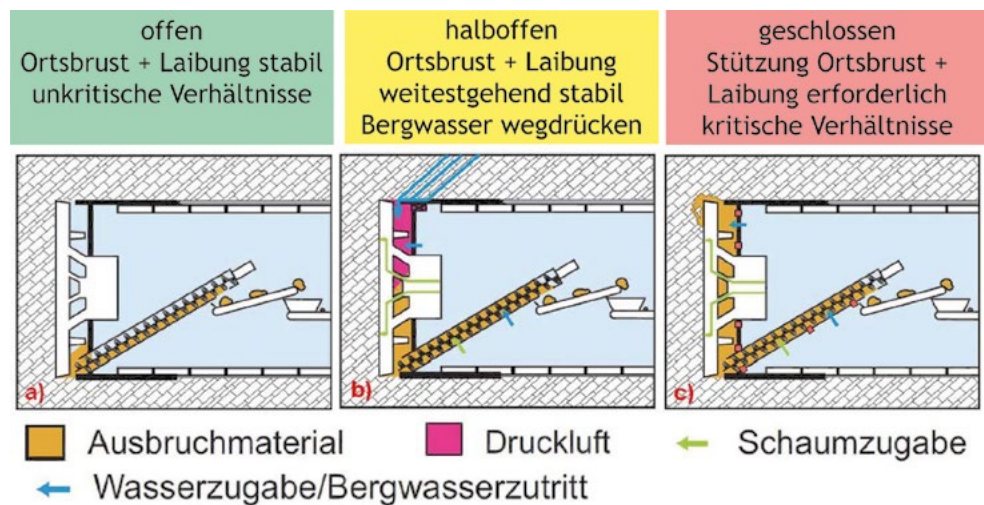
The basic requirements for the structure of the shield machine:

- It should have a conically tapered shield that is as short as possible.
- A rim with a fully closed perimeter should minimise cracks in the rock and therefore help prevent the face from advancing prematurely.
- A tiltable cutting wheel bearing should enable overcutting.
- The cutterhead is to be designed with the smallest possible open area.
- Stabilisers are to be included to stabilise the position of the machine (rolling).
- Advance exploration drill holes, drainage holes and sealing injections can be carried out via openings in the shield skin and open spaces in the cutting wheel/cutterhead.

2.3.2 Three Excavation Modes

In contrast to the largely stable crystalline rock, the neogenic rock offers the possibility of active face support, which is to be covered by the use of a shield machine with earth pressure components. It should be possible to operate the shield machine in three different modes depending on the geological conditions encountered.

- Open mode: Experiences from the exploratory tunnel led to the conclusion that extended sections of the tunnel can be traversed in open mode (according to the projection, 16 % of the entire neogenic section). In this mode, the cutting chamber is only filled to the extent required from a technical perspective.
- In semi-open mode, the cutting chamber is partially filled. Face support is effected on one hand by the extracted material and on the other hand by compressed air; this can hold back groundwater.



2 Die drei Vortriebs-Modi der Schildmaschine KAT3 beim Neogenvortrieb

The three excavation modes of a shield machine KAT3 during neogenic excavation

Quelle/credit: Dr. Markus Weh und Dr. Fritz Hollmann

16 % der Gesamtstrecke Neogen). Die Abbaukammer ist in diesem Modus nur so weit gefüllt, wie es maschinentechnisch erforderlich ist.

- Beim halboffenen Modus ist die Abbaukammer teilgefüllt. Eine Ortsbruststützung wird einerseits durch das Abbaugut und andererseits durch eine Druckluftbeaufschlagung erwirkt, die Grundwasser zurückhalten kann.
- Beim geschlossenen Modus wird über den Erdbrei eine aktive Stützung der Ortsbrust aufgebracht. Dieser Modus setzt eine Verbreitbarkeit des anstehenden Gebirges voraus.

2.3.3 Umbau auf TBM-S

Die Schildmaschine mit Erddruckkomponenten sollte nach Auffahren der Lavanttaler Hauptstörungszone in einer Revisionskaverne auf den Hartgesteinsmodus umgebaut werden. Folgende massgebliche Änderungen ergeben sich durch die Umrüstung der Schildmaschine auf den Schildmaschinentyp TBM-S:

- Umrüstung des Schneidrads auf einen Hartgesteinsbohrkopf;
- Entfall der Möglichkeit zur aktiven Ortsbruststützung;
- Demontage der Förderschnecke und Austrag des Abbauguts durch das Zentrum der Schildmaschine auf die Förderbänder;
- Demontage von Personenschleuse und Materialschleuse;
- Betriebsbereitschaft des Steinbrechers für den Hartgesteinsmodus;
- Umstellung der Ringspaltverfüllung auf überwiegend Ringspaltverblasung mit Perlkies und Vermörtelung im Sohlbereich; in Störungszonen wird weiterhin Rundumvermörtelung ausgeführt.

- In closed mode, active face support is applied in the form of earth paste. This mode requires the ground ahead to be transformed into paste.

2.3.3 Conversion to TBM-S

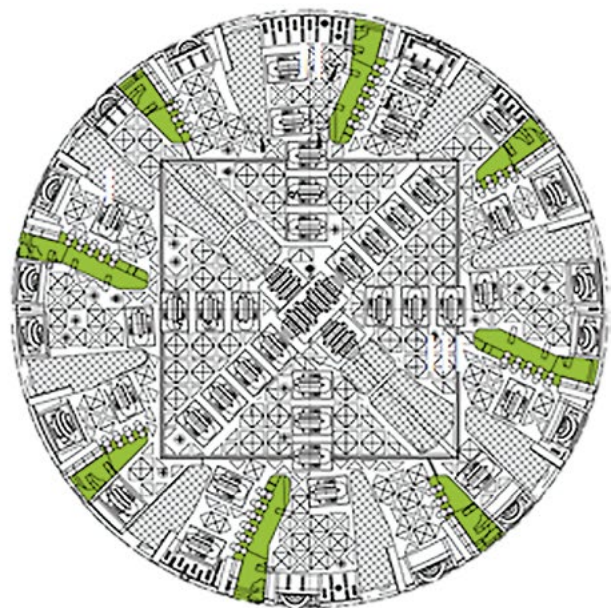
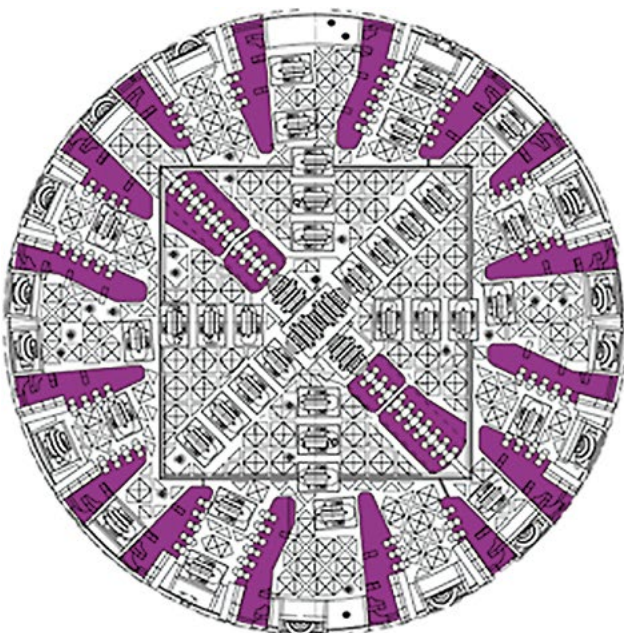
The shield machine with earth pressure components was to be converted into hard-rock mode in a disassembly chamber after crossing the Lavanttal main fault zone. The following essential alterations will be made when converting the shield machine into shield machine type TBM-S:

- The cutting wheel is converted to a hard-rock cutterhead.
- Active face support is no longer possible.
- The screw conveyor is disassembled and the excavated material discharged through the centre of the shield machine on the conveyor belts.
- The manlock and material lock are disassembled.
- Stone crusher for hard-rock mode is ready for operation.
- Annular gap backfilling is switched primarily to annular gap stowing with pea gravel and grouting in the invert region. In fault zones full round backfill grouting is still being performed.

2.3.4 Cutting Wheel and Cutterhead

The company PORR has not offered to replace the cutting wheel with a cutterhead, an expensive process, as envisaged in the tender project. Instead, the properties of a cutting wheel and a cutterhead are to be combined.

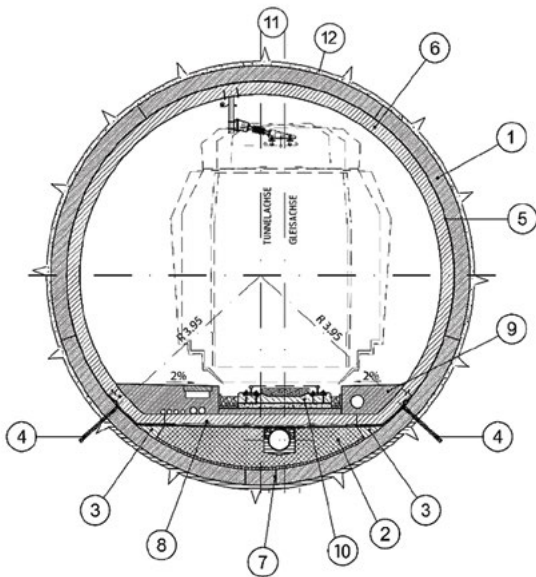
- The cutterhead with a larger open area for neogenic excavation was converted into a largely closed hard-rock cutterhead.
- The two directions of rotation were converted to turn clockwise only for material excavation.



Quelle/credit: Herrenknecht

3 Schneidrad für Neogenvortrieb (Bild links) und Bohrkopf für Kristallinvortrieb (Bild rechts)
Cutting wheel for neogenic excavation (Figure left) and cutterhead for crystalline excavation (Figure right)

Vereinfachter Regelquerschnitt kontinuierlicher Vortrieb
Simplified standard cross section continuous drive



- | | |
|--|--|
| 1. Tübbingring | 1. Lining segment |
| 2. Sohlelement (Fertigteil) | 2. Base element (precast) |
| 3. Innenschalenkeil | 3. Inner shell wedge |
| 4. Drainagebohrung
Drainagebahnen | 4. Drainage borehole
drainage ducts |
| 5. Abdichtungssystem | 5. Membrane |
| 6. Innenschale
(optionaler Entfall) | 6. Inner lining
(optional) |
| 7. Bergwasser-Drainage-
leitung | 7. Ground water drainage
duct |
| 8. Sohlplatte | 8. Ground slab |
| 9. Randweg | 9. Side track |
| 10. Feste Fahrbahn | 10. Slab track |
| 11. Gebirge | 11. Bedrock |
| 12. Ringspalt | 12. Concentric rift |

Quelle/credit: ÖBB

4 Vereinfachter Regelquerschnitt beim kontinuierlichen Vortrieb
Simplified standard cross section during continuous excavation

2.3.4 Schneidrad sowie Bohrkopf

Die Firma PORR hat den aufwendigen Austausch des Schneidrades durch einen Bohrkopf, wie im Ausschreibungsprojekt vorgesehen, nicht angeboten. Vielmehr sollten die Eigenschaften eines Schneidrades und eines Bohrkopfs verschmolzen werden.

- Das Schneidrad mit höherem Öffnungsgrad für den Neogenvortrieb wurde zu einem überwiegend geschlossenen Hartgesteinsbohrkopf umgebaut.
- Die zwei Drehrichtungen wurden für die Materialabfuhr auf ausschliesslich rechtsdrehend umgerüstet.
- Die Abbauwerkzeuge wurden aus dem Mischbesatz aus dem EPB-Modus auf ausschliesslich Diskenbesatz angepasst.
- Mit Rücksicht auf die prognostizierten hohen Druckfestigkeiten von bis zu 300 MPa sowie die hohe Abrasivität von CAI bis zu 6,0 wurden hochverschleissfeste Verschleisschutzplatten im Frontbereich gewählt.

2.4 Ausbau Nordröhre

Für den Ausbau der Nordröhre wurde eine «Einschaligkeit» angestrebt, die durch eine 35 cm starke Tübbingauskleidung realisiert wird. In der Nachschau der Vortriebsarbeiten kann der schlanke Tübbing aufgrund mangelnder Robustheit nicht weiterempfohlen werden.

Sofern geotechnisch und statisch kein Erfordernis bestand, konnte auf den nachträglichen Einbau einer Innenschale verzichtet werden. In Bereichen von Störungszonen von bautechnischer Relevanz sollte standardmässig eine abgedichtete Innenschale eingebaut werden.

- The cutting tools were switched from the mixed equipment used in EPB mode to disc cutters only.
- Considering the high compressive strengths of up to 300 MPa anticipated, and the high abrasiveness of up to 6.0 CAI, highly wear-resistant protective wear plates were selected for the front area.

2.4 Lining – North Tubes

The preferred option was to use a single-shell construction to line the north tubes, which is implemented using a 35 cm thick segmental lining. Having reviewed the excavation work, the slim segment can no longer be recommended due to its lack of robustness.

If there was no requirement from a geotechnical or structural perspective, it would not be necessary to subsequently install an inner lining. In fault zones of technical relevance to the structure, a sealed inner lining should be installed as standard.

3 Lavanttal Main Fault

3.1 TBM Excavation in the Lavanttal Main Fault

At the point of transition between the neogenic section and the crystalline section, the cutting wheel had already drilled the Lavanttal main fault prior to conversion.

The intention was to use mainly open mode for the 420 m long Lavanttal main fault zone.

- On site, pre-cracking and overhead cracking behaviour was encountered that was way beyond the criteria for open mode. The propulsive forces for steering the machine were too low.

3 Lavanttaler Hauptstörung

3.1 TVM-Vortrieb in der Lavanttaler Hauptstörung (LHS)

Am Übergang zwischen dem Neogen- und dem Kristallinabschnitt wurde noch vor dem Umbau mit dem Schneidrad die Lavanttaler Hauptstörung angefahren.

Für den 420 m langen Störungszonebereich der Lavanttaler Hauptstörung war überwiegend offener Modus vorgesehen.

- Vor Ort wurden Vor- und Überbruchverhalten angetroffen, die weit über den Kriterien für den offenen Betriebsmodus gelegen haben. Die Vortriebskräfte zum Steuern der Maschine waren zu gering.
- Auch ein geschlossener Betriebsmodus war aufgrund der fehlenden Verbreitbarkeit des Tunnelausbruchmaterials nicht umsetzbar.
- Im «TVM-Abschnitt» war entgegen der Prognose die fehlende Ausbildung der kompetenten Rippen und dadurch die fehlende Gewölbewirkung in Längsrichtung auffällig. Es wurden «Homogenbereiche» aus Zerrüttungsgestein bzw. Störungsgestein angetroffen. Progressives Nachbruchverhalten sowie die Ausbildung von Vor- und Überbrüchen wurden durch das Herabsetzen der mechanischen Trennflächeneigenschaften und aufgrund des erhöhten Verwitterungsgrades begünstigt.
- Der TVM-Vortrieb in der LHS wurde in einem Betriebsmodus mit Druckluftstützung und Teilfüllung der Abbaukammer unter massivem Einsatz umfangreicher Zusatz- und Sondermassnahmen geführt. Die sehr aufwendigen Zusatz- und Sondermassnahmen haben eine mittlere Vortriebsleistung von rund 0,8 m/AT erlaubt.

3.2 Zyklische Gegenvortriebe

Die Projektbeteiligten haben nach wenigen Hüben den TVM-Vortrieb mit «Firstinjektionsschirm und zwei Vortrieben» analysiert. Der Vortrieb in der LHS ohne Berücksichtigung von Sonderereignissen (wie Überbrüchen) hätte eine Verzögerung im Projekt von rund eineinhalb Jahren bedeutet. Es wurde daher vereinbart, über zwei projektgemässe Querschläge zyklische Gegenvortriebe in der Nordröhre auszuführen, um die Strecke für die TVM in der Störungszone zu verkürzen:

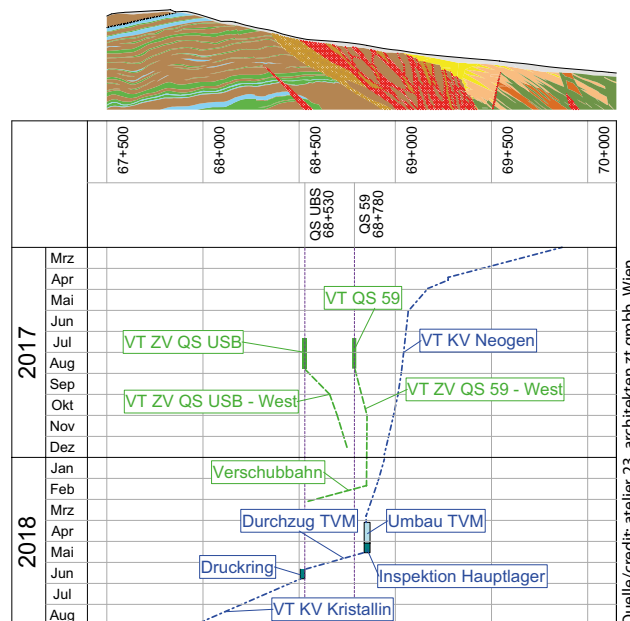
- Auch die zwei zyklischen Vortriebe gestalteten sich teilweise sehr aufwendig. Der Vortrieb in Teilquerschnitten wurde durch Überbrüche, Nachankerungen sowie Sohlhebungen verzögert. Nach acht Monaten konnte der Durchschlag zur TVM gefeiert werden.
- Während die TVM entsprechend Punkt 2.3.3 umgebaut wurde, wurde die Röhre auf den Durchzug vorbereitet.
- Nach dem Durchzug der TVM wurden die Vortriebsarbeiten im Kristallinabschnitt im Bereich eines hierfür installierten Druckrings aufgenommen.
- Im Abschnitt der LHS mit zyklischem Vortrieb wird jetzt eine herkömmliche Innenschale auf Folienabdichtung errichtet.

- It was also impossible to use closed operating mode as it was not possible to process the excavated material into paste.
- In the “TBM section”, contrary to the projections, the lack of competent ribs and therefore the lack of arch effect in the longitudinal direction was conspicuous. “Homogeneous areas” consisting of fractured rock and/or fault rocks were encountered. Progressive post-cracking behaviour and the formation of pre- and overhead creasing were improved by reducing mechanical joint face properties and due to the increased level of weathering.
- The TBM excavation in the Lavanttal main fault was carried out in an operating mode with compressed air support and partial filling of the cutting chamber with widespread use of additional and special measures. The extremely laborious additional and special measures taken enabled an average advance rate of around 0.8 metres per day.

3.2 Cyclical Reverse Driving

After a few strokes, those involved in the project analysed the TBM excavation with “crown injection screen and two excavations” Excavating in the Lavanttal fault zone without taking into account exceptional events (such as overhead cracking) would have meant a project delay of around one-and-a-half years. For this reason, it was agreed for cyclical reverse driving to be carried out in the north tubes via two special cross-passages, so as to shorten the distance excavated by the TBM in the fault zone.

- The two cyclical excavations were also very laborious at times. Performing excavation in partial cross sections was delayed by overhead cracking, retrospective bolting and invert heaving. A breakthrough to the TBM was achieved after eight months.



Quelle/credit: atelier 23, architekten zt gmbh, Wien

5 Hauptstörung Bauablauf zyklischer Gegenvortrieb in der Lavanttaler Hauptstörung

Main fault construction process – cyclical reverse drive in the Lavanttal main fault

4 Grosse Marmorbandstörung

Unter dem Eindruck des Vortriebs in der LHS sowie der Erfahrungen beim Nachbarbauvorhaben KAT2 wurde vereinbart, «risikominimierende Massnahmen für den TVM-Vortrieb» zu untersuchen. Im Frühjahr 2018 wurde ein Erkundungsprogramm (Bohrungen und Injektionsversuche) von der Südröhre aus Richtung Nordröhre durchgeführt.

Auf Basis der Erkenntnisse des Erkundungsprogramms wurde beschlossen, den Bereich «grosse Marmorbandstörung» vorlaufend zum TVM-Vortrieb zyklisch aufzufahren. Ausgeführt werden sollte ein Kalottenvortrieb mit Kalottensohle. Um einen Vortrieb der TVM in diesem Abschnitt zu gewährleisten, sollte im Anschluss an den Vortrieb der gesamte Bereich wieder mit Beton aufgefüllt werden, um es zu ermöglichen, die TVM stabil auf Kurs zu halten.

Aufgrund der gegenüber den Prognosen massiv schlechteren Verhältnisse wurde dann eine Strecke von rund 100 m Haupttunnel zyklisch hergestellt. Verformungen im Dezimeterbereich konnten nur durch nachgiebigen Ausbau mit Schlitzten auch in der Kalottensohle beherrscht werden. Die Komplexität des zyklischen Vortriebs hat die Sinnhaftigkeit der gewählten risikominimierenden Massnahme bestätigt.

Die Betonarbeiten wurden in Walzbeton im Sohlbereich und mehreren Betonierabschnitten an Pumpbeton darüber geteilt. Die Betonierleitungen wurden in der Firste geführt. Die Abschaltung der Abschnitte erfolgte über Spritzbetonschalen mit GFK-Bewehrung.

Massige Bauteile neigen zu ausgeprägter Temperaturentwicklung. Zumal die TVM-Durchfahrt nur wenige Tage nach Fertigstellung der Betonauffüllung geplant war, waren Sondermassnahmen zur Betonkühlung erforderlich. Begrenzender Faktor diesbezüglich ist die Hauptlagerdichtung der TVM, welche auf eine maximale Temperatur von 50 °C ausgelegt ist.

Die Durchörterung des Vortriebsabschnittes der grossen Marmorbandstörung mit der TVM ist dann vergleichsweise problemlos verlaufen:

- Die Massnahme des Bodenaustauschs im Kalottenquerschnitt hat die gewünschte Wirkung gebracht. Es waren ausreichend Vortriebskräfte für die Schildfahrt vorhanden, um die TVM zielgerichtet steuern zu können.
- Die offene Diskussion im Vorfeld über Statik und mögliche auftretende Versagensfälle ist Teil einer kooperativen Projektabwicklung.
- Eine Ertüchtigung der TVM vor dem Abschnitt und ein Durchlaufbetrieb während der Durchörterung haben einen kontinuierlichen Vortrieb sichergestellt.
- Der Vortriebsmannschaft wurden Soll- und Warnwerte für die Masse je Hub auf den Bandwaagen (in t/Hub) sowie für die Entwicklung der Tendenz (mm/m) an die Hand gegeben. Die Beobachtung dieser Parameter stellte ein geeignetes Instrument für die Vortriebssteuerung im gegenständlichen Abschnitt dar.

- While the TBM was being converted as per point 2.3.3, the tubes were prepared to pull the machine through.
- After the TBM was pulled through, excavation work in the crystalline section began in the area of a thrust ring installed for this purpose.
- In the Lavanttal main fault section, a conventional inner lining is now being installed on foil sealing using cyclical excavation.

4 Major Marble Band Fault

Influenced by the excavation in the Lavanttal main fault and the experiences from the neighbouring construction project KAT2, it was agreed that “risk-minimising measures for TBM excavation” would be assessed. In spring 2018, an exploration programme (drill holes and injection attempts) was carried out from the south tube in the direction of the north tubes.

Based on the findings of the exploration programme, the decision was taken to carry out cyclical excavation of the “major marble band fault” area in advance of the TBM excavation. A top heading excavation with invert surface was to be performed. In order to ensure that a TBM could excavate in this section, the plan was to refill the entire area with concrete following excavation, in order to keep the TBM on a stable course.

Due to the hugely disadvantageous conditions, contrary to the projections, a section of around 100 m of main tunnel was then cyclically excavated. It was only possible to overcome deformations in the decimeter range by way of flexible lining with slots, including in the invert surface. The complexity of the cyclical excavation confirmed that the risk-minimising measure selected had been sensible.

The concrete work was split between roller-compacted concrete in the invert region and several concreting steps of pumped concrete on top. The concrete lines were routed in the crown. The stop ends for the steps were set using shotcrete lining with GRP reinforcement.

Bulky components tend to be subject to pronounced temperature development. Special concrete cooling measures were therefore required, particularly as the TBM was due to pass through just a few days after the concrete filling work was scheduled for completion. One limiting factor in this regard is the main bearing seal of the TBM, which is designed for a maximum temperature of 50 °C.

By way of comparison, the TBM crossed the excavation section of the major marble band fault with no problems:

- The soil replacement measure in the top heading cross section had the desired effect. There was sufficient propulsive force available to drive the shield machine while keeping the TBM on course.
- The open discussion beforehand regarding statics and possible failures is part of a cooperative approach to the project.

Im Abschnitt der grossen Marmorbandstörung erfolgte daher ein Tübbingeinbau. Die Kontinuität in der Aussenschale ist erhalten geblieben.

5 Wartungsbahnhöfe für Revisionsarbeiten

Die TVM-Vortriebe im kristallinen Gestein der Koralpe haben gezeigt, dass massive Verschleisserscheinungen am Stahlbau der TVM auftreten. Um die Funktionsfähigkeit des Bohrkopfs und des Schildes aufrechtzuerhalten, sind regelmässige Revisionsarbeiten erforderlich. Beim Nachbarbauvorhaben KAT2 wurden nach jeweils 1000 m Vortrieb vor dem Bohrkopf Revisionsnischen ausgebrochen, um die erforderlichen Schweissarbeiten durchführen zu können.

Die Firma PORR hat die besonderen Rahmenbedingungen des Projekts KAT3 genutzt und die Zugänglichkeit zum Bohrkopf von der benachbarten Südröhre aus hergestellt. Die Vortriebsarbeiten für die Querschläge wurden dem TVM-Vortrieb vorlaufend ausgeführt. Projektgemäss wurde der Hohlraum im Ausbruchquerschnitt der TVM mittels einer Betonplombe verschlossen.

Für einen Zugang zum Bohrkopf als Wartungsbahnhof musste daher zunächst die Betonplombe lokal abgetragen werden. Bis zum Zentrum der TVM wurde dann dem TVM-Vortrieb vorlaufend ein zyklischer Vortrieb geführt. So war ein gesicherter Hohlraum (Wartungsbahnhof) vor dem Bohrkopf gegeben, aus welchem die erforderlichen Schweissarbeiten ausgeführt werden konnten.

Die Schweissarbeiten am Bohrkopf konnten dann über Gerüstkonstruktionen in gesichertem Umfeld und an mehreren Stellen zeitgleich durchgeführt werden. So sind die Revisionsarbeiten effizient abgelaufen. Eine Hohlraumherstellung und -sicherung, versorgt durch den Bohrkopf hindurch, konnten am kritischen Weg eingespart werden (je Standort rund zwei bis drei Wochen Bauzeit). Die Revisionsarbeiten selbst sind durch die effiziente Zugänglichkeit rascher abgelaufen, als das bei einer Versorgung durch den Bohrkopf der Fall gewesen wäre.

6 Topf-Nocke

Der Entwurf des Auftraggebers und auch die Tübbingplanung des Auftragnehmers sahen eine Kopplung der benachbarten Tübbingringe über eine Topf-Nocke-Konstruktion vor. Die Nocke weist eine Höhe von rund einem Drittel der Tübbingdicke auf.

Unerwartet kam es in Vortriebsabschnitten, in denen Versätze an benachbarten Tübbingungen auftreten, nicht zum Abscheren der Nocke. Vielmehr kam es zum Bruch des Topfs und daher zu massiven Abplatzungen an der Tübbingröhre.

Durch Einschneiden der Nocke der bereits produzierten Tübbingringe sowie durch Schalungsanpassungen für die zu-

- Reinforcing the TBM before the section and continuous operation while traversing it ensured that excavation could continue without stopping.
- The excavation team was provided with target and warning values for the mass per stroke (in t/stroke) and for the bias progression (mm/m). Monitoring these parameters represented a suitable tool for heading control in this section.

Lining was therefore installed in the major marble band fault section. Continuity was maintained in the external lining.

5 Maintenance Stations for Inspection Works

The TBM excavations in the crystalline rock in the Koralpe have shown that significant signs of wear occur on the steelwork of the TBM. In order to maintain the functionality of the cutterhead and the shield, regular inspection work is required. In the neighbouring construction project KAT2, inspection recesses were excavated in front of the cutterhead after every 1,000 m of excavation to perform the necessary welding work.

PORR made use of the specific conditions of the KAT3 project and provided access to the cutterhead from the neighbouring south tubes. The excavation work for the cross-passages was carried out in advance of the TBM excavation. In this project, the cavity in the excavation cross section of the TBM was sealed using a concrete plug.

To access the cutterhead at the maintenance station, it was therefore necessary to remove the concrete plug locally beforehand. Then, prior to the TBM excavation, a cyclical excavation was performed to the centre of the TBM. A secured cavity (maintenance station) was then created in front of the cutterhead, from which the necessary welding measures could be performed.

The welding measures on the cutterhead could then be carried out in several places simultaneously in a secured environment from scaffolding. This meant the inspection works could be completed efficiently. Excavating and securing cavities through the cutterhead ensured that savings could be made along the critical path (around two to three weeks of construction time per site). The inspection works themselves were quicker due to the efficient access, in comparison to what would have been the case with maintenance through the cutterhead.

6 Cam and Pocket

The principal's design and also the contractor's segment planning stipulated that the lining segment rings should be coupled using a cam and pocket construction. The height of the cam is around a third of the segment's thickness.

Unexpectedly, in excavation sections in which there were misalignments with neighbouring segments, the cam was not sheared off. Rather, this caused the pocket to crack and therefore led to severe spalling of the lining segments.

künftigen Tübbinge konnte eine Schwächung der Nocke erreicht werden.

Über Kernbohrungen konnte nachgewiesen werden, dass bei Versätzen an benachbarten Tübbingungen die Nocke ebendort absichert. Abplatzungen am Tübbing konnten so vermieden werden.

7 Konvergenzmessung Tübbingring über Dreiachsinklinometer

Der Analyse von Verformungen kommt im modernen Tunnelbau eine grosse Bedeutung zu. Die Erfassung und Auswertung von Verformungen beschränkt sich nicht auf zyklische Vortriebe. Auch bei kontinuierlichen Vortrieben treten Verformungen auf, die unter anderem nachstehende Ursachen haben können:

- Ungenügende Bettung führt zu Ovalisierungen der Tübbingröhre.
- Bei Ringspaltverfüllung über Mörtel kann es zum Aufschwimmen der Röhre kommen.
- Singuläre Auflasten im Firstbereich führen zu Verformungen der Tübbingröhre.

Der Erfassung des Verformungsverhaltens der Tübbingröhre, speziell unmittelbar nach Verlassen des Schildschwanzes, kommt daher grosse Bedeutung zu. Gerade dort ist aber durch die Einbauten der TVM die Sicht für herkömmliche Vermessungssysteme massiv eingeschränkt.

In Zusammenwirken mit den Firmen VMT sowie UTB konnte das RCMS (Ringkonvergenz-Messsystem) der Firma VMT weiterentwickelt werden. Der Einsatz der kabellosen Dreiachsinklinometer ermöglicht über die Erfassung der Winkeländerungen der Sensoren die Erfassung der Verschiebungen zueinander sowie der Radialbewegungen des Rings. Die Verformungsdaten und relativ dazu die Maschinendaten ermöglichen Rückschlüsse auf den Verformungsmechanismus. Ist der Auslöser erst gefunden, ist es oft möglich, Gegenmassnahmen zu ergreifen und die Ausdehnung der Verformung zu reduzieren.

8 Forcierung Innenschalenherstellung

Die Verzögerungen der Vortriebsarbeiten in der Nordröhre von rund zwei Jahren gegenüber der Prognose haben die Vertragspartner veranlasst, Gegenmassnahmen zu ergreifen:

- Zunächst wurde die Baugrenze in der Nordröhre verschoben und so die Vortriebslänge für den TVM-Abschnitt verkürzt.
- Demgegenüber wurden die Innenschalenbereiche in der Nordröhre verlängert. Eine Beschleunigung des Projekts konnte daher nur über Optimierungsmassnahmen der Innenschalenherstellung erfolgen. Nachstehende Elemente haben dazu geführt, die Übergabe an die bahntechnische Ausrüstung um mehr als 14 Monate früher zu ermöglichen:



Quelle/credit: Di Dieter Plank

6 Anpassung der Nocke Cam adjustment

By cutting into the cam in the segments already produced and by adapting the formwork for the subsequent segments, it was possible to weaken the cam.

It was possible to show by drilling cores that the cam also sheared off in the event of misalignment with the neighbouring segments. It was possible to prevent the segment from spalling in this way.

7 Segment Ring Convergence Measurement Using Three-Axis Inclinometer

Analysing deformations is of extreme importance in modern tunnel construction. Recording and analysing deformations is not limited to cyclical excavations. Deformations also occur in continuous excavations, with the following being possible causes among others:

- Insufficient bedding causes the lining segments to become oval in shape.
- Backfilling the annular gap using grout can cause the tubes to lift.
- Occasional loads in the crown area can cause deformations in the lining segments.

Recording the deformation behaviour of the lining segments, especially immediately after leaving the shield tail, is therefore of vital importance. However, in precisely this area, the visibility for conventional measuring systems is severely restricted by the TBM's equipment.

In cooperation with the companies VMT and UTB, it was possible to make enhancements to VMT's RCMS (Ring Convergence Measurement System). Using a wireless three-axis inclinometer, it was possible to record the angle changes of the sensors and thereby record how the rings moved together and their radial movements. The deformation data and the relative machine data enable conclusions to be

- o Einsatz zusätzlicher Schalungseinheiten;
- o teilweises Umkehren der Betonierichtung;
- o Vorziehen der Restarbeiten und Versorgung über die Nachbarröhre;
- o als risikominimierende Massnahmen hat der AN weitere Vorgänge vorgezogen und zeitgleich ausgeführt, um die vereinbarten Termine zielsicher erreichen zu können;
- o vertragliche Anpassung des Übergabetermins

Literatur/References

- [1] [HAN08] D. Handke, D. Fabbri, K. Keiper: Konzeptuelle Überlegungen zu den maschinellen Vortrieben beim Koralmtunnel. (Conceptual considerations on the mechanical excavations in the Koralm tunnel.) In: Südbahntagung 2008 (2008)
- [2] [HAN10] D. Handke, M. Nolden, K. Mussger, A. Steidl: Lösungsansätze für Planung und Bauausführung des Bauloses KAT3 des Koralmtunnels. (Solution methods for the design and construction of contract KAT3 of the Koralm Tunnel.) In Geomechanics and Tunnelling 04/2010 (2010)
- [3] [PRI18] H. Prinz, R. Strauss: Ingenieurgeologie. (Engineering geology.) 6th edition, Springer Spektrum, Berlin (2018)

drawn about the deformation mechanism. Once the trigger is identified, it is often possible to take countermeasures and reduce the expansion of the deformation.

8 Accelerating Inner Lining Production

The delays in the excavation work in the north tubes of around two years in comparison to the projection prompted the contractual partners to take countermeasures:

- Firstly, the end of the construction section in the north tubes was relocated, thus shortening the excavation length for the TBM section.
- Conversely, the inner lining areas in the north tubes were extended. It was therefore only possible to speed up the project by taking optimisation measures for the inner lining production. The following elements enabled the handover for the installation of railway equipment to be brought forward by more than 14 months:
 - o the use of additional lining units;
 - o partial reversal of the concreting direction;
 - o bringing forward remaining tasks and supply via the neighbouring tubes;
 - o as risk-minimising measures, the contractor brought forward further operations and performed them at the same time in order ensure that the agreed deadlines were met;
 - o contractual adjustment of the handover date

PROJEKTDATEN

Region

Kärnten, Österreich

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

ÖBB Infrastruktur AG

Planung und Bauleitung

Geoconsult/Bernard Ingenieure/Lombardi/
Basler & Hofmann/Maidl

Bauaufsicht

Geoconsult/Bernard

Baumangement

Metz und Partner

Ausführung

PORR Bau GmbH/Tunnelbau

Kenndaten

Bauzeit: 11/2013 bis 06/2022
 Inbetriebnahme: 12.2025
 Auftragsvolumen Tunnel: 297 Mio. Euro
 Gesamtlänge: 21 km Haupttunnel
 Ausbruchquerschnitt
 Haupttunnel: 77,8 m²

Besondere Merkmale

Je eine Röhre zyklischer und kontinuierlicher Vortrieb

PROJECT DATA

Region

Carinthia, Austria

Client, project management and senior site management

ÖBB Infrastruktur AG

Planning and site management

Geoconsult/Bernard Ingenieure/Lombardi/
Basler & Hofmann/Maidl

Construction supervision

Geoconsult/Bernard

Construction management

Metz und Partner

Construction

PORR Bau GmbH/Tunnelbau

Key data

Construction period: 11/2013 to 06/2022
 Commissioning: 12.2025
 Contract size, tunnel: 297 million euros
 Total length: 21 km main tunnel
 Excavation cross section
 of main tunnel: 77.8 m²

Special features

Cyclical and continuous excavation – one tube each

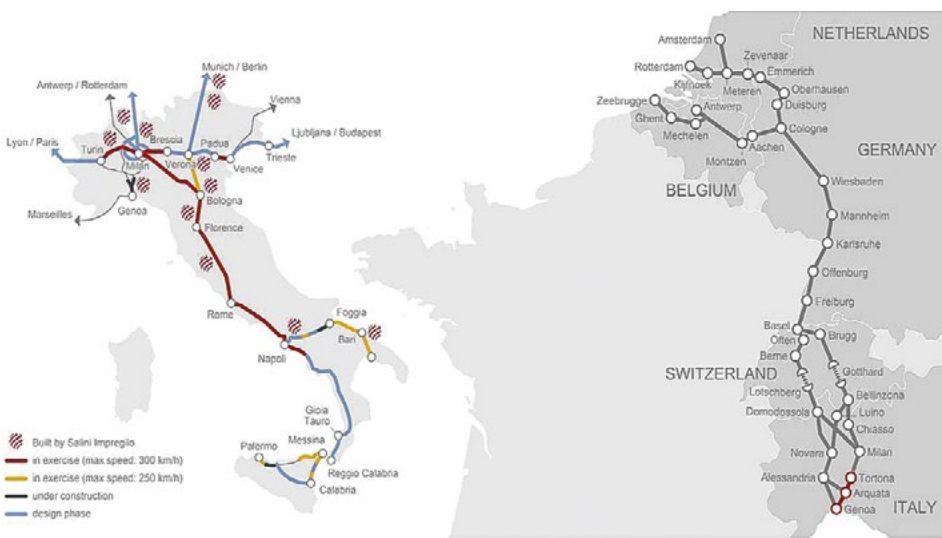


Asbestos Risk Management in Tunnels Excavated by Conventional Methods

Filippo Giunta, Civil Engineer/Construction Site Manager, Consortium COCIV (J.V. Salini Impregilo – Condotte – CIV), Genova/IT
Nicola Meistero, Civil Engineer/General Manager, Consortium COCIV (J.V. Salini Impregilo – Condotte – CIV), Genova/IT

Asbestos Risk Management in Tunnels Excavated by Conventional Methods

The “Terzo Valico dei Giovi” project consists of the construction of a new HC-HV railway line, which will allow the Port of Genoa to be connected both with Milan and northern Europe. Asbestos containing rocks encountered during underground excavations led COCIV to design and implement a complex, technical and procedural system unprecedented in tunnelling.



1 High-speed Italian system and Genoa–Rotterdam axis

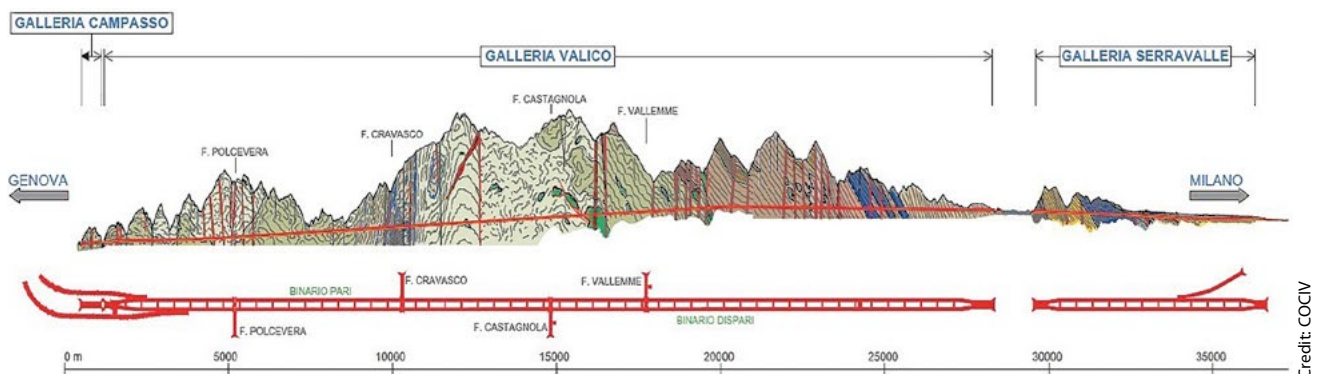
1 Project Description

The railway line Milan–Genoa, part of the high-speed/high-capacity Italian system, is one of the 30 European priority projects approved by the European Union on 29 April 2014 (No. 24 “Railway axis between Lyon/Genoa–Basel–Duisburg–Rotterdam/Antwerp”) as a new European project, a so-called “Bridge between two seas” Genoa–Rotterdam. The new line will improve the connection from the Port of Genoa with the hinterland of the Po Valley and northern Europe, with a

significant increase in transport capacity, particularly cargo, to meet growing traffic demand.

To the south, the new railway line will be connected with the Genoa railway junction, the harbour basins of Voltri, the historic port by the “Voltri Interconnection” and the “Fegino Interconnection”. To the north, in the Novi Ligure plain, the project connects the existing Genoa–Turin rail line (for the traffic flows in the direction of Turin and Novara–Sempione) and the Tortona–Piacenza–Milan rail line (for the traffic flows in the direction of Milan–Gotthard).

The “Terzo Valico” project is 53 km long and is challenging due to the presence of about 36 km of underground works in the complex chain of the Apennine located between Piedmont and Liguria. In accordance with the most recent safety standards, the underground layout is formed by two single-track tunnels side by side with a cross-passage every



2 Terzo Valico project

Risikomanagement beim konventionellen Vortrieb in asbesthaltigem Gestein

An der Tunnelbaustelle in Cravasco wurden im Laufe der untertägigen Ausbrucharbeiten asbesthaltige geologische Formationen in einer natürlichen Matrix entdeckt. Deshalb mussten in Abstimmung mit den örtlichen Behörden spezielle Verfahren festgelegt werden in Bezug auf den Abbau von und den Umgang mit Asbest. In der Folge war es möglich, technische und operative Lösungen zu entwickeln, die für den Neubeginn bzw. die Fortsetzung der Ausbrucharbeiten unter absolut sicheren Arbeitsbedingungen erforderlich waren. Die strenge Einhaltung der Vorschriften, die Anlagen- und Maschinenoptimierung sowie der Einsatz eines Systems zur kontinuierlichen Umweltüberwachung führten schliesslich zum Erfolg einer bis dahin beispiellosen Operation.

Gestion des risques liés à l'amiante dans les tunnels excavés par des méthodes conventionnelles

Sur le chantier de Cravasco, des formations géologiques contenant naturellement de l'amiante ont été rencontrées dans le sous-sol excavé. Des procédures spécifiques ont donc dû être définies en accord avec les autorités publiques locales. Il a été ainsi possible d'identifier et de développer les solutions techniques et opérationnelles nécessaires pour relancer ou poursuivre les excavations dans des conditions de travail absolument sûres. La stricte conformité des protocoles, l'optimisation des installations et des machines, ainsi que le recours à un système de surveillance continue de l'environnement ont permis de mener à bien une opération sans précédent.

Gestione dei rischi legati all'amiante nelle gallerie scavate con metodi convenzionali

Presso il cantiere di Cravasco, nel corso dello scavo in sotterraneo, sono state attraversate alcune formazioni geologiche contenenti amianto in una matrice naturale. A seguito di ciò è stato necessario definire, di comune accordo con le autorità pubbliche locali, delle specifiche procedure esecutive. In questo modo è stato possibile identificare e sviluppare le soluzioni tecniche e operative necessarie per riavviare ovvero proseguire con le attività di scavo in sotterraneo in condizioni di lavoro di assoluta sicurezza. Il severo rispetto dei protocolli, l'ottimizzazione dei macchinari e degli impianti come pure l'uso di un sistema di monitoraggio ambientale in continuo hanno portato al successo di un'operazione senza precedenti.

500 m, which is safer than one double-track tunnel only in the remote event of an accident.

The project foresees about 90 km of underground works, which will affect the Valico tunnels (main line), the junction with the historical lines and the intermediate adits.

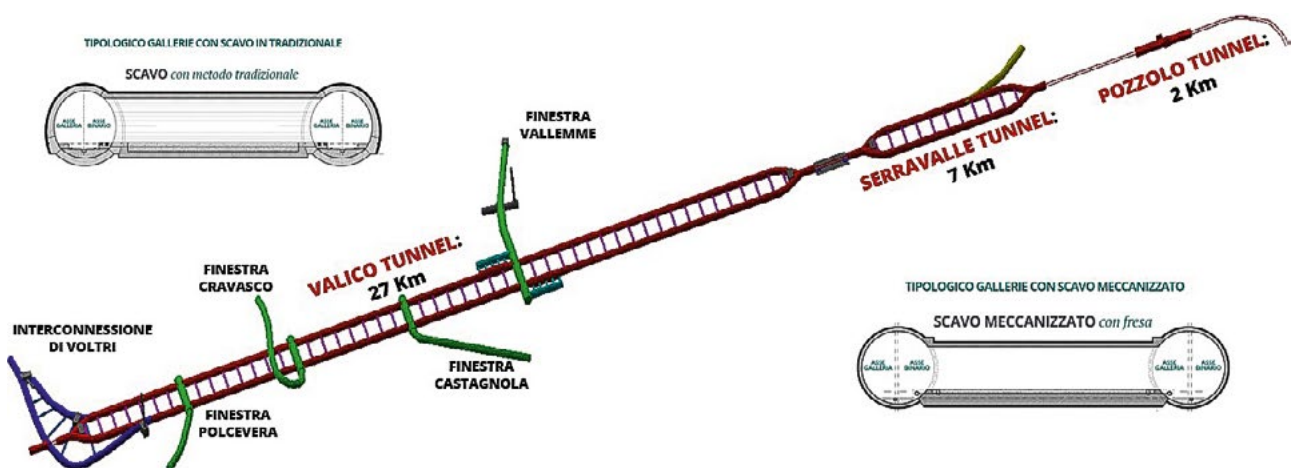
About 28 km of tunnel will be excavated by using TBM, while the remaining 62 km will be excavated by conventional tunnelling methods.

Project key data to comply with:

- a maximum speed on the main line of 250 km/h,
- maximum gradient 12.5 ‰,
- track wheelbase 4.0–4.5 m,
- 3 kV DC power supply and
- Type 2 ERTMS signalling system.

2 Cravasco Construction Site

The Cravasco job site is articulated on a service area of reduced extensions, about 6,000 m², at an altitude of 293.50 m

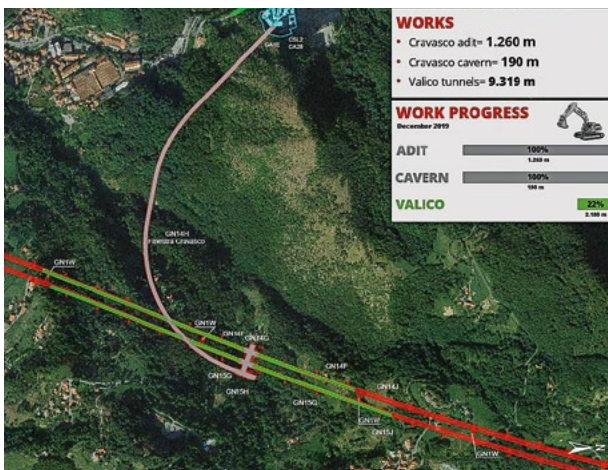


3 Project track development



Credit: COCIV

4 Cravasco construction site



Credit: COCIV

5 Works progress

a.s.l., and is connected to the provincial road S.P. n°6 through a service track with a slope of about 11 %.

The main underground works included in the Cravasco work lot are the following:

- Cravasco adit – 1,260 m in length and a cross section of approx. 95 m²;
- Cravasco cavern – 190 m in length and a cross section of approx. 200 m²;
- Valico tunnels – 9,319 m in length and a cross section of approx. 90 m².

3 Geology Surrounding the Cravasco Tunnels

The Cravasco tunnels cross a complex geology characterised by the passage from the sequences of Alpine rock masses to those of the Apennine rock masses along the so called Sestri-Voltaggio line (S.V.L.).

The crossings of ophiolitic geological units, deriving from metamorphism processes, can be associated with the presence of asbestos in a natural matrix.

The asbestos minerals that can be encountered along the project track are:

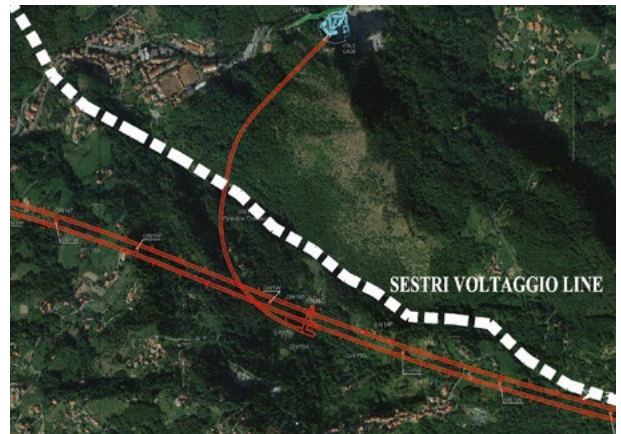
- chrysotile,
- actinolite,
- tremolite.

4 Asbestos Rock Masses throughout the Excavation of the Cravasco Adit

4.1 Overview

During the construction of the Cravasco adit, near tunnel metre 0+706, tunnelling work struck geological formations that can be traced back to ophiolite sequences (usually referred to as “green stones”) that contain asbestos fibres within a natural matrix, which led COCIV to redesign new and complex plant and equipment systems and specific technical procedures to allow excavations to be restarted, minimising the risk of asbestos exposure for workers and the release of asbestos fibres into other work areas and the external environment.

After identifying the “source” as the excavation of the face and any potential “vectors” (air, water and soil) related to the face excavation for the release and spread of fibres, COCIV established and implemented technical and procedural solutions for the continuation of activities in line with the following principles:



Credit: COCIV

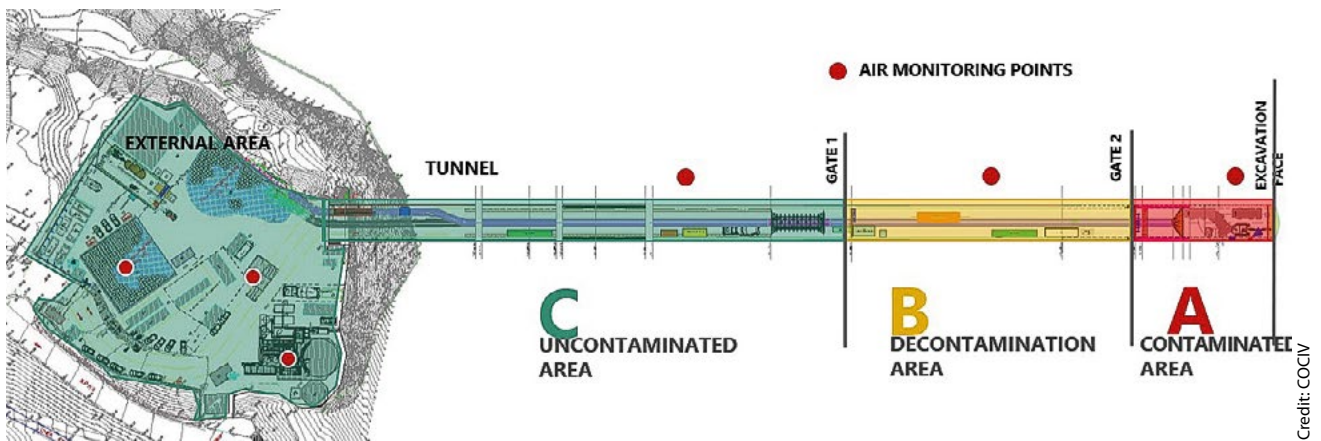
6 S.V.L.



Credit: COCIV

7 “Green Stones”

Asbestos Risk Management in Tunnels Excavated by Conventional Methods



8 View of site areas

- prioritising at “source risk reduction” activities over passive protection measures for workers, preferring “collective” to “individual” protection measures;
- confining and minimising the work areas affected by asbestos fibres contamination, separating and isolating the excavation area from the rest of the underground tunnel;
- reducing workers asbestos exposure to the minimum during all the activities;
- no dispersion of asbestos fibres to the outside using a suction type ventilation system equipped with a special filter system positioned at the tunnel portal before discharging the air into the open, channelling all the waters of the site into a single purification plant and preventing the sludges from contaminating any other place in the tunnel and the job site;
- identifying work processes and operational methodologies that, in addition to enabling activities in safety, could guarantee sustainable productivity comparable to normal productivity in the absence of asbestos;
- making identified solutions and procedures easy to replicate also in other Terzo Valico sites potentially affected by excavations in asbestos-carrying rock formations.

The asbestos thresholds considered during the excavation activities are:

- Concentration $C < 2$ [ff/l] within the working environment;
- Concentration $C < 1$ [ff/l] within the living environment;
- Concentration $C > 1,000$ [mg/kg] excavation material containing asbestos to be treated as hazardous waste.

The frequent air monitoring performed within and around the job site has always shown the adequacy and effectiveness of what has been realised.

4.2 Technical Solutions

4.2.1 Tunnel Physical Separations

In order to prevent the dispersion of airborne asbestos fibres both in the work environment and in the external environment, COCIV as a first step started subdividing the tunnel into three physically separate areas, each associated with a specific risk:

- Zone A – “Contaminated Area” excavation area, where all processes linked to the excavation of rocks containing asbestos within a mineral matrix are performed. All equipment required for the initial containment and abatement of asbestos fibres released during excavation activities was concentrated in Zone A.



9 Physical separation of areas



Credit: COCIV



Credit: COCIV

10 Ventilation units

- Zone B – “Decontamination Area” is the tunnel section with variable lengths, where decontamination activities for all personnel, tools and equipment used in Zone A during contaminating excavation activities are planned and carried out.
- Zone C – “Uncontaminated Area” refers to the section from Gate 1 to the “external area” (Fig. 8), in which all work activities are not directly linked to the excavation of asbestos-contaminated materials. Therefore, the risk of exposure to asbestos fibres is low.

The physical separation of the three areas was achieved by creating two “Physical Compartments” and using dedicated demountable and quickly removable metal bulkhead structures; at the same time, bulkhead gates were equipped with flat spray nozzles that could produce an effective water blade for the entire time the gates were open, so as to guarantee the continuity of physical separation between the areas.

4.2.2 Ventilation Systems

The original forced ventilation system was replaced by a ventilation system extracting the air from Zone A, in order to capture the maximum number of airborne asbestos fibres released in Zone A during the excavation activities.

The air extracted by the ventilation system, conveyed by rigid metal ducts, runs through the entire length of the tunnel to be subsequently released into the atmosphere after undergoing a filtration treatment that captures any asbestos fibres and contaminated dust.

Starting at the tunnel portal and progressing to the excavation face, the new extraction ventilation system consists, specifically, of two fans fitted in line on an external metal support, with a power of 200 kW each, controlled by a frequency converter and equipped with suitable silencers at the fan air intake/outlet points, capable of extracting up to 60 m³/s of air from the tunnel.

Each of the two dust scrubbers in use was able to filter an air flow of approx. 20 m³/s and is equipped

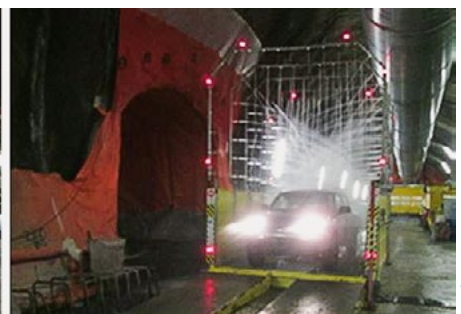
with class K4 dry filters with 99.96 % efficiency (equivalent to HEPA H13). Inside the dust scrubber, the contaminated air is forced through filter bags. The filter bags capture the dust and the contaminated fines. Some of the fines are falling off the filter or will be “shaken” off by blowing a short pulse of compressed air into the filter bags. The contaminated dust and fines which are falling or are pulsed off the filter bags are dropping straight into an isolated hopper/tray at the bottom of the scrubber. This contaminated material will be transported by an auger system to a mixing unit, which blends the dust/fines with water. The resulting sludge liquid, contaminated with asbestos fibres, is then sent to the waste water treatment plant.

4.2.3 A-Zone Tools and Equipment

A dust and fume extractor hood was designed and installed at the end of the metal duct, near the air extraction intake. Initially a PVC membrane on a steel frame was used as an air intake funnel which was positioned at the end of the metal duct in order to easily capture the asbestos fibres during the excavation works. Its aim is that of increasing and facilitating conveying dust and fumes produced during rock breaking at the excavation face into the extraction pipe, thus limiting the concentration and spreading of asbestos fibres in Zone A.

In order to balance the ventilation system and facilitate the washing and handling of the air at the excavation face, two “pressure boosters” were installed into the bulkhead at Gate 2 (Fig. 8), connected to flexible spiral ducts with a 1 m diameter. The flexible spiral ducts had a length of 10 m, to be positioned as close as possible to the face (area of excavation action ...) to blow the air away from the face in a controlled manner and at the same time guiding it towards the extraction hood.

In the “Contamination Zone A”, the standard spray system installed on the hydraulic rock breaker which was used to excavate the face was further enhanced with 24 high-pressure spray nozzles, powered by a pressurisation unit consist-



Credit: COCIV

11 Decontamination units

Asbestos Risk Management in Tunnels Excavated by Conventional Methods

ing of a pump with a flow of 50 l/min at a pressure of 120 bar, in order to create a veritable air cone around the rock breaker's chisel.

A few metres behind the excavation face close to the tunnel crown, a water spray arch was installed, fitted with approx. 40 water spray nozzles tilted towards the excavation face ensuring to cover the entire section. The main aim was to keep the "open" work area and rock face constantly wet especially during the excavation process. Breaking and chipping the rock off the face using a rock breaker created a lot of fines and dust, which was the source and main cause of airborne asbestos fibres.

In order to reduce the amount of fibres, at the excavation face, two directional "water fog cannons" were installed. Each of these was equipped with a crown of 60 high-pressure spray nozzles and connected to a pressurisation unit consisting of an adjustable volumetric pump with a capacity ranging from 5 l/min to 35 l/min.



12 Water management system

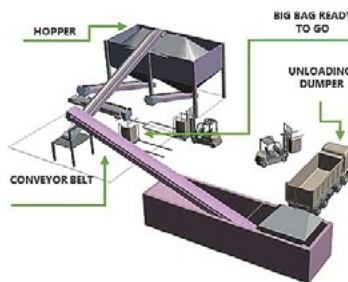
Credit: COCIV

4.2.4 B-Zone Tools and Equipment

The "Zone B – Decontamination Area", which, as already mentioned, was designed for the performance of all decontamination operations for staff, vehicles and equipment used in Zone A during excavation activities and exiting towards Zone C, entailed the installation of two separate decontamination units, one for construction equipment and the other one for operational staff transiting from Zone A to Zone C.

4.2.5 C-Zone Tools and Equipment

The area outside the tunnel was also considerably impacted by changes, additions and reconfigurations of the original layout in order to allow the most appropriate management and treatment of process waters from the tunnel that were particularly rich in asbestos fibres, as well as the delicate management



14 Tunnel muck management system



13 Big bags

Credit: COCIV

of asbestos-contaminated excavation earth and rocks, to be disposed of as special hazardous waste pursuant to current legal provisions.

The original chemical/physical treatment system with quartzite filtration was adapted with the inclusion of a further stage consisting of a final ultrafiltration unit before waste waters are released into the stream. Ultrafiltration is a pressure filtration process that can split water-insoluble particles and is used to separate solids suspended in the water itself, usually consisting of colloids, lime, bacteria and viruses. Solid separation is performed by using a "hollow-fibre membrane" with 0.02 µm pores capable of filtering asbestos fibres.

The sludge produced by the filter press, therefore, was collected in a removable container and managed as waste, subject to prior classification, in line with applicable legislation.

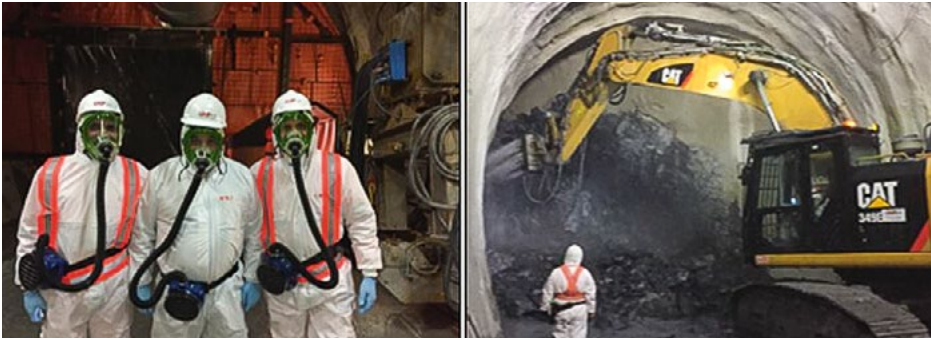
In the case of "special hazardous waste" (asbestos content > 1,000 mg/kg), the excavation soil is processed in the subsequent stages of big bag packaging, decontamination, temporary storage in the external areas and final delivery to authorised waste disposal sites.

4.2.6 Personal Protection Equipment (PPE)

All staff members who access Zones A and B, apart from having to wear the full double Tyvek suits, were issued with



Credit: COCIV



15 PPE

rubber boots and gloves with long oversleeves, both easily washable, as well as high-visibility jackets and hard hats.

With respect to respiratory tract PPE, ground staff operating mainly in Zones A and B were issued with TMP3 full-face APRs equipped with P3 EN143/02 filters, characterised by an FPN2000 Nominal Protection Factor and an FPO-400 Operational Protection Factor, i.e. capable of “reducing” the concentration of airborne fibres in the usage environment by 400 times. Staff members employed as machine operators only, on the other hand, were issued with half-face APRs equipped with a P3 EN143 filter characterised by an FPN50 Nominal Protection Factor and an FPO-30 Operational Protection Factor since operators, insulated in the cab, are already protected by the overpressure system that entails supplying the cab with air taken from the outside environment and filtered through suitable HEPA H13 filters.

5 Asbestos Rock Masses throughout the Excavation of Valico Tunnels

5.1 Overview

The know-how gained by COCIV in the field of asbestos risk management was undoubtedly refined during the progress of excavation activities in relation to the systematic discoveries of geological formations containing “Green Stones” with asbestos absent or present in concentrations below and above threshold (regulatory limit of 1,000 mg/kg).

In order to be able to manage the asbestos risk in line with the assessments contained in the geological reference model of the work, a series of additional provisions have been introduced for the excavation of the tunnels which foresee the execution of supplementary activities earlier than the excavation phases.

An effective risk management process cannot be separated from:

- a preliminary phase of “asbestos research”, prior to the excavation, with new and different protections for workers and the external environment;
- a reworking and constant updating of the procedures in order to calibrate new technical-operational solutions that

envisage simultaneous excavation of multiple front faces of excavation.

In particular, with regard to the research phase, given the impossibility of excluding the presence of asbestos in any type of rock mass, waterborne rather than airborne drilling equipment was used for the hammer excavation (preventive abatement of

potential asbestos fibres), while for the excavation with explosives (drill and blast technique), beside the use of water cartridges, a preliminary phase was introduced to analytically verify the presence of asbestos in the drilling mud.

Finally, regarding the excavation of multiple front faces, unlike the Cravasco adit experience, it was necessary to install dedicated physical separation areas, one for each tunnel, in order to minimise the potential impacts within the common areas such as the cavern and the adit.

5.2 Updating of Management Procedures

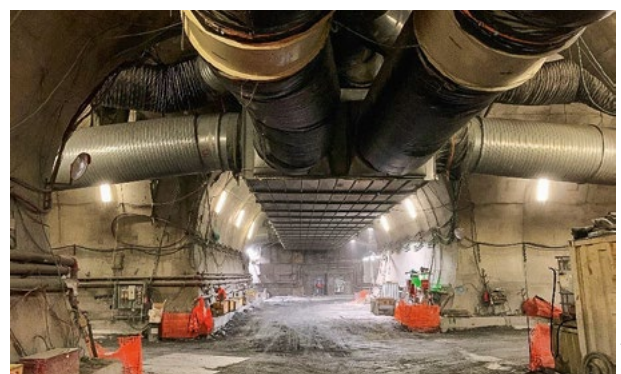
The new experiences gained in the asbestos field have allowed us to refine the technical-operational procedures necessary for the correct management of the asbestos risk during the excavation phases.

5.3 Phases of Asbestos Research

Regarding the Cravasco tunnels, considering that the geological reference model foresees a potential presence of green stones along the project track, it is necessary to activate a series of activities aimed at the preventive search for formations containing green stones.

In particular, these research activities consist of the evaluation of asbestos concentrations both as regards the rock mass fibres (mg/kg) and as regards the airborne fibres (ff/l).

Depending on the lithologies encountered at the excavation fronts and the presence or absence of green stones, as well



16 Cavern view



Credit: COCIV

17 Physical separation of areas

as the analytical results of the massive and airborne samples found, specific procedures are implemented which provide for:

- the execution of additional activities for preventive risk management (geological coring and exploration);
- the adjustment of sampling frequencies according to the type of excavation (hammer or drill and blast);
- the activation of specific prevention and protection measures according to risk levels;
- the correct management of excavated materials (by-product soil or waste).

5.4 Equipment Needed for Each Excavation Face

To cope with the above situations, it is necessary to guarantee the independence of each of the tunnels by providing for the adaptation and optimisation of the equipment already present on the site.

In order to limit the interference between the tunnels and minimise the impacts inside the common areas, each tunnel must be equipped with:

- motorised gates equipped with water blades that follow the excavation progress;
- cleaning bases and decontamination units for personnel and vehicles;
- de-dusting unit complete with booster fans;
- extraction pipes;
- fog cannons;
- misting equipment on construction site vehicles;
- HEPA filters.

6 Conclusions

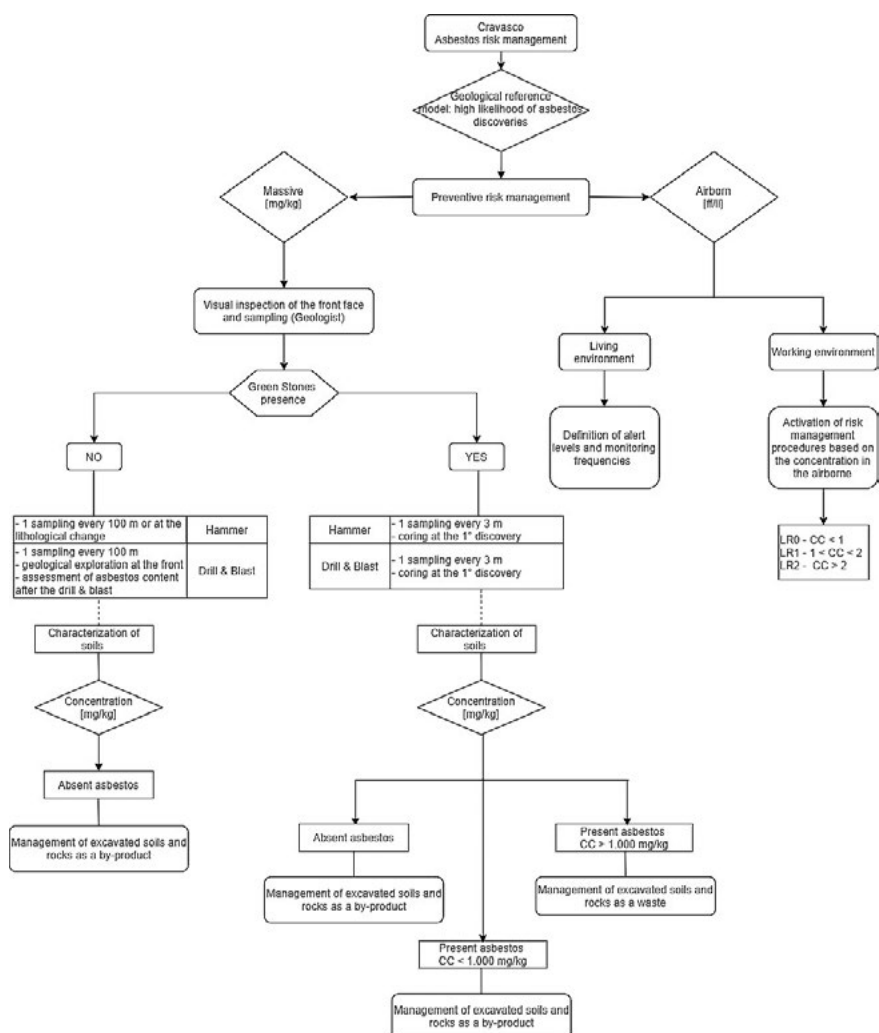
In the field of tunnelling with rock masses containing asbestos in a nat-

ural matrix, the experience gained at the Cravasco site and at the Valico Tunnel has allowed us to develop unprecedented know-how in the construction world.

The definition of specific technical-operational procedures, the implementation of training and information activities and the active and participatory involvement of authorities in the decision-making processes are enabling the achievement of important milestones that see not only the achievement of the pre-established corporate productivity objectives, but also the minimisation and mitigation of risks on workers, as well as the achievement of a "zero impact" status on the living environment surrounding the construction site areas.

References

- [1] Meistro N., Poma F., Russo U., Ruggiero F., D'Auria C., (2019). Excavation with traditional methods through geological formations containing asbestos. Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, pp. 4932–4942.



18 Flow-chart process in asbestos management

Credit: COCIV



Neubau Albulatunnel II

Herausforderungen beim Vortrieb aus der Sicht des Unternehmers

*Reinhard Perner, Bmstr. Dipl.-Ing. TU Graz, PORR Suisse AG, Altdorf/CH
Klaus Eder, Dipl.-Ing. TU Wien, PORR Suisse AG, Altdorf/CH*

Neubau Albulatunnel II

Herausforderungen beim Vortrieb aus der Sicht des Unternehmers

Der Neubau des Albulatunnels II, welcher das Herzstück der Bahnverbindung vom Albulatal in das Oberengadin darstellt, war schon Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen. In diesem Beitrag werden die technischen, aber auch vertraglichen Herausforderungen, welche sich im Zuge der Vortriebsarbeiten ergaben, aus der Sicht des Hauptunternehmers der ARGE NAT II beleuchtet.

New Construction of the Albula Tunnel II

Excavation Challenges From the Contractor's Perspective

The new construction of the Albula Tunnel II, which is the heart of the rail connection from the Albula valley to the Upper Engadine, has already been the subject of numerous publications. This article explores the technical as well as contractual challenges that arose during the excavation work from the perspective of the main contractor, JV NAT II.

1 Einleitung

Auf einer Gesamtlänge von 62 km überbrückt die Bahnlinie von Thusis nach St. Moritz mit insgesamt 42 Tunneln und 144 Brücken mehr als 1000 Höhenmeter. Herzstück der Strecke ist der im Jahr 1903 in Betrieb genommene Albulatunnel, der im Jahr 2008 zum UNESCO-Weltkulturerbe erhoben wurde. Allerdings weist der mehr als 110 Jahre alte Tunnel mittlerweile erhebliche technische Mängel auf. Aufgrund des geringen Kostenunterschieds sowie der geringeren Einflüsse auf den laufenden Bahnbetrieb entschied sich die Rhätische Bahn im Jahre 2006 gegen eine umfassende Sanierung und für einen Neubau des Tunnels. Damit kann auch den modernen Sicherheitsanforderungen besser Rechnung getragen werden.

Im Winter 2014/2015 erhielt die ARGE Neubau Albulatunnel II (NAT II) – bestehend aus der PORR Suisse AG (Federführung), der Walo Bertschinger AG und der Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A. – den Zuschlag für den Bau des neuen Tunnels. Die Auftragssumme beträgt rund 125 Millionen Schweizer Franken (exkl. MwSt.).

Die Übergabe des Tunnels war ursprünglich für den August 2019 geplant. Aufgrund der angetroffenen geologischen Verhältnisse, welche sowohl Einfluss auf die Vortriebs- als auch auf die Innenausbauarbeiten haben, dauern die Arbeiten jedoch länger als prognostiziert. Mit einer Übergabe des Tunnels an die Folgegewerke ist erst im Jahr 2021 zu rechnen.

2 Umfassende Vorarbeiten

Vor dem eigentlichen Beginn der Vortriebsarbeiten mussten umfangreiche Vorarbeiten durchgeführt werden. Der Vor-

1 Introduction

Over a total length of 62 km, the railway line from Thusis to St. Moritz spans over 1000 meters in altitude with a total of 42 tunnels and 144 bridges. The heart of the route is the Albula tunnel, which was put into operation in 1903 and was declared a UNESCO World Heritage Site in 2008. However, the tunnel, now aged over 110, has developed significant technical defects. Due to the small cost difference and the lower impact on ongoing rail operations, the Rhaetian Railway decided in 2006 to forego extensive renovation and construct a new tunnel instead. This means that modern safety requirements can also be better fulfilled.

In winter 2014/2015, the JV Neubau Albulatunnel II (NAT II) – consisting of PORR Suisse AG (lead management), Walo Bertschinger AG and Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A. – was awarded the contract for the construction of the new tunnel. The contract is worth around CHF 125 million (excluding VAT).

The tunnel handover was originally planned for August 2019. However, the work is taking longer than anticipated due to the geological conditions encountered which impact both the excavation and the interior construction. The tunnel is not expected to be handed over for subsequent works until 2021.

2 Extensive Preparatory Work

Before starting the actual excavation work, extensive preparatory work had to be carried out. The excavation was

Construction du nouveau tunnel de l'Albula II

Défis liés à l'avancement du point de vue de l'entrepreneur

Malgré les enseignements tirés de la construction du premier tunnel de l'Albula et des sondages géologiques supplémentaires, les travaux d'avancement engagés sur les deux sites de Preda et Spinas ont réservé leur lot de surprises. Mais grâce à la collaboration de toutes les parties prenantes et au travail de grande qualité à la hauteur des enjeux, des solutions aux problèmes techniques ont pu être rapidement trouvées. La résolution de leurs différends contractuels s'est révélée d'autant plus difficile et n'a abouti en partie que grâce au recours à un organe de règlement.

Nuova costruzione della galleria dell'Albula II

Le sfide nell'avanzamento dal punto di vista dell'impresa

I lavori di avanzamento, che hanno preso il via da entrambi i punti di installazione di Preda e Spinas, hanno riservato alcune sorprese, a dispetto delle esperienze maturate nella costruzione della prima galleria dell'Albula e delle perlustrazioni geologiche preliminari. I problemi tecnici sono potuti essere risolti con la cooperazione di tutti i soggetti coinvolti con una qualità adeguatamente alta. La loro sistemazione a livello contrattuale si è rivelata altrettanto complessa e ha richiesto in parte l'intervento di una commissione per la risoluzione delle controversie.

trieb erfolgte über zwei Angriffe von Norden (Preda) und Süden (Spinas). Auf den beiden Installationsplätzen in Preda und Spinas errichtete die ARGE Bürokomplexe, eine Unterkunftbaracke für 65 Personen, Gewässerschutzanlagen zur Säuberung der Tunnelabwässer, zwei Betonanlagen, Werkstätten für die Geräteinstandsetzung sowie ein Kieswerk zur Aufbereitung des ausgebrochenen Materials.

Von Dezember bis März ist die Baustelle geschlossen und nur per Eisenbahn erreichbar, da die Passstrasse von Bergün nach Preda gesperrt ist und als Schlittenbahn genutzt wird. Sämtliche Antransporte von Massengütern müssen vertraglich bedingt per Bahn erfolgen.

3 Geologie

3.1 Prognose

3.1.1 Preda

Gemäss geologischer Prognose sollte von Preda aus auf 1127 m der Vortrieb im Allgäuschiefer stattfinden, wobei dieser zu Beginn als stark verwittert prognostiziert wurde. Für die restliche Strecke im Allgäuschiefer war nachbrüchiges Gebirgsverhalten prognostiziert, wobei die Gefährdung infolge trennflächenbedingter Ablösungen als gering eingestuft wurde. Anschliessend an den Allgäuschiefer folgt mit 110 m die komplexe Formation der Raibler Rauwacke, bei welcher es sich laut Prognose um mit Lockergestein gefüllte Hohlräume im festeren Gebirgsverbund sowie schwach verfestigtes Material («schwimmendes Gebirge») handeln sollte. Die restlichen Tunnelvortriebsmeter von Preda aus (ca. 1500 m) sollten in einer kurzen Zone von Mylonit (ca. 50 m) und im Albulagranit, welcher durch eine kurze Zone von Myloniten und Ultramyloniten durchzogen ist, erfolgen. Der Granit wird als massig bis schwach paralleltexturiert erwartet mit kleinen bis mittleren Druckfestigkeiten (10–100 N/mm²). Die Trennflächenabstände der Hauptklüftungen sind gemäss Prognose eng- bis weitständig.

tackled from two sides – from the north (Preda) and south (Spinas). The JV set up office complexes on the two installation sites in Preda and Spinas, as well as accommodation barracks for 65 people, water protection facilities for purifying the tunnel wastewater, two batching plants, workshops for equipment maintenance and a gravel plant for processing the excavated material.

The construction site is closed from December to March and only accessible by rail since the pass road from Bergün to Preda is closed and used as a sledge run. All transport of bulk goods must be contractually carried out by rail.

3 Geology

3.1 Forecast

3.1.1 Preda

According to the geological prediction, 1127 m should be excavated in the Allgäu slate from Preda; this rock was initially predicted to be heavily weathered. Loose rock mass behaviour was predicted for the remainder of the Allgäu slate section, whereby the risk due to joint face separation was classified as low. The Allgäu slate is connected to a 110 m complex formation of Raibler-Rauwacke rock which, according to the prediction, involves cavities filled with loose rock in the firmer rock cluster and weakly compacted material ("floating rock"). The remaining tunnel excavation meters from Preda (approx. 1500 m) should include a short zone of mylonite (approx. 50 m) and Albula granite, which is traversed by a short zone of mylonite and ultramylonite. The granite is expected to be massively to slightly parallel textured with small to medium compressive strengths (10–100 N/mm²). According to the prediction, the joint face distances of the main cracks can be narrow or far apart.

With regard to hydrogeology, frequent small springs and occasional large springs (> 10 l/s) were predicted in the All-

Betreffend Hydrogeologie wurden im Allgäuschiefer häufig kleine Quellen, vereinzelt grosse Quellen (> 10 l/s) prognostiziert. Im gesamten Abschnitt der Raibler Rauwacken werden namhafte Wassereinträge > 10 l/s als wahrscheinlich eingestuft. Sie treten aus Klüften und aus Karstspalten in den Tunnel zu. Im Albulagranit sind Wasserzutritte aus Klüften verbreitet, beschränken sich jedoch im Allgemeinen auf Tropfstellen und kleinere Quellen < 1 l/s.

Hinsichtlich der Verwertbarkeit des Ausbruchmaterials wurde der Allgäuschiefer als Materialklasse (MKL) 3 gemäss SIA 199 eingestuft, der Albulagranit grossteils als MKL 2, untergeordnet als MKL 3. Die MKL 1, welche für die Hartschotterproduktion geeignet ist, wurde im Vortriebsbereich Preda nicht erwartet.

3.1.2 Spinas

Von Spinas aus wurde auf den ersten ca. 220 m Lockermaterial prognostiziert, wobei zu ca. 50% Bach- und Gehängeschutt und ca. 50% Grundmoräne erwartet wurden. Nachbrüchiges Verhalten wurde insbesondere im Bachschutt prognostiziert.

Im anschliessenden Bereich steht auf ca. 2800 m der Albulagranit an, welcher auch von mylonitisierten Störungen durchzogen ist, aber bereichsweise eine höhere Druckfestigkeit als jener in Preda aufweisen soll (100–200 N/mm²).

Im Lockermaterial wurden insbesondere im Bachschutt häufig grössere Quellen (1–5 l/s) erwartet. Die Hydrogeologie des Albulagranits im Vortriebsbereich Spinas wurde ähnlich wie jene in Preda prognostiziert.

gäu slate. Within the entire Raibler-Rauwacken rock section, considerable water ingresses > 10 l/s are classified as likely. They enter the tunnel from cracks and karst fissures. In Albulagranite, water ingresses from fissures are widespread but generally limited to drip points and smaller springs < 1 l/s.

In terms of the usability of the excavated material, the Allgäu slate was classified as material class (MCL) 3 according to SIA 199, the Albulagranite primarily as MCL 2, secondarily as MCL 3. MCL 1, which is suitable for hard ballast production, was not expected in the Preda excavation area.

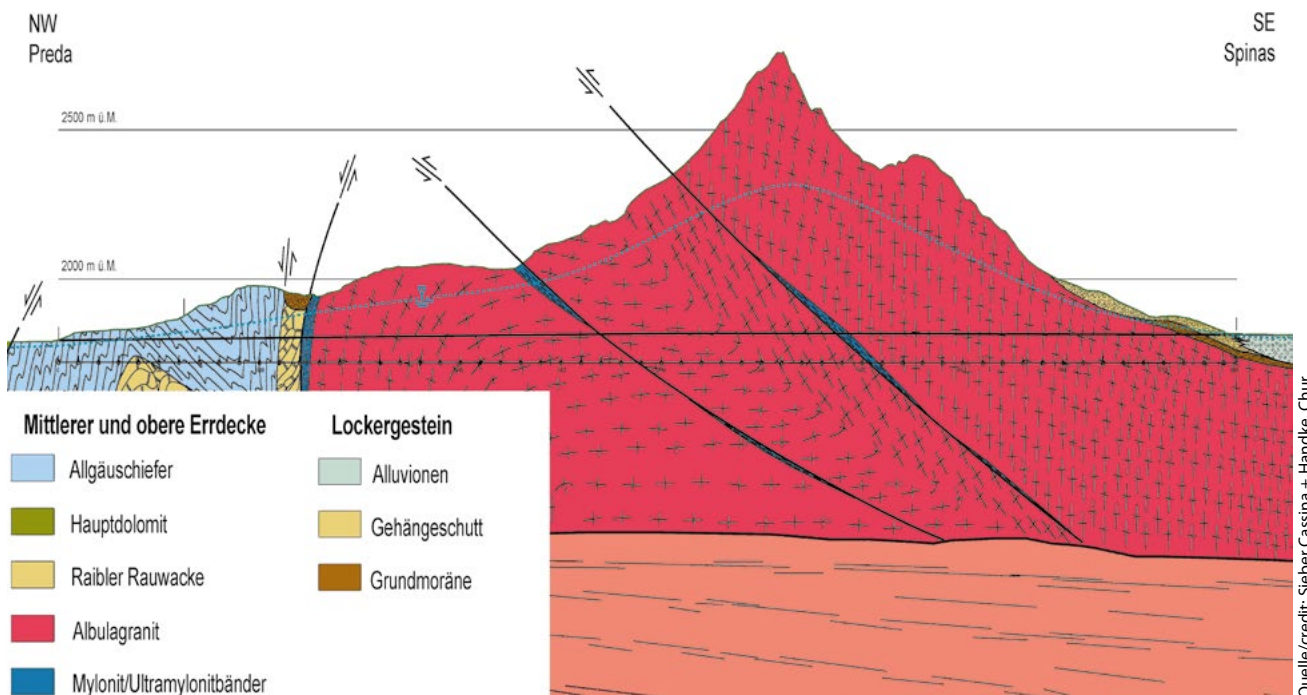
3.1.2 Spinas

From Spinas, the first approx. 220 m was predicted to be loose material with the expectation that approx. 50% would be stream debris and slope debris and approx. 50% would be ground moraine. Loose behaviour was particularly predicted in the stream debris.

In the adjoining area, the Albulagranite is present at approx. 2800 m, where mylonite disturbances pervade but which in some areas should have a higher compressive strength than that in Preda (100–200 N/mm²).

Larger springs (1–5 l/s) were expected frequently in the loose material, particularly in the stream debris. The hydrogeology of the Albulagranite in the Spinas excavation area was predicted to be similar to that in Preda.

For the Albulagranite in the Spinas excavation area, material class 1 according to SIA 199 was primarily expected over



1 Das geologische Längensprofil zeigt die unterschiedlichen Gesteinsformationen
The geological longitudinal profile shows the different rock formations

Für den Albulagränit im Vortriebsbereich Spinas wurde auf einer Länge von ca. 1660 m hauptsächlich die Materialklasse 1 gemäss SIA 199 erwartet, ansonsten MKL 2, untergeordnet MKL 3.

3.2 Angetroffene geologische Verhältnisse

Die unterschiedlichen geologischen Formationen hielten für alle Projektbeteiligten in der Ausführung doch einige Überraschungen parat.

3.2.1 Allgäuschiefer

Die angetroffenen Verhältnisse im Allgäuschiefer haben gegenüber der Prognose doch signifikante Abweichungen aufgewiesen. Die Klüftung hat einen wesentlich höheren Einfluss auf die Durchtrennung bzw. Zerlegung der Allgäuschiefer gehabt, als nach der Prognose ersichtlich war. Das gilt insbesondere für die Vortriebsbereiche ausserhalb der «Kluftzone» am Übergang zu den Raibler Schichten.

Durch die nicht prognostizierte Dominanz von Klufflächen kam es auch zu einer Verschiebung beim Eintreten des Gefährdungsbildes «Niederbrüche durch trennflächenbedingte Ablösungen» von der Klassifikation «gering» (Soll) zu «mittel-hoch» (Ist).

3.2.2 Albulagränit

Die Abweichungen im Granit sind aus Sicht der Unternehmung noch markanter. Der Granit wurde in einer wesentlich höheren Festigkeit angetroffen als prognostiziert. Sowohl die Gesteins Härte als Punkt-Last-Wert (PLI) als auch die Brechbarkeitswerte sind signifikant höher als prognostiziert. Dies zeigt sich auch in der Verschiebung der Materialklassenbilanz für die Materialaufbereitung: 91 % des gesamten Albulagränits wurden von der geologischen Baubegleitung als Materialklasse 1 und somit als geeignet für die Hartschotterproduktion eingestuft, obwohl diese im Bereich Preda gar nicht erwartet wurde. Das Trennflächensystem wurde mitunter auch als sehr engständig, d. h. < 0,2 m, angetroffen, was so nicht prognostiziert war.

4 Vortrieb

4.1 Konzept

Durch den kleinen Querschnitt des eingleisigen Tunnels von nur 35 m² und die doch beträchtliche Gesamtlänge von 5860 m war ein gut abgestimmtes Vortriebskonzept unerlässlich. Die Eckpfeiler dieses Konzepts waren:

- Das Konzept soll für beide Vortriebe (Preda und Spinas) gleich anwendbar sein, damit grösstmögliche Flexibilität in der Ersatzteilhaltung erreicht werden kann. Dies insbesondere daher, da aufgrund der exponierten Lage der Baustelle eine kurzfristige Erreichbarkeit nur schwer realisierbar ist.
- Der pneugebundene Verkehr und die erforderlichen Logistikischen im Tunnel sollten auf ein Minimum reduziert werden.

Daher hat sich die ARGE NAT II für folgende Konzeption entschieden:

a length of approx. 1660 m, otherwise MCL 2, secondarily MCL 3.

3.2 Geological Conditions Encountered

The different geological formations presented some surprises to everyone involved in the construction project.

3.2.1 Allgäu Slate

The conditions encountered in the Allgäu slate deviated significantly from the prediction. The fissures have a much greater impact on the sectioning and fragmentation of the Allgäu slate than was apparent from the prediction. This is particularly true in the excavation areas outside the "fissure zone" at the transition to the Raibl Formation.

Due to the unpredictable dominance of fissure areas, the "low" (target) classification was also changed to "medium – high" (actual) upon the occurrence of the risk profile "collapses caused by joint face separation".

3.2.2 Albula Granite

The deviations in the granite are even more pronounced from the contractor's perspective. The granite was found in a much higher density than anticipated. Both the rock hardness as a point load index (PLI) and the breakability values are significantly higher than predicted. This can be seen in the shift in the material class result for material processing: 91 % of the total Albula granite was classified as material class 1 by the geological construction supervision and therefore as suitable for hard ballast production, although this was not at all expected in the Preda area. The joint face system was also occasionally very narrow, i.e. < 0.2 m, which was not predicted.

4 Excavation

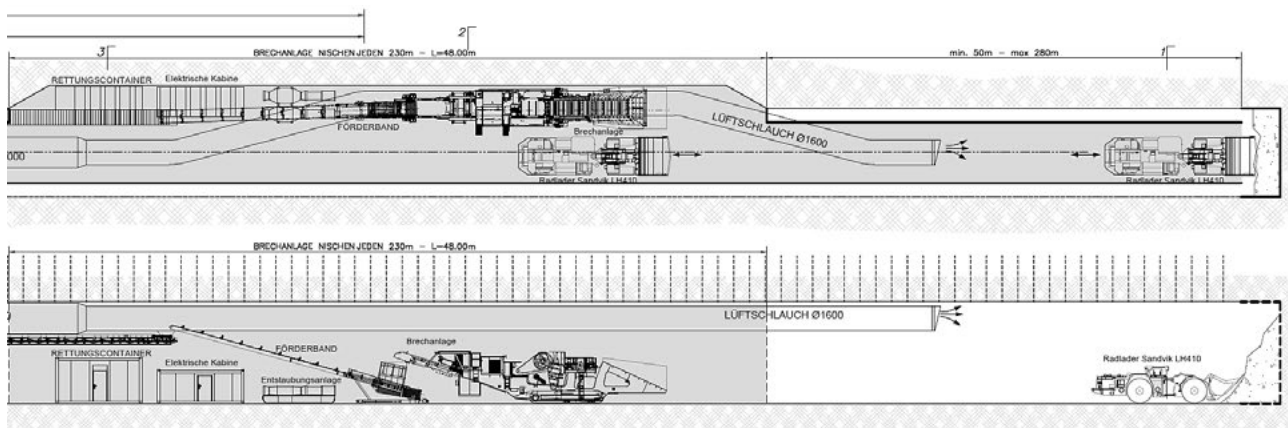
4.1 Concept

Due to the small crosssection of the single-track tunnel of only 35 m² and the considerable total length of 5860 m, a well-coordinated excavation concept was absolutely crucial. The cornerstones of this concept were:

- The concept should be equally applicable to both excavations (Preda and Spinas) to achieve the greatest possible flexibility in spares inventory. This is particularly important because short-term accessibility is challenging owing to the exposed location of the construction site.
- Tyre-bound traffic and the necessary logistics niches in the tunnel should be reduced to a minimum.

The JV NAT II thus decided on the following concept:

- The excavated material is removed in the back area using a conveyor belt.
- The material is crushed to the required size using a track-mounted crusher which is transferred every 230 m. The belt is thus extended with every 230 m of excavation.
- Removal from the face to the crusher is performed using a loader with a side-dump bucket.



Quelle/credit: PORR

2 Vortriebskonzept der ARGE NAT II

Excavation concept of the JV NAT II

- Die Schutterung des Ausbruchmaterials erfolgt im rückwärtigen Bereich mit einem Förderband.
- Das Brechen des Materials auf die erforderliche Korngröße erfolgt mit einem raupenmobilen Brecher, welcher alle 230 m überstellt wird. Die Bandverlängerung erfolgt somit auch alle 230 m Vortrieb.
- Die Schutterung von der Ortsbrust zum Brecher erfolgt mit einem Fahrlader mit Seitenkippschaufel.

4.2 Ausführung Vortrieb Preda

In Preda starteten die Ausbrucharbeiten im Lockergestein auf den ersten 37 m im Schutze von vier Rohrschirmetappen. Aufgrund des hohen Verwitterungsgrades und der geringen Gesteinsfestigkeiten musste dieser Bereich mittels Tunnelbagger ausgebrochen werden. Im darauffolgenden Abschnitt des Allgäuschiefers konnte auf Sprengvortrieb umgestellt werden. Allerdings erwies sich das dunkle, feinschiefrige Gestein als sehr nachbrüchig und reagierte bei mechanischer Belastung unter Wassereinfluss stark schlambildend, sodass immer wieder Teilstrecken mit dem Tunnelbagger aufgefahren werden mussten. Die sehr intensive Durchtrennung des Gebirges führt zwangsläufig zur Ausbildung kleinerer Trennflächenkörper. Bei den gemäss der Prognose zu erwartenden Blockgrößen in der Klasse bis 60 cm und den angegebenen hohen Festigkeiten (50–100 N/mm²) ist der Einsatz eines Brechers bei Transport mit dem Förderband notwendig. Die tatsächlich durch die sehr intensive Durchtrennung viel kleineren Trennflächenkörper machten den Einsatz des Brechers unwirksam bzw. es kam zur Ausbildung zu kleiner Korngrößen und bei Anwesenheit von Wasser zur Ausbildung von Schlamm. Statt der erwarteten plattigen Trennflächenkörper bis ca. 0,6 m Grösse traten überwiegend dünne plattige Trennflächenkörper mit scharfen, rasierklingenartigen Kanten auf. Diese verursachten Schäden an den Förderbändern.

Der Vortrieb konnte nicht wie in der Planung vorgesehen mit der Sicherungsklasse (SKL) 3 mit flacher Sohle erfolgen, sondern nur mit Sicherungsklassen mit schwerer Ausbruchsicherung und tiefer Sohle (SKL 4 und SKL 5) bewältigt

4.2 Excavation in Preda

In Preda, the excavation work in loose rock started in the first 37 m under the protection of four pipe roofing umbrella sections. Due to the high level of weathering and the low rock strength, a tunnel excavator had to be used to excavate this area. In the subsequent section of the Allgäu slate, it was possible to switch to drill and blast. However, the dark, slightly slaty rock proved to be very loose and generated a lot of sludge when subjected to mechanical loads with water ingress, to the point where sections had to be driven through again and again with the tunnel excavator. The highly intense division of the rock inevitably leads to the formation of joint face bodies. Given the block sizes to be expected in the class up to 60 cm and the indicated high strengths (50–100 N/mm²), the use of a crusher for transport with the conveyor belt is necessary. The joint face bodies, which were actually much smaller due to the very intense division, made use of the crusher ineffective or caused a formation of too-small grain sizes and sludge was formed when water was present. Instead of the expected flat joint face bodies up to approx. 0.6 m in size, there were predominantly thin, flat joint face bodies with sharp, razor-like edges. This caused damage to the conveyor belts.

The excavation could not be carried out with the safety class (SC) 3 with a flat floor as planned, but only with safety classes with extensive excavation support and a deep floor (SC 4 and SC 5). Additional measures in the back area were necessary (installation of a fixed provisional construction track and a temporary drainage line at the bottom of the floor). This also involved increased maintenance of the conveyor belts and the track-mounted crusher. Overall, this resulted in significant construction time delays.

In the area of the transition to the Rauwacke rock, the predicted fissure zone in the Allgäu slate was excavated in the corresponding form. With water ingress of 45 l/s, the water protection facilities were put to the test for the first time. Up to 50 face injections at 15 m intervals were necessary to stabilise this area in several stages.

werden. Zusätzliche Massnahmen im rückwärtigen Bereich waren erforderlich (Einbau einer befestigten provisorischen Baupiste und einer temporären Entwässerungsleitung am Sohlentiefpunkt). Weiters war damit eine erhöhte Instandhaltung der Förderbänder und des raupenmobilen Brechers verbunden. Gesamtheitlich betrachtet kam es dadurch zu wesentlichen bauzeitlichen Verzögerungen.

Im Bereich des Übergangs zur Rauwacke wurde die prognostizierte Kluftzone im Allgäuschiefer in entsprechender Ausprägung aufgefahren. Bei Wasserzutritten von 45 l/s wurden die Gewässerschutzanlagen zum ersten Mal auf eine harte Probe gestellt. Bis zu 50 Ortsbrustinjektionen in einem Abstand von 15 m waren nötig, um diesen Bereich in mehreren Etappen zu stabilisieren.

Den bautechnisch anspruchsvollsten Bereich stellte die Raibler Formation dar. Geologisch gesehen besteht die Raibler Rauwacke aus porösen Dolomiten mit Hohlräumen. Diese Matrix beinhaltet Fremdkomponenten mit Schiefer-, Kalk- und Granitgestein sowie gipshaltigen Schlamm. Beim Bau des ersten Albulatunnels kam es hier zu einem Schlamm-einbruch, der die damalige Baufirma in den Konkurs zwang und die Baustelle für ein Jahr lahmlegte. Deshalb wurde der Abschnitt dieses Mal in drei Zonen (RW I, RW II und RW III) unterteilt, wobei der ungünstigste dritte Abschnitt im Schutze eines Gefrierkörpers ausgebrochen wurde. Aufgrund des bauzeitlichen Rückstands infolge der Erschwer-nisse im Allgäuschiefer hat der Bauherr entschieden, dass neben der Erstellung der Vereisungszone in der Zone RW III auch der Vortrieb in diesem Bereich als Gegenvortrieb von der Kaverne heraus erfolgen soll. Beide Arbeiten wurden an Drittunternehmungen vergeben.

Die ersten beiden Zonen (RW I und RW II) wurden im Bag-gervortrieb von der ARGE NAT II aufgefahren. Durch die aufwendigen Sicherungsmassnahmen mit Ortsbrustankern, Injektionen, Spiessen und Spritzbeton reduzierte sich in diesem Abschnitt die mittlere Vortriebsleistung auf täglich rund 95 cm. Aufgrund der Erkundungsergebnisse und der mehrmals geänderten Ausführungsplanung wurde mit der Bauherrin eine leistungsunabhängige Vergütung der Aus-brucharbeiten vereinbart.

Der Vortrieb im Albulagranit stellte streckenmässig den Hauptanteil der Sprengarbeiten dar. Vor allem der infolge der hohen Festigkeit des Gebirges hohe Verschleiss am Bohr-werkzeug und an den Brecherkomponenten sowie die starke Durchtrennung des Gebirges, welche so nicht prognostiziert waren, machten den Teams zu schaffen.

4.3 Ausführung Vortrieb Spinas

In Spinas kamen auf den ersten Vortriebsmetern ebenfalls Rohrschirme als Ausbruchsicherung zum Einsatz. Die ange-troffenen geologischen Verhältnisse erforderten einen Aus-bruch in Teilflächen, was vertraglich nicht vorgesehen war. Zusätzlich hat sich in diesem 250 m langen Lockergesteins-



Quelle/credit: PORR

3 Im Allgäuschiefer konnte auf Sprengvortrieb umgestellt werden, allerdings erwies sich das Gestein als sehr nachbrüchig und schlammbildend

In the Allgäu slate, it was possible to switch to drill and blast but the rock turned out to be very loose and sludge-forming

The most technically challenging area was the Raibler Formation. Geologically speaking, Raibler-Rauwacke rock consists of porous dolomite with cavities. This matrix contains foreign components with slate, lime and granite as well as gypsum-loaded sludge. During the construction of the first Albulatunnel, there was an inrush of mud which caused the construction company at the time to go bankrupt and brought the construction site to a halt for a year. The section was therefore divided into three zones (RW I, RW II and RW III) this time, with the most difficult third section being excavated with the protection of frozen ground. Due to the construction delays caused by the difficulties in the Allgäu slate, the client decided that in addition to the establishment of the frozen zone in RW III, the excavation in this area should also be performed as a counter drive from the cavern. Both tasks were outsourced to third parties.

The first two zones (RW I and RW II) were excavated by the JV NAT II. Due to the challenging safety measures with face bolts, injections, spiles and shotcrete, the average advance rate in this section was reduced to around 95 cm per day. A performance-independent remuneration for the excavation work was agreed with the client on the basis of the survey results and execution planning, which had been changed several times.

bereich ein Verbruch ereignet, der den Vortrieb für über einen Monat stoppte. An die 500 m³ Schlamm und Gestein drangen aus der Firste in den Tunnel ein. Glücklicherweise kam es hier nicht zu Personenschäden. Erst nach umfangreichen Schaum- und Zementinjektionen konnte dieser Abschnitt stabilisiert und durchörtert werden.

The excavation in the Albula granite was the largest part of the blast work in terms of distance. The teams particularly struggled with the high wear and tear on the drilling tool and the crusher components caused by the great rock strength, as well as the severe division of the rock, which had not been predicted.



Quelle/credit: PORR

4 In Spinas erfolgte der Rohrschirmvortrieb bei laufendem Bahnbetrieb

In Spinas, the pipe umbrella excavation was carried out while the railway was still in operation

Im darauffolgenden Sprengvortrieb im Granit musste jede Sprengung in einem mit dem Bahnbetreiber abgestimmten Sprengfenster erfolgen. Aufgrund des geringen Abstands zur Bestandsröhre durften die zulässigen Erschütterungen einen Grenzwert von 60 mm/s nicht überschreiten.

Zusätzliche Einschränkungen ergaben sich aufgrund der doch stärkeren Gebirgsdurchtrennung, welche vielfach eine Reduktion der Abschlagslänge erforderlich machte. Trotz dieser einschränkenden Rahmenbedingungen erreichte die ARGE Tagesleistungen von bis zu 20 m je Arbeitstag. Ein

4.3 Excavation in Spinas

In Spinas, pipe umbrellas were also used as excavation support for the first few meters of excavation. The geological conditions encountered required break-outs in sections, which was not included in the contract. In addition, a cave-in occurred in this 250 m long loose rock area which stopped the excavation work for over a month. Around 500 m³ of sludge and rock penetrated into the tunnel from the roof. Fortunately, no one was injured during this incident. It was only possible to stabilise and pierce through this section following extensive foam and cement injections.

wichtiger Meilenstein wurde am 2. Oktober 2018 mit dem Durchschlag zum Vortrieb Preda erreicht.

5 Geografische und logistische Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf den Baubetrieb

Obwohl sich die Baustelle an einer touristisch stark frequentierten Passstrasse und Eisenbahnlinie befindet, wird hier im Hochgebirge mit all seinen klimatischen und logistischen Herausforderungen gebaut.

Die Baustelleneinrichtungsflächen in Preda und Spinass liegen auf rund 1800 m Höhe.

In Preda ist sie über die Albulapassstrasse bis Mitte Dezember und im Winter nur über die Bahnlinie sowie in Ausnahmefällen über die Schlittenbahn erreichbar. Aus vertraglicher Sicht ist die ARGE verpflichtet, sämtliche Massengüter per Bahn anzutransportieren. Dies stellte vor allem in der Einrichtungsphase, die ohnehin meist sehr terminkritisch ist, eine enorme Challenge dar. Sämtliche Bürocontainer, Förderbandkomponenten, Werkstatthallen, Unterkunftsbaracken und Geräte wurden, wenn möglich, mit der Rhätischen Bahn in Einzelteilen antransportiert. Waren für die Bahn gewisse Anlagenteile oder Baustellengeräte zu gross, mussten nächtliche Spezialtransporte mit Kranen organisiert werden, da die Bahnviadukte von Bergün nach Preda nicht herkömmlich passierbar gewesen wären.



6 Nächtlicher Antransport eines Bohrwagens durch Bergün
Night-time transport of a drill jumbo through Bergün

Obwohl die Baustelle bisher von wirklich starken Wintereinbrüchen verschont geblieben ist, mussten sämtliche Gebäude bezüglich Schnee- und Windlasten auf die Anforderungen im Gebirge adaptiert werden. Temperaturen bis -30°C und Frosttiefen von rund 2,0 m müssen speziell bei Fundamentationen für zum Beispiel Förderbandstützen in Betracht gezogen werden.

Müssen aufgrund von Lawinengefahr die Strasse/Schlittenbahn sowie die Bahnstrecke gesperrt werden, so ist der

During the subsequent drill and blast operation in the granite, each blast had to be performed during a blast window coordinated with the railway operator. Due to the short distance to the existing tunnel, the permissible vibrations could not exceed a limit of 60 mm/s.

Additional restrictions arose owing to the greater rock separation which often made it necessary to reduce the round length. Despite these restrictive framework conditions, the JV achieved daily outputs of up to 20 m per working day. An important milestone was reached on 2 October 2018 with the break-out to the Preda excavation.



Quelle/credit: Andy Mettler, Swiss Image

5 Grosser Jubel herrschte nach dem erfolgreichen Durchschlag des Albulatunnels

There was great jubilation following the successful break-out of the Albula tunnel

5 Geographical and Logistical Framework Conditions and Their Effects on Construction Operations

Although the construction site is located on a pass road and railway line that is highly frequented by tourists, the construction work is being carried out in the high mountains with all the associated climatic and logistical challenges.

The site installation facilities in Preda and Spinass are located at around 1800 meters above sea level. In Preda, the site can be reached via the Albula pass road until mid-December, and in winter only via the railway line or, in exceptional cases, via the sledge run. JV is contractually obliged to transport all bulk goods by rail. This was a huge challenge, particularly during the setup phase, which is usually highly critical in terms of deadlines in any case. All office containers, conveyor belt components, workshop halls, accommodation barracks and equipment were, where possible, transported in individual parts via the Rhaetian Railway. If certain parts of the installation or construction site equipment were too large for the trains, special overnight transports with cranes had to be organised, as the railway viaducts from Bergün to Preda would not have been passable through conventional means.



Quelle/credit: Pöyry

7 Baustelleneinrichtungsfäche Preda
Preda site installation area

Baubetrieb aus Sicherheitsgründen einzustellen, da bei Schlechtwetter auch keine entsprechende Rettung per Hubschrauber aus der Luft erfolgen kann.

Für den Baubetrieb gab es eine Vielzahl von täglichen (bahn)logistischen Vorgängen und Abhängigkeiten, die auch starke Auswirkungen auf die Vortriebsleistungen hatten:

- Abtransport des Ausbruchmaterials per Bahn von Spinas zum Baubahnhof Preda, Ablad und Abtransport per Förderband zur Deponie
- Förderbandtransporte von Ausbruchmaterial aus dem Vortrieb Preda zur Deponie
- Verlad und Transport von aufbereitetem Betonzuschlag per Bahn von Preda nach Spinas
- Antransport von Zement und Baumaterial per Bahn
- Abtransport von Abfällen und Schlammfilterkuchen per Bahn
- Sprengfenster in den Zugpausen
- Nachtsprengverbot auf den jeweils ersten 300 Vortriebsmetern

Unschwer zu erkennen ist, dass die Förderbänder die Lebensader der Baustelle sind. Aufgrund der engen Platzverhältnisse im Vortrieb sind Ausfälle an dieser Anlage nur für kurze Zeit überbrückbar (Zwischenschuttern) und daher ein absolutes Worst-Case-Szenario.

Although the construction site has been spared severe winters thus far, all buildings had to be adapted for the requirements in the mountains with regard to snow and wind loads. Temperatures down to -30°C and frost depths of around 2.0 m must be considered particularly when laying foundations – for example for conveyor belt supports.

If, due to the risk of avalanches, the road/sledge run and the railway line have to be closed, construction work must stop for safety reasons since appropriate rescue from the air via helicopter cannot be conducted in adverse weather.

A large number of daily (rail) logistical processes and dependencies took place for construction operations which also had a serious impact on the advance rate:

- Removal of the excavated material by rail from Spinas to the Preda site train station, unloading and removal via conveyor belt to the landfill
- Conveyor belt transport of excavated material from the Preda excavation to the landfill
- Loading and transportation of prepared concrete aggregate via train from Preda to Spinas
- Removal of cement and construction materials via train
- Removal of waste and sludge filter cakes via rail
- Blast windows during train breaks
- No night-time blasting in the first 300 meters of excavation

6 Vertragliche Abwicklung

Die aufgezeigten geologischen Abweichungen und die im Zuge der Vortriebsarbeiten zusätzlich erforderlichen Massnahmen sind für ein Projekt in dieser Grössenordnung nichts Ungewöhnliches. Da der Werkvertrag als klassischer Bauvertrag gemäss SIA konzipiert ist, ist auch die grundsätzliche Rollenverteilung der Vertragspartner klar geregelt.

Dass die vertragliche Bereinigung nicht ohne Friktionen vonstattengeht, war beiden Vertragspartnern bewusst. Daher war bereits bei Vertragsunterzeichnung die Streiterledigung über ein Schlichtungsverfahren gemäss Empfehlung VSS 641 510 implementiert.

Das Streiterledigungsmodell sieht drei Phasen vor:

- Phase 1: Baustellenentscheidungsweg bis zum Chefgespräch
- Phase 2: Schlichtungsverfahren
- Phase 3: gerichtliche Beurteilung

Das Schlichtungsgremium besteht aus je einem Vertreter der Bauherrenseite und der Unternehmerseite sowie einem Juristen als Schlichter.

Wichtig ist, dass die Streitschlichter kontinuierlich über den Baufortschritt informiert sind, damit sie rasch ein Gesamtbild vom Baustellengeschehen haben, um im Anlassfall einer erforderlichen Streiterledigung speditiv zu einer Entscheidung kommen zu können. Das Streitschlichtungsgremium wird beim Projekt Albulatunnel II mit der Zustellung des Baustellenwochenberichts zeitnah über den Baufortschritt informiert. Zusätzlich werden halbjährlich Informationssitzungen abgehalten, an denen das Schlichtungsgremium auch über anstehende strittige Themen informiert wird und somit in mögliche Schlichtungsfälle bereits einen ersten Einblick erhält.

7 Resümee

Die Vortriebsarbeiten für den Bau des Albulatunnels II stellen in technischer Hinsicht für alle Projektbeteiligten eine spannende und herausfordernde Aufgabe dar. Beinahe sämtliche Methoden des modernen konventionellen Tunnelbaus kamen zum Einsatz, um diese Arbeiten durchzuführen. Gefrierverfahren, Injektionen, Sprengvortrieb, MUL und MUF waren erforderlich, um die unterschiedlichen geologischen Formationen vom harten Albulagravit bis zur «schwimmenden» Rauwacke zu bewältigen. Dass es dabei trotz jahrelanger Planungen und Projektvorbereitungen im Zuge der Ausführungsarbeiten zu Abweichungen kommen kann, liegt in der Natur der Sache. Die technische Bewältigung der Aufgabe ist, und das unter gemeinsamem Einsatz sämtlicher Beteiligten, zur Zufriedenheit aller gelungen – der Berg wurde bezwungen. Die vertragliche Bereinigung wird aufgrund der Komplexität der Materie noch Zeit und Geduld in Anspruch nehmen.

It is easy to see that the conveyor belts are the vital lines of the construction site. Due to the limited space available during excavation, failures in this installation can only be surmounted for a short time (intermediate removal) and are therefore an absolute worst-case scenario.

6 Contractual Processing

The geological deviations shown and the additional measures required during the excavation operations are not unusual for a project of this size. Since the contract is designed as a classic construction contract in accordance with SIA, the basic role allocation of the contracting parties is also clearly regulated.

Both contracting parties were aware that the contractual agreement would likely involve some friction. Dispute resolution via an arbitration procedure in accordance with recommendation VSS 641,510 was therefore already implemented when the contract was signed.

The dispute resolution model has three phases:

- Phase 1: Construction site decision-making process up to the executive meeting
- Phase 2: Arbitration procedures
- Phase 3: Judicial assessment

The arbitration board consists of one client representative and one contractor representative as well as a lawyer as an arbitrator.

It is important that the arbitrators be continuously informed about the progress of the construction so that they receive a quick overall picture of the construction site operations, allowing for a quick decision in the event of a dispute. In the Albula Tunnel II project, the dispute arbitration board is promptly informed of the construction progress with the delivery of the weekly construction site report. In addition, information meetings are held every six months, at which the arbitration board is also informed about current disputes, thus receiving an initial insight into possible arbitration cases.

7 Summary

The excavation work for the construction of the Albula Tunnel II was an exciting and challenging task for all project participants. Almost all methods of modern conventional tunnelling were used to complete this work. Ground freezing processes, injections, drill and blast, mechanical excavation in loose rock (MUL) and mechanical excavation in solid rock (MUF) were required to manage the different geological formations from hard Albula granite to “floating” Rauwacke rock. Despite years of planning and project preparation, deviations in the course of the excavation work are only natural. With the joint efforts of all involved, the technical accomplishment of the task was achieved successfully to everyone’s satisfaction – the mountain was conquered. The contractual agreement will take time and patience due to the complexity of the subject matter.

Insgesamt hat sich der gewählte Weg der Streiterledigung grundsätzlich bewährt, da trotz der aufgezeigten vertraglichen Abweichungen in der Abwicklung des Projekts der Baufortschritt stets im Fokus stand und die Differenzen betreffend Bauvertrag im Bedarfsfall über eine Drittmeinung bereinigt werden konnten. Dadurch war es möglich, dass die Meinungsverschiedenheiten das tägliche Geschäft nicht zu sehr belasteten. Gesamtheitlich zeigte sich jedoch, dass die Phase 1, also der Baustellenentscheidungsweg, relativ rasch ausgeschöpft wurde, wodurch doch einige Themen, sogar Abrechnungsdifferenzen, in die Phase 2, die Streitschlichtung, delegiert wurden. Inwieweit dies projektspezifisch ist oder ob bei anderen Bauvorhaben ähnliche Erfahrungen gemacht wurden, würde die Autoren dieses Beitrags sehr interessieren.

Overall, the chosen dispute resolution method has proven successful, because despite the contractual deviations in the development of the project, the construction progress was always in focus and the differences regarding the construction contract were resolved through third-party opinion where necessary. This largely prevented disagreements from impairing daily operations. However, it was shown that phase 1 (construction site decision-making process) was completed relatively quickly, which meant that some issues, including billing differences, were delegated to phase 2 (dispute resolution). The author of this article is greatly interested in finding out to what extent this is project-specific or whether other construction projects involved similar experiences.

PROJEKTDATEN

Region

Schweiz, Kanton Graubünden

Bauherr

Rhätische Bahn AG, Chur

Gesamtprojektleitung und Oberbauleitung

Amberg Engineering AG, Chur

Planung

Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Olten

Gähler und Partner AG, Baden

Straub AG, Chur

Bauleitung

Pöyry Schweiz AG, Zürich

AF Toscano AG, Chur

Ausführung

ARGE Neubau Albulatunnel II (NAT II), bestehend aus:

PORR Suisse AG, Altdorf

Walo Bertschinger AG, Dietikon

Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A.

Kenndaten

Bauzeit: 9 Jahre

Inbetriebnahme: 2022

Baukosten Rohbau: 135 Mio. Schweizer Franken
inkl. MwSt.

Gesamtlänge: 5860 m

Ausbruchquerschnitt: ca. 34–72 m² (LGV)

PROJECT DATA

Region

Switzerland, Canton of Grisons

Client, project and contract management

Rhätische Bahn AG, Chur

Overall project management and construction supervision

Amberg Engineering AG, Chur

Planning

Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Olten

Gähler und Partner AG, Baden

Straub AG, Chur

Site management

Pöyry Schweiz AG, Zurich

AF Toscano AG, Chur

Construction

JV Neubau Albulatunnel II (NAT II), consisting of:

PORR Suisse AG, Altdorf

Walo Bertschinger AG, Dietikon

Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A¹⁾

Key data

Construction time: 9 years

Operation: 2022

Shell construction costs: 135 million Swiss francs
incl. VAT

Total length: 5,860 m

Excavation crosssection: approx. 34–72 m² (LGV)



Tunnelling for CERN’s Future Circular Collider Feasibility Studies for 100 km Tunnel in Geneva

John Osborne, Senior Civil Engineer, CERN, Genf/CH
Alexandra Tudora, Fellow, CERN, Genf/CH

Tunnelling for CERN’s Future Circular Collider Feasibility Studies for 100 km Tunnel in the Geneva Region

The European Organisation for Nuclear Research (CERN) is currently investigating the feasibility of a future collider, namely the Future Circular Collider (FCC), as a potential successor of the Large Hadron Collider (LHC). Situated in the Geneva region, the tunnel will be approximately 100 km long with a 5.5 m diameter. The circular tunnel with large caverns will straddle the Swiss–French border.

1 Introduction

It is envisaged that the FCC tunnel will host the world’s largest particle accelerator. The study, currently in the feasibility stage, started officially in 2013 as a result of the recommendations made by the European Strategy for Particle Physics Update (ESPPU). Since then, to support physicists’ ambitions, the civil engineering team at CERN has been working on planning for the construction of what will be one of the world’s longest tunnels.

It is not the first time that CERN is embarking on a project of such a large scale. When CERN started the construction of the LEP (Large Electron-Positron) in 1983 [1], followed by the LHC in 1998, they were the largest facilities ever built, which made Europe a worldwide leader in science and technology [2]. To endorse the physics case, the tunnelling studies must satisfy requirements for both a lepton and a hadron machine, as well as reuse the LHC infrastructure. Maintenance

and refurbishment are needed to extend its lifetime, as the LHC infrastructure will reach the end of its design lifespan around 2040.

Similarly to the LHC, the FCC will extend into the territories of both France and Switzerland. The main challenges encountered by the civil engineers are the geological features, location, environment and costs. This paper describes the studies carried out for the tunnelling works required to host the future accelerator(s).

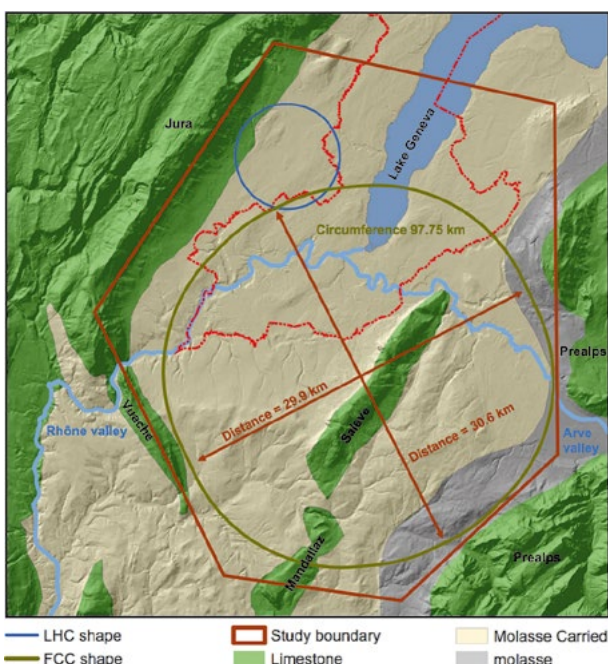
2 Project Description

Following studies of various locations and geometries of the accelerator machine, the conceptual design of the FCC considers a quasi-circular tunnel, with a circumference of 97.75 km situated in the Geneva basin. The tunnel is buried deep underground at an average depth of 300 m ASL. In addition to the main tunnel, approximately 8 km of bypass tunnels, 22 shafts, 16 large caverns and 12 new surface sites are required. The emphasis for the conceptual study of the underground infrastructure has been on locating the tunnel within the boundaries defined by the topographical and geological features of the Geneva basin, while ensuring connections to the LHC which will be used as an injector for the FCC. The locations of the surface sites have been selected to match the machine’s layout, for example the predefined experimental points, but also taking into account the socio-economic and environmental factors.

Approximately 9 million cubic metres of spoil will result from the excavations for FCC structures. About 90% of this will be molasse, the reuse potential of which – although it has proved to be a good rock for tunnelling – is not obvious. Ongoing research is being carried out at CERN to tackle spoil management issues.

2.1 Tunnel Layout and Position

The initial constraint for the position of the collider was that it must connect to the existing accelerator chain. In addition, the natural features defined the study boundary (Fig. 1):



1 FCC Study Boundary

Credit: CERN

Tunnelbau für den Future Circular Collider von CERN

Machbarkeitsstudien für einen 100 km langen Tunnel in der Region Genf

Die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN) prüft derzeit die Machbarkeit eines neuen Teilchenbeschleunigers als möglichen Nachfolger für den Large Hadron Collider (LHC). Der Future Circular Collider (FCC) soll einen Umfang von 100 km haben und sich bei Genf über schweizerisches und französisches Staatsgebiet erstrecken. Der Tunnelbau muss in einer möglichst günstigen geologischen Umgebung erfolgen, die hauptsächlich aus Moränen, Molasse und Kalkstein besteht. Die Baugrunduntersuchungen für die Tunnelplanung könnten voraussichtlich 2021 und der Bau des Tunnels dann ca. 2028 beginnen. Die Baukosten werden derzeit auf 6 Mrd. Schweizer Franken beziffert.

Construction d'un tunnel pour le Future Circular Collider du CERN

Études de faisabilité pour un tunnel de 100 km près de Genève

Le CERN étudie actuellement la faisabilité d'un nouvel accélérateur, le Futur collisionneur circulaire (FCC), potentiel successeur du Grand collisionneur de hadrons (LHC). Le tunnel de 100 km doit être creusé de part et d'autre de la frontière suisse dans le secteur de Genève. Le tracé du tunnel doit permettre de profiter des conditions géologiques les plus favorables dans un sous-sol composé principalement de moraines, de molasse et de calcaire. Selon le calendrier envisagé, la reconnaissance du terrain pourrait commencer en 2021 pour être intégrée dans la conception du tunnel et permettre le début des travaux de génie civil vers 2028. Le coût de réalisation des ouvrages de génie civil est évalué à 6 milliards de CHF.

Costruzione del tunnel per il Future Circular Collider del CERN

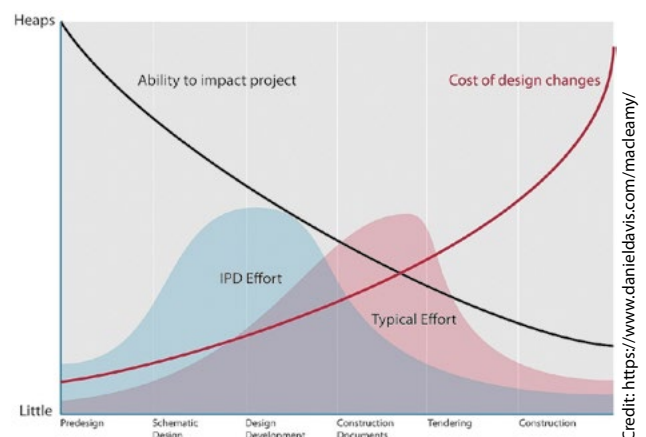
Studi di fattibilità per un tunnel di 100 km presso Ginevra

Il CERN sta attualmente valutando la fattibilità di un futuro acceleratore, chiamato Future Circular Collider (FCC), quale potenziale successore del Large Hadron Collider (LHC). Questo tunnel sotterraneo di 100 km attraverserà il confine franco-svizzero nella regione di Ginevra. Il tunnel dovrà essere posizionato all'interno della geologia più favorevole, composta in gran parte da morene, molasse e calcare. Si prevede che le indagini in sito possano partire nel 2021 per supportare la progettazione del tunnel e consentire l'avvio dell'ingegneria civile intorno al 2028. La stima dei costi iniziali per l'ingegneria civile è di 6 miliardi di CHF.

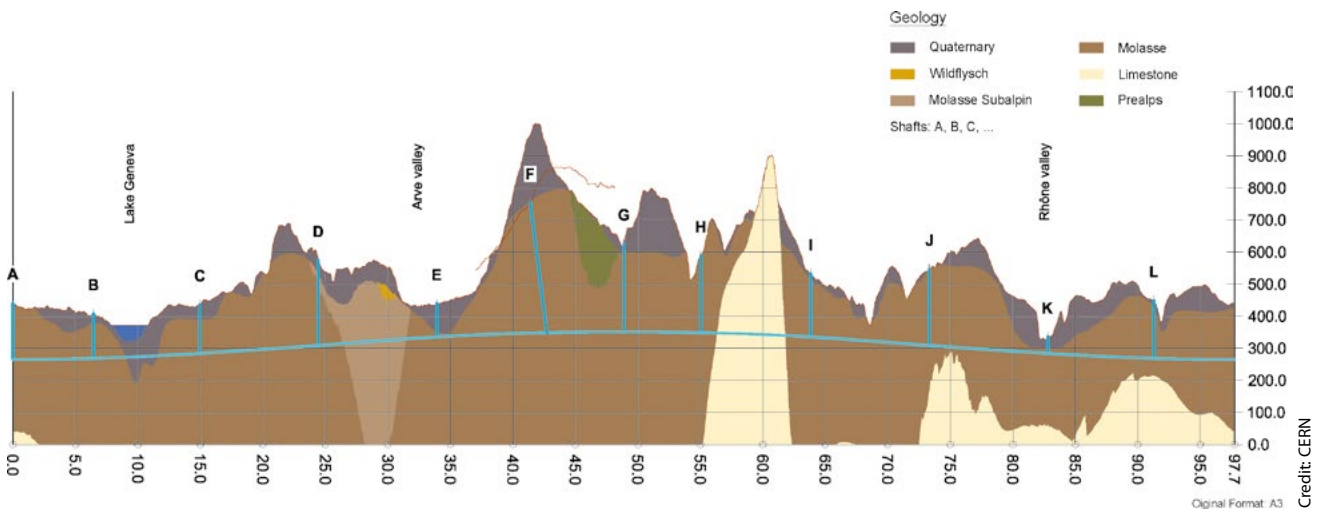
- The Jura Mountains to the north-west – due to the challenging nature of the limestone and the excessive overburden.
- Lake Geneva to the north – the depth of the lake rapidly increases in the north-east direction. The study boundary is placed at the point where the depth is prohibitively great.
- The Alpine foothills to the east and south-east – due to the challenging nature of the faulted ground and the excessive overburden.
- The Vuache range to the south-west – due to the challenging nature of the limestone, overburden and faulting.

Geology plays an important role when positioning the FCC tunnel. The aim was to place the tunnel as much as possible in the molasse and avoid the limestone. Previous experience at CERN during LEP construction of sectors 3 and 4 in the Jura limestone convinced civil engineers that it is better to minimise tunnelling through this fractured hard rock characterised by karstic features. The sedimentary rock called molasse, typical in the Geneva basin, has proved to be a good medium for tunnelling.

Another prominent concern was to orient the tunnel in a way that limited the depth around its perimeter, thereby minimising the depth of the shafts, reducing the overburden pressure on the underground structures and reducing the length of service infrastructure (cables, ducts, pipes, etc.). [3]



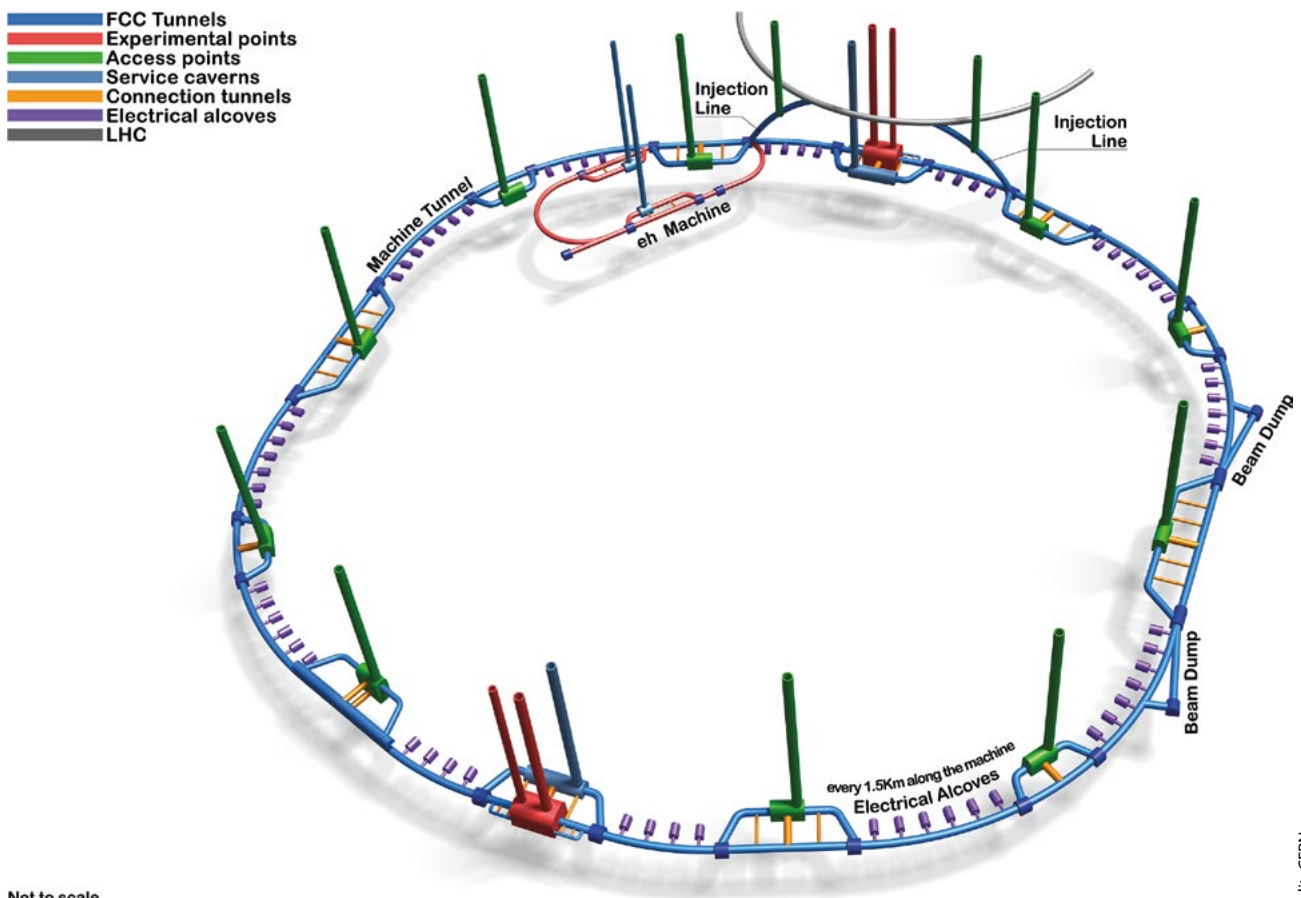
2 Macleamy's Curve (2004, Construction User Roundtable)



3 Geological profile along the tunnel circumference

The very first stages of a construction project offer the greatest opportunity for overall reduction of cost, schedule and environmental impact (Fig. 2). A digital approach to the feasibility study has enabled the civil engineering team to extract the maximum value from the large amount of available data relating to the terrain, geology, hydrology, environment and build environment of the Geneva basin, including man-made hazards such as geothermal boreholes. In order to locate the

optimal position for any given design of the FCC tunnel, all elements of this data need to be analysed simultaneously. The Tunnel Optimisation Tool (TOT), developed specifically for the FCC study by the engineering consultancy ARUP, is based on an open-source geographical information system (GIS) and allows the user to input any size, shape and position of tunnel and instantly see how this interacts with the geology, terrain, the environment and the build environment in the study area.



Not to scale
Frequency of connection tunnels for illustration only

4 3D schematic of underground infrastructure (not to scale)

The alignment of the tunnel has been optimised based on criteria such as geology, overburden, shaft depth and surface locations. The tunnel profile of the baseline position is shown in Fig. 3. The tunnel is located predominantly in the molasse, avoiding the Jura Mountains and the Alpine foothills. However, the tunnel will cross areas with challenging geology: one sector of the tunnel crosses the Mandallaz limestone and one section (between points B and C) will be tunnelled through the glacial deposits called moraines, under Lake Geneva. Other high-risk areas are the Rhône and Arve valleys.

There are twelve surface sites (A to L) associated with each underground point along the ring, required for access, operation and management. Four of them are experimental points (PA, PB, PL, PG).

2.2 Geology

The Geneva basin has three main ground types: moraines, molasse and limestone. The variable sedimentary rock, called molasse, is overlaid by low-strength glacial deposits, called moraines. The depth of the moraines varies from only a few metres up to 100 metres. Limestone features in the form of the Jura Mountains, the Alpine foothills, the Vuache and Salève chains border and intersect the layers of molasse. The molasse is composed of horizontally bedded layers of marls and sandstones. The term sandstone refers to cemented sandy or silty rocks and the term marl refers to clayey rocks [4]. These layers vary considerably in strength. The molasse is considered a suitable rock type for TBM excavation. It is stable and dry; however, the heterogeneity of the rock leads to some uncertainty. In particular, it is essential that the large span caverns are constructed in stronger sandstone.

The Jura and Vuache limestone is challenging for excavation due to karstic features formed by chemical weathering of the rock. It is common for the karsts to be filled with water and sediment, which can lead to water inflows and instability of the excavation. In comparison to the molasse, CERN has experienced significant issues with excavating in the limestone of the Geneva region. During the construction of the LEP, sector 3 to 4 was excavated in the Jura limestone and there were major issues with water ingress at the tunnel face [2].

Directly under the lakebed, there are very soft deposits which have been identified in previous site investiga-

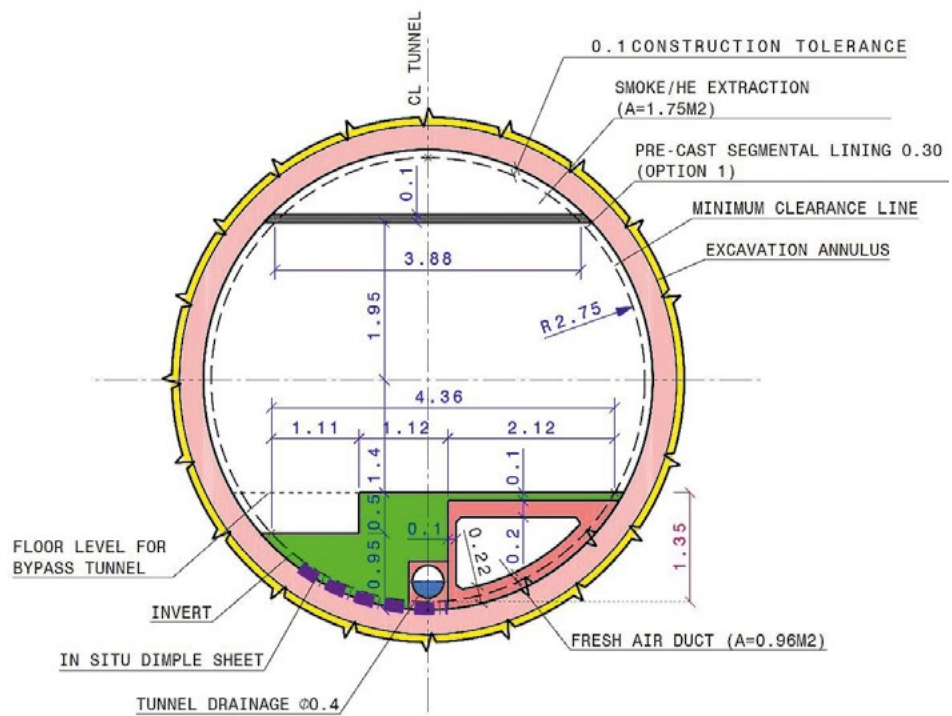
tion campaigns along the proposed alignment. "These have been identified as very soft lacustrine clayey silts and glacial-lacustrine silts and clays with an elastic modulus between 2 MPa and 10 MPa and extending from the lakebed to a level of 260 m" [5]. Despite little available information for the Arve Valley and Rhône Valley, it is expected that soft deposits, alluvial and alluvio-glacial moraines are to be encountered at depths of up to approximately 100 m below ground level. In order to avoid construction challenges and the risk of water inflows, the alignment of the tunnel was lowered by 30 m to allow the tunnel to pass through the more competent rock.

There are some known faults within the molasse that will bisect the alignment of the tunnel. The LEP, and before that the Super Proton Synchrotron (SPS), passed through the significant fault of the Allondon near Meyrin, without encountering particular difficulties during construction. For the LEP and LHC, the faults have posed greater problems regarding long-term stability.

2.3 Underground Structures

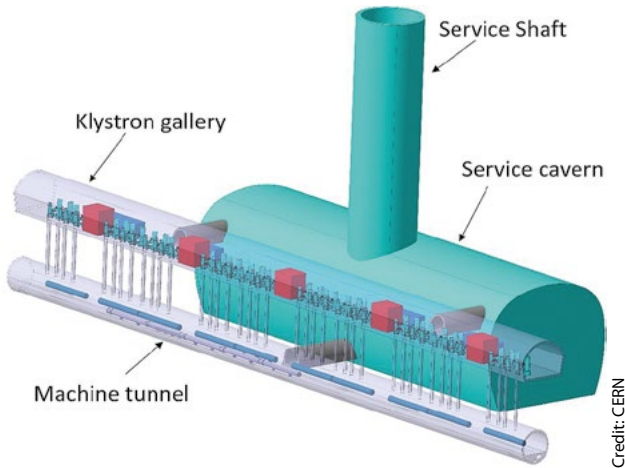
2.3.1 Tunnels

The main tunnel of the FCC is 97.75 km long and has an internal diameter of 5.5 m. The tunnel follows the layout of the accelerator machine, which is a quasi-circle made up of a series of arcs and straight sections. Fig. 5 shows the cross section of the empty arc tunnel, indicating the air supply and smoke and helium extraction ducts, which have been integrated into the civil engineering design. The tunnel invert is comprised of a precast concrete element (for the fresh-air supply duct) with cast in situ concrete around it, creating a lower floor level on the left side for the cryogenic distribu-



5 Typical cross section of the main tunnel

Credit: CERN



6 Klystron gallery at point H

tion line. On the right, the design allows space for safety passage and operation, such as magnet installation.

An additional 8 km of bypass tunnels of the same diameter are required for transporting equipment and personnel. A klystron gallery is required at point H (Fig. 6). This is similar to the bypass tunnels but located vertically above the machine tunnel to allow a clear route for the waveguides. At point D, two tunnels – each 2.1 km long – are required for the beam dumps and transfer tunnels that will connect the LHC to the FCC at points B and L. These will have an internal diameter of 4 m.

Auxiliary structures such as alcoves are needed to house electrical equipment. They are located every 1.5 km around the tunnel circumference and will be 25 m long with a 6 m inner diameter.

Life safety is based on compartmentalisation of an incident by placing partition walls and fire doors at 440 m spacing. In case of an accidental fire or gas release, the zone affected is isolated from the rest of the tunnel by immediate closure of the fire doors.

2.3.2 Shafts

Twenty-two large-diameter shafts are included in the design:

- Four large experimental shafts of 15 m inner diameter, connecting experiment caverns to the ground surface, located at points A, B, G and L
- Four small experimental shafts of 10 m inner diameter, connecting experiment caverns to the ground surface, located at points A, B, G and L
- Twelve shafts of 12 m inner diameter, connecting service caverns to the ground surface, located at all points
- Two construction shafts of 7 m inner diameter, located near the existing CERN accelerators, to facilitate the construction of the beam transfer tunnels from the LHC or SPS

At least one of the access shafts will have a larger diameter (18 m) for lowering in accelerator or infrastructure elements. The shafts' depths range from 51 m to 259 m, except for the shaft at point F, which would be 558 m deep. However, an alternative solution proposes an inclined tunnel with a length of 2,750 m and a gradient of 15 %.

2.3.3 Caverns and Alcoves

Large caverns are required at experimental points to house the detectors. The caverns at point A and point G have a

EXPERIMENT CAVERN AT A AND G TYPICAL SECTION

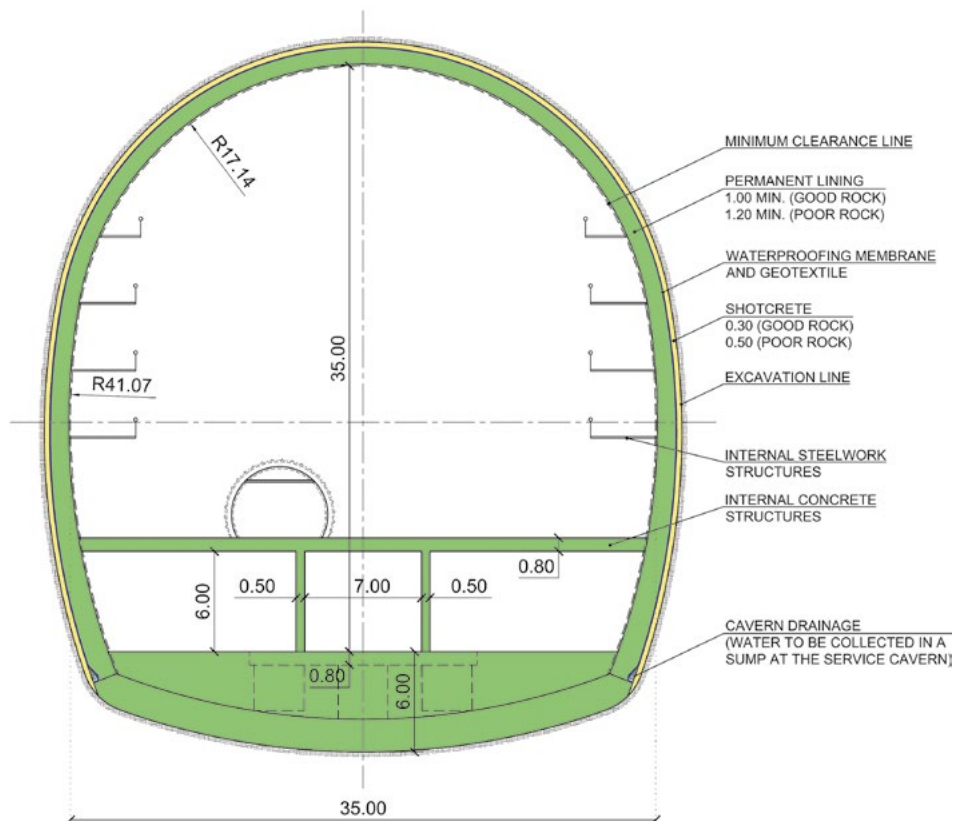
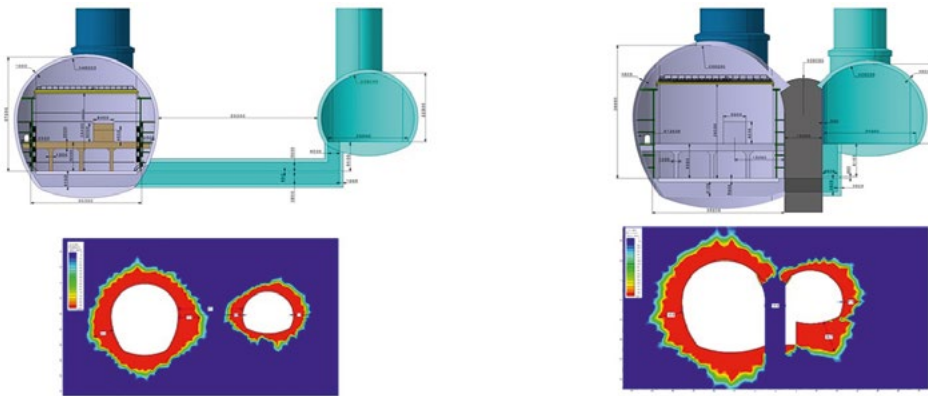


TABLE 1. ASSUMED ROCKBOLTING

DESCRIPTION	GOOD ROCK	POOR ROCK
ROCKBOLT LENGTH (m)	7	10
ROCKBOLTING SPACING (m x m)	3 x 3	1.2 x 1.2

7 Typical cross section of large experimental cavern



8 Stress analysis of experimental and service cavern arrangements

maximum clear span of 35 m, which is at the limit of what is possible given the current knowledge of the ground conditions (Fig. 7). Smaller span caverns of 30 m are required at point B and point L and, at each of the twelve access points, a service cavern with a span of 25 m and a length of 100 m.

At experimental points, the initial design proposed a concrete pillar between the service and the experimental cavern, similar to the existing layout at the compact muon solenoid (CMS), point 5 of the LHC. However, detailed finite element analysis showed that for the FCC, given the large spans and the depth of the structures, a similar layout is not feasible. In order to reduce the construction risks, it was decided to increase the distance between the service cavern and the experimental cavern to 50 m. Fig. 8 shows both scenarios.

In addition to the main experimental and service caverns, there are 26 locations which require a junction cavern, ranging in length from 30 m to 400 m. Some junction caverns will be used to allow passage of the TBM from the bypass tunnels to the main tunnel. Two 50 m caverns are required for each of the beam dumps to accommodate the dump beam line.

2.4 Infrastructure at Ground Surface

At each of the twelve access sites, approximately 6 to 9 hectares will be required to build large steel-frame and concrete buildings to serve infrastructure needs: electric distribution, cooling and ventilation, cryogenics, etc. At the current baseline position, four of these sites will be located in Switzerland. Large shaft head buildings at experimental sites will be used for detector assembly during installations. Other structures such as transformer hardstanding and cooling towers are envisaged.

3 Construction Strategy

The total tunnel construction work has been divided into twelve packages. The assumed construction strategy is shown in Fig. 9. Parallel tunnelling activities will start from each of the twelve access locations. The construction activities are planned to start in 2028 and will be handed over to physicists before 2035. The construction will commence with

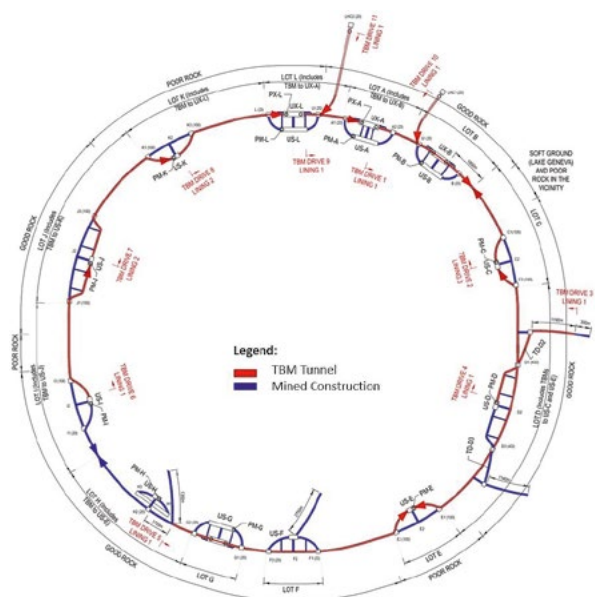
a pilot section of 10 km (sector L-A-B).

The works will start with the excavation of the shafts. For the most part, the shafts are located in the molasse rock. Shafts in molasse have historically been built more cost-effectively using drill and blast construction with a combination of shotcrete and rock bolts. A cast in situ lining is included in the design of FCC shafts. However, before

reaching the molasse, the first few metres will be excavated in the moraines and other supporting methods such as diaphragm walls or secant piles will be used in combination with additional water control measures. An alternative technology that has been explored is the use of vertical shaft sinking machines (VSM) (Fig. 10).

For the TBM excavations, different lining designs have been developed corresponding to “good” or “poor” conditions of the rock. Table 1 describes the type of ground and the recommended support methods. For TBM excavation in sectors with good conditions, a single-pass precast lining (30 cm thickness) has proved to be sufficient. For sectors in poor condition where there is a higher risk of water inflow, an optional second in situ cast lining can be adopted.

It is anticipated that tunnelling under Lake Geneva will pose some challenges. As the ground is expected to be water-bearing moraine, it is necessary to maintain a fully waterproof lining system. For the construction of the main tunnel between points B and C, a Mixshield TBM (Fig. 11) will



9 Construction strategy

Credit: CERN

Credit: CERN

Support class	Ground type	Material quality	Temporary support	Permanent support	Ground improvement
Good rock	Molasse, flysch and limestone	Fresh and massive rock with no to moderate jointing	Shotcrete and rock bolts	Relatively thin permanent concrete linings lightly reinforced with steel bars or steel fibre, or unreinforced	1% of length calculated as 30% of a 1 m annulus to account for fault and karst backfill
Poor rock	Molasse, flysch and limestone	Jointed and fractured rock	Highly reinforced shotcrete and rock bolts	Permanent concrete linings with medium steel bar reinforcement densities	10% of length calculated as 30% of a 2 m annulus for general ground mass improvement
Soft ground	Moraines and other quaternary and tertiary soils	Sand to clay with variable geotechnical conditions	Diaphragm walls for shafts and heavily reinforced shotcrete to form structural "shells"	Permanent concrete linings with high steel bar reinforcement densities	For shafts only 15 m grout curtains between rock and soft ground; for alcoves, 100% of length calculated as 30% of a 2 m annulus for ground mass improvement

Credit: ILF

Table 1 Ground type and support

be employed. The precast segmental lining is thicker (45 cm) as compared to other locations and has a higher reinforcement density (Table 2). Positioned at about 50 m under the lakebed, the tunnel will be subjected to a maximum water pressure of 10 bar. This will allow the use of commercially available EPDM gaskets, placed at all segment joints. More challenging conditions would be encountered during construction of the alcoves, due to the high risk of water inflows.

The exact construction sequence of the caverns will include benched excavations using a rock breaker and roadheader with the primary support being provided by rock bolts, cable bolts and layers of steel fibre concrete. The final lining will be in situ cast concrete [3].

4 Cost Estimates

The total costs for the civil engineering were estimated at CHF 6 billion at the feasibility stage [3]. For a lepton machine (FCC-ee), the civil engineering costs are lower (CHF 5.4 billion), as only two experimental points are required, which

means fewer shafts and caverns. These estimates resulted from a detailed cost and schedule study carried out by ILF in collaboration with the civil engineering team at CERN. The measure prices considered in the cost model include the direct costs (personnel, materials and equipment) and the indirect costs such as management and support personnel, erection, site preparation and dismantling of the equipment. At this stage, no costs have been included for land procurement and spoil deposits. The material and labour cost data has been derived from previous projects; equipment costs were taken directly from the BGL Construction Equipment Register and building costs were calculated in accordance with BKI Construction Costs [5]. These have been compared to the costs of HL-LHC (High-Luminosity LHC) and also indicated to be in the same range as other tunnelling projects in Europe.

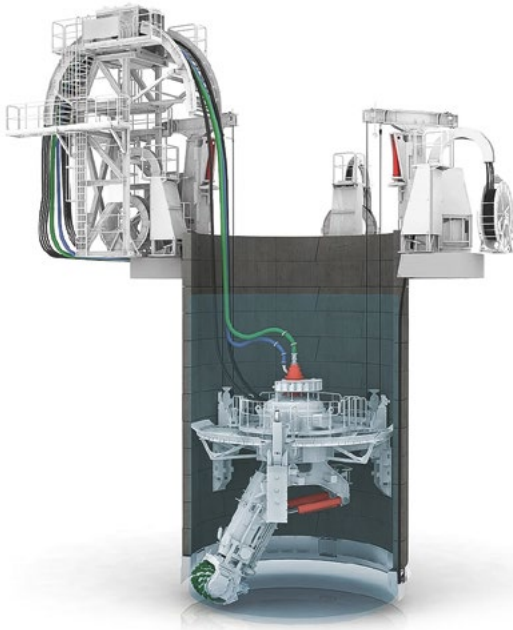
5 Conclusion

The conceptual design for the FCC underground infrastructure ensures compatibility for hosting the FCC-ee and FCC-hh consecutively. The geometry of the tunnel is strictly dic-

Parameter	TBM tunnel in "good" rock	TBM tunnel in "poor" rock	TBM tunnel in soft ground
Minimum internal diameter (m)	5.5	5.5	5.5
Characteristic compressive concrete strength for precast concrete, f_{ck} (MPa)	50	50	50
Precast concrete thickness (m)	0.3	0.3	0.45
Gasket segments	yes	yes	yes
Cast in situ concrete thickness (m)	none	0.25	0.25
Characteristic compressive concrete strength for in situ concrete, f_{ck} (MPa)	-	40	40
Reinforcement for in situ concrete	-	local reinforcement cages	local reinforcement cages
Total radial construction tolerance (m)	0.1	0.1	0.1
Excavation diameter (m)	6.3	6.8	7.1

Credit: ILF

Table 2 Conceptual lining for TBM tunnels



Credit: Herrenknecht

10 Vertical shaft sinking machine

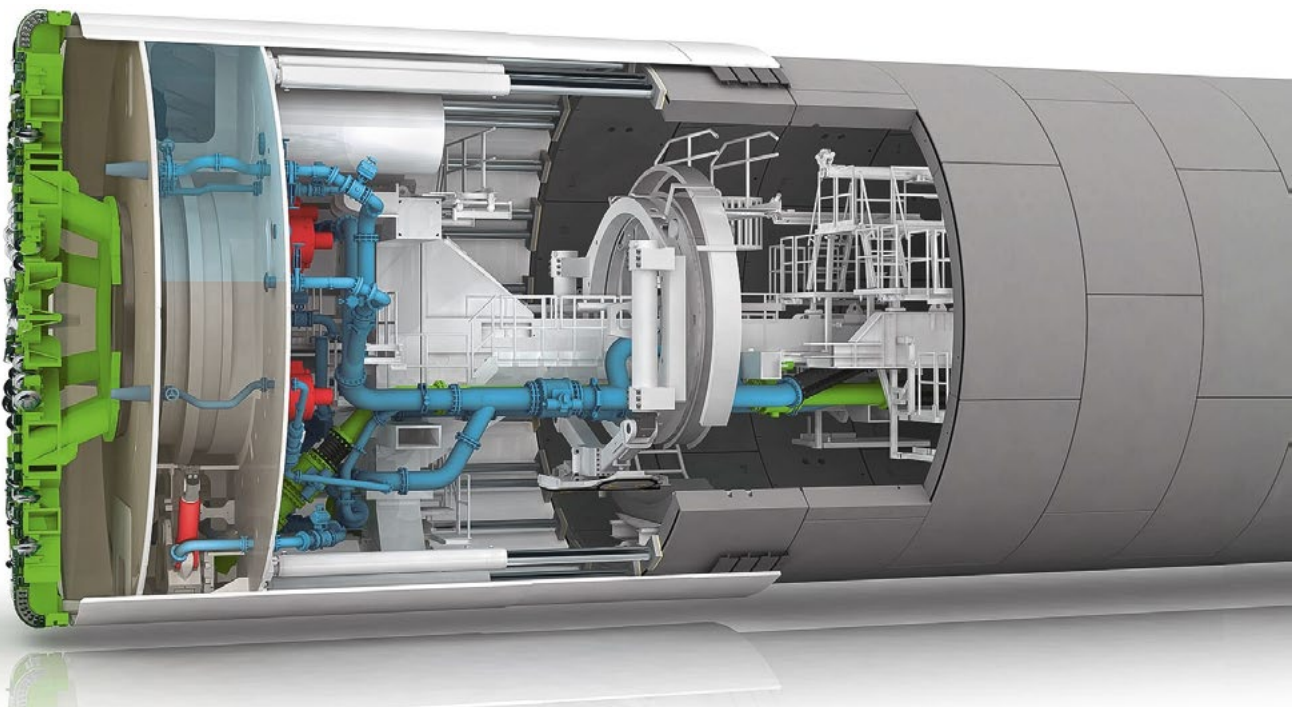
tated by defined parameters of the machine. The project has been set out at the optimum location to achieve the best connections to the existing CERN accelerator complex, within the most favourable ground conditions. Some degree of change is expected following the results from site investigations within the next design stages. Pre-construction preparations (e.g. planning for site investigations) have started, while waiting for an update from the European Strategy for Particle Physics in May 2020 “to guide the direction of the field to the mid 2020 s and beyond” [6].

References

- [1] CERN Press Release, The LEP Story. Available at: <https://home.cern/news/press-release/cern/lep-story>. Accessed 5 December 2019.
- [2] Schopper, H.: LEP – The Lord of the Colliders Rings at CERN 1980–2000. Geneva, 2009. Springer.
- [3] Benedikt, M., J. Gutleber, F. Zimmermann: Future Circular Collider Study. Volume 3: The Hadron Collider (FCC-hh) Conceptual Design Report. CERN accelerator report, CERN-ACC-2018-0058, Geneva, 2018.
- [4] Fern, E.J., et al.: Geotechnical characterisation of a weak sedimentary rock mass at CERN, Geneva. Tunnelling and Underground Space Technology. Geneva, 2018.
- [5] Cost and Schedule Study – Phase 3 Report. Prepared by ILF. EDMS 2050,504/1. CERN, Geneva, 2018.
- [6] ESPPU website, <https://europeanstrategyupdate.web.cern.ch/welcome>. Accessed on 5 December 2019.

PROJECT KEY DATA

Region	Client
CERN, Switzerland	CERN
Key data	
Construction period:	2029 – 2035
Start of operations:	Physics experiments planned to start in 2039
Length:	97.75 km
Tunnel inner diameter:	5.5 m
Civil engineering costs:	6 billion Swiss francs
Cost of main tunnel per m:	25,000 Swiss francs



Credit: Herrenknecht

11 Mixshield tunnel boring machine



Paris – Verlängerung der Métro-Linie 11 Rückblick und Ausblick

Alexander Heim, Dipl. Bauingenieur/Executive MBA HSG, Implenia France/FR

Paris – Verlängerung der Métro-Linie 11

Herausforderungen beim Bau eines hybriden Grossprojektes im Grossraum Paris

Die Verlängerung der bestehenden Pariser Métro-Linie 11 um sechs weitere Stationen stellt an Bauherr, Betreiber, Planer und Unternehmer vielfältige Anforderungen. Einschränkungen zur Reduktion der Auswirkungen auf die Umgebung limitieren die Auswahl von Bauverfahren, die Logistik und den Baubetrieb. Kernstück der Erweiterung sind der 3,3 km lange Doppelspurtunnel im EPB-Vortrieb und zwei bergmännisch zu erstellende Stationen.

Paris – Extension of Métro Line 11

Challenges During the Construction of a Major Hybrid Project in the Greater Paris Area

The extension of the existing Paris Métro line 11 to include six further stations presents multifaceted challenges for the client, operator, planner and contractor. Restrictions to reduce the effects on the surroundings limit the choice of construction methods, logistics and construction operations. The 3.3 km long twin-track tunnel in the EPB excavation and two stations to be built underground are the centrepiece of the extension.

1 Die Pariser Métro-Linie 11 im Wandel

1.1 Aktueller Betriebszustand der Linie 11

Die bereits im Jahre 1935 in Betrieb genommene Pariser Métro-Linie 11 verbindet das Pariser Zentrum mit dem nord-östlichen Stadtrand. Bereits im Jahre 1937 wurde die Linie um eine Station bis zur heutigen Endstation verlängert.

Der kommerzielle Betrieb erstreckt sich heute vom zentralen Knoten «Le Châtelet» im Pariser Zentrum bis zur Endstation «Mairie des Lilas» auf einer Länge von 6,6 km und bedient insgesamt 13 Stationen mit einem Aufkommen von ca. 120 000 Passagieren pro Tag. Das in Betrieb stehende Rollmaterial des Typs MP59 «Metro auf Reifen» wird in Viererkompositionen betrieben und im untertägigen Betriebswerk in Les Lilas unterhalten. Grössere Reparaturen müssen im externen Betriebswerk in Le Fontenay-sous-Bois vorgenommen werden.

1.2 Projekt Verlängerung der Linie 11

Das Projekt Verlängerung der Linie 11 sieht vor, das aktuelle Trasse um 6 km auf neu 12,2 km zu verlängern. Durch die Verlängerung und den Bau von sechs weiteren Stationen im Pariser Osten, auf dem Gebiet der Städte Les Lilas, Romainville, Noisy-le-Sec, Montreuil und Rosny-sous-Bois, werden zusätzlich 85 000 Einwohner an das Pariser Métro-System angeschlossen. Die erzielte Verkürzung der Reisezeit aus Rosny-sous-Bois ins Pariser Zentrum beträgt ca. 50%. Zusätzlich wird

1 Paris Métro Line 11 in Transition

1.1 Current Operating Status of Line 11

Paris's Métro line 11 was put into operation in 1935 and connects central Paris with the north-eastern suburbs. As early as 1937, the line was extended by a further station to the current terminus.

Today, the commercial operation covers a length of 6.6 km from the central hub "Le Châtelet" in the centre of Paris to the terminus "Mairie des Lilas", serves a total of 13 stations and is used by around 120,000 passengers per day. The MP59 "tyred Métro" rolling stock that is in operation is used in four-car configurations and is serviced in the underground depot in Les Lilas. More extensive repairs have to be carried out in the external depot in Le Fontenay-sous-Bois.

1.2 Project to Extend Line 11

The project to extend line 11 intends to extend the current route by 6 km to make it 12.2 km. As a result of the extension and the construction of six further stations in the east of Paris in the area of the towns Les Lilas, Romainville, Noisy-le-Sec, Montreuil and Rosny-sous-Bois, an additional 85,000 residents will be connected to the Paris Métro system. As a result, the travel time from Rosny-sous-Bois to central Paris will be reduced by roughly 50%. In addition, at the Rosny-Bois-Perrier station, the new line 11 will connect with the existing line E of the SNCF's RER train network.

Paris – Prolongement de la ligne 11 du métro

Défis liés à la réalisation d'un grand projet hybride dans le cadre du Grand Paris

La RATP a chargé, à l'été 2016, l'ARGE ALLIANCE (NGE, Demathieu Bard, Implenia, Pizzarotti) du lot principal GC01 du prolongement de la ligne 11. Implenia, en qualité d'expert technique, met à disposition les compétences nécessaires dans les domaines de la construction de tunnel et de la gestion de grands projets. La direction des travaux sur site est assurée par le groupement d'ingénieurs ARS (Artelia, Richez Architecte, Systra). En parallèle, des opérations complexes et de grande envergure sont menées dans les secteurs des travaux spéciaux en profondeur, du génie et de la construction de tunnel par avancement mécanique avec bouclier à pression de terre et en mode conventionnel avec un front de taille divisé. Les principaux travaux se déroulent de l'été 2016 à l'été 2021.

Parigi – prolungamento della linea metropolitana 11

Le sfide edili di un grande progetto ibrido nell'area metropolitana di Parigi

L'ente autonomo dei trasporti parigini (RATP), nell'estate del 2016, ha assegnato alla ARGE ALLIANCE (NGE, Demathieu Bard, Implenia, Pizzarotti) la commessa principale GC01 per il prolungamento dell'attuale linea 11. Implenia, con la sua esperienza tecnica, mette a disposizione le necessarie competenze nel settore della costruzione di gallerie e di gestione di grandi progetti. La direzione edile locale è curata dal gruppo ingegneristico ARS (Artelia, Richez Architecte, Systra). Sono svolti parallelamente interventi edili complessi nel settore della costruzione speciale sotto il livello del suolo, della costruzione ingegneristica e della costruzione di gallerie con avanzamento EPB meccanico e con procedimenti convenzionali con fronte di attacco diviso. L'esecuzione dei lavori principali è prevista per il periodo dall'estate del 2016 all'estate del 2021.

die neue Linie 11 am Bahnhof Rosny-Bois-Perrier an die bestehende Linie E des RER-Bahnnetzes der SNCF angebunden.

Durch die erwartete Erhöhung der Fahrgastzahlen um ca. 15 % wird zusätzlich die Anpassung und Modernisierung von zehn der 13 in Betrieb stehenden Stationen an aktuelle Regelwerke mit zusätzlichen Zugängen und Fluchtwegen für die Fahrgäste erforderlich. Das bestehende Rollmaterial wird durch neue Zugkompositionen mit fünf Wagen abgelöst. Die Wartung erfolgt zukünftig im neuen Betriebswerk der Linie 11 in Rosny-sous-Bois.

Das neu entstehende Trasse verläuft über 5400 m untertägig in einem Doppelspurtunnel. Die Tunnelabschnitte werden auf 3300 m Länge im Schildvortrieb, auf 150 m Länge in konventioneller Bauweise und auf 1900 m als Tagbautunnel in Schlitzwandbauweise erstellt.

600 m der Strecke zwischen den Stationen «La Dhuy» und «Rosny-Bois-Perrier» inklusive der Station «Landon Domus» verlaufen auf einem Brückenbauwerk.

Der vorliegende Beitrag behandelt den Leistungsumfang der Arbeitsgemeinschaft ALLIANCE für das Baulos GC01.

2 Das Baulos GC01 – hybrider Grossauftrag in urbanem Umfeld

Die internationale Arbeitsgemeinschaft ALLIANCE wird durch die beiden französischen Firmen NGE GC (Federführung) und Demathieu Bard (kaufmännische Leitung) sowie Implenia (CH und F) und Pizzarotti (IT) als technische Experten gebildet. Im Juni 2016 wurde die ARGE ALLIANCE mit der Erstellung von

Due to the expected increase in passenger numbers by approx. 15 %, it will also be necessary to alter and modernise ten of the 13 operational stations in line with current regulations with additional entrances and escape routes. The existing rolling stock will be replaced with new train configurations with five carriages. In future, maintenance will be carried out in the new depot for line 11 in Rosny-sous-Bois.

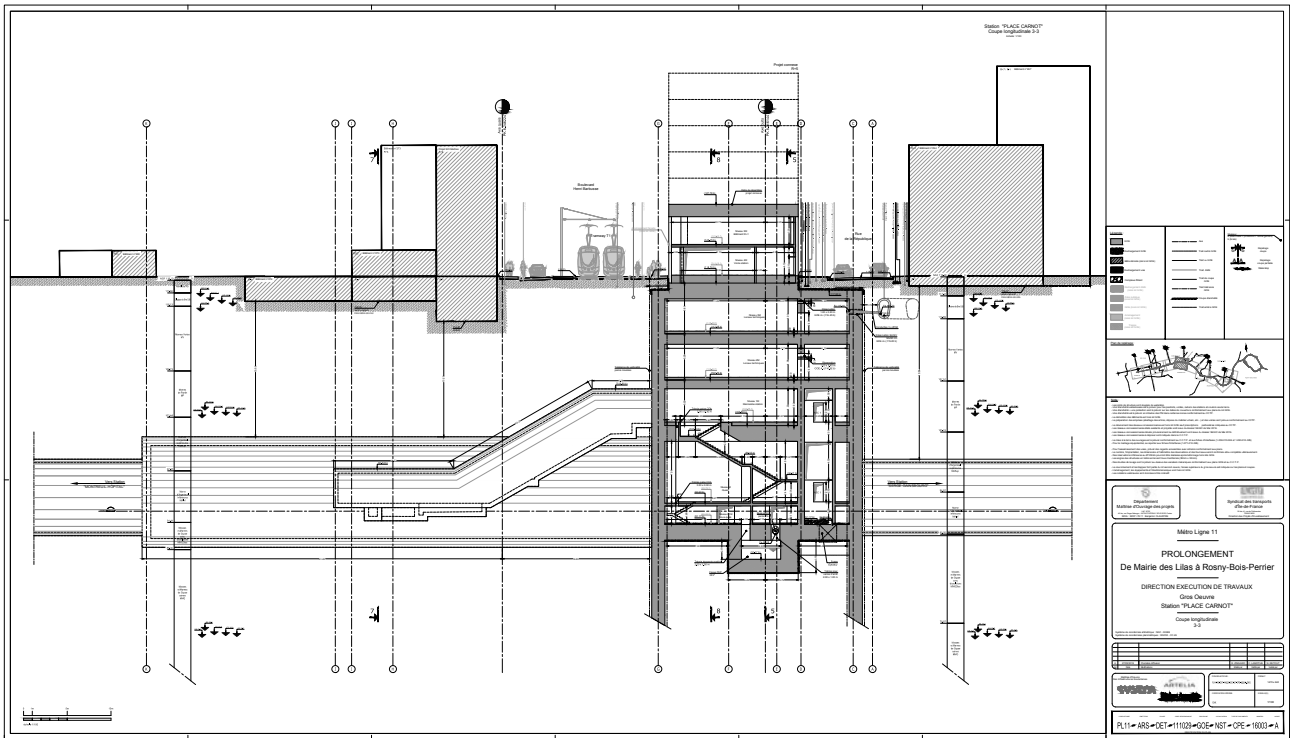
The newly created route will run for 5,400 m underground in a double-track tunnel. The tunnel sections will be constructed over 3,300 m with a shielded TBM, over 150 m with the conventional tunnelling method and over 1,900 m as cut-and-cover tunnel with diaphragm wall construction.

A total of 600 m of the route between the stations "La Dhuy" and "Rosny-Bois-Perrier", including the station "Landon Domus", will run on a bridge structure.

The present article deals with the scope of service for the joint venture ALLIANCE for construction lot GC01.

2 Construction Lot GC01 – Major Hybrid Contract in Urban Surroundings

The international joint venture ALLIANCE is made up of the two French companies NGE GC (lead management) and Demathieu Bard (commercial management) as well as Implenia (CH and F) and Pizzarotti (IT) as technical experts. In June 2016, the JV ALLIANCE was commissioned with the construction of a 3.3-km tunnel by the use of a shielded TBM, four metro stations, of which two will be constructed underground, as well as three rescue and ventilation shafts. All of



Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

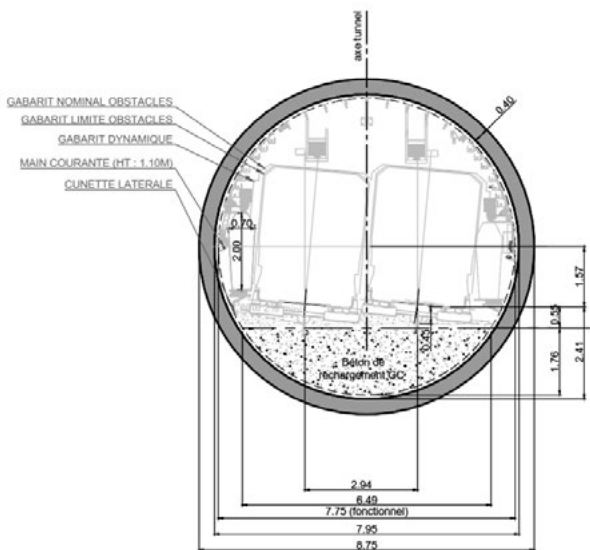
1 Situation Tunnel mit Bebauung, Beispiel Station «Carnot»
Tunnel situation with development, example of “Carnot” station

3,3 km Tunnel im Schildvortrieb, vier Métro-Stationen, davon zwei in bergmännischer Bauweise, sowie drei Rettungs- und Lüftungsschächten beauftrag. Sämtliche Bauwerke liegen in dicht besiedeltem Gebiet. Beschränkte Baustelleneinrich-

the structures are in densely populated areas. Limited site installation areas, the direct proximity to existing structures and extensive road closures that will be required complicate the selection of construction methods and the construction operations.

COUPE TYPE TUNNEL

Echelle: 1/100
Rayon = 250m devers = 135mm
Diamètre intérieur: 7.75m sans tolérance de construction
7.95m avec tolérance de construction
Pose béton - traverse béton



Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

2 Plan Querschnitt Tunnel
Tunnel cross section plan

2.1 Scope of Service for Construction Lot GC01 for JV ALLIANCE

The scope of service for construction lot GC01 includes the following structural work:

- Construction of a 3.3 km single-shell double-track tunnel with segment lining
- EPB shield driving $D_a = \varnothing 9,120$ mm, segment thickness $d = 400$ mm, system 6 + 1, segment lengths: $L = 1,500$ mm and $L = 1,800$ mm, minimum curve radius $R_{min.} = 250$ m
- Construction of two Métro stations in underground construction from access shafts to be prepared in diaphragm wall construction
- Construction of two Métro stations in cover construction with diaphragm walls
- Construction of 140 m cut-and-cover tunnel with diaphragm wall construction
- Subsoil improvement via systematic filler injections to reduce potential bentonite losses in the area of the “Masses et Marnes du Gypse” gypsum formations
- Excavation pit shoring with tangent bored pile walls to create the main entrances to the stations “Hôpital” and “Serge Gainsbourg”
- Micropiles in the portal area and in the interface between the tunnel and bridge structure

Paris – Extension of Métro Line 11 •

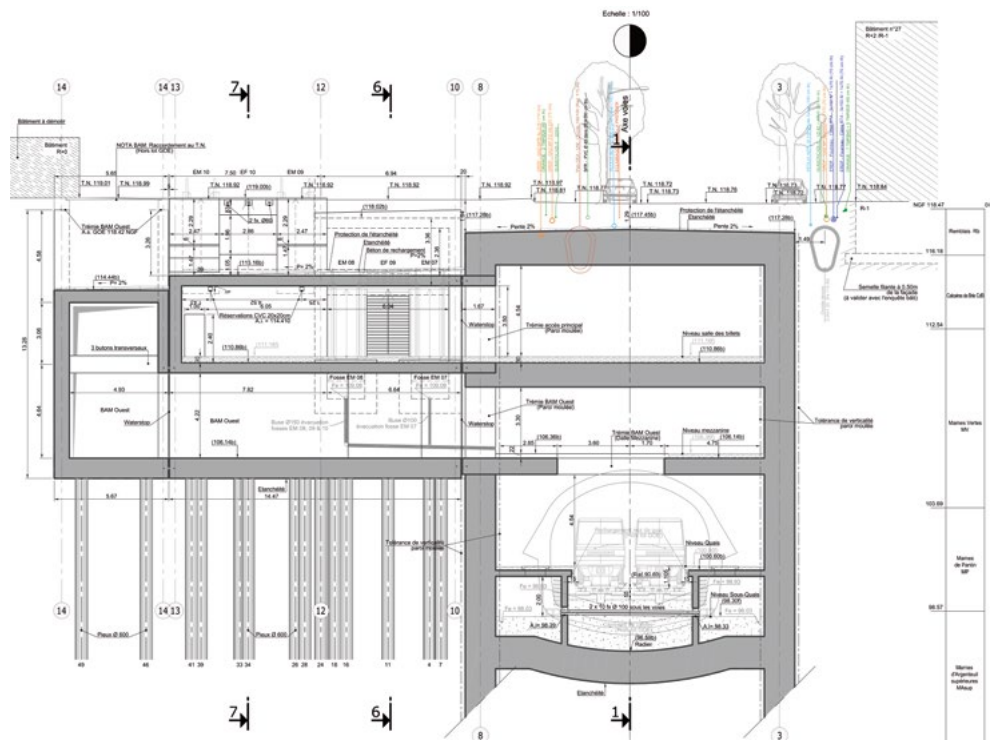
Challenges During the Construction of a Major Hybrid Project in the Greater Paris Area

tungsflächen, die unmittelbare Nähe zu bestehenden Bauwerken und umfangreiche erforderliche Strassensperrungen erschweren den Baubetrieb und die Auswahl der Bauverfahren.

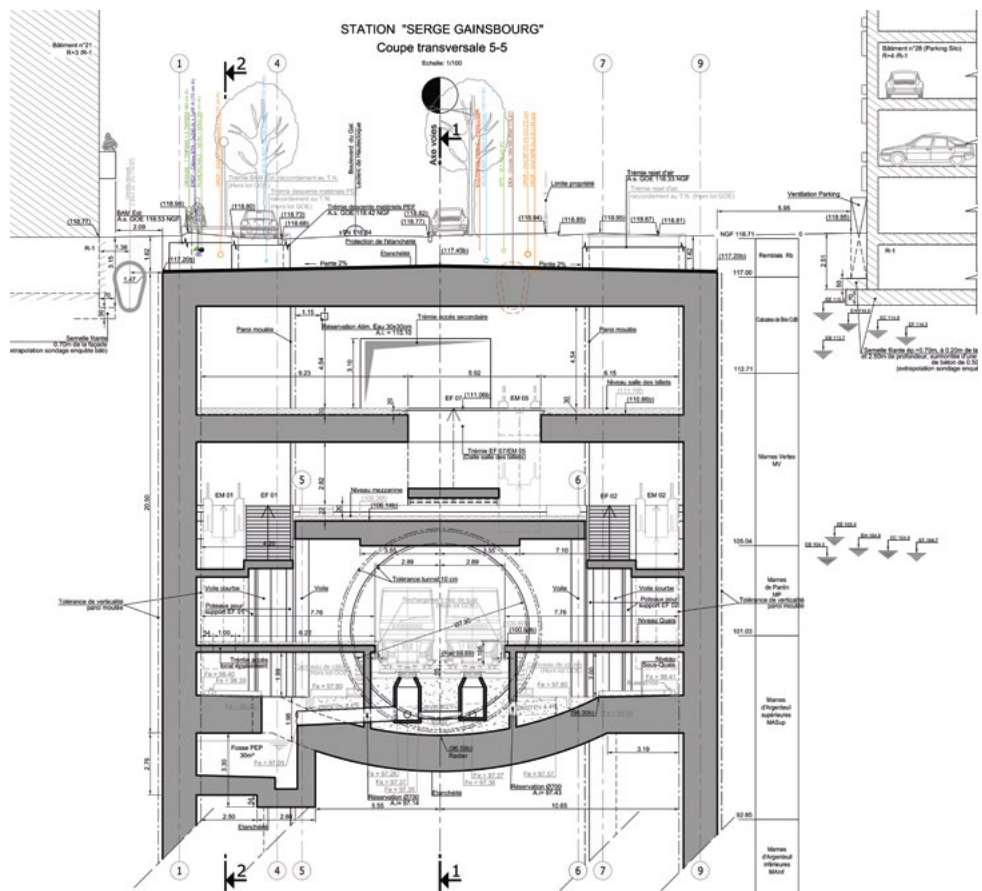
2.1 Leistungsumfang des Bauloses GC01 der ARGE ALLIANCE

Der Leistungsumfang des Bauloses GC 01 umfasst folgende Bauwerke:

- Erstellung von 3,3 km einschaligen Doppelspurtunnels mit Tübbingausbau, EPB-Schildvortrieb $D_a = 9120$ mm, Tübbingstärke $d = 400$ mm, System 6 + 1, Tübinglängen: $L = 1,500$ mm und $L = 1,800$ mm, minimaler Kurvenradius $R_{min} = 250$ m
- Erstellung von zwei Métro-Stationen in bergmännischer Bauweise aus in Schlitzwandbauweise zu erstellenden Startschächten
- Erstellung von zwei Métro-Stationen in Deckelbauweise mit Schlitzwänden
- Erstellung von 140 m Tagbautunnel in Schlitzwandbauweise
- Baugrundverbesserung durch systematische Füllinjektionen zur Reduzierung von potenziellen Bentonitverlusten im Bereich der Gipsformationen «Masses Marnes et Gypses»
- Baugrubenverbau mit tangierenden Bohrpfehlwänden zur Erstellung der Hauptzugänge der Stationen «Hôpital» und «Serge Gainsbourg»
- Mikropfähle im Portalbereich und in der Schnittstelle zwischen Tunnel und Brückenbauwerk



3 Querschnitte Stationen Tradi
Cross sections, stations Tradi



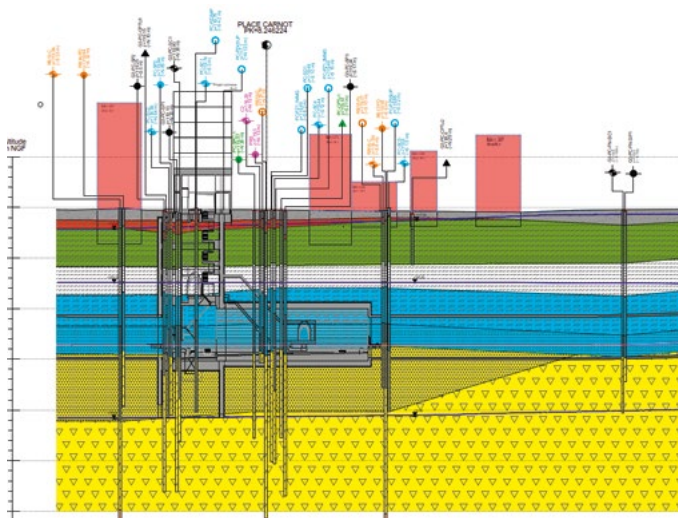
4 Stationen top-down, Beispiel Station «Serge Gainsbourg»
Stations top-down, example of "Serge Gainsbourg" station

Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

Paris – Verlängerung der Métro-Linie 11 •

Herausforderungen beim Bau eines hybriden Grossprojektes im Grossraum Paris



5 Geologischer Längsschnitt Tunnel im Bereich der Station «Carnot»
Geological longitudinal section of the tunnel in the area of "Carnot" station

LEGENDE STRATIGRAPHIQUE

	Remblais
	Colluvions
	Calcaire de Brie
	Argiles vertes
	Marnes de Pantin
	Marnes d'Argenteuil supérieures
	Marnes d'Argenteuil inférieures
	Masses et Marnes du Gypse altérées / avec dissolution
	Masses et Marnes du Gypse
	Sables de Monceau
	Calcaires de Saint-Ouen
	Les niveaux de nappe présentés correspondent au niveau EB

2.2 The Construction of the Double-Track Tunnel Using an EPB TBM

2.2.1 Routing and Geological Profile of the TBM Excavation

The tunnel route is entirely in a densely populated area between the stations to be newly constructed, namely "La Dhuis" in the city of Rosny-sous-Bois and "Serge Gainsbourg" in the area of Les Lilas. The double-track tunnel to be constructed over a length of 3.3 km will be excavated with an EPB shield machine $\varnothing 9,120$ mm.

Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

2.2 Die Erstellung des Doppelspurtunnels mithilfe einer EPB-TVM

2.2.1 Streckenführung und geologisches Profil des TVM-Vortriebs

Die Tunnelstrecke liegt vollständig in dicht besiedeltem Gebiet zwischen den neu zu erstellenden Stationen «La Dhuis» im Stadtgebiet von Rosny-sous-Bois und der Station «Serge Gainsbourg» auf dem Gebiet von Les Lilas. Der auf 3,3 km zu erstellende Doppelspurtunnel wird mit einer EPB-Schildmaschine $\varnothing 9120$ mm aufgeföhren.

Hauptsächlich folgt der Tunnel den Mergelformationen «Marnes de Pantin» und «Marnes d'Argenteuils» mit einer Überlagerung von ca. 20 m. Aufgrund der geringen Permeabilität der durchhörten Schichten ist mit wenig Grundwasserandrang zu rechnen.

2.2.2 Montage der TVM im Startschacht und Anfahr-situation in der Station «La Dhuis»

Der zur Montage der TVM erforderliche Startschacht mit einem Durchmesser von 32 m liegt in unmittelbarer Nähe

The tunnel will mainly follow the marl formations "Marnes de Pantin" and "Marnes d'Argenteuils" with an overlap of approx. 20 m. Due to the low permeability of the strata crossed, little groundwater inrush is expected.

2.2.2 Assembly of the TBM in the Access Shaft and Entry Situation in the "La Dhuis" Station

The access shaft required for the assembly of the TBM with a diameter of 32 m is in the immediate vicinity of an 18-storey high-rise building. Access with abnormal loads is extremely



Quelle/credit: Implenia France SA

6 Startschacht/Montage TVM
Starting shaft/assembly TVM



Quelle/credit: Implenia France SA

7 Anfahrkaverne Station La Dhuis, Stirnwand mit Anfahr-dichtung
Launching Chamber Station La Dhuis, Starting Sealing in Front Face

eines 18-stöckigen Hochhauses. Die Zufahrt mit Sondertransporten gestaltet sich aufgrund der in Hanglage befindlichen Einrichtungsfläche äusserst schwierig. Die Anfahrt der TVM erfolgt aus der bereits in bergmännischer Bauweise erstellten, an den Startschacht anschliessenden Station mit reduziertem Nachläufer. Die Anfahrtdichtung wurde im Zuge des konventionellen Vortriebs im Kalotte-Strosse-Verfahren zweiteilig in die mit Spritzbeton und Glasfaseranker gesicherte Ortsbrust eingebaut. Die in der Kaverne zur Anfahrt der TVM benötigte Rückstifekonstruktion musste aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse an die Kavernengeometrie angepasst und mit einem eigens dafür konzipierten Portalkran eingebaut werden. Die Anfahrt der TVM erfolgte im Januar 2020 in drei Etappen, um den anfänglich reduzierten Nachläufer schrittweise zu komplettieren. Der geplante 14-monatige Regelvortrieb erfolgt ab Februar 2020.

Auf dem ersten Streckenabschnitt von ca. 1000 m zwischen den Stationen «La Dhuy» und «Hôpital» ist ein Kurvenradius von $r = 250$ m aufzufahren sowie auf ca. 150 m potenziell quellfähige Tone der Formation «Argiles Vertes» zu durchörtern.

Der anschliessende Vershub der TVM durch die in Deckelbauweise erstellte, 86 m lange Station «Hôpital» erfolgt nach vollständigem Aushub und Einbau der definitiven Sohle mit vorfabrizierten Sohlübblingen unter Einsatz der Vorschubzylinder der TVM.

Der zweite Streckenabschnitt von der Station «Hôpital» zur vorgängig bergmännisch erstellten Station «Carnot» folgt auf ca. 1200 m grösstenteils in ca. 20 m Tiefe dem öffentlichen Strassennetz und unterquert dabei die achtspurig ausgebaute Autobahn A3, die Paris von Porte de Bagnolet mit dem Grossflughafen Charles de Gaulle verbindet. Die Unterquerung des Tagbautunnels der Autobahn A3 mit einer Überlagerung von 9,6 m stellt eine der Schlüsselstellen des TVM-Vortriebs dar.

Die Einfahrt in die bereits erstellte Kaverne der Station «Carnot» ist aufgrund der günstigen geologischen und hydrogeologischen Voraussetzungen ohne besondere Hilfskonstruktionen geplant. Die Durchfahrt erfolgt wieder mithilfe vorfabrizierter Sohlübblinge.



Quelle/credit: Implenia France SA

8 Startschacht, Montage Rückstife mit selbst entwickeltem Hebegerät
Starting Shaft, Assembly of Thrust Frame with special developed lifting device

complicated due to the set-up area being on a slope. The approach of the TBM took place from the station that was already constructed underground, which connects to the access shaft, with reduced back-up. The starter seal was installed in two parts into the face, secured with shotcrete and fibreglass rock bolts during the conventional tunnelling excavation in the top-heading-bench procedure. The thrust frame construction required in the cavern for the approach of the TBM needed to be adjusted to the cavern geometry due to the restricted space available and was installed with a specially designed gantry crane. The approach of the TBM took place in January 2020 in three stages in order to complete the initially reduced back-up in steps. The planned 14-month regular driving process will take place starting in February 2020.

On the first section of approximately 1,000 m between the “La Dhuy” and “Hôpital” stations, it is necessary to drive a curve radius of $r = 250$ m and to cross approximately 150 m of potentially swellable clays in the “Argiles Vertes” formation.

The subsequent shunting of the TBM through the 86-metre-long “Hôpital” station, which has been created in cover construction, will take place following the complete excavation and installation of the definitive invert with prefabricated invert segments using the shifting cylinder of the TBM.



Quelle/credit: Google Street View

9 Autobahn A3 mit zu unterfahrendem Tagbautunnel und Verkehrssituation
A3 motorway with cut-and-cover tunnel to be undercut and traffic situation



Quelle/credit: Google Street View



Quelle/credit: Implemia France SA

10 Station «Serge Gainsbourg» mit Deckel und Hauptöffnung zur Demontage der TVM
 “Serge Gainsbourg” station with cover and main opening for dismantling of the TBM

Die Anfahrt in der Station «Carnot» in unmittelbarer Nähe zu als sehr sensibel klassierten Gebäuden erfordert zur Einhaltung des Setzungsgrenzwertes von 10 mm die Anfahrt unter 180 kPa Stützdruck.

Der Vortrieb des letzten Streckenabschnitts zwischen den Stationen «Carnot» und «Serge Gainsbourg» folgt der Avenue de Verdun und endet mit der Einfahrt in der bereits mit Schlitzwänden in Deckelbauweise erstellten Station. Die Demontage der TVM und des Nachläufers wird durch die Begrenzung der Hauptöffnung im Deckel auf 12 × 20 m, die Nähe der bestehenden Bausubstanz sowie die sehr schwierigen Zufahrten zur Baustelle mit Schwertransporten deutlich erschwert.

2.3 Die Erstellung der Stationen «La Dhuis» und «Carnot» in konventioneller Bauweise

2.3.1 Geografischer und geotechnischer Kontext

Aufgrund der nicht ausreichend vorhandenen Flächen sind die Stationen «La Dhuis» und «Carnot» in konventionellem Vortrieb zu erstellen. Beide Stationen werden aus vorgängig in Schlitzwandbauweise erstellten Startschächten aufgeföhren. Die Erschliessung des Vortriebs «La Dhuis» erfolgte über einen oben offenen Schacht mit 32 m Durchmesser. Der Vortrieb «Carnot» wird über den in Deckelbauweise erstellten Startschacht und dessen Deckenaussparungen erschlossen. Parallel zum Vortrieb erfolgt der Innenausbau im Startschacht.

Beide Stationen liegen mit 20–25 m Überlagerung unter bebauten Parzellen in den geologischen Formationen «Marnes de Pantin» und «Marnes d’Argenteuils» und konnten ohne Bergwasserandrang aufgeföhren werden.

Die geotechnischen Voraussetzungen in den stark tonhaltigen Formationen «Argiles Vertes» und «Marnes de Pantin» wurden allgemein als äusserst ungünstig mit Blick auf die technische Machbarkeit sowie ihre Auswirkungen auf Bauzeit und Kosten eingeschätzt.



Quelle/credit: Implemia France SA

11 Station «Hôpital», Erstellung Schlitzwände
 “Hôpital” station, preparation of diaphragm walls

The second section from the “Hôpital” station to the “Carnot” station previously created underground will follow over approximately 1,200 m largely at a depth of 20 m under the public road network, and will cross the eight-lane expanded A3 motorway which connects Paris from Porte de Bagnolet to Charles de Gaulle airport. The crossing of the cut-and-cover tunnel with the A3 motorway with an overlap of 9.6 m is one of the key points of the TBM excavation.

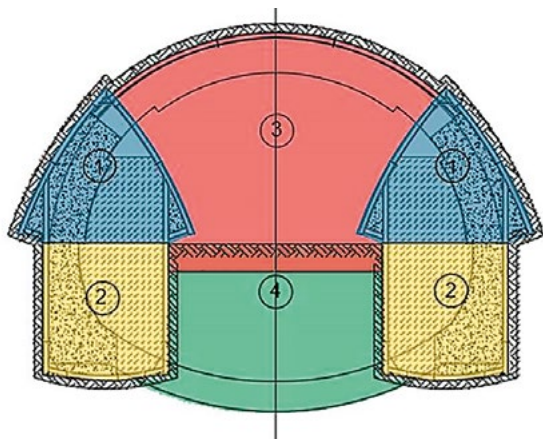
The entry into the cavern already created for the “Carnot” station is planned to be carried out without special supporting structures due to the favourable geological and hydrogeological conditions. Again, the passage will take place using prefabricated invert segments.

The approach to “Carnot” station in the immediate vicinity of buildings classed as very sensitive requires an approach under 180 kPa support pressure in order to comply with the settlement limit value of 10 mm.

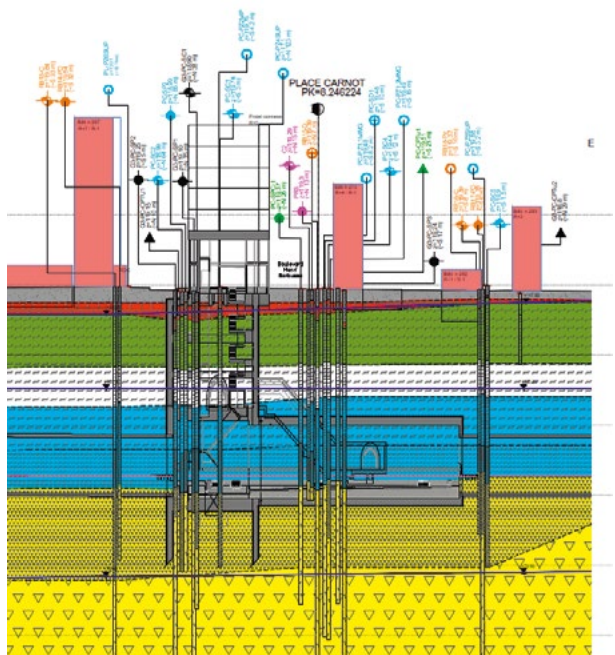
2.3.2 Auswahl des Vortriebsverfahrens und Setzungsgrenzwerte

Aufgrund der vorgegebenen Setzungsgrenzwerte von 25 mm wurde bereits in einem frühen Projektstadium das Vortriebsverfahren mit geteilter Ortsbrust vorgegeben. Mehrere Varianten mit variablen Querschnitten und Geometrien der Ulmenstollen wurden zu Beginn der Ausführungsplanung modelliert, um die in Bezug auf zu erwartende Setzungen optimierten Querschnittsformen zu prüfen.

Im Sinne der vertraglich vorgesehenen Optimierungen wurde gemeinsam mit Bauherrschaft und Bauleitung die Umsetzung eines Vortriebskonzepts unter erschwerten Bedingungen mit reduzierten Querschnitten und schwerem Stahlbau favorisiert, um die im Projektkonzept vorgesehenen Hebungsinjektionen zu vermeiden. Das ausgewählte Vortriebsverfahren wird im Folgenden dargestellt:



12 Unterteilung des Kavernenquerschnitts und Bauphasen
Division of the cavern cross section and construction phases



13 Geologischer Längsschnitt Station «Carnot»
Geological longitudinal section, "Carnot" station

The excavation of the last section between the "Carnot" and "Serge Gainsbourg" stations will follow Avenue de Verdun and end with entry into the station that has already been created with diaphragm walls in cover construction. The dismantling of the TBM and the back-up will be impeded considerably due to the limitation of the main opening in the cover to 12 × 20 m, the proximity to existing structures as well as the very complex access to the construction site with heavy loads.

2.3 Construction of the "La Dhuis" and "Carnot" Stations with Conventional Tunneling Construction

2.3.1 Geographic and Geotechnical Context

Due to the insufficient area available, the "La Dhuis" and "Carnot" stations must be prepared using the conventional tunnelling method. Both stations are excavated from access shafts first created with a diaphragm wall construction. The access for the "La Dhuis" excavation took place via an open-top shaft of 32 m in diameter. The "Carnot" excavation will be accessed via the access shaft created in cover construction and its cover cut-outs. The inner lining in the access shaft will take place in parallel to the excavation.

Both stations are situated with 20 to 25 m overlap under developed plots in the geological formations "Marnes de Pantin" and "Marnes d'Argenteuils" and were able to be excavated without groundwater inrush.

The geotechnical requirements in the very clayey formations "Argiles Vertes" and "Marnes de Pantin" were generally assessed as extremely unfavourable in terms of the technical feasibility as well as their effects on construction time and costs.

2.3.2 Selection of the Excavation Method and Settlement Limit Values

Due to the specified settlement limit values of 25 mm, the excavation method with split face had already been stipulated in an earlier project stage. Several variants with variable cross sections and geometries of the side galleries were modelled at the start of the design phase in order to check that the cross section shapes were optimised in terms of the settlement to be expected.

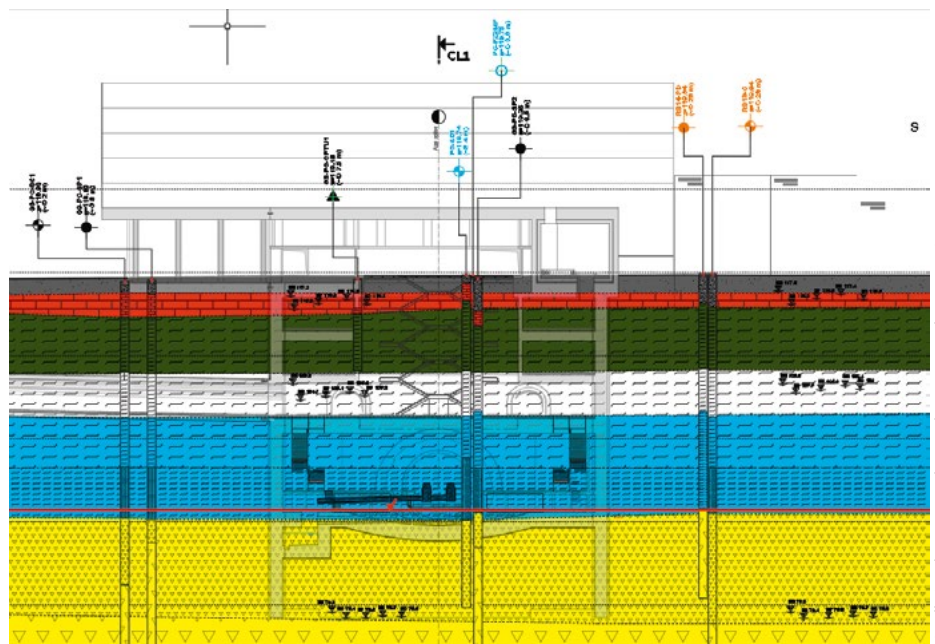
In terms of the optimisations intended under the contract, together with the client and site management, the implementation of an excavation concept under complicated conditions with reduced cross sections and heavy steel lining was favoured in order to avoid the excavation injections intended in the project concept. The selected excavation method is shown below:

- Phase 1: Side galleries in the top-heading area, expansion HEB 180, round length 80 cm, shotcrete protection with PP fibre and GRP rock bolt including face
- Phase 2: Side galleries in the invert area, expansion HEB 180, round length 80 cm, shotcrete protection with PP fibre and GRP rock bolt without face, waterproofing

Quelle/credit: Implenia France SA

Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

LEGENDE STRATIGRAPHIQUE



Quelle/credit: Auszug Plan Werkvertrag, Bauleitung ARS

14 Geologischer Querschnitt Station «Carnot»
Geological cross section "Carnot" station

- Phase 1: Ulmenstollen im Kalottenbereich, Ausbau HEB 180, Abschlagslänge 80 cm, Spritzbetonsicherung mit PP-Faser und GFK-Anker inklusive Ortsbrust
- Phase 2: Ulmenstollen im Sohlbereich, Ausbau HEB 180, Abschlagslänge 80 cm, Spritzbetonsicherung mit PP-Faser und GFK-Anker ohne Ortsbrust, Abdichtung und Gewölbe-füsse mit SCC-Beton, Armierungsgrad ca. 180 kg/m³, Blocklänge 7,2 m
- Phase 3: Kalottenvortrieb mit nachlaufendem Einbau des Kalottengewölbes, Sicherung mit HEB 200, GFK-Anker in der Abwicklung und Ortsbrust, Erstellung des Gewölbebetons mit SCC-Beton, Blocklänge 2,4 m
- Phase 4: Strossenvortrieb, nachlaufend zum Gewölbebeton
- Phase 5: Sohlvortrieb
- Phase 6: Einbau Sohlbeton und Ringschluss

2.3.3 Setzungsprognosen, Festlegung der Sicherungsmittel und «méthode observationelle»

Sämtliche Vortriebsphasen wurden im Hinblick auf die Setzungsverteilung an der Oberfläche mithilfe der Software Plaxis 3d modelliert, um die Einhaltung der Setzungsgrenzwerte der betroffenen Gebäude zu prognostizieren. Anhand der Modellierung der einzelnen Vortriebsphasen konnten die Sicherungsmittel räumlich gezielt und optimiert eingesetzt werden. Dies erfolgte u.a. in Abhängigkeit von der bestehenden Bebauung sowie gezielt an komplexen Geometrien wie zum Beispiel der Verschneidung der Zugangsstollen mit der Hauptkaverne.

Gezielt angeordnete Messquerschnitte erlaubten die Reduktion der Sicherungsmittel und somit die Optimierung in Bezug auf Bauzeit und Baukosten. Die Anwendung der «méthode observationelle» und vorgängig mit allen Projektbeteiligten abgestimmte Ausbautypen erlaubten während der Vortriebsphase die erforderliche schnelle Anpassung.



Quelle/credit: Implemia France SA

15 Station «La Dhuy», paralleler Strossenvortrieb mit Gewölbebeton
"La Dhuy" station, parallel slope excavation with vault concrete

- system and kicker with SCC concrete, level of reinforcement approx. 180 kg/m³, block length 7.2 m
- Phase 3: Crown heading with subsequent installation of the top-heading vault, protection with HEB 200, GRP rock bolt in the execution and face, preparation of the vault concrete with SCC concrete, block length 2.4 m
- Phase 4: Stope excavation, subsequent to the vault concrete
- Phase 5: Invert excavation
- Phase 6: Installation of invert concrete and ring closure

2.3.3 Settlement Prognoses, Stipulation of the Supporting Agents and "méthode observationelle"

All excavation phases were modelled in terms of the settlement distribution on the surface using the Plaxis 3d software in order to forecast the compliance with the settlement limit values for the buildings affected. Using the modelling of the individual excavation phases, it was possible to insert the supporting agents in targeted and optimised locations. This was carried out, among other things, depending on the



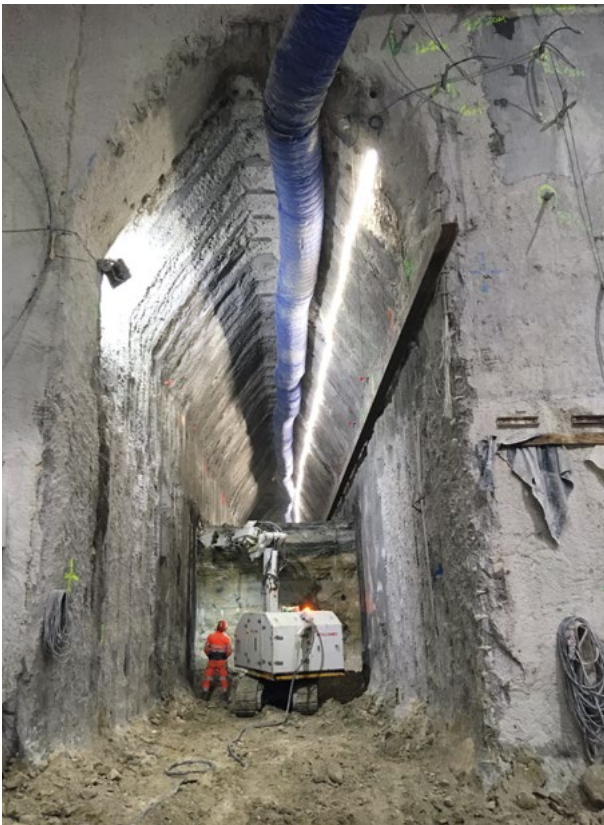
Quelle/credit: Implenia France SA

16 Vortrieb «Culée haute»
"Culée haute" excavation



Quelle/credit: Implenia France SA

17 Profilkontrolle
Profile check



Quelle/credit: Implenia France SA

18 Vortrieb «Culée basse»
"Culée basse" excavation

existing development and targeted at complex geometries, such as the intersection of the access tunnel with the main cavern.

Measuring cross sections arranged in a targeted manner allowed for the reduction of the supporting agents and therefore for optimisation in terms of construction time and construction costs. The use of the «méthode observationnelle» and construction types agreed on by all project participants in advance enabled the quick adjustment required during the excavation phase.

2.3.4 Successful Risk Management During Construction

The "La Dhuis" and "Carnot" stations were built one after the other. This staggering allowed for an extensive exchange of experiences both in terms of the numerical modelling of the settlements and in terms of the performance of the work. Even during the initial phase of the construction of "La Dhuis" station, during the monthly risk management meetings between the contractor and site supervision, detailed analyses were carried out to optimise the process of construction in terms of cost, time and settlement progression. Targeted variations of the radial rock bolts intended to improve the subsoil parameters in the form of soil nailing only resulted in minor changes in the settlement progression. Soil nailing was therefore subsequently only used in geometric intersection areas and in the direct area of influence under existing buildings.

2.3.4 Erfolgreiches baubegleitendes Riskmanagement

Die Stationen «La Dhuis» und «Carnot» wurden nacheinander ausgeführt. Diese Staffelung ermöglichte sowohl im Bereich der numerischen Modellierung der Setzungen als auch in der Ausführung der Arbeiten einen umfangreichen Erfahrungsaustausch. Bereits in der Startphase der Ausführung der Station «La Dhuis» wurden im Zuge der monatlich abgehaltenen Riskmanagement-Sitzungen zwischen Unternehmung und örtlicher Bauleitung detaillierte Analysen zur Optimierung des Bauablaufs in Bezug auf Kosten, Bauzeit und Setzungsentwicklung durchgeführt. Gezielte Variationen der zur Verbesserung der Baugrundkennwerte im Sinne einer Bodenvernagelung vorgesehenen radialen Anker zeigten nur unwesentliche Veränderungen in der Setzungsentwicklung. Die Bodenvernagelung wurde daher in der Folge nur noch in geometrischen Verschneidungsbereichen und im direkten Einflussbereich unter bestehenden Gebäuden eingesetzt.

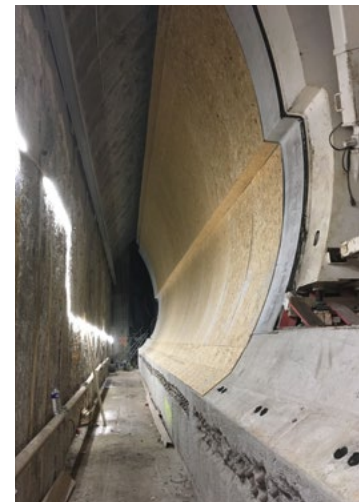
Ähnliche Erfahrungen ergaben sich im Kalottenvortrieb mit nachlaufender Gewölbeshalung. Die vorgesehene Blockierung des Ausbaus durch den Einbau des Kalottengewölbes auf die vorgängig erstellten Paramente zeigte nur wenig Einfluss auf die Setzungsentwicklung. Der zur vollen Aufnahme des Gebirgsdrucks dimensionierte Ausbau mit HEB 200 und 20 cm dicker Spritzbetonschale, welcher direkt auf die betonierte Gewölbefüsse abgesetzt wurde, blockierte das System bereits ausreichend. Demzufolge konnte der Abstand zwischen Ortsbrust und Ringschluss des Innengewölbes auf über 12 m vergrössert werden, um eine Entflechtung und Rationalisierung des Bauablaufs herbeizuführen.

Als nachteilig im Sinne der Setzungsentwicklung zeigten sich die sehr klein gewählten Ausbruchquerschnitte im Umlenkvortrieb und der Achsabstand der HEB-160-Ausbaubogen von nur 80 cm. Die ursprünglich gewünschte Reduzierung der Setzungen mit möglichst kleinen Querschnitten und steifem Ausbau konnte in der Ausführung nur schwer realisiert werden. Die kraftschlüssige Verfüllung und Bettung der HEB-Bogen war aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse sehr aufwendig. Im Bereich des Kalottenvortriebs der Station «La Dhuis» wurden daraufhin zur Herstellung einer schnellen kraftschlüssigen Bettung zwischen Spritzbetonversiegelung und HEB-Bogen erfolgreich Bullflexschläuche eingesetzt.

Im Nachhinein betrachtet, wurde der erwartete Vorteil der reduzierten Querschnitte in der Ausführungsphase durch den erschwerten Einbau der Sicherungsmittel wieder gemindert. Die in der Startphase sehr numerisch geprägten Analysen zur Querschnittsoptimierung hätten zusätzlich in Hinblick auf deren Sensibilität in Bezug auf Querschnittsbreite und Bogenabstand bewertet werden sollen. Vermutlich hätten ein auf 1 m vergrösserter Bogenabstand und wenige Dezimeter zusätzliche Querschnittsbreite zu deutlichen Verbesserungen im Bauablauf und zu einem verbesserten Einbau der Sicherungsmittel geführt, und zwar ohne grosse zusätzliche Setzungen.

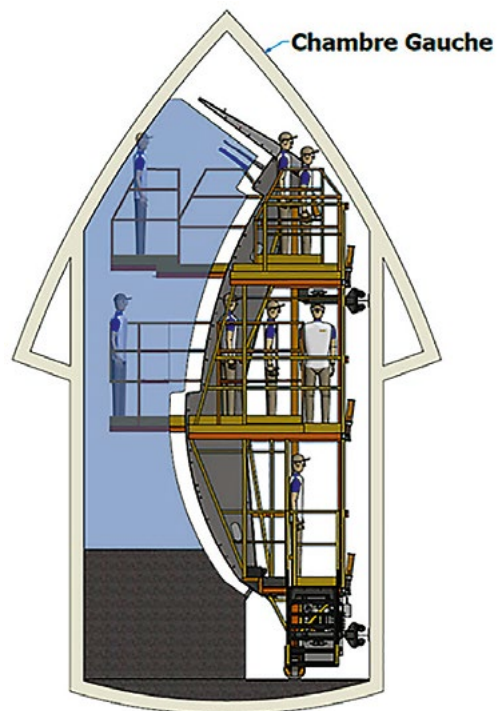
Similar experiences occurred in the crown heading with subsequent vault formwork. The intended blockage of the expansion by installing the top-heading vault on the previously prepared side walls had only a minor influence on the settlement progression. The expansion dimensioned to fully absorb the ground pressure with HEB 200 and a 20 cm thick shotcrete lining, which was deposited directly on the concreted kicker, already sufficiently blocked the system. Consequently, the distance between the face and ring closure of the inner vault lining could be enlarged to over 12 m in order to bring about a separation and rationalisation of the construction process.

The very small excavation cross sections in the tunnel side wall excavation and the axial spacing of the HEB-160 support arches of just 80 cm proved to be disadvantageous in terms of settlement progression. The originally desired reduction of settlement with cross sections that were as small as possible and rigid support was difficult to achieve during construction.



Quelle/credit: Implenia France SA

19 Einbau Gewölbeparament
Installation of vault side wall



Quelle/credit: Implenia France SA

20 Schalungsprinzip Paramentbeton
Formwork principle, tunnel side concrete

Als Erfolgsfaktor darf sicherlich der enge, zeitnahe, unkomplizierte und fachlich fundierte Erfahrungsaustausch zwischen Unternehmung und Bauleitung im Laufe der Vortriebsarbeiten bezeichnet werden. Die vorgängig definierten und statisch nachgewiesenen Sicherungstypen konnten erfolgreich baubegleitend den vorgefundenen Verhältnissen angepasst werden. Sämtliche Anpassungen konnten anhand der vorgängig berechneten Szenarien abgebildet werden. In monatlichen Risikomanagement-Sitzungen wurden die getroffenen Massnahmen und weitere erforderliche Anpassungen formal abgehandelt. Zusätzliche Sitzungen, zeitaufwendige statische Berechnungen mit Prüflauf oder zeitraubender Schriftverkehr mit potenziellen Verzögerungen des Bauablaufs konnten dadurch vermieden werden.

3 Besondere logistische Herausforderungen bei «La Dhuis»

Besondere Herausforderungen an den Bauablauf stellen sich im Bereich der Baulogistik der Baustelle Station «La Dhuis». Die in Hanglage befindliche Einrichtungsfläche ist zusätzlich durch das vorgeschriebene Lagervolumen für Ausbruchmaterial von $5 \times 1000 \text{ m}^3$ stark eingeschränkt. Die logistische Abwicklung des Lastwagenverkehrs ist extrem schwierig, da in der näheren Baustellenumgebung kein Warte- oder Stauraum für Laster vorhanden ist. Die Einrichtungsfläche der Baustelle bietet Platz für maximal fünf Lastwagen. Die Anbindung der Baustelle erfolgt über die Autobahn A86, die zu den am stärksten befahrenen Autobahnen im Grossraum Paris gehört. Das tägliche Stauaufkommen beeinträchtigt

The force-fit filling and bedding of the HEB arches was very costly due to the restricted spatial conditions. In the area of the crown heading for “La Dhuis” station, Bullflex hoses were subsequently successfully installed to produce a quick force-fit bedding between the shotcrete seal and HEB arches.

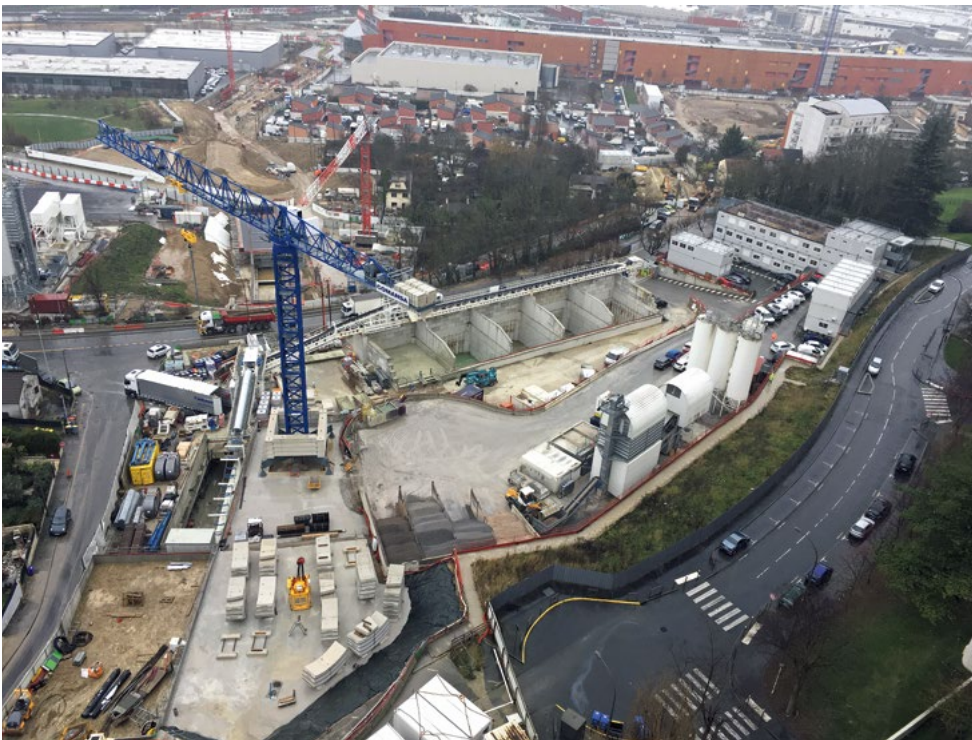
In hindsight, the expected advantage of the reduced cross sections in the construction phase was reduced again due to the complicated installation of the supporting agents. The analyses for the cross section optimisation, which were very numerically dominated in the initial phase, should have been additionally assessed in terms of their sensitivity in relation to cross section width and arch spacing. It is likely that increasing arch spacing to 1 m and a few decimetres of additional cross section width would have resulted in considerable improvements in the construction process and to the improved installation of the supporting agents, without significant additional settlement.

One thing that can definitely be seen as a success is the close, prompt, straightforward and technically sound exchange of experience between the contractor and site supervision during the excavation work. The previously defined and statically verified support types were able to be successfully adjusted to the conditions found during construction. All adjustments were able to be mapped using the previously calculated scenarios. The measures taken and the further adjustments required were formally dealt with in monthly risk management meetings. As a result, it was possible to avoid additional meetings, laborious static calculations with test

runs and time-consuming correspondence with potential delays for the construction process.

3 Particular Logistical Challenges for “La Dhuis”

There were particular logistical challenges for the construction process at the «La Dhuis» station construction site. The set-up area, which is on a slope, is also severely restricted due to the stipulated storage volume for excavated material of $5 \times 1,000 \text{ m}^3$. The logistics handling of the heavy-goods traffic is extremely complex because there are no waiting or holding areas for trucks in the immediate surroundings of the construction site. The



Quelle/credit: Implenia France SA

21 Übersicht «La Dhuis» mit Lagerbehälter Schuttermaterial
Overview of “La Dhuis” with excavated material storage container

Paris – Verlängerung der Métro-Linie 11 •

Herausforderungen beim Bau eines hybriden Grossprojektes im Grossraum Paris

die Versorgung der Baustelle stark. Im Mittel werden pro Laster drei bis maximal vier Rotationen pro Tag erreicht, sodass bis zu 30 Sattelschlepper parallel eingesetzt werden müssen. Zusätzlich wird der Abtransport des Ausbruchmaterials durch die Öffnungszeiten der Deponien von 7 bis 16 Uhr stark eingeschränkt. In Kombination mit den lärmschutzbedingten Einschränkungen des Baubetriebs über Tag von 20 bis 7 Uhr und dem parallelen Betrieb der Baustellenbetonmischanlage führt dies bei einem Aufkommen von 150 bis 180 Lastwagen pro Tag zu einer Spitzenkadenz von bis zu 15 Lastern pro Stunde.

Auch die Anlieferung und Montage der TVM, welche im Sommer 2019 begann, stellte alle Projektbeteiligten vor spezielle Herausforderungen. So mussten in unmittelbarer Nähe zu den umliegenden Wohnbauten die zwingend erforderlichen nächtlichen Anlieferungen der Sondertransporte abgewickelt werden. Die sommerliche Hitze von bis zu 37° C bei grösstenteils nicht klimatisierten Wohnsubstanzen in Kombination mit den anhaltenden nächtlichen Bau- und Montageaktivitäten belasteten die Beziehungen zwischen Anwohnern und Baustelle ausserordentlich. Bei extremen Hitzewellen wurden die Arbeiten auf Anordnung der Bauherrschaft in der Nacht vorübergehend eingestellt, um das nächtliche Lüften ohne Einschränkung durch Lärmemissionen zu ermöglichen. Es hat sich gezeigt, dass gezielte, regelmässige Informationskampagnen zwischen Bauherr, Stadtverwaltung, Baustelle und Bürgerschaft eine zwingende Grundlage zur Steigerung der Akzeptanz bei den Anwohnern und für eine erfolgreiche Abwicklung des Baubetriebs sind.

set-up area of the construction site has space for a maximum of five trucks. The site is accessed via the A86 motorway, which is one of the most heavily used motorways in the greater Paris area. The daily congestion considerably impairs supplies to the site. On average, three to a maximum of four rotations are achieved per truck every day, meaning that up to 30 articulated lorries need to be used in parallel. In addition, the removal of the excavated material is heavily restricted by the opening times of the waste dumps from 7 a.m. to 4 p.m. In combination with the restrictions on construction operations above ground from 8 p.m. to 7 a.m. due to noise protection and the parallel operation of the site concrete mixing plant, this results in between 150 to 180 trucks arriving at the site per day with a peak rate of up to 15 trucks per hour.

The delivery and assembly of the TBM, which commenced in summer 2019, also posed particular challenges for all project participants. For example, the mandatory night-time deliveries of the abnormal loads had to be carried out in the immediate vicinity of the surrounding residential buildings. The summer heat of up to 37°C in the residential buildings, which mostly do not have air conditioning, combined with sustained construction and assembly activities at night, put an extraordinary strain on relationships between residents and the site. During extreme heat waves, the work was temporarily suspended at night on the instruction of the client in order to enable night-time ventilation without restriction due to noise emissions. It turned out that targeted, regular information campaigns between the client, city administration, construction site and the citizens are an obligatory



Quelle/credit: Implenia France SA



Quelle/credit: Implenia France SA



Quelle/credit: Implenia France SA

22 Montage TVM Startschacht
TBM assembly access shaft

4 Zusammenfassung

Das Bauwerk GC01 der Verlängerung der Pariser Métro-Linie 11 mit seinem 3,3 km langen, mittels EPB-TVM aufzufahrenden Doppelspurtunnel sowie den vier neu zu erstellenden Stationen stellt sich aufgrund seiner zahlreichen und mannigfaltigen technischen und logistischen Facetten als äusserst komplex dar. Permanente parallele Bauaktivitäten verschiedener Gewerke auf vier unabhängigen Baustellen, die in fünf verschiedenen Städten des Grossraums Paris liegen, stellen tägliche Herausforderungen in Bezug auf Planung und Koordination des Baubetriebs dar. Zusätzliche Erschwernisse durch die dichte umliegende Bebauung und stark eingeschränkte Baustelleneinrichtungsflächen binden Managementkapazitäten bei allen Projektbeteiligten und beeinflussen das tägliche Baugeschehen. Logistische Engpässe, bedingt durch das extrem hohe Verkehrs- und Stauaufkommen im Grossraum Paris, erschweren die Planbarkeit der Logistikprozesse massiv.

Trotz allen technischen und logistischen Herausforderungen konnte das hybride Grossprojekt seit Sommer 2016 bisher erfolgreich abgewickelt werden.

basis for increasing acceptance among residents and for the successful execution of the construction operations.

4 Summary

Construction lot GC01 of the extension of Paris Métro line 11 with its 3.3 km long double-track tunnel to be produced using EPB TBM, as well as the four stations to be newly constructed, is extremely complicated due to its numerous and varied technical and logistical facets. Permanent parallel construction activities by various trades on four independent construction sites, are located in five different towns in the greater Paris area, represent daily challenges in terms of the planning and coordination of construction operations. Additional difficulties due to the dense surrounding development and heavily restricted site installation areas absorb management capacities for all project participants and influence the daily construction process. Logistical bottlenecks due to the extremely heavy traffic and congestion in the greater Paris area significantly complicate the ability to plan the logistics processes.

In spite of all the technical and logistical challenges, so far the major hybrid project has been able to be executed successfully since summer 2016.

PROJEKTDATEN

Region

Paris, Île-de-France

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

RATP

Planung und Bauleitung

Ingenieurgemeinschaft ARS (Artelia, Richez Architecte, Systra)

Ausführung

Arbeitsgemeinschaft ALLIANCE (NGE GC, Demathieu Bard, Implenia, Pizzarotti)

Kenndaten

Bauzeit:	76 Monate, 2016–2023
Inbetriebnahme:	2024
Baukosten Tunnel:	253 Mio. Euro
Gesamtlänge:	3300 m
Ausbruchquerschnitt:	TVM-Durchmesser 9120 mm

Besondere Merkmale

Erstellung eines Métro-Tunnels und von vier neuen Stationen in urbanem, dicht besiedeltem Gebiet. Bau von zwei Stationen aus Startschächten heraus in bergmännischer Bauweise mit reduzierten Setzungsgrenzwerten, zwei Stationen in Deckelbauweise mit Schlitzwänden in unmittelbarer Nähe zu Gebäuden. Unterfahrung der Autobahn A3 mit ca. 10 m Überlagerung, Durchfahrung von zwei Stationen mit der TVM

PROJECT DATA

Region

Paris, Île-de-France

Client, project management and senior site management

RATP

Planning and site management

ARS engineering association (Artelia, Richez Architecte, Systra)

Construction

Joint venture ALLIANCE (NGE GC, Demathieu Bard, Implenia, Pizzarotti)

Key data

Construction period:	76 months, 2016–2023
Commissioning:	2024
Construction costs, tunnel:	253 million euros
Total length:	3,300 m
Excavation cross-sectional area:	TVM diameter 9,120 mm

Special features

Construction of a Métro tunnel and of four new stations in a densely populated urban area. Construction of two stations from access shafts in underground construction with reduced settlement limit values, two stations in cover construction with diaphragm walls in the immediate vicinity of buildings. Crossing below the A3 motorway with an overlap of approximately 10 m, passing through two stations with the TBM.



Gesamtsystem Bypass Luzern

Projektübersicht und bautechnische Herausforderungen

Thomas Kloth, Dipl. Bau.-Ing. ETH/SIA, eMBA, Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Zofingen, 4800 Zofingen/CH

Daniel Frey, Dipl. Bau.-Ing. HTL, Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Zofingen, 4800 Zofingen/CH

Jürg Stebler, Dipl. Bau.-Ing. ETH, Executive MBA HSG, Jauslin Stebler AG, 4132 Muttenz/CH

Gesamtsystem Bypass Luzern

Projektübersicht und bautechnische Herausforderungen

Mit dem Gesamtsystem Bypass Luzern wird die Verkehrssituation auf der N02/N14 im Raum Luzern markant verbessert. Zentrales Element des Gesamtsystems Bypass Luzern ist ein neuer Tunnel Bypass mit zwei Röhren und je zwei Fahrstreifen. Die Bauzeit dauert bis zur Inbetriebnahme rund zwölf Jahre. Die Investitionskosten betragen ca. 1,8 Milliarden Schweizer Franken.

Bypass Luzern Overall System

Project Overview and Structural Challenges

The Bypass Luzern overall system will significantly improve the traffic situation on the national roads N02/N14 in the Lucerne area. The central element of the Bypass Luzern overall system is a new Tunnel Bypass with two tubes and two lanes in each. Construction will take around twelve years before it goes into operation. The investment costs amount to approx. 1.8 billion Swiss francs.

1 Gesamtsystem Bypass Luzern

Die Nationalstrassen N02 und N14 sind im Raum Luzern morgens und abends überlastet. Die erwartete Verkehrszunahme bis 2040 wird die Situation zusätzlich verschärfen und für grossräumige Stausituationen sorgen. Das Projekt Gesamtsystem Bypass Luzern soll Abhilfe schaffen. Es besteht aus den drei Teilprojekten Ausbau Nord (TP 1), Tunnel Bypass (TP 2/3) und Ergänzung Süd (TP 4.1). Es bewirkt eine Verlagerung des nationalen und regionalen Transitverkehrs von der bestehenden Nationalstrasse in den neuen Tunnel Bypass. Dabei werden Kapazitäten im bestehenden Nationalstrassennetz zwischen den Anschlüssen Emmen-Süd, Luzern-Zentrum und Luzern-Kriens geschaffen, welche dem lokalen Ziel-, Quell- und Binnenverkehr zugutekommen. Mit dem Tunnel Bypass wird eine zweite Stammachse und somit eine Redundanz im Hochleistungsstrassennetz im Raum Luzern geschaffen. Dadurch wird verhindert, dass bei Störungen (Unfälle, Pannenfahrzeuge usw.) auf der Nationalstrasse der Stauumfahrsverkehr in das untergeordnete Strassennetz abfließt. Zudem kann der Verkehr bei einer zukünftigen Instandsetzung der Stadtautobahn oder des Tunnels Bypass über die Nationalstrasse abgewickelt werden; er muss nicht mehr, wie bei der Instandsetzung Cityring, durch Luzern und Kriens umgeleitet werden.

1 Bypass Luzern Overall System

The N02 and N14 national roads in the Lucerne area are congested in the morning and evening. The expected increase in traffic until 2040 will further aggravate the situation and cause large-scale traffic jams. The Bypass Luzern overall system is intended to remedy this situation. It consists of three subprojects, namely the north expansion (SP 1), Tunnel Bypass (SP 2/3) and south extension (SP 4.1). It will shift the national and regional transit traffic from the existing national road to the new Tunnel Bypass. This will create capacities in the existing national road network between the Emmen-South, Lucerne-Central and Lucerne-Kriens junctions, which will benefit local terminating, originating and internal traffic. The Tunnel Bypass creates a second trunk axis and therefore a redundancy in the high-performance road network in the Lucerne area. This will prevent congestion traffic from flowing into the subordinate road network in the event of disruptions (accidents, breakdown vehicles, etc.) on the national road. In addition, in the event of future maintenance to the urban motorway or the Tunnel Bypass, traffic can be diverted via the national road; it will no longer have to be diverted through Lucerne and Kriens, as in the case of the City Ring repair.

Système global de contournement de Lucerne

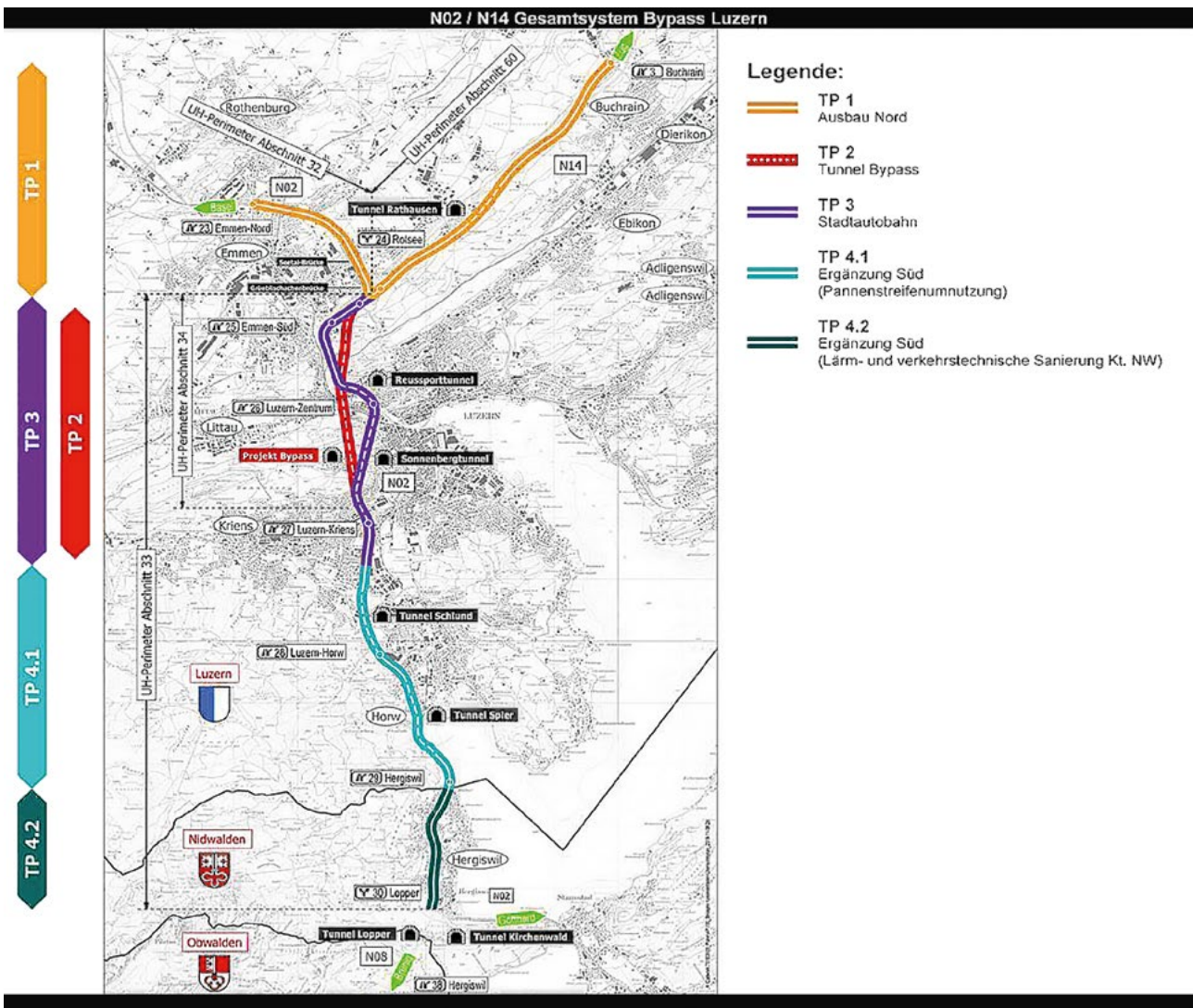
Aperçu du projet et défis structurels

Les routes nationales N02 et N14 dans la région de Lucerne sont périodiquement engorgées. Le Parlement a par conséquent décidé de remédier au goulet d'étranglement et, dans le cadre du Programme de développement stratégique (PRODES), d'approuver les moyens nécessaires à la planification et à la réalisation. Un élargissement à 6 voies est prévu entre l'échangeur de Rotsee et la jonction de Buchrain sur la N14 et comme élément central le tunnel Bypass. Avec un tube nord de 3760 m et un tube sud de 3850 m, celui-ci est prévu à deux voies et à directions séparées.

Sistema generale del bypass di Lucerna

Panoramica del progetto e sfide strutturali

Le strade nazionali N02 e N14 nella zona di Lucerna sono periodicamente congestionate. Il Parlamento ha pertanto deliberato di eliminare il collo di bottiglia e di stanziare i fondi necessari per la progettazione e la realizzazione in quadro del Programma di sviluppo strategico delle strade nazionali (PROSTRA). Sono in programma un ampliamento a 6 corsie tra il raccordo di Buchrain e la diramazione di Rotsee sulla N14 e la costruzione della galleria di Bypass quale elemento centrale. Questa sarà progettata a due corsie con sensi di marcia separati – con un tubosettentrionale di 3760 m e un tubosud di 3850 m.



Quelle/credit: Jauslin Stebler AG, MuttENZ

1 Übersicht Projektstruktur Gesamtsystem Bypass Luzern
Overview of Bypass Luzern overall system project structure

1.1 Ausbau Nord (TP 1)

In der Verzweigung Rotsee wird eine zweistreifige Verkehrsführung von Basel (N02) in Richtung Zug/Zürich (N14) realisiert. Der Abschnitt N14, Verzweigung Rotsee bis Anschluss Buchrain, wird von vier auf sechs Fahrstreifen ausgebaut. Der bestehende Tagbautunnel Rathausen wird um eine dritte Tunnelröhre ergänzt. Zudem werden in der Verzweigung Rotsee die zwei bestehenden Einfahrtsrampen Emmen-Süd in Richtung Zug durch einen kombinierten Anschluss mit einem neuen Knoten auf der Reusseggstrasse ersetzt.

1.2 Tunnel Bypass (TP 2)

Der Tunnel Bypass besitzt als Kernelement zwei zweistreifige Tunnelröhren im Richtungsverkehr, welche Luzern und die Reuss unterqueren. Die Tunnellänge beträgt für die Nordröhre (FBNO) rund 3760 m und für die Südröhre (FBSU) rund 3850 m. Davon werden ca. je drei Kilometer im bergmännischen Verfahren und der Rest im Tagbau erstellt.

1.3 Stadtautobahn (TP 3) (heutiger Cityring)

Nach der Inbetriebnahme des Tunnels Bypass wird die heutige N02, Cityring, zur Stadtautobahn umfunktioniert. Der Nationalstrassenabschnitt zwischen Ibach im Norden und dem Anschluss Luzern-Kriens im Süden mit dem Tunnel Reussport und dem Tunnel Sonnenberg dient damit zukünftig primär der Abwicklung des Ziel-, Quell- und Binnenverkehrs der Agglomeration Luzern.

1.4 Grosshofbrücken inkl. Portalbauwerk (TP 2)

Das bestehende Portal Süd des Tunnels Sonnenberg und die Grosshofbrücke werden vollumfänglich ersetzt. Die vorliegende Lösung wurde im Rahmen eines Projektwettbewerbs ermittelt.

1.1 North Expansion (SP 1)

At the Rotsee junction, a two-lane traffic route from Basel (N02) in the direction of Zug/Zurich (N14) will be implemented. The N14 section from the Rotsee intersection to the Buchrain junction will be expanded from four to six lanes. The existing Rathausen cut-and-cover tunnel will have a third tunnel added. In addition, at the Rotsee junction the two existing entry ramps Emmen-South in the direction of Zug will be replaced by a combined connection with a new junction on Reusseggstrasse.

1.2 Tunnel Bypass (SP 2)

The core element of the Tunnel Bypass are two two-lane tunnels each with traffic running in one direction, which cross under Lucerne and the Reuss river. The tunnel length for the north tunnels (FBNO) is around 3,760 m and for the south tubes (FBSU) around 3,850 m. Approximately three kilometres of each tunnel will be built using the tunneling method and the rest using the cut-and-cover method.

1.3 City Motorway (SP 3) (Current City Ring Road)

Once the Tunnel Bypass has gone into operation, the current N02 City Ring road will be converted into an urban motorway. The section of the national road between Ibach in the north and the Lucerne-Kriens junction in the south with the Reussport tunnel and the Sonnenberg tunnel will therefore primarily serve to handle terminating, originating and internal traffic in the Lucerne agglomeration in the future.

1.4 Grosshofbrücke incl. Portal Structure (SP 2)

The existing south portal of the Sonnenberg tunnel and the Grosshofbrücke bridge will be completely replaced. The existing solution was identified in a project competition.



Quelle/credit: Planergemeinschaft Grosshof, c/o ACS Partner AG, Zürich

2 Visualisierung Grosshofbrücken inkl. Portalbauwerk aus Sicht Sonnenberg Richtung Südosten

Visualisation of Grosshofbrücken incl. portal structure as seen from Sonnenberg in a southeast direction

1.5 Ergänzung Süd (TP 4.1)

Das Projekt sieht zwischen dem Anschluss Luzern-Horw und dem Halbanschluss Hergiswil in beiden Fahrrichtungen eine permanente Pannestreifenumnutzung (PUN) vor, sodass in diesem Abschnitt zukünftig durchgehend zweimal drei Fahrstreifen zur Verfügung stehen. In Fahrtrichtung Nord wird der dritte Fahrstreifen mittels der Pannestreifenumnutzung bereits ab der Verzweigung Lopper sichergestellt. Der Tunnel Schlund besitzt bereits heute drei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Im Tunnel Spier wird der Pannestreifen zugunsten des dritten Fahrstreifens aufgehoben.

1.5 South Extension (SP 4.1)

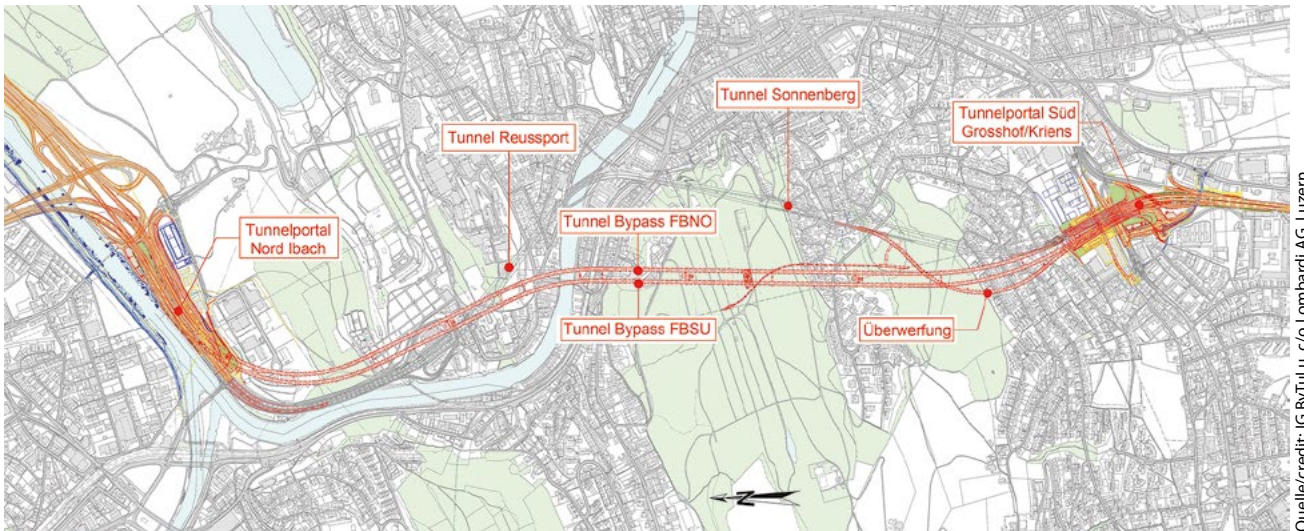
The project envisages a permanent hard shoulder conversion (HSC) in both directions between the Lucerne-Horw junction and the Hergiswil partial junction, meaning that in this section there will be two lots of three lanes available throughout in the future. For northbound traffic, the third lane will be ensured by means of hard shoulder conversion from the Lopper junction. The Schlund tunnel already has three lanes for each direction. In the Spier tunnel, the hard shoulder will be suspended in favour of the third lane.

2 Tunnel Bypass

Der neue Tunnel Bypass besteht aus zwei richtungstrennten, parallel verlaufenden Tunnelröhren.

2 Tunnel Bypass

The new Tunnel Bypass consists of two direction-specific tunnel tubes running in parallel.

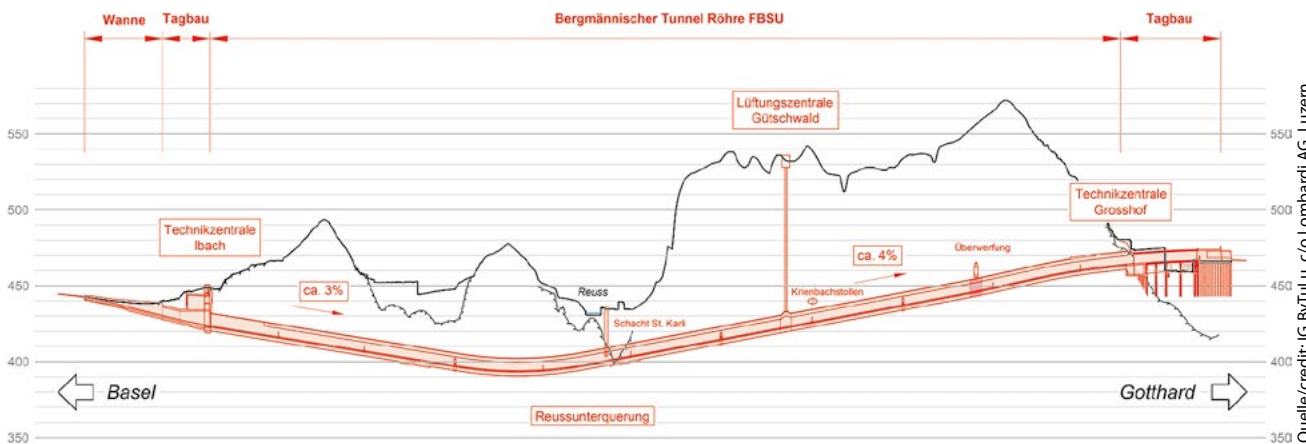


Quelle/credit: IG ByTuLu, c/o Lombardi AG, Luzern

3 Horizontale Linienführung Tunnel Bypass
Tunnel Bypass horizontal layout

Aufgrund der Unterquerung des Reusstals etwa in Tunnelmitte und aufgrund der Höhenlage der nördlichen und südlichen Anschlusspunkte weist der Tunnel einen Tiefpunkt auf.

Due to the fact that the Reuss valley is crossed underneath roughly in the middle of the tunnel and due to the altitudes of the northern and southern junction points, the tunnel has



Quelle/credit: IG ByTuLu, c/o Lombardi AG, Luzern

4 Längenprofil Tunnel Bypass
Tunnel Bypass longitudinal profile

Für den Abschnitt unter der Reuss sind tief reichende, mit Lockergestein gefüllte Gletschertöpfe in Kombination mit verwittertem Felsen und einer Störzone prognostiziert. Die Tiefenlage der Reussquerung ist ein Kompromiss zwischen einer geologisch bedingten möglichst tiefen und einer verkehrlich bedingten möglichst flachen Tunnellage.

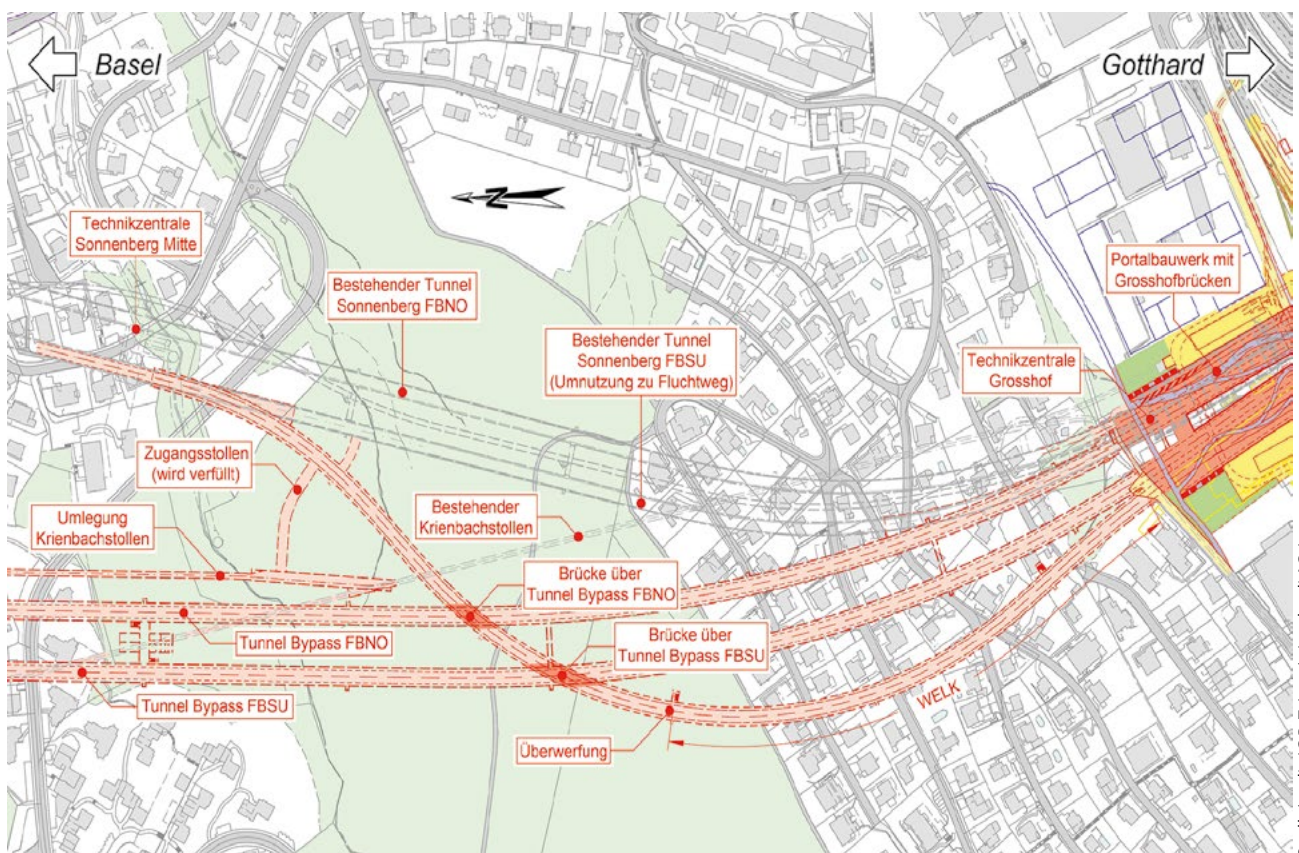
For the section under the Reuss, it is predicted that there will be deep potholes filled with loose stone combined with weathered rocks and a fault zone. The depth of the crossing under the Reuss is a compromise between the tunnel being as deep as geologically possible and the tunnel being as flat as possible for traffic reasons.

2.1 Überwurfungstunnel Sonnenberg, Fahrbahn Süd

Damit die beiden Systeme Tunnel Bypass und Stadtautobahn im Anschluss Luzern-Kriens getreu ihrer jeweiligen Verkehrsfunktion geführt werden können, erfolgt die entsprechende Entflechtung unterirdisch mit einem Überwurfungstunnel.

2.1 Sonnenberg Overpass Tunnel, South Carriageway

To ensure that the two systems, Tunnel Bypass and urban motorway at the Lucerne-Kriens junction, can be routed in accordance with their respective traffic function, the corresponding separation will be carried out underground with an overpass tunnel.



Quelle/credit: IG ByTuLu, c/o Lombardi AG, Luzern

5 Situation des neuen Überwurfungstunnels (Tunnel Sonnenberg FBSU)
 Situation of the new overpass tunnel (Sonnenberg Tunnel FBSU)

Der Überwurfungstunnel steigt nach der Technikzentrale Sonnenberg-Mitte zunächst mit rund 5% an und überquert nach ca. 300 m schleifend die beiden Röhren des Tunnel Bypass im geringstmöglichen Abstand. Um die normkonforme maximale Steigung von 5% einzuhalten, müssen beim Normalprofil des Überwurfungstunnels ein paar Kompromisse akzeptiert werden. In den Kreuzungsbereichen mit den Röhren des Tunnel Bypass wird in der Sohle eine 1 m starke bewehrte Betonplatte realisiert und auf den Werkleitungskanal verzichtet. Die Werkleitungen werden in einem Rohrblock im Bankett geführt. Nach den Kreuzungsbereichen wird ein Werkleitungskanal gebaut, welcher auch als Fluchtweg in Fahrtrichtung Süd dient.

After the Sonnenberg-Mitte technical centre, the overpass tunnel initially rises at around 5% and after approx. 300 m crosses the two tubes of the Tunnel Bypass at the smallest distance possible. In order to comply with the maximum gradient of 5% required by standards, a few compromises have to be accepted for the normal profile of the overpass tunnel. In the crossing areas with the tubes of the Tunnel Bypass, a 1 m thick reinforced concrete plate will be realised in the base and there will be no service duct. The service lines will be laid in a pipe block in the side strip. After the crossing areas, a service duct will be constructed, which also serves as an escape route for the southbound direction of travel.

2.2 Fluchtwegkonzept

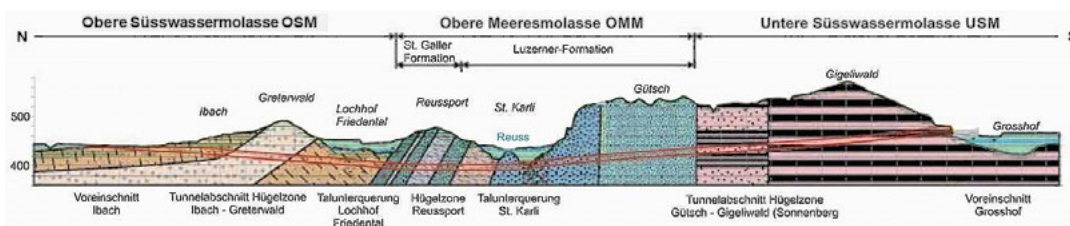
Um das übergeordnete Projektziel der Systemredundanz von Tunnel Bypass und Stadtautobahn zu erfüllen, werden als Fluchtwege aus dem Tunnel Bypass und aus der Stadtautobahn im Ereignisfall nur Elemente des jeweilig gleichen Systems genutzt. Auf gegenseitige Verbindungen wird auch dann verzichtet, wenn dadurch kürzere Wege an die Oberfläche möglich wären. Die Fluchtwege aus dem Tunnel Bypass führen über die regelmässig angeordneten Querverbindungen in die jeweils andere, nicht vom Ereignis betroffene Tunnelröhre.

2.2 Escape Route Concept

In order to fulfil the overriding project target of system redundancy between the Tunnel Bypass and the urban motorway, only elements of the same system are used as escape routes from the Tunnel Bypass and the urban motorway in the event of incidents. Reciprocal connections will not even be used if this makes shorter routes to the surface possible. The escape routes from the Tunnel Bypass run via the regularly arranged cross-passages into the respective other tunnel not affected by the incident.

3 Geologie/Hydrogeologie Tunnel Bypass

3.1 Geologische Verhältnisse



6 Geologische Verhältnisse Tunnel Bypass

Tunnel Bypass geological conditions

Aus geologisch-geotechnischer Sicht lässt sich der Tunnel Bypass zwischen Ibach im Norden und Grosshof im Süden in die folgenden Abschnitte mit unterschiedlichem geologisch-geotechnischem Charakter unterteilen:

- Voreinschnitt Ibach: Obere Süswassermolasse (OSM) mit geringmächtigen Lockergesteinen (Austritt Talflanke);
- Hügelzone Ibach–Greterwald: Obere Süswassermolasse (OSM), schwach tektonisiert und günstig stehende Schichtlagen;
- Talunterquerung Lochhof/Friedental: Obere Süswassermolasse (OSM), teilweise verwittert bis auf Tunnelsohle;
- Hügelzone Reussport: Obere Meeresmolasse (OMM), unterschiedliche Felsarten mit günstig stehenden Schichtlagen;
- Talunterquerung St. Karli: Obere Meeresmolasse (OMM), stärker tektonisiert und verwittert mit komplizierter Felsoberfläche, Tunnel streift die heterogene Talfüllung, welche mit dem Wasser der Reuss kommuniziert;
- Hügelzone Gütsch–Gígeliwald: Obere Meeresmolasse (OMM) bzw. Untere Süswassermolasse (USM), mässig tektonisiert (gegen S stärker), mit günstig stehenden Schichtlagen;
- Voreinschnitt und Talrandbereich Grosshof: Untere Süswassermolasse (USM) mit mächtigen und komplexen Lockergesteinsfüllungen mit unterschiedlichen Grundwasserstockwerken.

3.2 Geotechnische Eigenschaften, Bergwasser, Gasgefährdung

Aufgrund des Mineralgehalts ergeben sich teilweise hohe Gesteinsfestigkeiten. Der hohe Anteil (> 50%) an Quarz in den Molassesandsteinen führt zu hohen Abrasivitäten und kann zu übermäßigem Verschleiss bei mechanischem Vortrieb führen. Das Quellpotenzial der quellbaren Mineralien in Mergeln

3 Geology/Hydrogeology Tunnel Bypass

3.1 Geological Conditions

From a geological-geotechnical perspective, the Tunnel Bypass between Ibach in the north and Grosshof in the south can be divided into the following sections with different geological-geotechnical characteristics:

- Ibach preliminary cut: Upper freshwater molasse (UFM) with thin seams of loose rock (valley flank exit);
- Ibach–Greterwald hill zone: Upper freshwater molasse (UFM), slight tectonic fracture and favourable vertical layers;
- Lochhof/Friedental valley crossing: Upper freshwater molasse (UFM), partially weathered up to tunnel floor;
- Reussport hill zone: Upper marine molasse (UMM), various rock types with favourable vertical layers;
- St. Karli valley crossing: Upper marine molasse (UMM), heavy tectonic fracture and weathered with complicated rock surface, tunnel touches on the heterogeneous valley filling, which interacts with the water of the Reuss;
- Gütsch–Gígeliwald hill zone: Upper marine molasse (UMM)/lower freshwater molasse (LFM), moderate tectonic fracture (heavier towards S), with favourable vertical layers;
- Grosshof preliminary section and valley edge area: Lower freshwater molasse (LFM) with heavy and complex loose rock filling with various groundwater storeys.

3.2 Geotechnical Properties, Groundwater, Gas Hazard

Due to the mineral content, in some cases there are high rock strengths. The high proportion (> 50%) of quartz in the molasse sandstone leads to high abrasiveness and may cause excessive wear during mechanical excavation. The swelling potential of the swellable minerals in marls and

und Schlammsteinen der Molasse wird infolge kleiner Durchlässigkeit der Schichten und der nicht mächtigen quellfähigen Schichtstärken als gering eingestuft. Bei bereits ausgeführten Objekten (Tunnel Sonnenberg, Krienbachstollen usw.) sind keine Probleme mit Quellvorgängen aufgetreten.

mudstones of the molasse is classified as low as a result of the low permeability of the layers and the thin swellable layer thicknesses. In the case of existing structures (Tunnel Sonnenberg, Krienbachstollen, etc.), no problems occurred with swelling processes.

Lithologische Einheit Lithological unit	Lithologie Lithology	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa] Uniaxial compressive strength [MPa]		
		Minima Minimum	Mittelwerte Mean	Maxima Maximum
Untere Süßwassermolasse (USM) Lower freshwater molasse (LFM)	Sandstein, Konglomerat Sandstone, conglomerate	20	65–70	120
	Silt-, Tonstein Siltstone, mudstone	10	55–60	110
Obere Meeresmolasse (OMM) Upper marine molasse (UMM)	Sandstein, Konglomerat Sandstone, conglomerate	20	65–70	120
	Silt-, Tonstein Siltstone, mudstone	5	55–60	110
Obere Süßwassermolasse (OSM) Upper freshwater molasse (UFM)	Silt-, Tonstein Siltstone, mudstone	5	30–35	100

Quelle/credit: IG GEO LU, c/o Kellerhals + Häfeli AG, Bern

Table 1 Gesteinskennwerte

Table 1 Rock characteristics

Es muss lokal mit tiefgründig verwittertem Felsen gerechnet werden. Diese Verwitterung ist insbesondere im Bereich der beiden Talunterquerungen Lochhof und St. Karli (Schwäche-zonen Fels) von Bedeutung, da die Lockergesteinsrinne in den Tunnelbereich respektive mindestens bis in die Auflockerungszonen des Tunnelbereichs hinabgreift. Diese Zone ist gekennzeichnet durch Verminderung der Gesteinsfestigkeiten, Kluftbildungen (teilweise offen oder verfüllt mit Kluft-lehm), fehlende Kohäsion und Ausbildung wasserführender Kluftaquiferen (Spalten). Je nach Lockergesteinsbedeckung können sich hydraulische Druckhöhen (oder gespannte Höhen) bis auf Terrainoberkante ausbilden.

On a local level, it must be expected that there will be deep weathered rocks. This weathering is particularly significant in the area of the two valley crossings Lochhof and St. Karli (rock weakness zones) as the loose rock channel reaches into the tunnel area or at least into the excavation-disturbed zones of the tunnel area. This zone is characterised by a reduction in rock strengths, jointing (in some cases open or filled with fissure clay), lack of cohesion and formation of water-bearing fissure aquifers (gaps). Depending on the loose rock covering, hydraulic pressure heads (or tensioned heads) may form up to the upper edge of the ground.

Der Anfall des Bergwassers bestimmt sich massgebend aus dem Kluftwasservorkommen. Die Kluftbildung ist im frischen Felsen als gering zu betrachten, sodass demzufolge der Wasseranfall als sehr gering prognostiziert wird. In den Tunnelvorzonen und im Bereich der Talunterquerung Lochhof sind diese Kluftbildungen infolge Durchfahrens der Verwitterungszone des Felsens bedeutender. Im Bereich der Talunterquerung St. Karli wird der Wasseranfall am grössten sein, da sich der Tunnel in der Verwitterungszone respektive in der Lockergesteinszone befindet, welche das Flussbett der Reuss bildet. Das anfallende Bergwasser zeigt keine Betonaggressivität. Es neigt aber infolge hoher Wasserhärte zur Versinterung.

The amount of groundwater is mainly determined by the fissure water occurrence. The fissure formation must be considered to be low in the fresh rocks, meaning that as a result the amount of water is forecast to be very low. In the tunnel entrance zones and in the area of the Lochhof valley crossing, these fissure formations are more significant as a result of going through the zone of weathering of the rock. The amount of water will be at its greatest in the area of the St. Karli valley crossing because the tunnel is in the zone of weathering/in the loose rock zone, which forms the riverbed of the Reuss. The groundwater present is not aggressive towards concrete. However, it does have a tendency towards fusion due to the high water hardness.

Bezüglich Gasgefährdung ist von einer kleinen Gasgefahr der Stufe 1 auszugehen. Lokal ist aufgrund dünner Steinkohleflöze eine Gasgefahrstufe 2 möglich. Mit einer entsprechend ausgelegten Tunnellüftung inklusive der üblichen Gasmessungen kann die Gasgefährdung während des Vortriebs beherrscht werden.

In terms of gas hazards, a low gas hazard of level 1 is to be assumed. Locally, a gas hazard level of 2 is possible due to thin seams of coal. With an appropriately designed tunnel ventilation including the usual gas monitoring, the gas hazard can be controlled during excavation.

4 Tunnelbau

4.1 Normalprofil

Für den Tunnel Bypass sind ein konventioneller Vortrieb (Sprengvortrieb) und ein maschineller Vortrieb untersucht worden. Für den Überwölbungstunnel der Stadtautobahn kommt nur ein konventioneller Vortrieb infrage. Die Geometrie des Normalprofils basiert auf dem erforderlichen Lichtraumprofil, den weiteren Nutzungsanforderungen, der erforderlichen Stärke des Tragwerks und der Vortriebsmethode.

4.2 Vortriebskonzept Tunnel Bypass

Unabhängig von der Methode werden die beiden bergmännischen Tunnelröhren (FBNO, FBSU) jeweils von Norden (Ibach) nach Süden (Kriens) vorgetrieben.

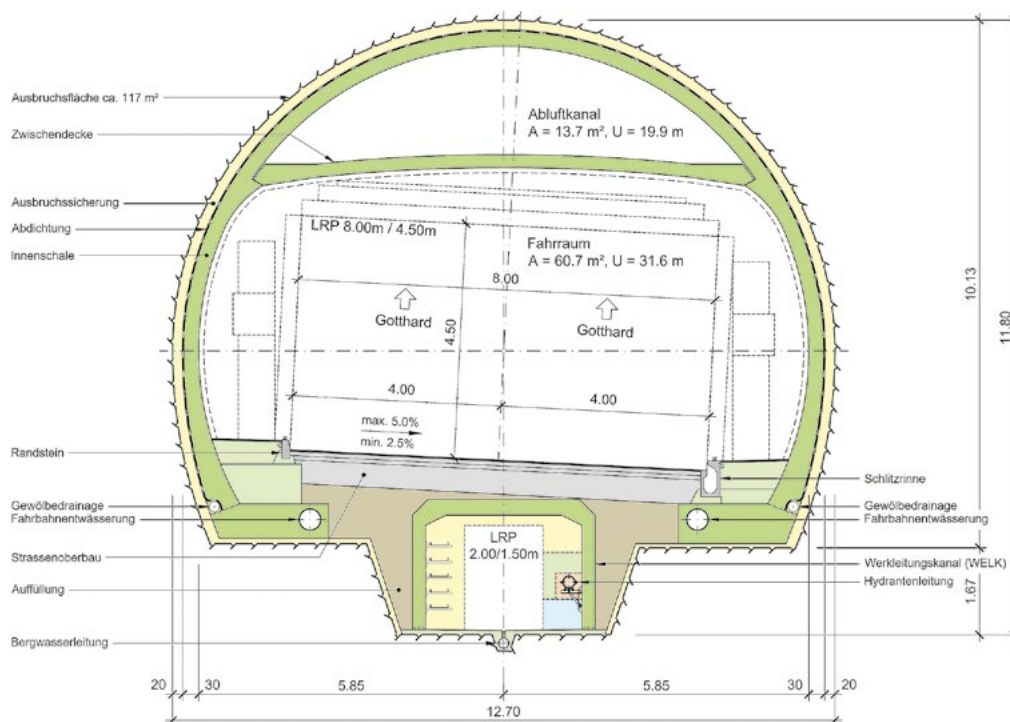
4 Tunnel Construction

4.1 Standard Sections

Conventional excavation (drill and blast) and mechanical excavation have been investigated for the Tunnel Bypass. Only conventional excavation can be considered for the urban motorway overpass tunnel. The geometry of the standard tunnel profile is based on the required minimum clearance outline, the other usage requirements, the required thickness of the structure and the excavation method.

4.2 Tunnel Bypass Excavation Concept

Irrespective of the method, the two tunnels (FBNO, FBSU) will each be driven from the north (Ibach) to the south (Kriens).



7 Normalprofil Tunnel Bypass mit Sprengvortrieb (SPV)

Tunnel Bypass standard profile with drill and blast excavation (D&B)

Beim konventionellen Vortrieb wird der Querschnitt aufgrund der Profilgröße im Teilausbruch aufgeföhren. Der Graben für den Werkleitungskanal wird nachlaufend ausgebrochen, die Betonfertigteile werden eingebaut und mit aufbereitetem Ausbruchmaterial seitlich eingeschüttet. Die Auffüllung wird mit einer Schutzschicht abgedeckt und als provisorische Baupiste genutzt. Die beiden Vortriebe der einzelnen Röhren starten zeitlich leicht versetzt aus der Baugrube Ibach Richtung Süden – zunächst fallend bis zum Tiefpunkt und anschliessend steigend bis zum Durchschlag im Süden. Ein Gegenvortrieb von Süden ist aus logistischen Gründen nicht geplant. Die Reussunterquerung erfolgt im Schutz vorgängig ausgeführter Bauhilfsmassnahmen. Die diversen Nebenbauwerke (Nischen, Querverbindungen, unterirdische Technikzentralen, Treppenhäuser etc.) werden zeitlich versetzt im rückwärtigen Bereich erstellt.

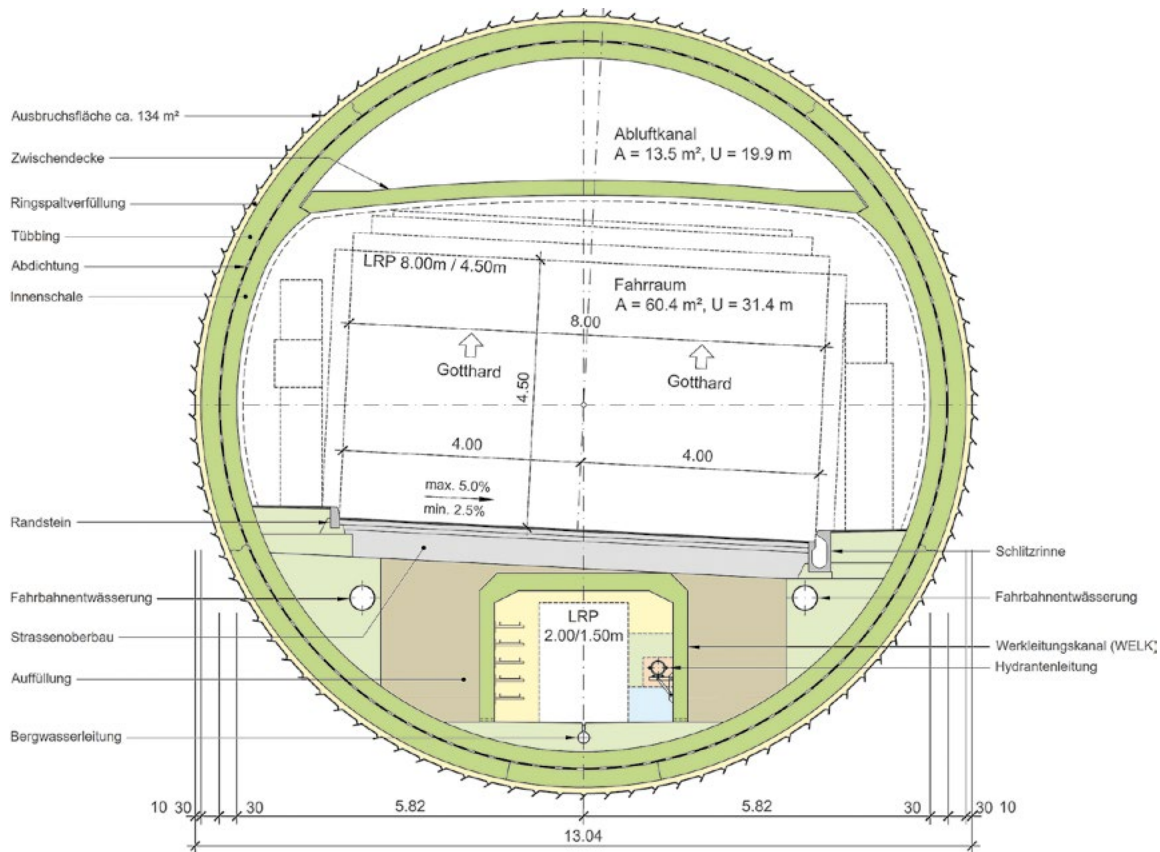
In conventional tunnelling, the cross section will be driven due to the profile size in the partial excavation. The trench for the service duct will be excavated subsequently, the precast concrete segments will be installed and the sides backfilled with processed, crushed excavation material. The backfill will be covered with a protective layer and used as a provisional site road. The excavation of the two individual tunnels will start at slightly staggered times from the Ibach construction trench in a southerly direction – initially descending to the low point and then rising to the breakthrough in the south. For logistical reasons, there are no plans for a counter-drive from the south. The crossing below the Reuss will be carried out with the protection of structural supporting measures constructed in advance. The various auxiliary structures (recesses, cross-connections, underground technical centres, staircases, etc.) will be created at staggered times in the rear area.

Für einen maschinellen Vortrieb können in der vorliegenden Geologie entweder eine offene Gripper-Tunnelbohrmaschine (TBM) oder eine geschlossene Schild-TBM (TBM-S) eingesetzt werden. Zuerst wird die Röhre Bypass FBSU aufgeföhren. Nach dem Durchstich im Grosshof-West wird die TBM demontiert, zurück nach Norden transportiert und für den Vortrieb der Röhre Bypass FBNO in der Baugrube Ibach (resp. in der Startröhre FBNO) wieder aufgebaut.

Das Sohlgewölbe wird im Nachläuferbereich der Tunnelbohrmaschine betoniert. Anschliessend erfolgen das Versetzen der Werkleitungskanälelemente und die Hinterfüllung mit aufbereitetem Ausbruchmaterial. Die diversen Nebenbauwerke (Nischen, Querverbindungen, unterirdische Technikzentralen, Treppenhäuser etc.) werden in einem baulegistischen Mindestabstand hinter dem TBM-Nachläufer ausgebrochen.

For mechanical excavation, in the geological conditions present, either an open gripper tunnel boring machine (TBM) or a closed shield-TBM (TBM-S) can be used. The bypass FBSU tunnels will be excavated first. After the breakthrough in Grosshof-West, the TBM will be dismantled, transported back to the north and reassembled for excavation of the bypass FBNO tunnels in the Ibach construction trench (or in the FBNO starter tunnel).

The base invert will be cast in place in the TBM backup. Then the service ducts will be put in place and backfilled with processed, crushed rock from the tunnel excavation. The various auxiliary structures (recesses, cross-connections, underground technical centres, staircases, etc.) will be excavated at the minimum distance behind the TBM backup based on construction logistics.



8 Normalprofil Tunnel Bypass mit Tunnelbohrmaschine (TBM-S)
Tunnel Bypass standard profile with tunnel boring machine (TBM-S)

Aufgrund der geringen Überdeckung und der über dem Portal Ibach verlaufenden Reussseggrasse beginnt der Vortrieb am bergmännischen Portal im Schutz mehrerer Rohrschirm-etappen in der Kalotte mit anschliessendem Vollausbuch der Startröhre für die TBM. Der Bohrkopf mit Schild wird vor dem bergmännischen Portal montiert und anschliessend in die Startröhre eingeschoben. Die Nachläuferkonstruktion wird auf der vorhandenen Fläche in der Baugrube Ibach montiert. Die angenommenen durchschnittlichen Vortriebsleistungen betragen für beide Röhren FBSU und FBNO 70 m pro Woche.

Due to the low overburden and Reussseggrasse running above the Ibach portal, the excavation will start at the portal under the protection of several pipe umbrella stages in the crown with subsequent full-face excavation of the TBM start tunnel. The cutterhead with shield is assembled in front of the portal and then pushed into the starting tube. The backup structure will be installed in the available area in the Ibach excavation pit. The assumed average advance rates are 70 m per week for both FBSU and FBNO tunnels.

4.3 Übergeordnete Realisierungsetappierung/Großbauprogramm

Die Realisierung des Gesamtsystems Bypass Luzern muss unter Betrieb erfolgen. Es können nicht alle Baumaßnahmen des Gesamtsystems gleichzeitig umgesetzt werden. Dies würde zu einem Verkehrsinfarkt in der Region Luzern sowohl auf dem Nationalstrassen- als auch auf dem untergeordneten Strassennetz führen. Im Weiteren muss bei der Realisierungsetappierung der Engpassbeseitigungsprojekte auch die Instandsetzung bzw. der Unterhalt berücksichtigt werden. Die Instandsetzung der heutigen Nationalstrassenabschnitte wird terminlich auf das übergeordnete Bauprogramm abgestimmt. Damit sind während der Bauarbeiten die Beeinträchtigungen für Betrieb, Verkehrsteilnehmer und Anwohner minimiert.

Die zeitliche Etappierung wurde so gewählt, dass die Teilinbetriebnahmen keinen zusätzlichen Verkehr auf künftige oder sich im Bau befindende Abschnitte anziehen.

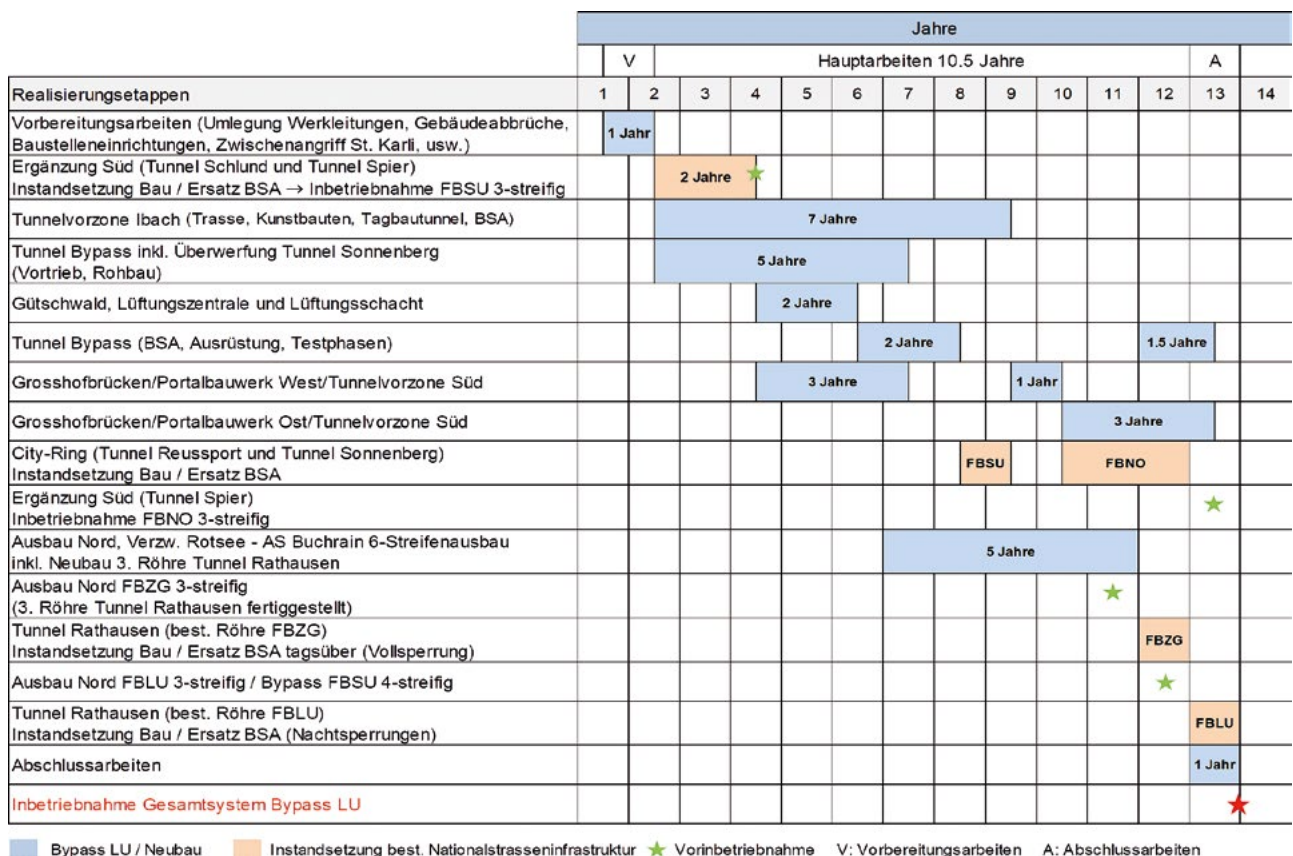
Aus diesem Grund soll in einem ersten Schritt nicht die Gesamtkapazität erhöht, sondern mit der Inbetriebnahme der Ergänzung Süd (Pannestreifenumnutzung im Tunnel Spier) in Fahrtrichtung Süd der Abfluss des Verkehrs aus dem Projektperimeter gefördert werden. Danach erfolgen die Kapazitätserhöhungen durch die Inbetriebnahme des Tunnels Bypass und der dritten Röhre des Tunnels Rathausen inklusive des 6-Streifen-Ausbaus bis zum Anschluss Buchrain.

4.3 Higher-Level Implementation Phasing/Rough Construction Schedule

The implementation of the Bypass Luzern overall system must be carried out during operation. It is not possible to implement all construction measures of the overall system simultaneously. This would cause gridlock in the Lucerne region, both on the national roads and on the subordinate road network. Furthermore, repairs/maintenance will also need to be considered in the implementation phasing of the bottleneck elimination projects. The scheduling of maintenance for the current national road sections will be coordinated with the higher-level construction schedule. This will minimise the adverse effects for traffic, road users and residents during the construction work.

The time schedule will be such that partial opening will not result in additional traffic on future sections or those under construction.

For this reason, the first step should not increase the overall capacity but instead promote the outflow of traffic from the project perimeter by putting into operation the south extension (hard shoulder conversion in the Spier Tunnel) in the southbound direction. Then the capacity increases will be carried out by putting into operation the Tunnel Bypass and the third tube of the Rathausen Tunnel, including the six-lane expansion up to the Buchrain junction.



Quelle/credit: Jauslin Stebler AG, MuttENZ

9 Realisierungsetappierung/Großbauprogramm Gesamtsystem Bypass Luzern
 Bypass Luzern overall system implementation phasing/rough construction schedule

4.4 Bau-/Verkehrsphasen

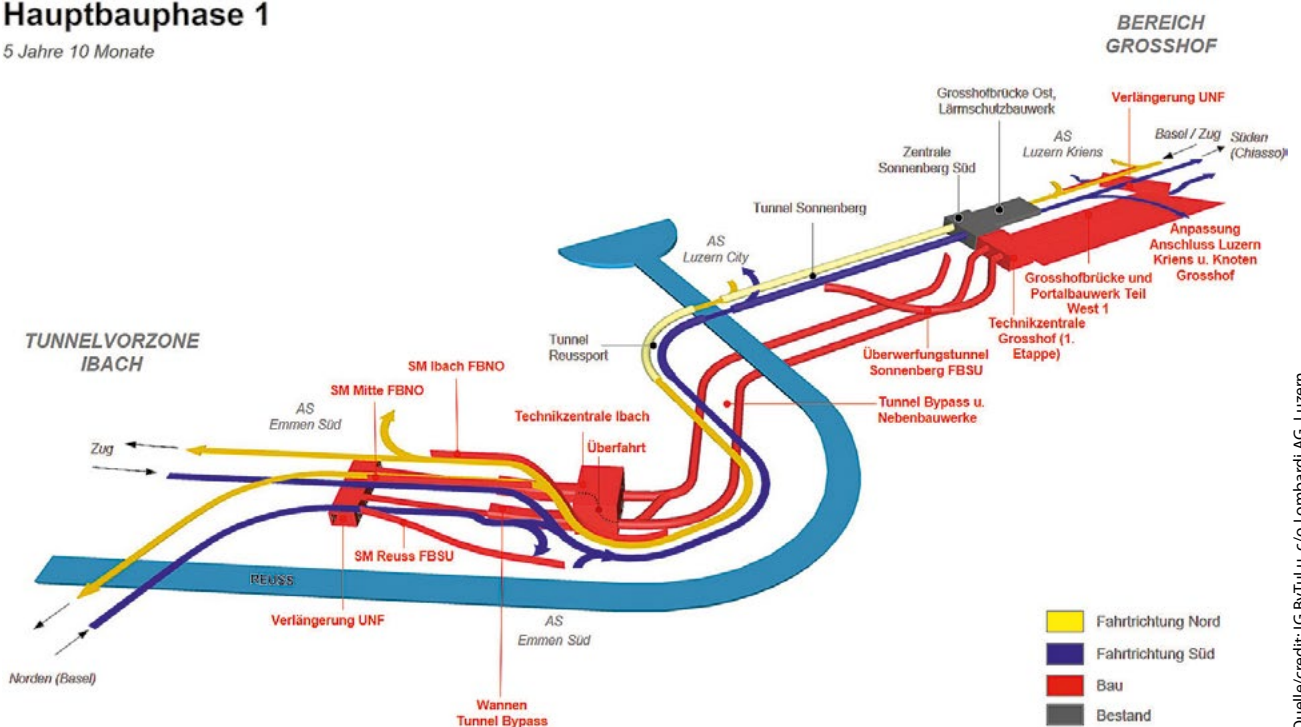
Für den Bau des Tunnels Bypass, welcher in der Vorzone Ibach im Norden und in der Vorzone Süd im Bereich Grosshof unmittelbar neben bzw. zwischen dem bestehenden Cityring realisiert wird, sind zahlreiche anspruchsvolle und komplexe provisorische Verkehrsführungen notwendig. Es müssen total sieben Hauptbau- bzw. Verkehrsphasen mit jeweils acht bis zwölf Unterbauphasen eingerichtet werden, um den Tunnel Bypass und die neuen Grosshofbrücken inklusive Portalbauwerk unter Betrieb zu realisieren.

4.4 Construction/Traffic Phases

Numerous challenging and complex temporary traffic management systems will be needed for the construction of the Tunnel Bypass, which will be implemented in the Ibach entrance zones in the north and in the Grosshof entrance zone in the south immediately next to or between the existing City Ring road. In total, seven main construction and traffic phases, each with eight to twelve sub-construction phases, will need to be constructed in order to implement the Tunnel Bypass and the new Grosshofbrücke including the portal structure with ongoing traffic.

Hauptbauphase 1

5 Jahre 10 Monate



10 Tunnel Bypass – Beispiel für Hauptbauphase (Dauer 5 Jahre 10 Monate)

Tunnel Bypass – example for main construction phase (duration 5 years, 10 months)

Die Bau- bzw. Verkehrsphasen sind so abgestimmt, dass die Vorbereitungsarbeiten in den Tunnelvorzonen Nord und Süd gleichzeitig starten können. Die Bauausführung erfolgt ab den Angriffspunkten Nord im Bereich Ibach (Tagbaubereiche, Portal, Vortrieb Tunnel Bypass, Innenausbau, Ausrüstung) sowie Süd im Bereich Grosshof (offene Strecke, Brücken, Portal, Vortrieb Überwurfungstunnel). Zusätzlich sind zwei Nebenangriffspunkte im Bereich St. Karli für die Vorbereitung der Reussunterquerung (Schacht und Stollen mit Bauhilfsmassnahmen) sowie im Gütschwald für den Abluftschacht und die Lüftungszentrale vorgesehen. In jeder Bau- bzw. Verkehrsphase müssen die für den Normalbetrieb geltenden Anforderungen der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) eingehalten werden. Gleichzeitig müssen die bestehenden Systeme der Tunnels Reussport und Sonnenberg infolge des Endes der Nutzungsdauer unter Betrieb abgelöst werden. Dies bedingt teilweise aufwendige BSA-Provisorien und stellt höchste Anforderungen an Projektierung und Realisierung.

The construction and traffic phases are coordinated so that the preparatory work in the north and south tunnel entrance zones can start at the same time. The construction will take place from the north working points in the Ibach area (cut-and-cover areas, portal, Tunnel Bypass excavation, interior work, tunnel equipment) and south working points in the Grosshof area (open route, bridges, portal, excavation overpass tunnel). In addition, two secondary working points are planned in the St. Karli area for the preparation of the crossing below the Reuss (shaft and duct with supporting construction measures) and in Gütschwald for the exhaust shaft and the ventilation station. In each construction or traffic phase, the requirements of the operating and safety equipment (OSE) valid for normal operation must be complied with. At the same time, the existing systems of the Reussport and Sonnenberg tunnels must be replaced during operation as they have come to the end of their useful life. This requires in some cases complex OSE provisions and places the highest demands on project planning and implementation.

4.5 Unterquerung Reusstal in St. Karli

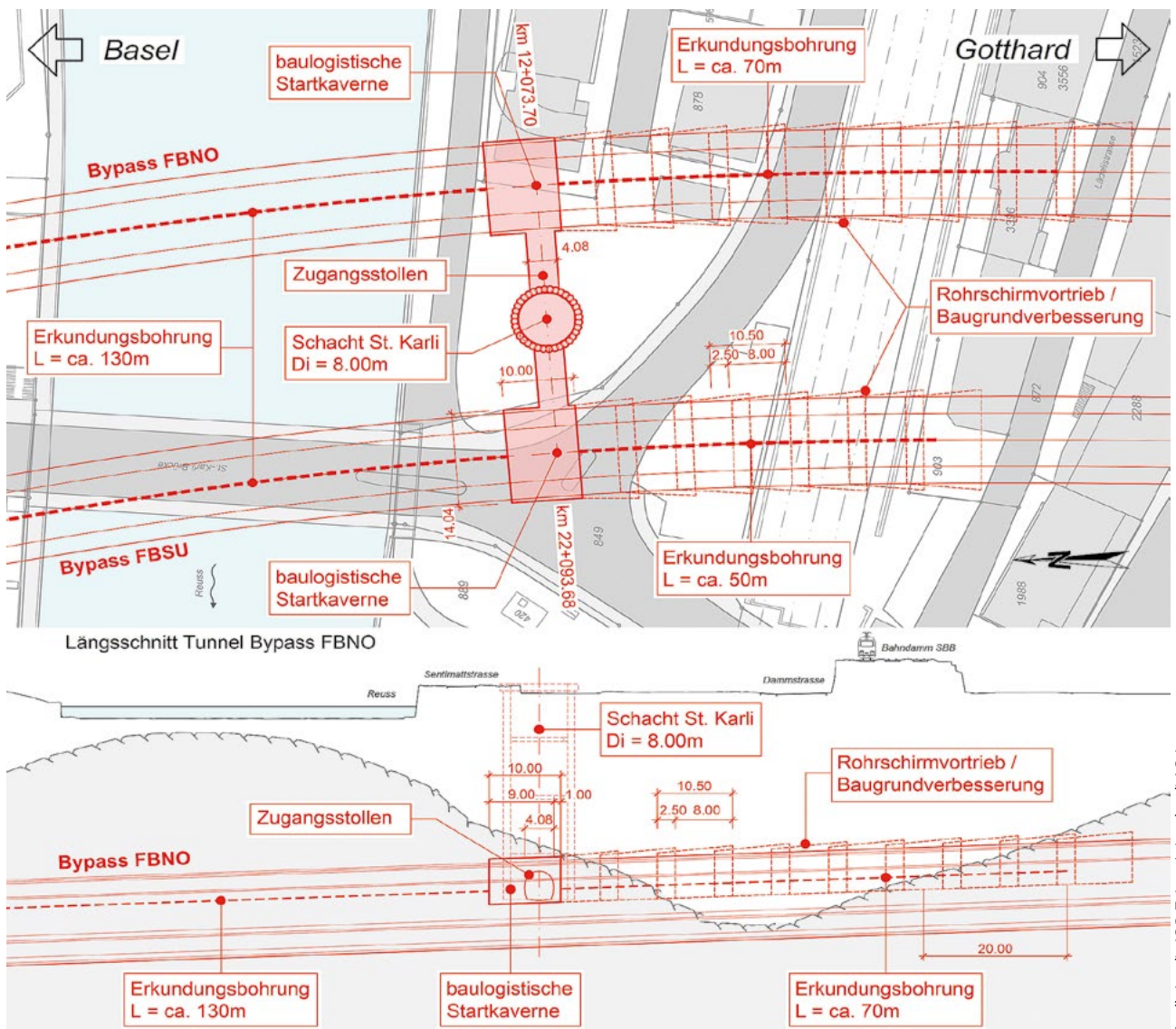
Die Vortriebe der beiden Röhren des Tunnels Bypass liegen auf dem kritischen Weg des Bauprogramms des Gesamtsystems Bypass Luzern.

Die Unterquerung des Reusstals ist die tunnelbautechnisch schwierigste Strecke des neuen Tunnels Bypass. Die geotechnisch anspruchsvolle Strecke umfasst gemäss geologischer Prognose ca. 65 m in der Nordröhre und ca. 35 m in der Südröhre. Die auf Tunnelniveau anstehende wasserführende Lockergesteinsfüllung in einem teilweise verwitterten Felsbett macht Bauhilfsmassnahmen erforderlich. Die Ausführung dieser Massnahmen aus dem Vortrieb heraus ist ein bautechnisches Risiko und könnte die Gesamtbautezeit erheblich verlängern. Darum ist vorgesehen, die Strecke mithilfe eines Zwischenangriffs vorgängig zu stabilisieren, um sie später im regulären Leistungsvortrieb durchfahren zu können.

4.5 Crossing Below the Reuss Valley in St. Karli

The drivings of the two tubes of the Tunnel Bypass are on the critical path of the construction schedule for the Bypass Luzern overall system.

In terms of tunnel construction, crossing below the Reuss valley is the most complex section of the new Tunnel Bypass. According to the geological forecast, the geotechnically challenging section will be at a length of approx. 65 m in the north tunnel and approx. 35 m in the south tunnel. The water-bearing loose rock filling in a partially weathered bedrock that is at tunnel level will necessitate auxiliary construction measures. The implementation of these measures in addition to the excavation is a construction risk and could considerably extend the entire construction schedule. This is why it is intended that this complex tunnel section will be stabilised in advance using an access tunnel so that this section can later be passed through at a regular tunnelling speed and full tunnelling capacity.

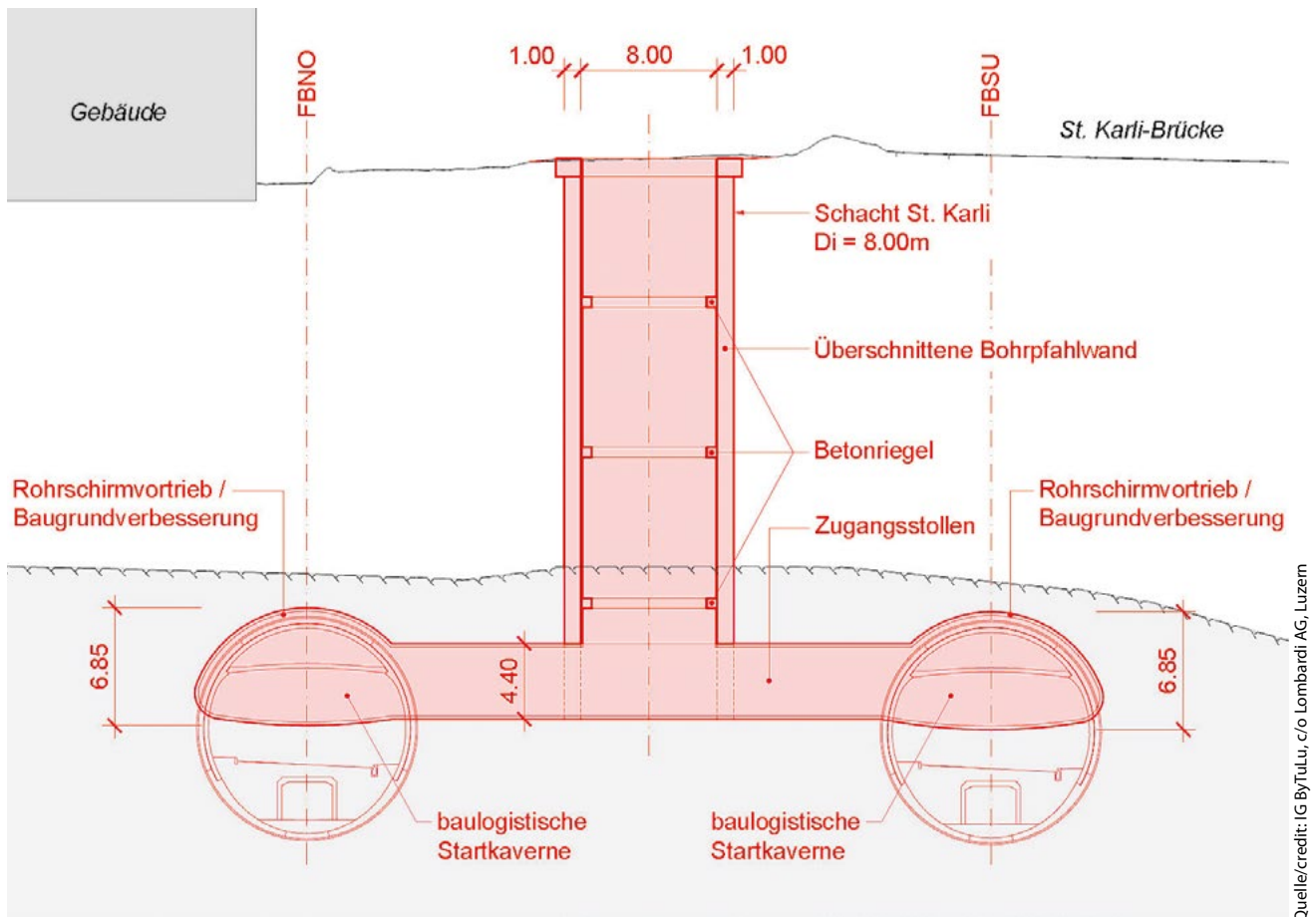


11 Situation und Längsschnitt Zwischenangriff St. Karli
 Situation and longitudinal profile St. Karli access tunnel

Quelle/credit: IG ByTüLu, c/o Lombardi AG, Luzern

Der Zwischenangriff im Reusstal soll möglichst nahe bei den Tunnelröhren liegen, um das Tunnelniveau auf dem kürzesten Weg zu erreichen. Zudem sollen der Schacht und die Zugangsstollen möglichst in intaktem Felsen liegen. Am besten werden diese Anforderungen durch einen Vertikal-schacht mit einem Innendurchmesser von ca. 8 m am Reussufer südlich der St.-Karli-Brücke erfüllt. Der Schacht liegt in der Mitte zwischen den beiden Röhren, und die zu ertüchtigende Strecke beginnt unmittelbar südlich davon. Aus dem Schacht führen zwei Querverbindungsstollen nach Osten und Westen in eine kleine baugelastige Startkaverne, welche der leicht vergrößerten Kalotte des Tunnelquerschnitts entspricht.

The intermediate point of attack in the Reuss valley must be as close as possible to the tunnels in order to reach the tunnel level via the shortest route. In addition, the shaft and access tunnels should be located in intact rock if possible. Ideally, these requirements will be met using a vertical shaft with an internal diameter of approx. 8 m on the Reuss bank in the south of St. Karli bridge. The shaft is located in the middle between the two tubes, and the section to be stabilised will start immediately to the south of this. From the shaft, two cross-connection tunnels to the east and west run into a small construction logistics starting cavern, which corresponds to the slightly enlarged crown of the tunnel cross section.

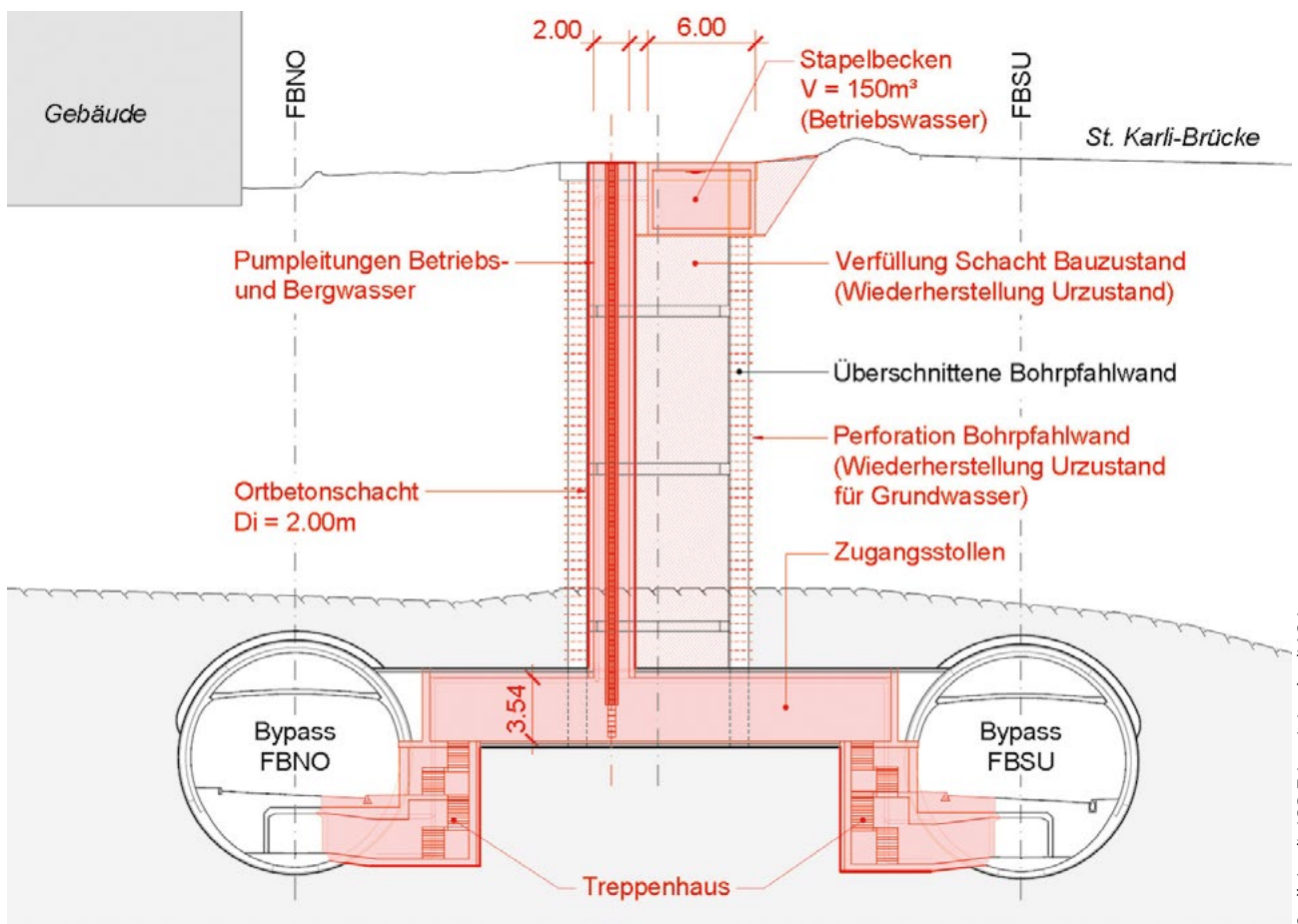


Quelle/credit: IG ByTUlu, c/o Lombardi AG, Luzern

12 Schnitt Zwischenangriff St. Karli (Bauzustand)
Profile of St. Karli access tunnel (during construction)

Aus den Startkavernen werden zunächst in beiden Röhren Erkundungsbohrungen sowohl nach Norden (ca. 130 m) als auch nach Süden (ca. 60–70 m) ausgeführt, um die geologische Prognose für die Ausführung der notwendigen Bauhilfsmassnahmen und für den späteren Hauptvortrieb zu verifizieren und zu optimieren. Danach wird die Kalotte der zu ertüchtigenden Strecken in beiden Röhren im Schutz eines ausinjizierten Rohrschirms etappenweise aufgeföhrt. Die Ortsbrust wird mittels Injektionen behandelt, um den Grundwasserzutritt während des Vortriebs auf ein Minimum zu beschränken.

From the starting caverns of both tunnels, probe drilling will initially be carried out both to the north (approx. 130 m) and to the south (approx. 60–70 m) in order to verify and optimise the geological forecast for the performance of the necessary auxiliary construction measures and for the later main excavation. After this, the crown of the sections to be stabilised in both tunnels, will be gradually excavated in the protection of a grouted pipe umbrella. The face will be treated using grout injections in order to restrict groundwater flow to a minimum during the excavation.



Quelle/credit: IG ByTulu, c/o Lombardi AG, Luzern

13 Schnitt Zwischenangriff St. Karli (Endzustand)
Profile of St. Karli access tunnel (final condition)

Für den Endzustand wird der Schacht grösstenteils rückgebaut bzw. verfüllt. Der verbleibende Teil wird permanent ausgebaut und umgerüstet, um im Endzustand die Pumpleitungen vom Stapelbecken auf Tunnelniveau an die Oberfläche zu führen. Am Schachtkopf befindet sich das Stapelbecken St. Karli mit einem Stapelvolumen von 150 m^3 .

5 Ausblick

Das eidgenössische Parlament hat den Ausbauschnitt 2019 im Strategischen Entwicklungsprogramm (STEP) Nationalstrassen im Sommer 2019 genehmigt. Im Ausbauschnitt 2019 ist auch das Projekt Gesamtsystem Bypass Luzern enthalten. Dementsprechend ist die Finanzierung des Gesamtsystems Bypass Luzern sichergestellt. Gemäss aktuellem Planungsprogramm ist vorgesehen, ab 2021 mit der Erarbeitung der Detailprojekte für den Tunnel Bypass und die Ergänzung Süd zu beginnen. Das Ziel des ASTRA ist, dass nach der Inbetriebnahme des Gesamtsystems Bypass Luzern auch die bestehenden Nationalstrasseninfrastrukturen im Projektperimeter (u. a. Tunnel Rathausen, Tunnel Reussport, Tunnel Sonnenberg, Tunnel Schlund, Tunnel Spier) instand gesetzt sind und die Gebrauchstauglichkeit für die nächsten 20 Jahre gewährleistet ist. Vorausgesetzt, es liegt eine rechtskräftige Plangenehmigung vor.

At the end of construction, the shaft will be largely dismantled and backfilled. The remaining section will be permanently expanded and converted in order to take the pump lines from the collection basin at tunnel level to the surface in the final condition. The St. Karli collection basin with a collection volume of 150 m^3 is located at the shaft head.

5 Outlook

The Federal Parliament approved the upgrade step 2019 in the Strategic Development Program (SDP) for Main Roads in summer 2019. The upgrade step 2019 includes the Bypass Luzern overall system project. Accordingly, the financing for the Bypass Luzern overall system is assured. According to the current planning schedule, it is intended to start from 2021 with the development of the detailed project plans for the Tunnel Bypass and the south extension. The aim of FEDRO is to ensure that, once the Bypass Luzern overall system has been commissioned, the existing national road infrastructure in the project perimeter (including Rathaus Tunnel, Reussport Tunnel, Sonnenberg Tunnel, Schlund Tunnel, Spier Tunnel) will also be repaired and serviceability guaranteed for the next 20 years. Provided that the plans have been approved in a legally valid manner,

migungsverfügung (PGV) vor, beginnen die Vorbereitungsarbeiten Ende 2024/Anfang 2025. Die Hauptarbeiten für den Tunnel Bypass starten ca. Ende 2026. Bei einer geschätzten Bauzeit von gut zwölf Jahren wird die Inbetriebnahme des Gesamtsystems Bypass Luzern nicht vor 2037 sein. Die Investitionskosten betragen ca. 1,8 Milliarden Schweizer Franken.

the preparatory work will start in late 2024/early 2025. The main work on the Tunnel Bypass will start around the end of 2026. With an estimated construction time of more than twelve years, the Bypass Luzern overall system will not be in operation before 2037. The investment costs amount to approx. CHF 1.8 billion.

PROJEKTDATEN

Region

Luzern, Schweiz

Bauherr, Gesamtprojektleitung

Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Zofingen

Planung und Gesamtleitungsunterstützung Phase Ausführungsprojekt

- Jauslin Stebler AG, Muttenz, Gesamtleitungsunterstützung
- IG 5B, c/o B+S AG, Bern (B+S AG, dsp Ingenieure & Planer AG, Ingenieurbüro Heierli AG), Projektverfasser TP 1 Ausbau Nord
- IG ByTuLu, c/o Lombardi AG, Luzern (Lombardi AG, Amberg Engineering AG, Emch+Berger WSB AG), Projektverfasser TP 2/3 Tunnel Bypass/ Stadtautobahn
- CES Bauingenieur AG, Hergiswil, Projektverfasser TP 4.1 Ergänzung Süd
- PG Grosshof, c/o ACS Partner AG, Zürich (ACS Partner AG, Hager Partner AG, smarch – Mathys & Stücheli), Projektverfasser Grosshofbrücken
- IG 3B, c/o BG Ingenieure und Berater AG, Bern (BG Ingenieure & Berater AG, Basler & Hofmann AG, HBI Haerter AG), Projektverfasser TP 5 BSA
- Pöry Schweiz AG, Zürich, Projektverfasser TP 6 Umwelt
- IG GEO LU, c/o Kellerhals + Häfeli AG, Bern (Kellerhals+ Häfeli AG, IUB Engineering AG), Projektverfasser Geologie/Geotechnik
- Rudolf Keller & Partner AG, Muttenz, Projektverfasser Verkehr
- Feddersen & Klostermann, Zürich, städtebauliche Begleitung
- C+E Planing AG, Wohlen, Bauherrenunterstützung BSA

Termine und Kosten

Aktueller Planungsstand: Ausführungsprojekt, Auflage im Frühjahr 2020

Bauzeit: ca. 12,5 Jahre

Frühestmöglicher

Baubeginn: 2025

Frühestmögliche

Inbetriebnahme: 2037

Baukosten Gesamtsystem

Bypass Luzern ca. 1,8 Mia. Schweizer Franken

(exkl. Instandsetzung bestehender Nationalstrasseninfrastrukturen im Projektperimeter)

PROJECT DATA

Region

Lucerne, Switzerland

Awarding authority, overall project management

Swiss Federal Roads Office ASTRA, Zofingen branch

Planning and management support for the implementation project phase

- Jauslin Stebler AG, Muttenz, Gesamtleitungsunterstützung
- IG 5B, c/o B+S AG, Bern (B+S AG, dsp Ingenieure & Planer AG, Ingenieurbüro Heierli AG), Projektverfasser TP 1 Ausbau Nord
- IG ByTuLu, c/o Lombardi AG, Luzern (Lombardi AG, Amberg Engineering AG, Emch+Berger WSB AG), Projektverfasser TP 2/3 Tunnel Bypass/ Stadtautobahn
- CES Bauingenieur AG, Hergiswil, Projektverfasser TP 4.1 Ergänzung Süd
- PG Grosshof, c/o ACS Partner AG, Zürich (ACS Partner AG, Hager Partner AG, smarch – Mathys & Stücheli), Projektverfasser Grosshofbrücken
- IG 3B, c/o BG Ingenieure und Berater AG, Bern (BG Ingenieure & Berater AG, Basler & Hofmann AG, HBI Haerter AG), Projektverfasser TP 5 BSA
- Pöry Schweiz AG, Zürich, Projektverfasser TP 6 Umwelt
- IG GEO LU, c/o Kellerhals + Häfeli AG, Bern (Kellerhals+ Häfeli AG, IUB Engineering AG), Projektverfasser Geologie/Geotechnik
- Rudolf Keller & Partner AG, Muttenz, Projektverfasser Verkehr
- Feddersen & Klostermann, Zürich, städtebauliche Begleitung
- C+E Planing AG, Wohlen, Bauherrenunterstützung BSA

Deadlines and costs

Current planning status: Implementation project, circulation in spring 2020

Construction time: approx. 12.5 years

Earliest possible start

of construction: 2025

Earliest possible operation: 2037

Construction costs,

Bypass Luzern overall system: approx. 1.8 billion Swiss francs

(excl. maintenance of existing national road infrastructure in the project perimeter)



Nouveau tunnel LEB

Défis d'un chantier en plein cœur de Lausanne

Olivier Hey, MSc Bau-Ing. ETHZ/SIA, Monod-Piguet Ingénieurs Conseil SA, Lausanne/CH

Nouveau tunnel LEB

Défis d'un chantier en plein cœur de Lausanne

Le nouveau tunnel du LEB à Lausanne est actuellement en cours de réalisation. Les conditions de réalisation au centre-ville et le maintien de l'exploitation ferroviaire – à l'exception de deux interruptions planifiées – imposent une logistique et des mesures particulières. La totalité des matériaux d'excavation est ainsi évacuée par le rail en souterrain par le biais du tunnel Tridel existant.

New LEB Tunnel

The Challenges of a Site in the Heart of Lausanne

The new LEB tunnel in Lausanne is currently under development. The location of the site in the city centre and the need to keep using the railway in the process (with the exception of two planned interruptions) require logistical arrangements and special measures. All of the excavation material is therefore being taken underground by rail via the existing Tridel tunnel.

1 Introduction

1.1 Contexte général

La ligne à voie métrique du LEB (Lausanne – Echallens – Bercher) a été mise en service en 1873 pour relier le Gros-de-Vaud au centre de Lausanne. Le terminus de la ligne historiquement situé à l'emplacement actuel du parc de la Brouette – en lien avec le surnom du LEB – a déjà été déplacé à deux reprises en direction du centre-ville lors de deux étapes d'extension de la ligne (1995, mise en souterrain partielle et extension jusqu'à la nouvelle gare souterraine de Chauderon, et 2000, prolongement en souterrain jusqu'à la gare du Flon).

De nos jours, le LEB est assimilable à un RER et sa fréquentation croît continuellement depuis plusieurs années en fonction du développement économique du Gros-de-Vaud.

Le projet du nouveau tunnel LEB répond globalement aux besoins liés à l'augmentation de la capacité de la ligne avec de nouvelles intersections, à l'acquisition de matériel roulant plus performant et à la modernisation des installations de sécurité existantes.

1.2 Objectif du projet

Actuellement le LEB circule avec une cadence au quart d'heure entre Flon et Cheseaux. Sur le tronçon empruntant l'avenue d'Echallens, le LEB n'est pas en site propre, une situation accidentogène impliquant des automobilistes, des cyclistes et des piétons, avec une issue mortelle malheureusement dans plusieurs cas (fig. 1).

Des mesures d'urgence ont été prises en 2009–2010 et 2013–2014, le danger reste néanmoins élevé. Le projet

1 Introduction

1.1 General Context

The LEB (Lausanne – Echallens – Bercher) metre-gauge railway line was commissioned in 1873 to link the Gros-de-Vaud area with the centre of Lausanne. The terminus of the line – historically located at the current site of the Parc de la Brouette – has already been moved closer to the city centre twice as part of two phases of line extension work (1995: partial underground construction and extension up to the new Chauderon underground station; 2000: extension underground up to the Flon station).

Nowadays, the LEB is similar to the RER suburban line in Paris and its usage has grown continuously for several years as a result of economic development in Gros-de-Vaud.

The new LEB tunnel project responds to the needs linked to the increase in capacity of the line with new intersections, the acquisition of new, more efficient rolling stock and the modernisation of the existing safety facilities.

1.2 Aim of the Project

The LEB currently runs every 15 minutes between Flon and Cheseaux. Along Avenue d'Echallens, the LEB shares the road with traffic, creating a hazardous situation for drivers, cyclists and pedestrians – unfortunately with fatal outcomes in several cases (Fig. 1).

Emergency measures were taken in 2009–2010 and 2013–2014 but the level of danger still remains substantial. The aim of the project is therefore to move the line

Neuer Tunnel für die LEB-Bahn

Zu den Herausforderungen von Bauarbeiten im Herzen von Lausanne

Durch den Bau eines neuen zweigleisigen Eisenbahntunnels mit einer Länge von 1414 m soll in erster Linie die Sicherheit des Strassenverkehrs auf der Avenue d'Echallens erhöht werden. Die Gesamtkosten des Projekts belaufen sich auf 136 Mio. Schweizer Franken und werden gemeinsam von der Eidgenossenschaft und dem Kanton Waadt übernommen. Die Arbeiten begannen im August 2017; die Inbetriebnahme des Tunnels ist für Ende 2021 geplant. Geologisch verläuft die Tunnelstrecke hauptsächlich durch die graue Molasse von Lausanne ohne besondere kritische Bereiche. Unvorhersehbare Gasvorkommen in den kohle- und pyrithaltigen Bodenhorizonten verzögerten jedoch den Vortrieb und erforderten besondere Sicherheitsvorkehrungen für die Arbeiter.

Nuovo tunnel LEB

Le sfide di un cantiere nel cuore di Losanna

La nuova opera a doppio binario lunga 1414 metri avrà principalmente lo scopo di rendere più sicuro il traffico urbano lungo l'Avenue d'Echallens. Il progetto complessivo del valore di 136 milioni di franchi è finanziato dalla Confederazione e dal Canton Vaud. I lavori sono iniziati nell'agosto 2017 e la messa in servizio è prevista per la fine del 2021. Il tracciato del tunnel presenta una geologia costituita prevalentemente da molassa grigia di Losanna, senza particolari punti critici. Tuttavia, alcune inaspettate emissioni di gas provenienti dagli orizzonti contenenti carbone e pirite hanno rallentato l'avanzamento dei lavori, rendendo necessaria l'attuazione di misure di sicurezza per i lavoratori.

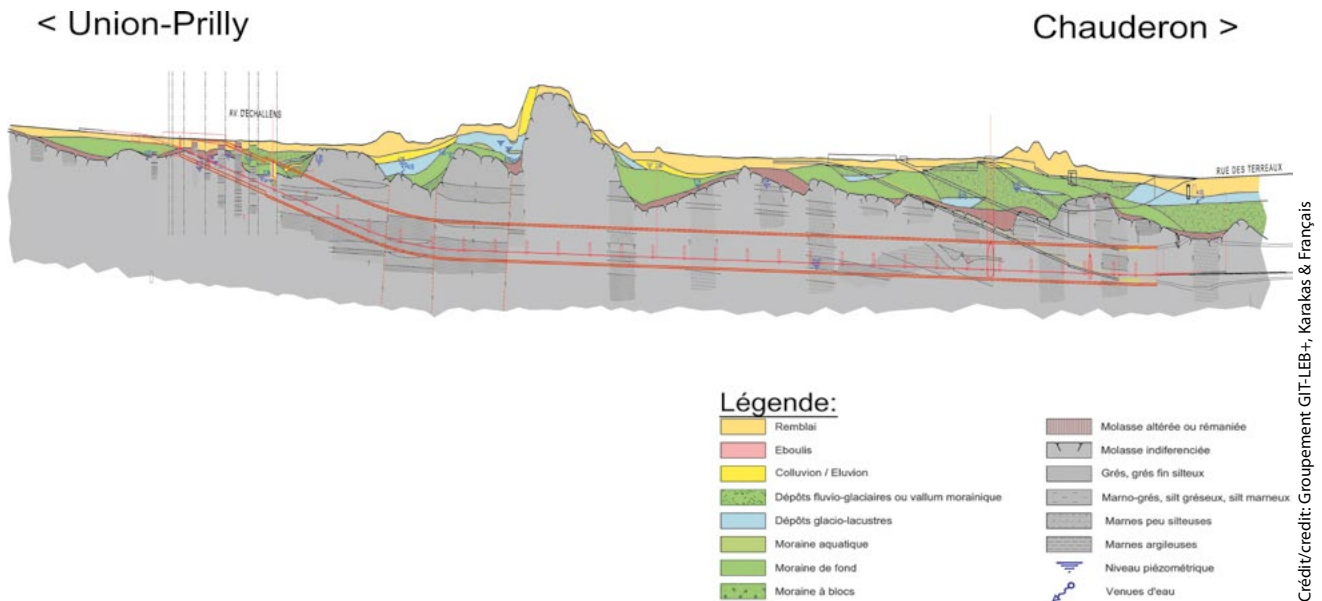
prévoit ainsi la mise en souterrain complète du tracé entre Chauderon et Union-Prilly. La voie unique sera également remplacée par une double voie. Ces mesures permettront de sécuriser la circulation sur l'avenue d'Echallens, de garantir les horaires et d'améliorer le service aux clients.

fully underground between Chauderon and Union-Prilly. The single track will also be replaced by a double track. These measures will make it safer for traffic using Avenue d'Echallens, guarantee that trains run on time and improve service for customers.



Crédit/credit: Transports publics lausannois

1 *Cohabitation difficile entre le LEB et les autres usagers de la chaussée*
A difficult coexistence between the LEB and other road users



Crédit/credit: Groupement GIT-LEB+, Karakas & Français

2 Profil en long géologique prévisionnel
Expected longitudinal geological profile

1.3 Organisation et financement

La maîtrise d’ouvrage est assurée par les transports publics de la région lausannoise (tl) au sein desquels la gestion opérationnelle du service voyageurs ferroviaires du LEB a été intégrée en 2013.

La construction du nouveau tunnel est devisée à 136 millions CHF, dont plus des deux tiers ont été accordés par les Chambres fédérales dans le cadre du fonds d’infrastructure ferroviaire (FIF). Le 23 mai 2017, le Grand Conseil vaudois a accordé la participation cantonale au projet, sous la forme d’un crédit d’investissement de 23,8 millions CHF et un prêt conditionnellement remboursable de 22 millions CHF pour le LEB.

2 Description du projet

2.1 Géologie

Le contexte géologique a été défini par trois campagnes de reconnaissance exhaustives menées entre 2014 et 2016 durant lesquelles 29 forages carottés ont été réalisés le long du tracé.

Le substratum rocheux est composé de molasse grise de Lausanne d’âge aquitanien (molasse d’eau douce). Celle-ci présente une alternance de bancs décimétriques à métriques de grès, de silt et de marnes, avec des couches intermédiaires. L’interaction entre la stratigraphie, la fracturation et l’érosion est mise en évidence dans la topographie des falaises de grès orientées NNO-SSE localement sub-affleurantes, que l’urbanisation tend souvent à masquer.

Au carrefour de Montétan, le toit de la molasse s’approfondit en un paléo-vallon très ouvert d’axe NE-SO. Sa limite amont remonte abruptement au sud du petit parc de Montétan et le substratum se poursuit par un plateau incliné (fig. 2).

1.3 Organisation and Funding

The construction project is being handled by the Lausanne region public transport authority (tl), where the operational management of rail passenger services of the LEB was integrated in 2013.

The construction of the new tunnel has been quoted at CHF 136 million, two thirds of which has been granted by the federal parliament as part of the Swiss rail infrastructure fund (FIF). On 23 May 2017, the Vaud cantonal parliament granted support from the canton for the project in the form of an investment loan of CHF 23.8 million and a conditionally repayable loan of CHF 22 million for the LEB.

2 Description of the Project

2.1 Geology

The geological context was defined by means of three extensive geological reconnaissance surveys carried out between 2014 and 2016, during which 29 core drill holes were made along the route.

The bedrock is made up of Lausanne grey molasse from the Aquitanian era (freshwater molasse). This comprises an alternating pattern of decimetric to metric beds of sandstone, silt and marl with intermediate layers. The interaction between the stratigraphy, fracturing and erosion is highlighted in the topography of the sandstone cliffs, which are oriented NNW-SSE and locally subcrops, which tend to be hidden by urbanisation.

At the Montétan crossroads, the bedrock deepens into a very open ancient valley going NE-SW. Its upstream limit goes back up again abruptly at the south of the small Montétan park and the bedrock continues with an inclined plateau (Fig. 2).

Nouveau tunnel LEB • Défis d'un chantier en plein cœur de Lausanne

Les terrains meubles qui coiffent le substratum molassique sont constitués de différents types de dépôts d'origine post-glaciaire, souvent aquifères, et de dépôts morainiques. La couverture superficielle se compose en général de remblais très hétérogènes.

Du point de vue hydrogéologique, aucune nappe n'est concernée par le projet. Seules des circulations d'eau de faible débit dans les fissures du massif sont attendues localement dans la molasse.

La quasi-totalité de l'excavation se fait dans de la roche. Seule la première partie de la contre-attaque réalisée depuis la station d'Union-Prilly se fait en partie dans un terrain meuble. Dans les bancs les plus gréseux, la résistance à la compression uniaxiale peut atteindre ponctuellement 100 MPa; dans les faciès marneux en revanche, des valeurs inférieures à 2 MPa ont été relevées. Sur la base des essais d'abrasivité (essais Cerchar), la roche molassique est considérée comme peu abrasive à abrasive.

Les marnes sont gonflantes. Sur la base des essais et des retours d'expérience du métro m2, une pression de gonflement maximale de 0,5 MPa pour un potentiel de gonflement compris entre 3 et 10% est retenue pour le dimensionnement.

2.2 Tracé

La totalité du nouveau tracé entre Chauderon et Union-Prilly est à double voie. Trois diagonales d'échange permettent la mise en œuvre du concept d'exploitation prévu par le LEB.

The soft ground that covers the molasse bedrock is made up of different types of post-glacial, often aquiferous, sediment and moraine sediment. The superficial covering is generally made up of very heterogeneous backfill.

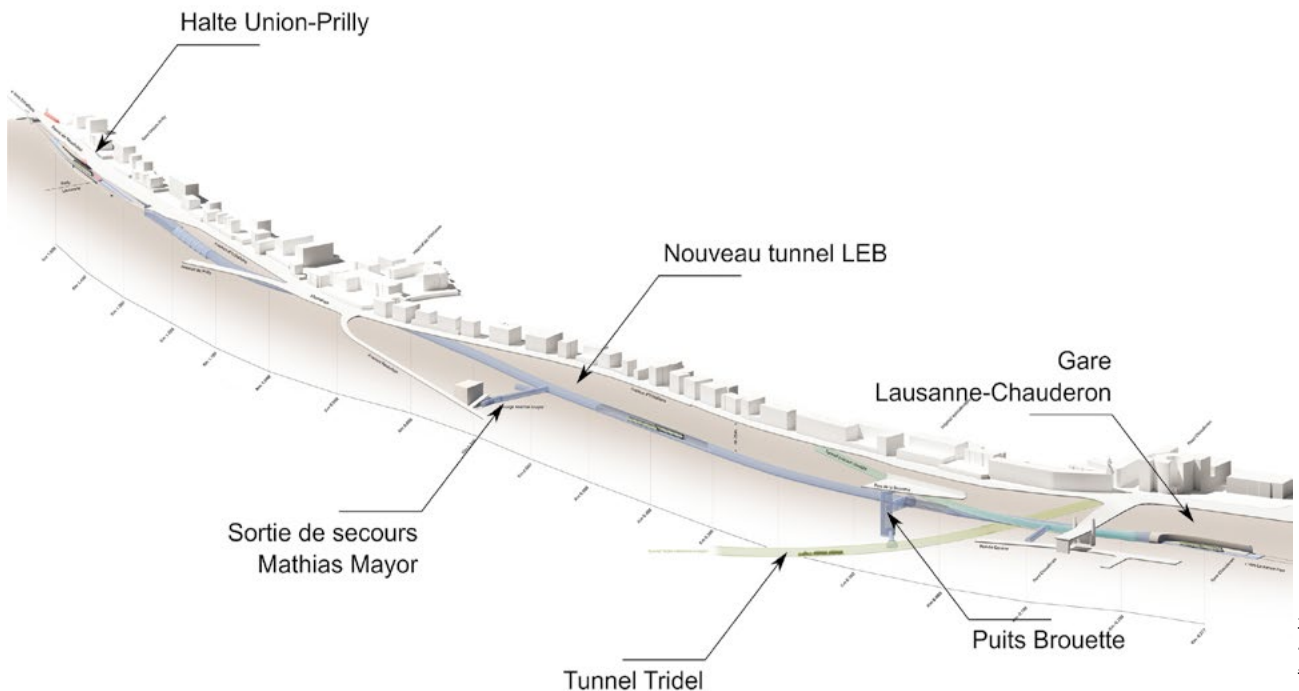
From a hydrogeological perspective, the project does not affect any water tables. Only circulating water with a very low flow rate in the cracks in the solid material is expected locally in the molasse.

Almost all of the excavation work will be carried out in the rock. Only the first part of the counter-excavation from Union-Prilly stations will be carried out in soft ground. In the banks containing the most sandstone, the compressive strength can reach 100 MPa in some areas; in the marl facies, on the other hand, we noted values less than 2 MPa. Based on abrasivity tests (Cerchar tests), the molasse rock is considered to be slightly abrasive to abrasive.

The marl is swelling. Based on tests and feedback from the m2 metro, a maximum swelling pressure of 0.5 MPa is retained for the dimensioning for a swelling potential understood to be between 3 and 10%.

2.2 Route

The entirety of the new route between Chauderon and Union-Prilly will have a double track. Three crossovers make it possible to implement the operational concept laid down by the LEB.



Crédit/credit: Architram

3 *Vue d'ensemble du projet et des ouvrages principaux*
View of the project as a whole and the main works



Crédit/credit: Maurice Schobinger

4 Excavation du puits Brouette
Excavation of the Brouette shaft

Pour des questions foncières, le tracé ferroviaire a été défini de manière à rester autant que possible sous le domaine public. Il suit ainsi l'avenue d'Echallens, à l'exception du secteur de Montétan dans lequel le tracé est dévié vers le nord afin d'éviter les difficultés géologiques décrites précédemment.

En profil en long, le tracé présente une pente constante de 5 ‰ depuis Chauderon puis monte rapidement avec une pente de 60 ‰ pour rejoindre la surface. La couverture est d'environ 15 m sur l'ensemble du tracé.

2.3 Ouvrages principaux

L'ouvrage principal est constitué du tunnel à double voie d'une longueur de 1414 m, relayé par une tranchée couverte de 64 m et une trémie de 106 m pour rejoindre la surface au niveau de la station d'Union-Prilly (fig. 3).

Deux sorties de secours sont prévues: l'une depuis la route de Genève en prolongeant l'accès pompier au-delà du tunnel existant, l'autre au droit du passage Mathias

In terms of land issues, the railway route has been defined in such a way that it remains in the public domain as far as possible. It therefore follows Avenue d'Echallens, with the exception of the Montétan section, where the route is diverted northwards to avoid the geological difficulties described above.

The route follows a constant gradient of 0.5 ‰ from Chauderon, then rises rapidly with a 6 ‰ gradient to rejoin the surface. The tunnel will have a clearance of around 15 m along the entirety of the route.

2.3 Main Construction Work

The main part of the project is made up of a double-track tunnel 1414 m in length, supplemented by a 64 m covered trench and a 106 m shaft to rejoin the surface at the level of Union-Prilly station (Fig. 3).

Two emergency exits are planned: one from Rue de Genève by extending the fire brigade access beyond the existing tunnel and the other to the right of Passage Mathias Mayor.

Mayor. Une centrale de ventilation et de désenfumage située dans le puits de la Brouette complète le dispositif de sécurité.

En phase d'avant-projet, la possibilité de réaliser une station souterraine en remplacement de la station de Montétan a été étudiée. Toutefois, au vu des coûts de réalisation élevés, de son attractivité réduite en raison de son déplacement et du projet de conversion de la ligne 9 en ligne de bus à haut niveau de service (BHNS) desservant également Chauderon, les études ont finalement été abandonnées.

2.4 Allotissement

Les travaux de génie civil sont répartis en deux lots.

- Lot GC1 : réalisation de la trémie et de la tranchée couverte à Union-Prilly ainsi que de la contre-attaque du tunnel sous-voûte parapluie; réaménagement de la station d'Union-Prilly.
- Lot GC2 : réalisation du nouveau tunnel depuis le puits Brouette (y compris aménagements intérieurs sur la totalité du linéaire); réalisation de l'issue de secours Mathias Mayor; réalisation du raccordement Chauderon.

A ventilation and smoke extraction system situated in the shaft of the Parc de la Brouette completes the safety measures.

In the planning phase, research was carried out to see whether it would be possible to replace Montétan station with an underground station. However, in view of the high development costs, its limited appeal due to its relocation and the project to convert line 9 into a bus rapid transit line also serving Chauderon, the research was eventually abandoned.

2.4 Apportionment

The civil engineering work is split into two lots:

- Lot GC1: realisation of the shaft and covered trench at Union-Prilly, as well as counter-excavating the tunnel umbrella arch; redevelopment of Union-Prilly station.
- Lot GC2: realisation of the new tunnel from the Brouette shaft (including interior fittings along the entirety of the line); realisation of the Passage Mathias Mayor emergency exits; realisation of the Chauderon junction.



5 Mise en place des cintres métalliques formant l'ogive
Implementation of the metal arches forming the ogive



Crédit/credit: Maurice Schobinger

6 Excavation de la calotte avec la haveuse Eickhoff ET 450
Excavation of the heading with the Eickhoff ET 450 roadheader

Un lot de travaux spécifique est dédié au transport par le rail et à la mise en décharge des matériaux d'excavation du lot GC2.

Tous les travaux de technique ferroviaire (dalle flottante, voie sans ballast, ligne de contact rigide, ventilation, équipements basse tension) sont regroupés dans un lot unique.

2.5 Déroulement des travaux

Les travaux ont démarré en août 2017 par l'excavation du puits Brouette. L'ouvrage profond de 42 m est l'unique accès pour les travaux de creuse du lot GC2 (fig. 4).

La position du puits ne peut être axée sur le tunnel en raison de la présence du tunnel LEB existant dont l'exploitation doit être maintenue. Un rameau horizontal a dû être excavé à très faible profondeur sous le tunnel existant et un soutènement spécifique sous forme d'ogive (fig. 5) a été mis en place à l'extrémité du rameau afin de permettre le démarrage de la creuse du nouveau tunnel.

A specific lot is dedicated to transporting the excavated material from lot GC2 and putting this in landfill.

All of the technical work related to the railway infrastructure (floating slab, ballastless track, conductor rail, ventilation, low-voltage equipment) is combined in a separate lot.

2.5 Progress of the Work

Work started in August 2017 with the excavation of the Brouette shaft. At 42 m deep, this provides the only access for the digging work in lot GC2 (Fig. 4).

The position of the shaft cannot be oriented towards the tunnel due to the presence of the existing LEB tunnel, which still needs to be used. A horizontal duct had to be excavated at a very shallow depth below the existing tunnel and a specific support in the form of an ogive (Fig. 5) was implemented at the end of the duct to enable the digging of the new tunnel to start.

Le projet mis en soumission prévoyait l'excavation de 190 m de tunnel en direction de Chauderon depuis l'extrémité du rameau, puis l'excavation du reste du tunnel en direction d'Union-Prilly jusqu'au percement en souterrain à la limite du lot GC1. Afin de rattraper divers retards ayant impacté le démarrage des travaux, le maître d'ouvrage a pris la décision de mobiliser un atelier de creuse supplémentaire afin d'avancer sur les deux fronts en même temps.

L'excavation sur le front principal en direction d'Union-Prilly est réalisée en section divisée calotte/stross. La calotte (53 m²) est excavée à l'aide d'une haveuse Eickhoff ET-450 de 120 t (fig. 6). Le stross est excavé par demi-sections verticales au moyen d'une haveuse de taille réduite (Eickhoff ET-120). La partie inférieure du radier est finalement excavée avec une fraise montée sur une pelle tunnel type Liebherr 944. Les cadences moyennes sont de l'ordre de 15 m/semaine.

Le radier contre-voûté en béton armé dimensionné pour reprendre les pressions de gonflement est bétonné à l'avancement par étapes de 12,50 m. L'utilisation d'un pont

The proposed project planned for the excavation of 190 m of tunnel towards Chauderon from the end of the duct, then the excavation of the rest of the tunnel towards Union-Prilly and the underground drilling work at the boundary of lot GC1. To make up for various delays that had an impact on the start of the work, the client decided to enlist an additional drilling company to progress on both fronts at the same time.

The main excavation work towards Union-Prilly is being carried out in a subdivided section (heading/bench). The heading (53 m²) is being excavated with the help of Eickhoff ET-450, 120 t roadheader (Fig. 6). The bench is being excavated in vertical half-sections using a small roadheader (Eickhoff ET-120). Finally, the lower part of the invert is being excavated with a rotary drum cutter attachment installed on a Liebherr 944 crawler excavator. On average, the excavation work is being completed at a rate of 15 m/week.

The reinforced-concrete invert designed to respond to the swelling pressures is being concreted in advance in 12.5 m



Crédit/credit: Maurice Schobinger

7 Ferrailage du radier contre-voûté sous le pont de franchissement
Reinforcement of the invert under the bridge



Crédit/credit: Maurice Schobinger

8 Interface entre la tranchée couverte et la contre-attaque du tunnel
Interface between the covered trench and the counter-excavation of the tunnel

de franchissement permet de ne pas pénaliser l'avancement (fig. 7).

En parallèle, les travaux du lot GC1 ont débuté par les travaux spéciaux de réalisation de l'enceinte de fouille (paroi berlinoise) des futures trémie et tranchée couverte, servant également d'appuis au futur pont provisoire. Les travaux de terrassement et de béton armé se sont poursuivis en dessous du pont provisoire. La contre-attaque du tunnel a été réalisée depuis l'extrémité de la tranchée couverte à l'abri de 6 (double-) voûtes parapluie, avec une couverture minimale de 2,50 m entre la voie ferrée existante en service et l'extrados de la voûte (fig. 8).

3 Défis des travaux en milieu urbain

3.1 Zones d'installation de chantier

Les travaux se déroulent en plein cœur de Lausanne, les surfaces disponibles pour les installations de chantier sont par conséquent extrêmement exigües et requièrent une organisation précise et efficace de la part des entreprises de construction.

sections. The use of a bridge means that progress does not have to be hindered (Fig. 7).

At the same time, the lot GC1 work started with the special work of implementing the excavation wall (soldier pile wall) for the future shaft and covered trench and as a support for the temporary bridge. The excavation and reinforced-concrete work continued under the temporary bridge. The counter-excavation of the tunnel has been implemented from the end of the covered trench to the roof of the 6 (double) pipe roof with a minimum of 2.5 m between the existing railway and the upper surface of the vault (Fig. 8).

3 Challenges of a Construction Project in an Urban Environment

3.1 Construction Site Areas

The construction work is taking place right in the heart of Lausanne and, as a result, the areas available for the sites are extremely cramped. This means that precise and efficient organisation is required from the construction companies.

Pour le lot GC2, la totalité des installations de chantier pour la creuse du tunnel sont concentrées sur une surface de 2000 m² incluant la surface occupée par le puits Brouette (diamètre intérieur 12,80 m). Les capacités de stockage en surface sont très limitées et impliquent une logistique «just in time» et un maximum de stockage en souterrain.

La protection contre les nuisances sonores générées par le chantier est également un sujet récurrent. Les travaux sont en effet exécutés en deux postes, du lundi au vendredi, et les zones d'installation sont entourées de logements. Toutes les installations de ventilation ont ainsi été intégrées dans un bâtiment isolé phoniquement permettant de réduire le niveau de bruit de plus de 10 dB.

3.2 Évacuation des matériaux d'excavation

Dès la phase d'avant-projet, une attention particulière a été portée à la problématique de l'évacuation de près de 90 000 m³ de matériaux extraits lors de la creuse. Il a été décidé de profiter de la proximité du tunnel ferroviaire reliant Sébeillon à l'usine d'incinération Tridel utilisé pour le transport des déchets ménagers pour élaborer un concept d'évacuation du matériel par le rail.

Le projet mis en soumission prévoyait déjà un approfondissement du puits Brouette d'une vingtaine de mètres et la réalisation d'une galerie provisoire entre la base du puits et le tunnel Tridel afin de stocker la production quotidienne dans un silo et de la charger dans des wagons-bennes durant la nuit au moyen d'une bande transporteuse. Ce mode d'évacuation était imposé aux soumissionnaires: l'évacuation des matériaux par camions n'est autorisée que pour des cas exceptionnels, des pénalités étant appliquées en cas de dysfonctionnement prolongé des installations de chargement sur le rail.

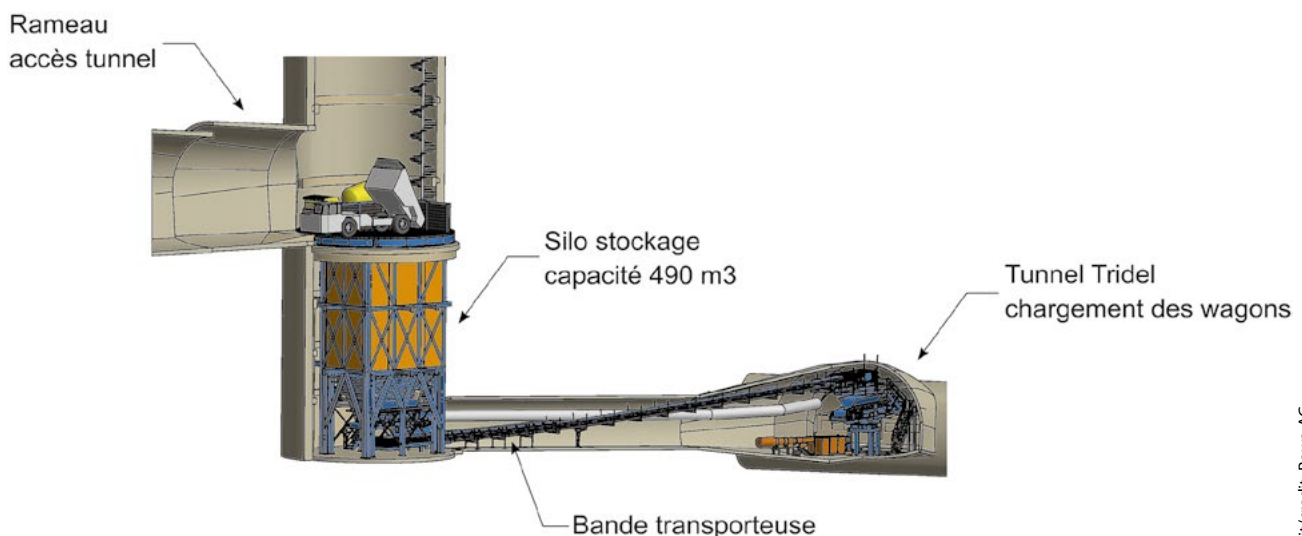
For lot GC2, all of the construction sites for digging the tunnel are concentrated in an area measuring 2000 m², including the area taken up by the Brouette shaft (internal diameter 12.8 m). The storage capacities at ground level are very limited. "Just in time" logistics therefore need to be applied and the underground storage space needs to be exploited as much as possible.

Another recurring theme is how to protect people from the noise generated by the construction sites. The work is effectively being carried out at two sites from Monday to Friday and the sites are surrounded by residential buildings. All of the ventilation installations have therefore been integrated into a sound-insulated construction, which reduces the noise level by more than 10 dB.

3.2 Removing Excavated Material

Starting during the planning phase, particular attention has been paid to the issue of removing the nearly 90,000 m³ of material excavated during the drilling process. A decision was made to take advantage of the proximity of the railway tunnel linking Sébeillon to the Tridel incineration plant used to transport household waste to come up with a concept to get rid of the material by rail.

The proposed project already included deepening the Brouette shaft by around 20 m and creating a temporary tunnel between the bottom of the well and the Tridel tunnel to store the material produced during the day in a silo and then load it into tipping wagons using a conveyor belt during the night. Bidders had to use this method: transporting material in lorries is only authorised in exceptional circumstances, with penalties being applied in the event of long-term malfunctions of the loading facilities on the railway.



9 Système de stockage et de chargement des matériaux sur le rail
System for storing material and loading it onto railway wagons



Crédit/credit: Benjamin Lhomme

10 Construction du pont provisoire mixte ferroviaire et routier à Union-Prilly
Construction of a temporary mixed-use (rail and road) bridge at Union-Prilly

Le concept minutieusement développé par le consortium IBGS et son sous-traitant Rowa dès l'élaboration de l'offre a permis la mise en place d'un système particulièrement efficace permettant de stocker 490 m³ et de charger quotidiennement plus de 1000 tonnes de matériaux (fig. 9).

Le transport et la mise en décharge des matériaux ont été adjugés à CFF Cargo. Un convoi composé de 20 wagons de type Fans-U d'une capacité de 800 m³ est à disposition du chantier. Les matériaux sont transportés jusqu'à la décharge du Lessus à Saint-Triphon.

3.3 Maintien de l'exploitation ferroviaire

L'exploitation ferroviaire ne peut être interrompue sur de longues périodes qu'au prix de mesures complexes de substitution par bus. Seules deux interruptions prolongées du trafic ferroviaire sont prévues durant le chantier. Des mesures de surveillance spécifiques sont mises en œuvre pour les travaux à proximité immédiate de la voie en exploitation.

The concept was carefully developed by the IBGS consortium and its subcontractor Rowa right from the tender preparation phase. It makes it possible to implement a particularly efficient system which allows 490 m³ of material to be stored and more than 1000 tonnes to be loaded on a daily basis (Fig. 9).

CFF Cargo were awarded the contract to transport the material and put this in landfill. A convoy made up of 20 Fans-U wagons with a capacity of 800 m³ is available to the site. The material is transported to the Lessus landfill in Saint Triphon.

3.3 Maintaining Use of the Railway

The use of the railway may only be interrupted for long periods of time on the condition that complex bus replacement measures are implemented. Only two prolonged interruptions to the rail traffic are planned for the duration of the work. Specific surveillance measures have been implemented for work in the immediate vicinity of the railway being used.

3.3.1 Interruption de trafic 2018

La circulation ferroviaire a été interrompue entre le 8 juillet et le 14 août 2018 afin de permettre la mise en place d'un pont provisoire d'une longueur de 170 m supportant la voie du LEB ainsi qu'une piste pour véhicules routiers (fig. 10). Cette structure métallique de 450 t ainsi qu'un rehaussement provisoire du profil en long de la voie ferrée permettent de réaliser la majeure partie des travaux de terrassement et de béton armé de la tranchée couverte ainsi que de la trémie en maintenant le LEB en exploitation.

3.3.2 Interruption de trafic 2021

Une interruption de trafic d'une durée de quatre mois environ est prévue en 2021 de manière à réaliser le solde des travaux de raccordement aux ouvrages existants aux deux extrémités du projet.

Il s'agira notamment de terminer les travaux d'excavation du tunnel dans le secteur Chauderon pour se raccorder en souterrain à la station existante. À Union-Prilly, l'interruption de trafic débutera par le démontage du pont provisoire, puis se poursuivra par la finalisation des travaux de gros œuvre.

Les derniers équipements ferroviaires seront également mis en place durant cette phase.

Le système de substitution mis en place avec succès lors de l'interruption de l'été 2018 sera reconduit.

3.3.3 Surveillance de l'exploitation ferroviaire

Le passage à très faible profondeur sous le tunnel LEB existant (couverture minimale inférieure à 2 m) lors de la réalisation du rameau entre le puits Brouette et le nouveau tunnel a, quant à lui, été réalisé sans interrompre la circulation des trains. Le soutènement de l'étape directement sous le tunnel existant a été dimensionné pour reprendre la totalité

3.3.1 Interruption to Traffic in 2018

The rail traffic was interrupted between 8 July and 14 August 2018 in order to erect a temporary bridge measuring 170 m in length to support the LEB track, as well as the road (Fig. 10). This 450 t metal structure, as well as the temporary raising of the longitudinal section of the railway mean that the majority of the excavation and reinforced-concrete work on the covered trench and shaft can be carried out with the LEB remaining in use.

3.3.2 Interruption to Traffic in 2021

Another four-month interruption is planned for 2021 to finish off linking the two extremities of the project to existing structures.

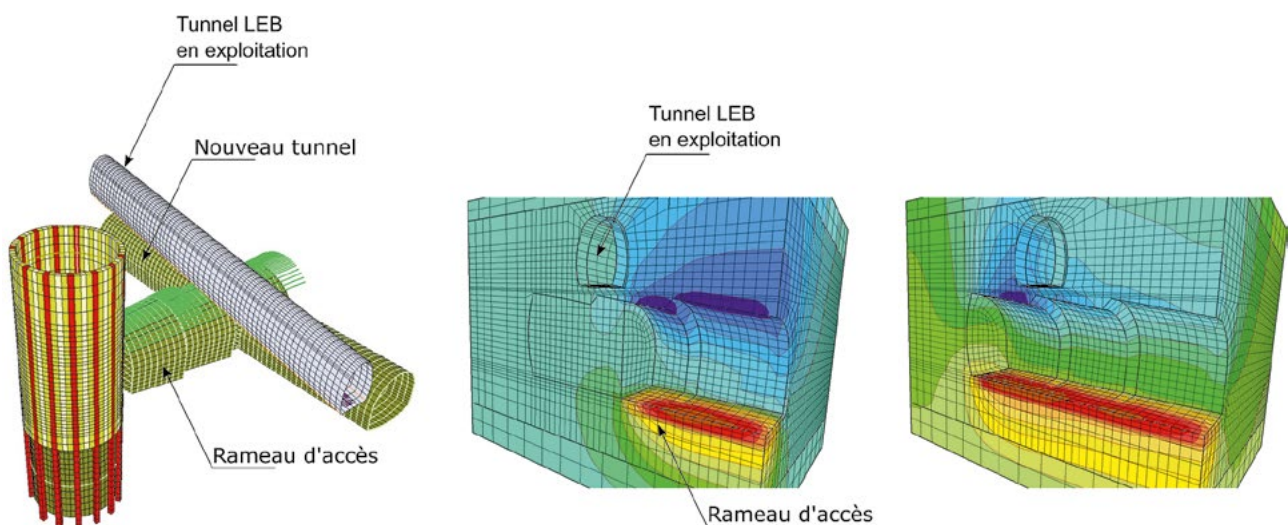
The main aim of this will be to finish the tunnel excavation work in the Chauderon area to link it up to the existing station underground. At Union-Prilly, the interruption will start with the disassembly of the temporary bridge. After this, the structural work will then be finalised.

The last pieces of railway equipment will also be installed during this phase.

The replacement bus system used successfully during the interruption in summer 2018 will be implemented once again.

3.3.3 Tracking the Use of the Railway

The very shallow passage under the existing LEB tunnel (minimum clearance less than 2 m) during the realisation of the duct between the Brouette shaft and the new tunnel was created without interrupting the rail traffic. The support for the stage directly underneath the existing tunnel was dimensioned to take the entire load from the displacement of the solid material between the two tunnels, as well as the load from the railway. The deformations to structures and



11 Modèle EF 3D pour le passage à très faible profondeur sous le tunnel LEB existant
FE 3D model for the very shallow passage under the existing tunnel

des charges de dislocation du massif situées entre les deux tunnels ainsi que la charge ferroviaire. Les déformations des structures ainsi que de la voie ferrée (en particulier gauche) ont été évaluées à l'aide d'un modèle EF 3D (fig. 11). En phase de réalisation, un système de suivi des déformations a été mis en place au niveau du tunnel existant à l'aide d'une station totale dans le premier cas, d'électro-nivelles dans le second cas. Le système de mesure était couplé à des feux provisoires permettant, si nécessaire, d'interrompre automatiquement la circulation ferroviaire en cas de dépassement des seuils définis avec l'exploitant. Le suivi des mesures a montré un comportement conforme aux prédictions. L'exploitation a pu être maintenue en tout temps.

3.4 Dégagements de gaz

Lors de l'excavation de la calotte, des émanations gazeuses ont été détectées de manière inattendue à partir du Tm 430. Le front était alors composé majoritairement de silt gréseux laissant apparaître de nombreuses veinules de charbon ainsi que des traces de pyrite (FeS₂). Les concentrations de dioxyde de soufre (SO₂) et de sulfure d'hydrogène (H₂S) dépassaient nettement les seuils autorisés aux postes de travail et définis par la SUVA (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents).

L'avancement en calotte a donc été stoppé immédiatement afin de définir conjointement entre les partenaires du projet en concertation avec la SUVA les mesures à mettre œuvre pour assurer la protection des ouvriers. Sur près de 150 m, la cadence d'avancement a significativement été réduite en raison d'arrêts fréquents pour ventiler et diluer les gaz.

Une communication spécifique a également été mise en place par le maître d'ouvrage afin de rassurer les riverains.

4 Conclusions

Malgré quelques aléas inhérents aux travaux souterrains, le chantier avance de manière satisfaisante grâce à la bonne collaboration des différents partenaires.

Sur le lot GC1, l'excavation de la contre-attaque est terminée et le radier contre-voûté est bétonné. Les travaux de béton armé dans la trémie et la tranchée couverte ont pu être finalisés début 2020. Tous les travaux restants seront réalisés après le démontage du pont provisoire lors de la prochaine interruption de l'exploitation du LEB prévue en 2021.

Sur le lot GC2, fin 2019, plus de 850 m de tunnel étaient excavés, les travaux de bétonnage du radier et des banquettes avançant en parallèle. Le percement est prévu pour juillet 2020.

Les travaux s'enchaîneront avec les aménagements intérieurs et la libération progressive du tunnel pour la mise en place des équipements ferroviaires.

La mise en service est prévue pour le 2^e semestre 2021.

the railway track (particularly the left) were evaluated using a 3D FE model (Fig. 11). In the implementation phase, a system for tracking deformations was introduced at the level of the existing tunnel with the help of a total station in the first case and electric levels in the second case. The measuring system is linked to two temporary traffic lights, which makes it possible to automatically interrupt the rail traffic if necessary if the thresholds defined with the owner are exceeded. By tracking the measures, we were able to see that the actual behaviour was in line with the predictions. This meant that the railway could continue being used at all times.

3.4 Gas Emissions

During the excavation of the heading, fumes were detected unexpectedly starting at tunnel metre 430. The front is mainly made up of sandstone silt, which means that numerous carbon venules and traces of pyrite can occur (FeS₂). The concentrations of sulphur dioxide (SO₂) and hydrogen sulphide (H₂S) considerably exceeded the thresholds authorised at places of work and those defined by the Swiss National Accident Insurance Fund SUVA (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents).

Work on the heading was therefore stopped immediately so that the project partners, together with SUVA, could define measures to be implemented to protect workers. As a result, over a length of nearly 150 m, the rate of work was reduced significantly due to frequent stops to ventilate and dilute the gas.

The client also issued a special communication to reassure area residents.

4 Conclusion

Despite some risks that are typical of work underground, the project is progressing in a satisfactory way thanks to the excellent cooperation between the various partners.

On lot GC1, the counter-excavation work is complete and the invert has been concreted. The reinforced-concrete work on the shaft and covered trench were finalised at the start of 2020. All of the remaining work will be carried out after the temporary bridge has been disassembled during the next interruption to the LEB, scheduled for 2021.

On lot GC2, 850 m of tunnel had been excavated at the end of 2019 and the concreting work on the invert and benches is progressing in parallel. The drilling work is scheduled for July 2020.

The work will be followed up by the interior installation and the gradual release of the tunnel so that the railway equipment can be installed.

It is expected that the tunnel will go into service in the second half of 2021.

DONNÉES DE PROJET

Région

Lausanne, Suisse

Client

Compagnie du chemin de fer leb SA p.a.
Transports publics de la région lausannoise

Conception, supervision du site et gestion des travaux

- Gros-œuvre et technique ferroviaire:
Groupement GIT-LEB+: Monod-Piguet (pilote),
CSD, GESTE, Karakas & Français

Exécution

Lot GC1: Frutiger

Lot GC2: Consortium IBGS: Infra Tunnel (pilote),
Bertholet+Mathis, Gasser, SIF

Evacuation des matériaux par le rail: CFF Cargo

Lot TechFer: Consortium IGCS: Implenla (pilote),
Cablex, GCF, Siemens

Données clés

Période des travaux: 2017–2021

Début des travaux: 2021

Coût des travaux: env. 60 millions de CHF
(sans technique ferroviaire
et transport des matériaux
par le rail)

Longueur: 1414 m

Section excavée: env. 70 m²

Caractéristiques particulières

Évacuation des matériaux par le rail en souterrain
par le tunnel Tridel existant

PROJECT DATA

Region

Lausanne, Switzerland

Client

Compagnie du chemin de fer leb SA,
Lausanne region public transport authority

Design, site supervision and general management of the work

- Structural work and railway infrastructure:
GIT-LEB+ consortium: Monod-Piguet (supervisor),
CSD, GESTE, Karakas & Français

Execution

Lot GC1: Frutiger

Lot GC2: IBGS consortium: Infra Tunnel (supervisor),
Bertholet+Mathis, Gasser, SIF

Removal of material by rail: CFF Cargo

Railway infrastructure: IGCS consortium:
Implenla (supervisor), Cablex, GCF, Siemens

Key data

Duration: 2017–2021

Commissioning: 2021

Tunnel

construction costs: approx. 60 million CHF
(excluding railway infra-
structure and the trans-
portation of material
by rail)

Total length: 1,414 m

Excavated cross-section: 70 m²

Distinctive characteristics

Removal of material by rail underground via the
existing Tridel tunnel



Ausbau Bahnhof Bern RBS

Herausfordernder städtischer Tunnelbau

Marco Ramoni, Dr. sc. dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH
Stephan Reiling, dipl. Bau-Ing. FH, Projektmanagementfachmann (GPM/IPMA Level D), B+S AG, Bern/CH
Simon Lerch, dipl. Bau-Ing. FH, Executive MBA BFH, Emch+Berger AG, Bern/CH

Ausbau Bahnhof Bern RBS

Herausfordernder städtischer Tunnelbau

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» beinhaltet den Neubau eines unterirdischen Bahnhofs und seiner Zulaufstrecke. Der neue RBS-Bahnhof besteht aus zwei 200 m langen, 26 m breiten und 17 m hohen Bahnhofskavernen, die 12 m unterhalb der bestehenden Gleise des Hauptbahnhofs Bern liegen. Die 1,5 km lange Zulaufstrecke weist unterschiedliche Querschnitte auf und wird sowohl im Untertags als auch im Tagbau erstellt.

Expansion of Bern RBS Station

Challenging Urban Tunnel Construction

The project «Expansion of Bern RBS Station» involves building a new underground station as well as the railway line for accessing it. The new RBS Station consists of two 200 m long, 26 m wide and 17 m high station caverns, which lie 12 m underneath the existing railway tracks of Bern Central Station. The 1.5 km access railway line has different cross sections and runs both underground and above ground (open cut).

1 Einleitung

Die Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS) realisiert zurzeit das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» [1] [2]. Dabei handelt es sich um den Bau eines neuen unterirdischen Bahnhofs, bestehend aus zwei Bahnhofskavernen – für jeweils zwei Gleise (Meterspur) und einen mittig angeordneten Perron – sowie dessen Zulaufstrecke (Bild 1). Der Ausbau der RBS-Infrastruktur ist erforderlich, weil der bestehende RBS-Bahnhof die Grenzen seiner Kapazität erreicht hat: Der 1965 eröffnete RBS-Bahnhof war für 16 000 Reisende/Tag konzipiert und wird aktuell von 60 000 Reisenden/Tag frequentiert [3] [4]. Sowohl der bestehende als auch der neue RBS-Bahnhof befinden sich unterhalb der Gleise des Hauptbahnhofs Bern.

Der Hauptbahnhof Bern ist mit 250 000 Reisenden/Tag der zweitgrösste Bahnhof der Schweiz [3] und wird zurzeit im Rahmen des Projektes «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern» von der Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) ausgebaut [2]. Dabei wird unter anderem eine neue Personenunterführung (die sogenannte Unterführung Mitte) gebaut, die sich teilweise oberhalb des neuen RBS-Bahnhofs befindet (Bild 1). Die zwei Projekte «Ausbau Bahnhof Bern RBS» und «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB» werden parallel entwickelt und in etwa zeitgleich realisiert, sodass zahlreiche planerische und ausführungstechnische Schnittstellen in der Planung und in der Ausführung zu berücksichtigen sind.

1 Introduction

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) is currently implementing the project «Expansion of Bern RBS Station» [1] [2]. It involves building a new underground station consisting of two station caverns – for two tracks (metre gauge) each and a platform arranged in between – as well as the access line to the new station (Fig. 1). The RBS infrastructure needs to be expanded as the existing RBS Station has reached its capacity: The RBS Station opened in 1965 and was designed for 16,000 passengers per day, but now 60,000 passengers pass through every day [3] [4]. Both the existing and the new RBS Station are located below the tracks of Bern Central Station.

Bern Central Station is the second largest station in Switzerland with 250,000 passengers per day [3] and is currently being expanded by Swiss Federal railways (SBB) within the scope of the project «Expansion of Bern Station public facilities» [2]. This involves, among other things, building a new pedestrian underpass (the so-called Unterführung Mitte), part of which lives above the new RBS Station (Fig. 1). The two projects «Expansion of Bern RBS Station» and «Expansion of Bern SBB Station public facilities» are developed in parallel and implemented more or less at the same time, meaning that numerous factors have to be taken into consideration during design and construction.

Extension de la gare RBS de Berne

Les défis de la construction d'ouvrages souterrains en milieu urbain

Tous les ouvrages souterrains sont réalisés près de la surface et dans des conditions urbaines exigeantes. Les travaux se déroulent principalement en roche tendre et parfois en terrain meuble aquifère. Ils sont rendus complexes par une faible couverture et de fortes charges de fondation au-dessus, mais aussi par leur réalisation, pour partie, au milieu ou près de structures existantes, parfois en parallèle à d'autres projets, le tout sans interruption de l'exploitation des infrastructures ferroviaires de la gare centrale de Berne ou du transport régional RBS. Ils requièrent des solutions spécifiques, mûrement réfléchies et parfois peu communes – comme la congélation du sol, l'étalement d'un bâtiment ou la disposition d'une armature de cisaillement dans le béton projeté utilisé pour le soutènement provisoire.

Ampliamento della stazione RBS di Berna

Le sfide della costruzione di opere sotterranee in ambito urbano

Tutte le opere sotterranee sono realizzate vicino alla superficie e in presenza di condizioni urbane impegnative. Le opere si trovano principalmente in roccia tenera e in parte in materiale sciolto acquifero. L'esecuzione con copertura ridotta e al di sotto di fondazioni con alti carichi, in parte all'interno o in vicinanza di strutture già esistenti, parallelamente ad altri progetti di ampliamento e con la struttura ferroviaria esistente della stazione centrale di Berna e di RBS in funzione, è impegnativa e richiede soluzioni specifiche, pensate nel dettaglio e, talvolta, inconsuete – come ad esempio il congelamento del terreno, la sottofondazione di un edificio o la disposizione di un'armatura di taglio nel calcestruzzo spruzzato utilizzato per la messa in sicurezza dello scavo.

Nach einer Projektübersicht (Kapitel 2) befasst sich der vorliegende Beitrag mit den einzelnen Abschnitten sowie mit ausgewählten Herausforderungen des Projektes «Ausbau Bahnhof Bern RBS» aus Sicht des Projektverfassers (Kapitel 3–5).

2 Projektübersicht

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» gliedert sich in neun Abschnitte (Bild 2):

1. RBS-Bahnhof (Neubau);
2. Bahnhofeinfahrt;
3. Eilgutareal;
4. Henkerbrännli;
5. Bierhübeli;
6. Wildpark;
7. Schanzentunnel (Bestand, Zufahrtstunnel);
8. Schanzentunnel (Bestand, Ausserbetriebnahme);
9. RBS-Bahnhof (Bestand, Ausserbetriebnahme).

Der Abschnitt 1 (Kapitel 3) besteht aus dem neuen RBS-Bahnhof mit seinen Nebenbauwerken. Die Abschnitte 2–7 (Kapitel 4) bilden die Zulaufstrecke zum neuen RBS-Bahnhof aus. Die Abschnitte 8–9 (Kapitel 5) betreffen die Ausserbetriebnahme der nicht mehr benötigten Teile der bestehenden RBS-Infrastruktur.

3 RBS-Bahnhof (Neubau) – Abschnitt 1

3.1 Bahnhofskavernen

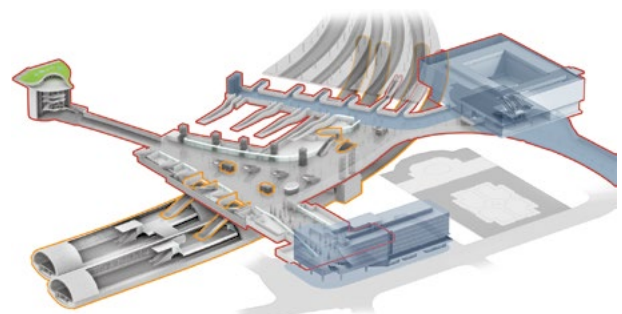
Die Hauptobjekte des Abschnitts 1 sind die zwei Bahnhofskavernen, die 200 m (Nordkaverne) respektive 210 m (Südkaverne) lang, 26 m breit und 17 m hoch sind und einen Abstand zueinander von 5–10 m aufweisen (Bild 3 und Bild 4). Die sich darin befindenden, 12 m breiten Perrons liegen

After a project overview (Chapter 2), this report outlines the individual sections as well as selected challenges of the project «Expansion of Bern RBS Station» from the point of view of the project engineer (Chapters 3–5).

2 Project Overview

The project «Expansion of Bern RBS Station» is divided into nine sections (Fig. 2):

1. RBS Station (new);
2. Station entrance;
3. Eilgutareal;
4. Henkerbrännli;
5. Bierhübeli;

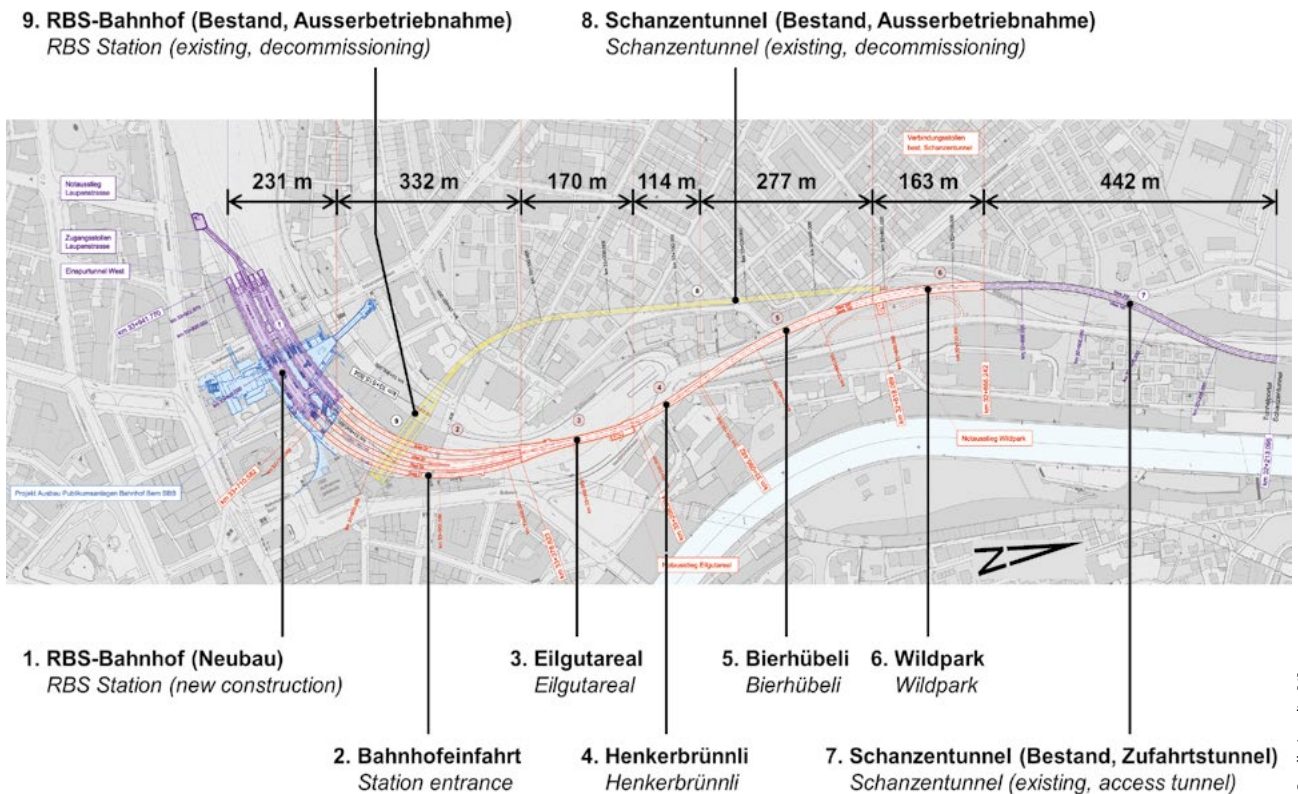


— Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB
Upgrade public facilities Bern Station SBB

— Ausbau Bahnhof Bern RBS
Upgrade Bern Station RBS

1 Projekte «Ausbau Publikumsanlagen Bahnhof Bern SBB» und «Ausbau Bahnhof Bern RBS» – Visualisierung
Projects «Expansion of Bern RBS Station» and «Expansion of Bern SBB station public facilities» – visualisation

Quelle/credit: [2]



2 Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» – Abschnitte (Situation)
Project «Expansion of Bern RBS Station» – sections (situation)

23 m unterhalb der südlichen Gleise (1–8) des Hauptbahnhofs Bern respektive 17 m unterhalb der neuen SBB-Personenunterführung. Aus diesen Niveaudifferenzen resultiert eine Überdeckung der Bahnhofskavernen im First von 12 m respektive 6 m. Die Höhenlage der Bahnhofskavernen ergibt sich einerseits aus der statisch erforderlichen Überdeckung und andererseits aus dem Ziel möglichst kurzer Umsteigezeiten.

Im Projektperimeter sind mehrere setzungempfindliche Objekte vorhanden, die durch die Bahnhofskavernen unterquert werden. Die Bahnhofskavernen sind im Grundriss so platziert, dass die Lasten aus den darüber liegenden Objekten möglichst symmetrisch auf den Ausbau der Bahnhofskavernen einwirken. Die zu unterquerenden Hauptobjekte sind (von Westen nach Osten, Bild 3):

- die Fussgängerüberquerung «Welle von Bern» (ein Bauwerk aus Holz, Stahl und Glas);
- die Strassenbrücke «Schanzenbrücke», welche die Bahn- gleise der SBB überspannt; die Betonbrücke hat eine Gesamtlänge von 107 m und ist in vier Felder mit einer Spannweite von 16–33 m unterteilt; der Abstand zwischen dem First der Bahnhofskavernen und den Brückenfundamenten beträgt 5–10 m;
- das sogenannte Posttunnelsystem, welches früher von der Post genutzt wurde und heute als Logistikweg und Lagerfläche dient; der Abstand zwischen dem First der Bahnhofskavernen und den unterirdischen Bauwerken des Posttunnelsystems beträgt 2 m;

- 6. Wildpark;
- 7. Schanzentunnel (existing, to be access tunnel);
- 8. Schanzentunnel (existing, to be decommissioned);
- 9. RBS Station (existing, to be decommissioned).

Section 1 (Chapter 3) consists of the new RBS Station and its ancillary structures. Sections 2–7 (Chapter 4) form the access line to the new RBS Station. Sections 8–9 (Chapter 5) relate to the decommissioning of the parts of the existing RBS infrastructure that are no longer needed.

3 RBS Station (new) – Section 1

3.1 Station Caverns

The main objects of Section 1 are the two station caverns, which are 200 m (north cavern) and 210 m (south cavern) long, 26 m wide and 17 m high and spaced apart by 5–10 m (Figs 3 and 4). The 12 m wide platforms in the station caverns lie 23 m below the southern tracks (1–8) of Bern Central Station and 17 m below the new SBB pedestrian underpass, respectively. These level differences result in 12 m to 6 m cover above the crown sections of the station caverns. The elevation of the station caverns is on the first hand based on the shortest possible time which is required to change trains and on the other hand to cope with the static requirements (structurally required cover).

The area surrounding the construction site includes numerous objects and structures that are susceptible to settlement and that are undercut by the station caverns. Viewed from above,

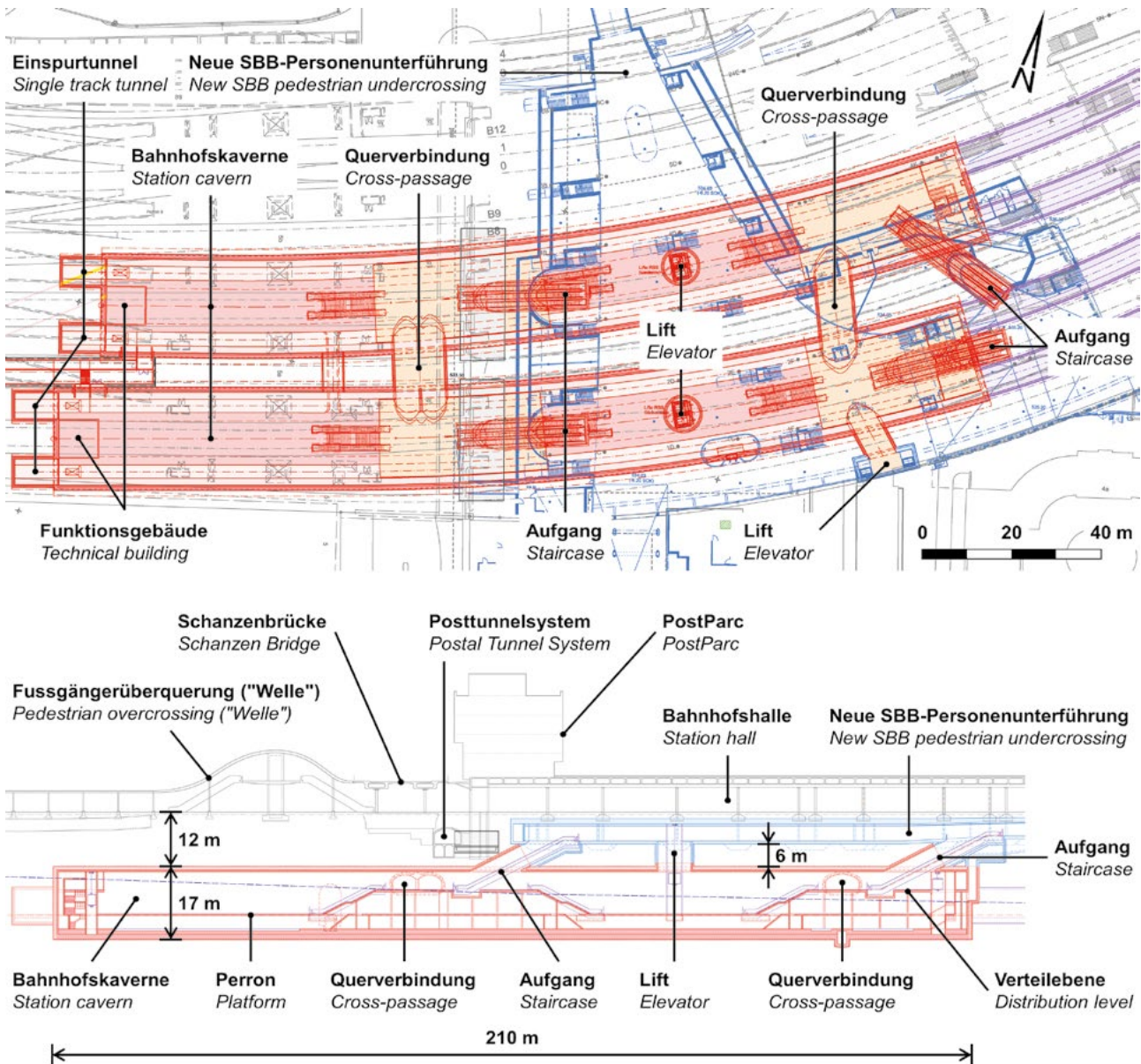
- der sogenannte PostParc (Kapitel 3.5);
- die Bahnanlagen und die Bahnhofshalle (deren Decke eine mit Vollstahlstützen getragene Betonplatte ist) des Hauptbahnhofs Bern.

Für den Personenfluss in und zwischen den Bahnhofskavernen sind sogenannte Verteilebenen vorgesehen, die durch zwei Querverbindungen miteinander verbunden sind (Bild 3). Ferner sind beide Bahnhofskavernen mit jeweils zwei Aufgängen und einem Lift mit der neuen SBB-Personenunterführung verbunden. Ein weiterer Lift im südöstlichen Bereich ermöglicht eine direkte Verbindung zur Postautostation, die sich oberhalb des Hauptbahnhofs Bern befindet.

Unterhalb der Perrons sind zahlreiche technische Räume vorgesehen (Bild 4). Ferner befindet sich ein sogenanntes

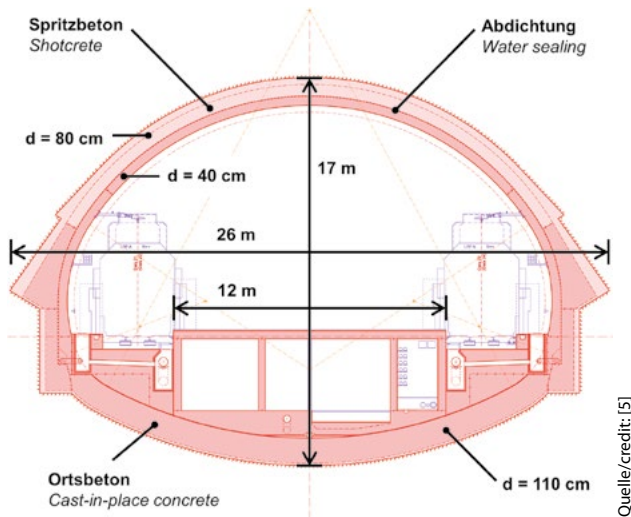
the station caverns are placed such that the loads from the objects and structures located above act as symmetrically as possible on the lining of the station caverns. The main objects and structures to be undercut are (from west to east, Fig. 3):

- the pedestrian overpass «Welle von Bern» (a structure made of wood, steel and glass);
- the road bridge «Schanzenbrücke», which extends over the SBB railway tracks; the concrete bridge is 107 m long in total and is divided into four spans measuring 16–33 m each; the distance between the roof of the station caverns and the bridge foundations is 5–10 m;
- the so-called Posttunnelsystem (postal tunnel system), which was used formerly by the postal service and which today serves as a logistics route and storage space; the distance between the roof of the station caverns and the underground structures of the postal tunnel system is 2 m;



3 Bahnhofskavernen – Situation (oben) und Längsschnitt (unten)
Station caverns – situation (top) and longitudinal section (bottom)

Quelle/Credit: [5]



Quelle/Credit: [5]

4 Bahnhofskavernen – Normalprofil Station caverns – standard cross section

Funktionsgebäude am westlichen Ende jeder Bahnhofskaverne (Bild 3).

Zur Sicherstellung einer späteren Erweiterung (unter Betrieb) zu einem Durchgangsbahnhof sind auf der Westseite der Bahnhofskavernen bei allen Gleisen 10 m lange Einspurtunnel als Anschlussmöglichkeit für die allfällige Zufahrtsstrecke West vorgesehen (Bild 3). Im Endzustand des vorliegenden Projektes (Kopfbahnhof) beherbergen die Einspurtunnel die Prellböcke.

Die Bahnhofskavernen befinden sich vollumfänglich in der Unteren Süsswassermolasse, die vorwiegend aus Sandsteinschichten und aus fein geschichteten Wechsellagerungen von Sandstein, Feinsandstein, Siltstein und Mergel besteht. Die Felsoberfläche kann mit glazialen Abflussrinnen und Kolken (aufgefüllte Gletschermühlen) durchzogen sein. Die Bahnhofskavernen befinden sich teilweise unterhalb des Bergwasserspiegels.

Um die Erschütterungen und die bautechnischen Risiken möglichst zu minimieren, erfolgt der Vortrieb der Bahnhofskavernen hauptsächlich mittels Teilschnittmaschine und in mehreren Teilausbrüchen respektive Arbeitsschritten (Bild 5):

1. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des oberen Teils beider Paramentstollen;
2. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des unteren Teils beider Paramentstollen;
3. Betonieren eines Widerlagers (Ortbeton, $d = 50$ – 165 cm) in beiden Paramentstollen;
4. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton und Gitterträger, $d = 30$ cm) des oberen mittleren Teils der Kalotte;
5. Abbruch der Zwischenwände und parallele Verstärkung der Ausbruchsicherung (Spritzbeton und Gitterträger, von $d = 30$ cm auf $d = 80$ cm) der gesamten Kalotte;
6. Ausbruch des unteren mittleren Teils der Kalotte (Kern) und paralleler Abbruch der Zwischenwände;
7. Ausbruch des mittleren Teils der Strosse;

- the so-called PostParc (Chapter 3.5);
- the railway facilities and the station hall (the ceiling of which is a concrete slab supported by solid steel columns) of Bern Central Station.

So-called distribution levels that are interconnected by means of two cross-passages are intended for the flow of pedestrians in and between the station caverns (Fig. 3). Furthermore, both station caverns are connected via two staircases and one elevator each to the new SBB pedestrian underpass. Another elevator in the south-western portion of the new RBS Station provides a direct connection to the Post Bus Station, which is located above Bern Central Station.

Numerous technical rooms are provided below the platforms (Fig. 4). Moreover, a so-called functional building is located at the western end of each station cavern (Fig. 3).

In order to allow for future extension (with ongoing operation) to a through station, 10 m long single-track tunnels are provided on the western side of the station caverns as a way to join the possible western access line (Fig. 3). In the finished state of the present project (terminal station), the single-track tunnels house the buffer stops.

The station caverns are located entirely within the Lower Freshwater Molasse, which primarily consists of layers of sandstone and thin alternating layers of sandstone, fine sandstone, siltstone and marlstone. The rock surface may be scoured with glacial drainage channels and potholes (filled in glacier mills). The station caverns are located partially below the groundwater level.

In order to minimise tremors and constructional risks as far as possible, the station caverns are mainly excavated using a roadheader and in several partial excavation work steps (Fig. 5):

1. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the upper portion of both side-wall tunnels;
2. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the lower portion of both side-wall tunnels;
3. Concreting of an abutment (concrete cast in-situ, $d = 50$ – 165 cm) in both side-wall tunnels;
4. Excavation and support (shotcrete and lattice girder, $d = 30$ cm) of the upper portion of the top heading;
5. Demolition of the dividing walls and simultaneous reinforcement of the excavation support (shotcrete and lattice girder, from $d = 30$ cm to $d = 80$ cm) of the entire top heading;
6. Excavation of the lower-middle portion of the top heading (core) and simultaneous demolition of the dividing walls;
7. Excavation of the middle part of the bench;
8. Excavation and support (shotcrete, $d = 25$ cm) of the lateral portions of the bench and simultaneous concreting of the outer walls (concrete cast in-situ, $d = 55$ cm) of the bench;
9. Excavation of the floor and simultaneous concreting of the invert (concrete cast in-situ, $d = 110$ cm).

8. Ausbruch und Sicherung (Spritzbeton, $d = 25$ cm) der seitlichen Teile der Strosse und paralleles Betonieren der Aussenwände (Ortbeton, $d = 55$ cm) der Strosse;
9. Ausbruch der Sohle und paralleles Betonieren des Sohlgewölbes (Ortbeton, $d = 110$ cm).

Die Abschlagslänge ist beschränkt auf 1–2 m für die Parameterstollen und die Kalotte, auf 3,5 m für die seitlichen Teile der Strosse und auf 5 m für den mittleren Teil der Strosse und die Sohle. Je nach erforderlichem Sicherungstyp wird die Ausbruchsicherung mit Ankern entlang der Ausbruchlaibung ergänzt. Wo vorausseilende Massnahmen erforderlich sind, sind Spiessschirme und eine Ortsbrustankerung vorgesehen. In Bereichen mit hohen Lasten und/oder geringen Baugrundfestigkeiten werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt.

Im Rahmen der Aushubarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung werden die heute flach fundierten Stahlstützen der Bahnhofshalle des Hauptbahnhofs Bern mittels Mikropfählen abgefangen. Die Länge der Mikropfähle, die sich oberhalb der Bahnhofskavernen befinden, wurde so beschränkt, dass ein Mindestabstand zwischen Mikropfahlspitzen und Ausbruchsicherung von mindestens 1 m eingehalten wird. Die von den Mikropfählen abzutragenden Lasten betragen bis zu 15 MN (auf Dimensionierungsniveau). Aus der Nähe zu den Bahnhofskavernen und dem Betrag der Lasten ergibt sich die (nicht übliche) Notwendigkeit der Anordnung einer Schubbewehrung in der Ausbruchsicherung der Bahnhofskavernen in den Bereichen unterhalb der Mikropfähle. Ferner gilt die Bedingung, dass das Kalottengewölbe der Bahnhofskavernen (Ausbruchsicherung, $d = 80$ cm) vollumfänglich tragfähig sein muss, bevor die SBB-Abfangungen belastet und die Aushubarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung gestartet werden dürfen. Damit kann sichergestellt werden, dass die Lasten von der Tragstruktur der Bahnhofskavernen aufgenommen werden können und dass die Mikropfähle nicht unterfahren werden müssen.

Die Querverbindung Ost (Bild 3) ist 8,8 m breit und 5,5 m hoch. Sie wird im Vollausbau ausgebrochen. Die Querverbindung West ist aufgrund der Anforderungen aus der Personenhydraulik breiter und wird aus statischen Gründen als Brillenprofil mit einer gesamten Breite von 12,4 m und einer Höhe von 5,3 m realisiert. Der Vortrieb erfolgt in drei Etappen (zuerst der Mittelstollen inkl. Ausbildung der Stützkonstruktion und anschliessend die zwei Seitenstollen).

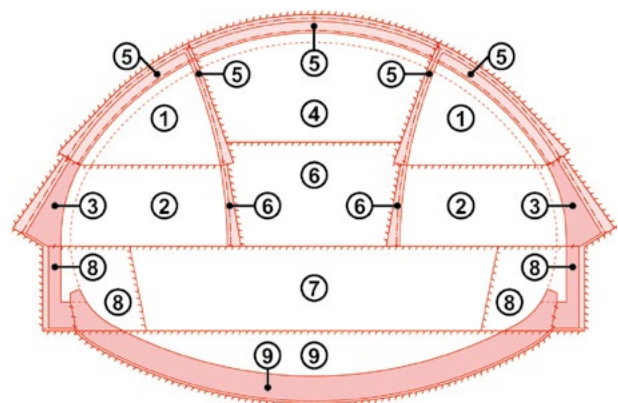
Die vier Aufgänge und die zwei Liftschächte (Bild 3), welche die Bahnhofskavernen mit der neuen SBB-Personenunterführung verbinden, werden aus Gründen der Arbeitssicherheit nur zu einem kleinen Teil im Untertagbau ausgebrochen. Dies erfolgt in kurzen Etappen und mit sofortiger Sicherung nach Fertigstellung des Kalottengewölbes der Bahnhofskavernen. Das Kalottengewölbe wird beim Vortrieb an diesen Stellen verstärkt, um den späteren Durchbruch der Aus-

The round length is limited to 1–2 m for the side-wall tunnels and the top heading, 3.5 m for the lateral portions of the bench and 5 m for the middle portion of the bench and for the floor. Depending on the type of support required, the excavation support is supplemented by rock bolts along the excavated profile. Where anticipatory measures are required, spiles umbrellas and face bolting shall be provided. In regions of high loads and/or low rock mass strength, the top heading abutments are reinforced with micropiles.

Within the scope of the excavation work for the new SBB pedestrian underpass, the stanchions of the station hall of Bern Central Station – which now have flat foundations – are supported by micropiles. The length of the micropiles, which are located above the station caverns, has been limited so as to keep a minimum distance of at least 1 m between the tips of the micropiles and the excavation support. The maximum load to be carried by the micropiles is 15 MN (at dimensioning level). Unusually, due to the proximity to the station caverns and the magnitude of the loads, shear reinforcement has to be provided in the excavation support of the station caverns in the regions below the micropiles. Furthermore, it is crucial that the top heading vault of the station caverns (excavation support, $d = 80$ cm) is fully capable of supporting loads before the SBB supports can be loaded and before the excavation work for the new SBB pedestrian underpass can be started. In this way, it can be ensured that the loads can be absorbed by the support structure of the station caverns and that the micropiles do not have to be underpinned.

The east cross-passage (Fig. 3) is 8.8 m wide and 5.5 m high. It is excavated by means of full-face excavation. The west cross-passage is broader on account of pedestrian dynamics requirements and, for static reasons, is designed as an «eyewear profile» with a total width of 12.4 m and a height of 5.3 m. Excavation takes place in three stages (firstly the central tunnel incl. formation of support structure and then the two side tunnels).

The four staircases and the two elevator shafts (Fig. 3), which connect the station caverns to the new SBB pedestrian



5 Bahnhofskavernen – Teilausbrüche/Arbeitsschritte (Querschnitt)
Station caverns – partial excavations/work steps (cross section)

Quelle/credit: [5]



6 Bahnhofskavernen – Visualisierung des Gewölbes mit rippenartiger Struktur
Station caverns – visualisation of the vault with rib-like structure

bruchsicherung zu ermöglichen. Der grössere Teil des Ausbruchs der Aufgänge und der Liftschächte erfolgt im Tagbau von oben nach unten im Rahmen der Bauarbeiten für die neue SBB-Personenunterführung. Der Liftschacht für die Verbindung zur Postautostation wird vollumfänglich von oben nach unten ausgebrochen.

Die Bahnhofskavernen werden teilabgedichtet. Der Ausbau ist zweischalig im Gewölbe und einschalig in der Sohle (Bild 4). Die Querverbindungen, die Aufgänge und die Liftschächte, die sich oberhalb der Bergwasserdrainage der Bahnhofskavernen befinden, werden voll abgedichtet und vollumfänglich zweischalig ausgebaut. Dasselbe gilt für die Einspurtunnel auf der Westseite der Bahnhofskavernen sowie für den Liftschacht zur Postautostation.

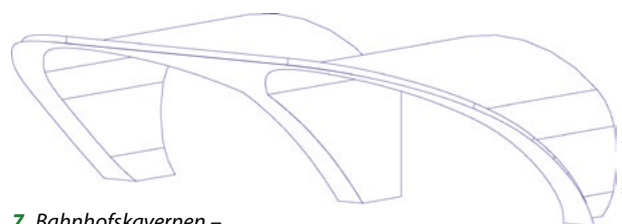
Das Gewölbe der Bahnhofskavernen wird in Ortbeton ausgeführt ($d = 40 \text{ cm}$, Bild 4), wobei die Oberfläche eine rippenartige Struktur hat (Bild 6). Die Rippen sind 33 cm breit und 12 cm tief. In ihren 67 cm breiten Zwischenräumen nimmt die Rippenstruktur Lichttechnik, Brandmelder und Akustik-elemente auf. Eine solche langfristig sichtbare Oberflächenstruktur ist im Untertagbau nicht üblich. Ihre Realisierung ist sehr anspruchsvoll und stellt hohe Anforderungen insbesondere an die einzusetzende Schalung. Zwecks sauberer Abschlussdetails sind bei den Gewölbeverschnidungen Stahleinfassungen vorgesehen (Bild 7).

3.2 Schacht Laupenstrasse

Der Schacht und der Stollen Laupenstrasse (Kapitel 3.3), die sich westlich der Bahnhofskavernen befinden (Bild 8), dienen einerseits als Angriffsstelle in der Bauphase und andererseits

underpass, are only excavated underground to a limited extent for occupational safety reasons. This takes place in short stages, with support measures implemented immediately and after completion of the top heading vault of the station caverns. The top heading vault is reinforced at these points during excavation in order to allow for dismantling of the excavation support at a later time. The majority of the excavation work on the staircases and elevator shafts takes place above ground from top to bottom during the construction works for the new SBB pedestrian underpass. The elevator shaft for the connection to the Post Bus Station is excavated exclusively from top to bottom.

The station caverns are partially waterproofed. The lining consists of two layers in the vault and one layer in the invert (Fig. 4). The cross-passages, staircases and elevator shafts, which are located above the groundwater drainage system of the station caverns, are fully waterproofed and have double-layered lining. The same applies to the single-track tunnels on the western side of the station caverns and to the elevator shaft to the Post Bus Station.



7 Bahnhofskavernen – Stahleinfassung für die Querverbindung West
Station caverns – steel edging for the west cross-passage

als Logistik- und Fluchtweg/Notausstieg in der Betriebsphase. Ferner beherbergen sie diverse Teile der Brandlüftung. Der Schacht ist 21 m lang, 14 m breit und 17 m tief. Die Geometrie des Schachtes ist durch die bestehenden Gebäude im Süden, die Parzellengrenze im Osten, die Gleise im Norden sowie die Freihaltezone für einen allfälligen Schanzentunnel (Strassentunnel) im Westen gegeben.

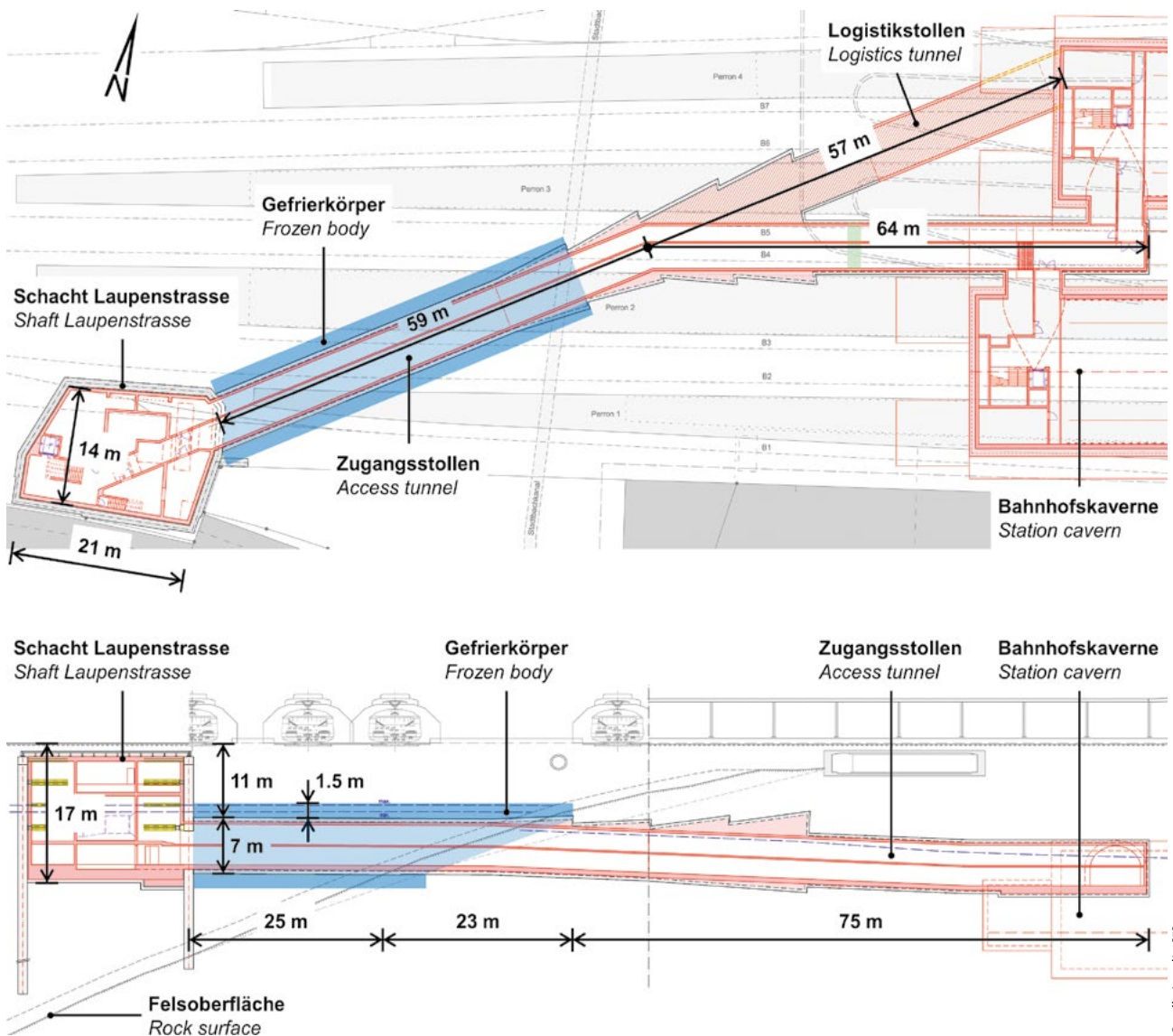
Der Schacht liegt im wasserführenden Lockergestein (Bild 8). Dabei handelt es sich vorwiegend um glaziale und fluvioglaziale Ablagerungen (Rückzugsschotter, Rückstausedimente und Moränenablagerungen) sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. In diesem Bereich befindet sich der Grundwasserspiegel 8 m unterhalb der Geländeoberkante.

Die Baugrubensicherung des Schachtes besteht aus 1 m dicken Schlitzwänden. Die Baugrube ist mit fünf Spriesslagen

The vault of the station caverns is concrete cast in-situ ($d = 40$ cm, Fig. 4), with the surface having a rib-like structure (Fig. 6). The ribs are 33 cm wide and 12 cm deep. The rib structure houses lighting technology, fire detectors and acoustic elements in the 67 cm wide intermediate spaces. A long-term visible surface structure of this kind is uncommon in underground construction. It is very challenging to produce and places high demands on the formwork to be used, in particular. Steel edgings are provided for the vault intersections in order to ensure clean finishing details (Fig. 7).

3.2 Laupenstrasse Shaft

The Laupenstrasse Shaft and Tunnel (Chapter 3.3), which are located to the west of the station caverns (Fig. 8), serve as an access point during the construction phase and as a logistics and escape route/emergency exit during the operational phase. They also house various fire ventilation elements. The shaft is 21 m long, 14 m wide and 17 m deep. The geometry of



8 Schacht und Stollen Laupenstrasse – Situation (oben) und Längsschnitt (unten)
Laupenstrasse Shaft and Tunnel – situation (top) and longitudinal section (bottom)

(Bild 9) sowie einer Spriessplatte aus Stahlbeton ausgesteift. Die fünfte Spriesslage wird nur im Bauzustand benötigt, bis die Spriessplatte betoniert ist. Nachher wird sie ausgebaut, um eine ausreichende lichte Höhe für die Ausführung der nachfolgenden Untertagarbeiten (Stollen Laupenstrasse und Bahnhofskavernen) gewährleisten zu können.

Der Schacht liegt aufgrund der beengten Platzverhältnisse teilweise unter bestehenden Gleisen (inkl. Weiche), die nicht über die gesamte Bauzeit gesperrt werden können. Deshalb ist über die Bauzeit des neuen RBS-Bahnhofs eine temporäre Hilfsbrücke erforderlich (Bild 10). Die Hilfsbrücke hat eine Spannweite von 24 m und ist 8 m breit (um ausreichend Platz für zwei Gleise mit Gleisabstand von 4 m zu bieten). In Längsrichtung werden die Lasten über einen Fachwerkträger (Südseite, oberhalb der Schachtöffnung) und direkt in die Schlitzwand (Nordseite) abgetragen. In Querrichtung besteht die Hilfsbrücke aus einer Verbundkonstruktion (Stahlquerträger mit darauf liegenden Betonplatten). Für den Endzustand wird die Schachtdecke als Bahnbrücke ausgebildet.

3.3 Stollen Laupenstrasse

Der Stollen Laupenstrasse hat im Regelquerschnitt einen Durchmesser von 7 m (Lockergesteinsstrecke) respektive 6,7 m (Felsstrecke) und unterfährt das SBB-Gleisfeld mit einer Überdeckung von 11 m (Bild 8). Er besteht aus zwei Teilen:

- Der sogenannte Zugangsstollen ist 123 m lang und wird sowohl im Bau- als auch im Endzustand benötigt. Die An-



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS/vebinder

9 Schacht Laupenstrasse (Blickrichtung West)
Laupenstrasse Shaft (looking west)

the shaft is defined by the buildings to the south, the plot borders to the east, the tracks to the north and the zone reserved for the possible Schanzentunnel (road tunnel) to the west.

The shaft is made in water-bearing soils (Fig. 8). These are mainly glacial and fluvioglacial deposits (glacial retreat gravel, ice-dammed lake deposits and moraine deposits) as well as artificial backfilling close to the surface. In this region, the groundwater level is 8 m below the surface.

The excavated shaft is supported by 1 m thick slotted walls. The construction trench is shored up by five layers of struts (Fig. 9) and a strut slab made of steel-reinforced concrete. The fifth layer of struts is only needed during construction until the strut slab has been concreted. It is then removed in order to ensure a sufficient clear height for the subsequent underground works (Laupenstrasse Tunnel and station caverns).

Due to limited amount of space available, part of the shaft is under existing tracks (incl. switch point), which cannot be closed off for the entire construction period. Therefore, a temporary bridge is required over the entire construction time of the new RBS Station (Fig. 10). The temporary bridge has a span of 24 m and a width of 8 m (in order to provide sufficient space for two tracks that are 4 m apart). In the longitudinal direction, load forces are transferred via a truss girder (south side, above the shaft opening) and directly into the diaphragm wall (north side). In the transverse direction, the temporary bridge is formed of a composite structure (steel cross beams with concrete slabs laid on top). In its final state, the roof of the shaft is built as a railway bridge.

3.3 Laupenstrasse Tunnel

The Laupenstrasse Tunnel has a diameter of 7 m (through the soils) and 6.7 m (through the solid rock) in typical cross section and cuts under the SBB tracks with a cover of 11 m (Fig. 8). It consists of two parts:

- The so-called access tunnel is 123 m long and is required both during and after construction. Access to the caverns is provided by one connection tunnel each, which join the station caverns perpendicularly and, via distribution levels, lead to the functional buildings on the western ends of the station caverns. The access tunnel has a double-layered lining and is fully waterproofed when finished.
- The so-called logistics tunnel, which leads to the front of the north station cavern, is 57 m long and only present in the construction phase and is backfilled at the end of construction works.

The first 25 m of the tunnel extend through water-bearing soil (Fig. 8). As with the Laupenstrasse Shaft (Chapter 3.2), these are primarily glacial and fluvioglacial deposits as well as artificial backfilling close to the surface. In this region, the groundwater level is 1–2 m above the tunnel. After that, the tunnel extends through a 23 m long transition region with mixed face conditions. The remaining 75 m of the tunnel

bindung an die Bahnhofskavernen erfolgt mit je einem Verbindungsstollen, der senkrecht an die Bahnhofskavernen anschliesst und über Verteilebenen zum jeweiligen Funktionsgebäude an den Westenden der Bahnhofskavernen führt. Der Zugangsstollen wird im Endzustand zweischalig ausgebaut und voll abgedichtet.

- Der sogenannte Logistikstollen, der zur Stirnseite der Bahnhofskaverne Nord führt, ist 57 m lang und nur im Bauzustand vorhanden; er wird am Ende der Bauarbeiten verfüllt.

Die ersten 25 m des Stollens liegen im wasserführenden Lockergestein (Bild 8). Wie für den Schacht Laupenstrasse (Kapitel 3.2) handelt es sich dabei vorwiegend um glaziale und fluvioglaziale Ablagerungen sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. In diesem Bereich befindet sich der Grundwasserspiegel 1–2 m oberhalb des Stollens. Anschließend befindet sich der Stollen in einem 23 m langen Übergangsbereich mit gemischter Ortsbrust. Die restlichen 75 m des Stollens befinden sich im selben Fels wie die Bahnhofskavernen (Kapitel 3.1).

Der Vortrieb des Stollens erfolgt ab dem Schacht Laupenstrasse. In der Lockergesteinsstrecke und in der Übergangszone erfolgt der Vortrieb im Vollausschub in Etappen à 1 m. Die Ausbruchsicherung besteht aus Spritzbeton ($d = 45$ cm) und Gitterträgern. Als vorausseilende Bauhilfsmassnahme ist ein Gefrierkörper vorhanden. In der Felsstrecke wird ebenfalls im Vollausschub mit Abschlagslängen von 1 m vorgerieben. Eine Ausnahme stellen die letzten 15 m der Aufweitung dar, wo aufgrund der Querschnittsgrösse respektive von Risikoüberlegungen auf Kalottenvortrieb mit zweiteiliger Unterteilung der Kalotte umgestellt wird. In der Felsstrecke wird systematisch ein Rohrschirm als vorausseilende Bauhilfsmassnahme implementiert, da das Vorhandensein von verwittertem Fels oberflächennah nicht ausgeschlossen werden kann. Die Ausbruchsicherung besteht ebenfalls aus Spritzbeton ($d = 30$ cm) und Gitterträgern. Eine Ortsbrustankerung und Mikropfähle für die Verstärkung der Kalottenwiderlager sind als Zusatzmassnahmen je nach Erfordernis vorgesehen.

Mit dem Gefrierkörper wird der Baugrund rund um den Hohlraum und im Kern verfestigt, versteift und abgedichtet. Die Dicke des Gefrierkörpers ausserhalb des Stollenprofils beträgt 1,5 m (Bild 8). Der Gefrierkörper ist zwischen 30 m (Sohle) und 58 m (First) lang und wird im Fels eingebunden. Für seine Realisierung (Solegefrieren) werden 26 Gefrierlanzen im Umfang und 16 Gefrierlanzen im Kern benötigt (Bild 11). Der Abstand der Gefrierlanzen ist 1 m. Bei der Anordnung der Gefrierlanzen wurden die potenziellen geometrischen Konflikte mit der Spriessung des Schachtes Laupenstrasse berücksichtigt sowie eine möglichst kleine Beschädigung der Bewehrung der Schlitzwände aufgrund der durchdringenden Kernbohrungen angestrebt. Die maximal zulässige Bohrungeauigkeit der gesteuerten Bohrungen (Bild 12) für die Gefrierlanzen beträgt 20 cm.



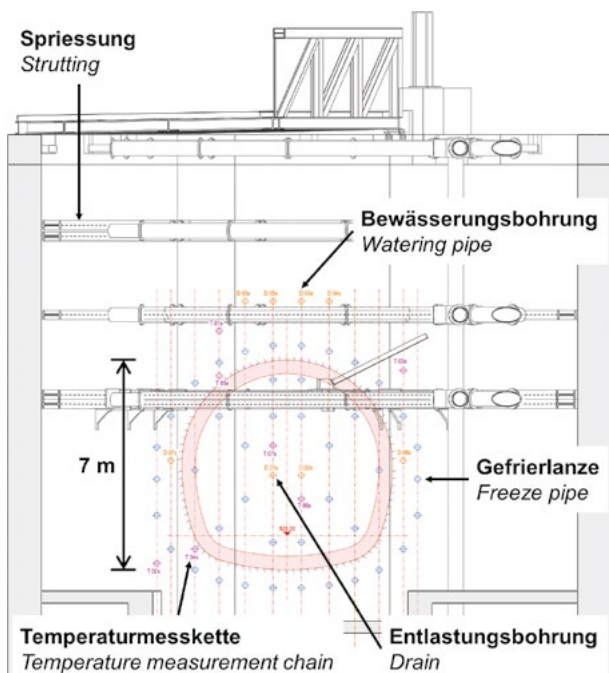
10 Schacht Laupenstrasse (Blickrichtung Ost)
Laupenstrasse Shaft (looking east)

Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS

run through the same rock as the station caverns (Chapter 3.1).

The tunnel is excavated starting from the Laupenstrasse Shaft. In the soil section and in the transition zone, the excavation occurs full-face in 1 m stages. The excavation support consists of shotcrete ($d = 45$ cm) and lattice girders. A body of frozen ground is used as an anticipatory auxiliary measure. In the rock section, full-face excavation with round lengths of 1 m is also carried out. The exception to this are the final 15 m of the widening section, where, due to the size of the cross section and risk considerations, there is a switch to top heading excavation with the top heading being divided into two parts. In the rock section, a pipe umbrella is systematically built-in as an anticipatory auxiliary measure, since the presence of weathered rock close to the surface cannot be ruled out. Also in this case, the excavation support consists of shotcrete ($d = 30$ cm) and lattice girders. Face bolting and micropiles for reinforcing the top heading abutments are also provided as additional measures, as required.

The body of frozen ground is used to strengthen, harden and seal off the subsoil around the cavity and in the core. The thickness of the body of frozen ground outside the tunnel



Quelle/Credit: [8]

11 Stollen Laupenstrasse – Layout der Gefriermassnahme (Querschnitt, Blick in Vortriebsrichtung)
 Laupenstrasse Tunnel – layout of ground freezing (cross section, looking in direction of advance)

Die Gefrierlanzen im Kern werden vor dem Vortriebsbeginn abgeschaltet. Ein Auftauen des Kerns wird durch die aussenliegenden Gefrierlanzen (die während des Vortriebs weiterbetrieben werden) verhindert, da somit radial keine Wärmezufuhr zum Kern erfolgen kann (der Wärmezufluss in Längsrichtung des Stollens ist ausreichend gering). Die statische und thermische Bemessung des Gefrierkörpers wurde durch die ETH Zürich (Professur für Untertagbau) durchgeführt. Die berechnete Gefrierzeit bis zum Erreichen der erforderlichen Wandstärke und des Gefrierens des Kernbereichs beträgt 20–30 Tage.

Um den Unsicherheiten betreffend die Lage des Grundwasserspiegels sowie seine saisonalen Schwankungen Rechnung zu tragen, sind oberhalb des Gefrierkörpers respektive des Stollenfirsts vier Manschettenrohre angeordnet (Bild 11), die in vier voneinander mit Packern getrennte Abschnitte unterteilt sind und vor sowie während des Auffrierens kontinuierlich mit Wasser beaufschlagt werden. Ferner sind im Kern zwei Entspannungsbohrungen angeordnet, um sicherzustellen, dass sich beim Auffrieren keine ungünstigen Porenwasserdrücke aufbauen können. Die Erfolgskontrolle der Bewässerung erfolgt mit Piezometern; diejenige der Gefriermassnahme erfolgt mit Temperaturmessketten im Randbereich und ausserhalb des Gefrierkörpers sowie mit den Entspannungsbohrungen im Kern (Dichtigkeitsbeurteilung anhand des Wasseranfalls).

3.4 Bauleistungen

Der Installationsplatz für den Abschnitt 1 befindet sich in der Nähe des Schachtes Laupenstrasse (Kapitel 3.2). Auf-

profile is 1.5 m (Fig. 8). The body of frozen ground is between 30 m (floor) and 58 m (roof) long and is embedded in the rock. In order to create it (brine freezing), 26 freezing lances are required in the perimeter and 16 in the core (Fig. 11). The distance between the freezing lances is 1 m. For the arrangement of the freezing lances, the potential geometric conflicts with the bracing of the Laupenstrasse Shaft were considered and the aim was to inflict as little damage as possible on the reinforcement of the slotted walls with the core drillings. The maximum permissible drilling inaccuracy for the freezing lance drillings (Fig. 12) is 20 cm. The freezing lances in the core are switched off prior to commencement of excavation work. The core is prevented from thawing by means of the outer freezing lances (which continue to operate during excavation), since, in this way, no heat can radially penetrate into the core (the flow of heat in the longitudinal direction of the tunnel is sufficiently low). The static and thermal design of the body of frozen ground were carried out by the ETH Zurich (Chair for Underground Construction). The calculated freezing time until the required wall thickness is reached and until the core region freezes is 20–30 days.

In order to account for the uncertainties in relation to the position of the groundwater level and its seasonal fluctuations, four watering pipes are arranged above the body of frozen ground (Fig. 11) They are divided in four sections separated from one another by means of packers and are continuously supplied with water before as well as during the freezing process. Furthermore, in order to ensure that no unfavourable pore-water pressures can build up during freezing, two relief bores are made in the core. In order to check for adequate water supply, piezometers are used. In order to check for adequate freezing, temperature measurement chains are used in the edge region and outside the body of frozen ground, while the relief bores in the core allow for the assessment of the watertightness based upon the observed water inflow).

3.4 Construction Logistics

The installation site for Section 1 is close to the Laupenstrasse Shaft (Chapter 3.2). Due to the limited amount of space available as well as the restricted access options, a platform was constructed above and next to the tracks west of Bern Central Station as well as above Laupenstrasse (Fig. 13) in order to allow supply and disposal activities to and from the construction site and to create a storage space.

Furthermore, in terms of construction logistics, the following issues regarding lack of space must be emphasised for the Laupenstrasse Shaft: Due to the presence of the struts in the shaft (Fig. 9) and the fact that the northern half of the shaft is covered by the temporary bridge (Fig. 10), the free ground space is reduced to 4 m x 11 m; in addition, the free working height in the shaft is restricted to 4 m, also on account of the struts (Fig. 11).

3.5 Settlement-reducing Measures for PostParc

As mentioned above (Chapter 3.1), the station caverns

grund der engen Platzverhältnisse sowie der beschränkten Zugangsmöglichkeiten wurde eine Plattform oberhalb und neben dem Gleisfeld westlich des Hauptbahnhofs Bern sowie oberhalb der Laupenstrasse gebaut (Bild 13), um die Ver- und Entsorgung der Baustelle zu ermöglichen sowie Lagerfläche zu kreieren.

In Bezug auf die Baulogistik sind ferner folgende Platzschränkungen beim Schacht Laupenstrasse zu betonen: Aufgrund des Vorhandenseins der Spriessung des Schachtes (Bild 9) und der Abdeckung der nördlichen Hälfte des Schachtes durch die Hilfsbrücke (Bild 10) reduziert sich die freie Grundrissfläche auf 4 m × 11 m; zudem beschränkt sich die freie Arbeitshöhe im Schacht, ebenfalls aufgrund der Spriessung (Bild 11), auf 4 m.

3.5 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc

Wie oben beschrieben (Kapitel 3.1), unterfahren die Bahnhofskavernen mehrere bestehende Objekte. In diesem Kapitel wird auf die setzungsmindernden Massnahmen für das Gebäude «PostParc» näher eingegangen.

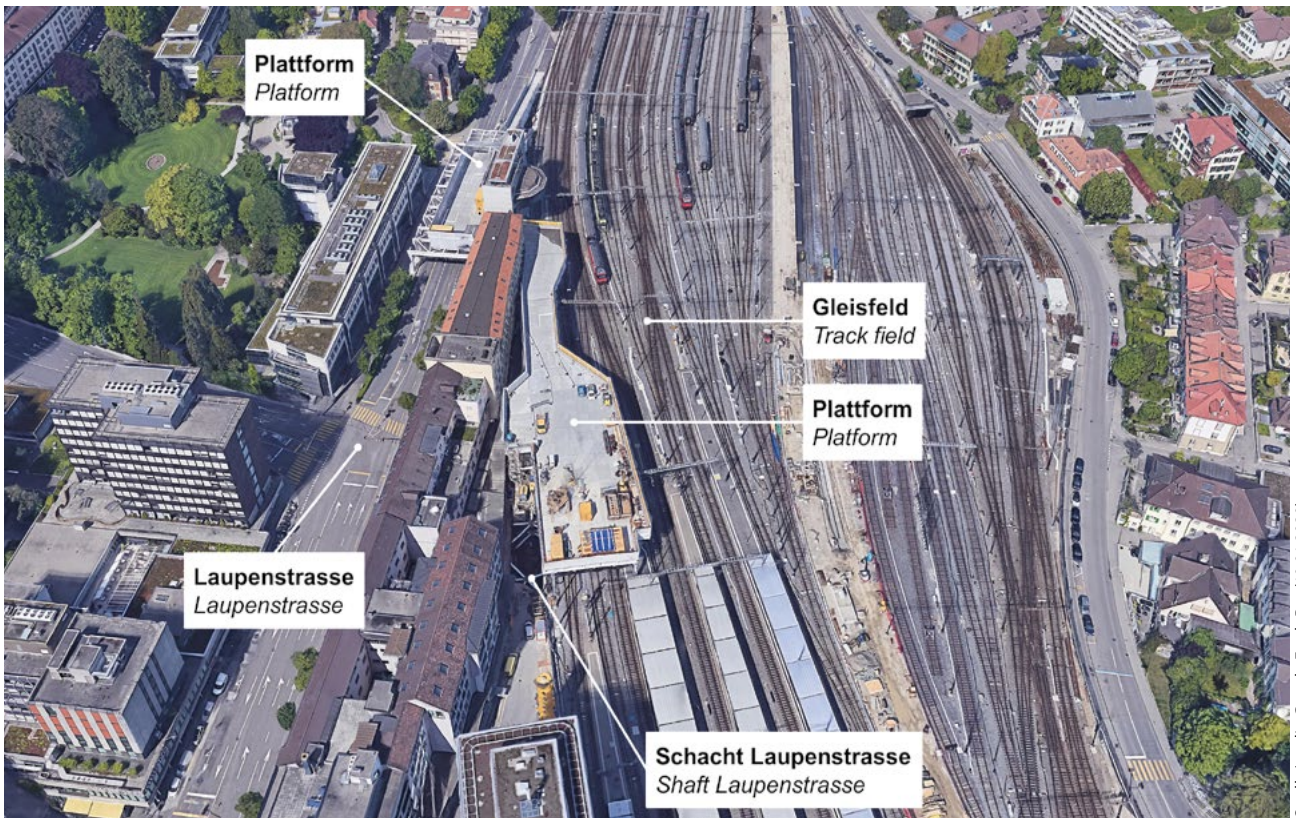
Der PostParc ist ein Gebäudekomplex, der 2016 eröffnet wurde. Für das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» ist der

undercut several existing structures. In this chapter, the measures for reducing settlement of the PostParc building are described in greater detail.

The PostParc is a building complex that opened in 2016. With regard to the project «Expansion of Bern RBS Station», the so-called Reiterbau is of particular interest, as this building (with four or five floors) extends over the tracks of Bern Central Station in parallel with the Schanzenbrücke Bridge and is undercut by the station caverns (Figs 3 and 14). The building is 181 m long, 25 m wide and 14–25 m high. It is composed of steel and concrete with a large glass front and is built on two parallel rows of columns placed between the tracks. One row of supports (west side) consists of former postal elevator shafts that have been filled in with concrete (these used to connect the platform to the postal tunnel system) with a ground area of 8 m²; the other row of supports consists of the (solid steel) supports of the station hall (platform columns) of Bern Central Station. The distance between the station caverns and postal elevator shafts is 2–4 m, and the distance between the caverns and the platform column foundation is 11 m. The foundation loads (at dimensioning level) can reach up to 29 MN for the postal elevator shafts and up to 25 MN for the platform columns.



12 Stollen Laupenstrasse – Bohrarbeiten für die Gefriermassnahme
Laupenstrasse Tunnel – drilling works for ground freezing



Quelle/Credit: Google Earth Pro (10.01.2020)

13 Plattform, Schacht Laupenstrasse und Umgebung (Blickrichtung West)
 Platform, Laupenstrasse Shaft and surroundings (looking west)

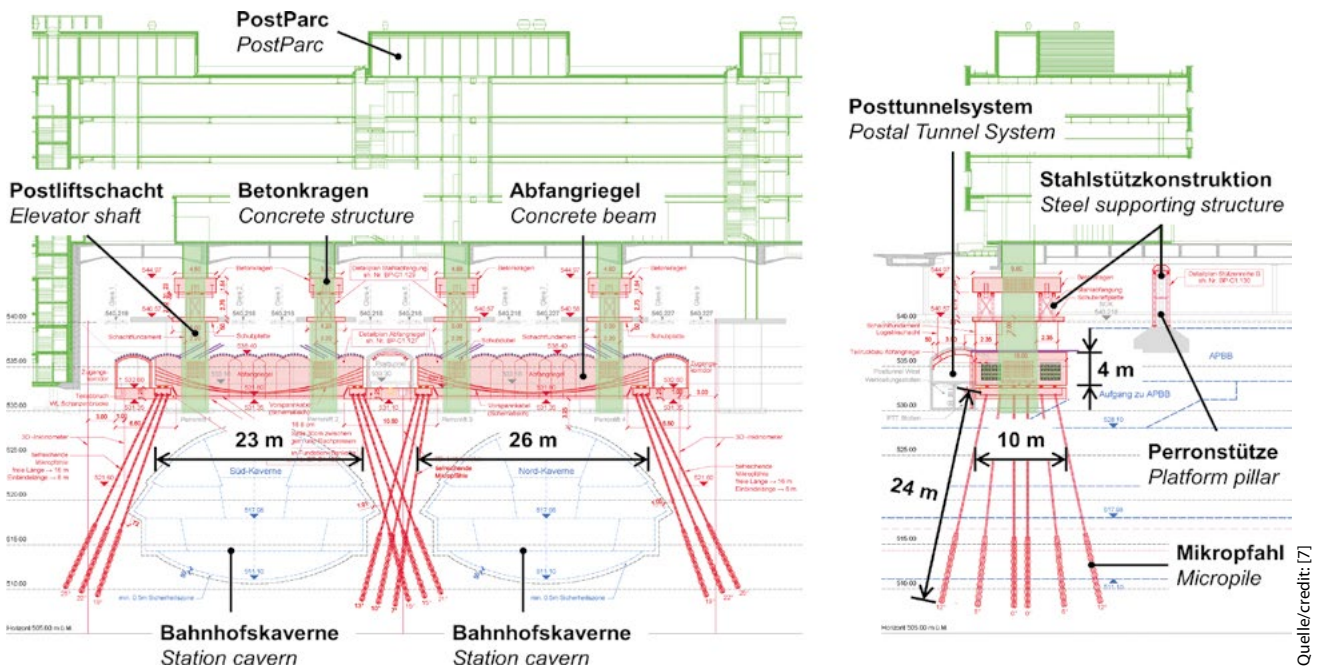
sogenannte Reiterbau von besonderem Interesse, da dieses Gebäude (mit bereichsweise vier oder fünf Stockwerken) die Gleise des Hauptbahnhofs Bern parallel zur Schanzenbrücke überspannt und von den Bahnhofskavernen unterfahren wird (Bild 3 und Bild 14). Das Gebäude ist 181 m lang, 25 m breit und 14–25 m hoch. Es hat eine Struktur aus Stahl und Beton mit einer grossen Glasfront und ist auf zwei parallelen Säulenreihen fundiert, die zwischen den Gleisen platziert sind. Eine Stützenreihe (Westseite) besteht aus ehemaligen, ausbetonierten Postliftschächten (die früher die Perrons mit dem Posttunnelsystem verbunden haben) mit einer Grundrissfläche von 8 m²; die andere Stützenreihe (Ostseite) besteht aus bereits vorhandenen Stützen (Vollstahlstützen) der Bahnhofshalle (Perronstützen) des Hauptbahnhofs Bern. Der Abstand zwischen Bahnhofskavernen und Postliftschächten beträgt 2–4 m, derjenige zu der Foundation der Perronstützen ist 11 m. Die Fundationslasten betragen (auf Dimensionierungsniveau) bis zu 29 MN für die Postliftschächte und bis zu 25 MN für die Perronstützen.

Die aufgrund des Ausbruchs der Bahnhofskavernen erwarteten Setzungen und Setzungsdifferenzen wurden anhand von 3D-FE-Berechnungen unter Berücksichtigung aller Bauphasen und aller Fundationslasten ermittelt. Rechnerisch werden differenzielle Setzungen der Postliftschächte von 10–15 mm erwartet. Gleichzeitig wurde der PostParc nachgerechnet, um seine Setzungsempfindlichkeit zu beurteilen. Diese Nachrechnung zeigte, dass differenzielle Setzungen

The expected settlements and differential settlements due to the excavation of the station caverns were determined based on 3D FE calculations in consideration of all construction phases and all foundation loads. Based on these calculations, differential settlements of 10–15 mm are expected for the postal elevator shafts. A recalculation for the PostParc was carried out in order to assess its susceptibility to settlement. This recalculation showed that differential settlements of up to 20 mm would not compromise the structural safety of the building. Therefore, the calculated differential settlements and the differential settlements that are potentially critical for the PostParc are similar. For this reason and because of the uncertainties inherent in any settlement prediction, for the case in which the settlements or differential settlements are greater than expected or excessive, compensatory measures and measures for reducing settlement are implemented or provided.

The measures for reducing settlement of the postal elevator shafts consist of three packages (Fig. 14):

1. In a first step, two prestressed underground reinforced concrete beams are built. These transfer beams are constructed underground, starting from the existing postal tunnel system (Fig. 15). The transfer beams are 23 m (south) and 26 m (north) long, 10 m wide and 4 m high. Each one is frictionally connected to two postal elevator shafts. Each transfer beam spans one station cavern and is supported by 24 m long (16 m of which as unbounded



Quelle/credit: [7]

14 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – Längsschnitt (links, Blickrichtung West) und Querschnitt (rechts, Blickrichtung Nord)
Settlement-reducing measures for PostParc – longitudinal section (left, looking west) and cross section (right, looking north)

von bis zu 20 mm die Tragsicherheit des Gebäudes nicht beeinträchtigen. Somit liegen die berechneten Setzungsdifferenzen und die für den PostParc möglicherweise kritischen Setzungsdifferenzen nahe beieinander. Aus diesem Grund und wegen der jeder Setzungsprognose inhärenten Unsicherheiten werden – für den Fall, dass die Setzungen und Setzungsdifferenzen grösser als erwartet respektive unzulässig sein sollten – Setzungsminderungs- und Kompensationsmassnahmen umgesetzt respektive vorgesehen.

Die setzungsmindernden Massnahmen für die Postliftschächte bestehen aus drei Paketen (Bild 14):

1. In einem ersten Schritt werden zwei unterirdische vorgespannte Stahlbetonträger realisiert. Diese Abfangriegel werden aus dem bestehenden Posttunnelsystem unterirdisch gebaut (Bild 15). Die Abfangriegel sind 23 m (Süd) respektive 26 m (Nord) lang, 10 m breit und 4 m hoch und werden mit je zwei Postliftschächten kraftschlüssig verbunden. Jeder Abfangriegel überspannt eine Bahnhofskaverne und wird auf 24 m langen (davon 16 m als freie Länge) geneigten Mikropfählen fundiert. Auf diese Weise werden die Fundamentlasten unterhalb der Bahnhofskavernen abgetragen. Um den Setzungsanteil aus der Eigenverformung der Mikropfähle zu minimieren, werden diese mittels hydraulischer Pressen (die sich zwischen Abfangriegel und Mikropfählen befinden) vorgespannt. Zusätzlich zur Setzungsreduktion tragen die Abfangriegel auch zu einer besseren Verteilung der Fundamentlasten über den Bahnhofskavernen bei, um dem Gefährdungsbild eines Durchstanzens der Postliftschächte in die Bahnhofskavernen entgegenzuwirken. Die Wirksamkeit dieses Massnahmenpakets wurde mit weiteren, detaillierteren 3D-FE-Berechnungen untersucht und bestätigt.

length) inclined micropiles. In this way, the foundation loads are carried away below the station caverns. In order to minimise the amount of settlement caused by the inherent deformation of the micropiles, these are preloaded by means of hydraulic presses (arranged between the transfer beams and micropiles). In addition to reducing settlement, the transfer beams also serve to improve the distribution of foundation loads across the station caverns, in order to counteract the hazard of the postal elevator shafts falling through into the station caverns. The effectiveness of this package of measures was investigated and confirmed using additional, more detailed 3D FE calculations.

2. In a second step, the preparation works for the third package of measures are carried out. This involves the use of



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS/verbildat

15 Setzungsmindernde Massnahmen PostParc – Vortriebsarbeiten aus dem Posttunnelsystem
Settlement-reducing measures for PostParc – excavation work from the postal tunnel system

2. In einem zweiten Schritt werden die Vorbereitungsarbeiten für das dritte Massnahmenpaket durchgeführt. Dabei werden massive temporäre Betonkragen ($L = 9,8$ m, $B = 4,6$ m, $H = 1,6$ m) rund um die Postliftschächte betoniert, um den Lastabtrag in den temporären Stahlstützkonstruktionen des dritten Massnahmenpakets zu ermöglichen. Diese Arbeiten erfolgen auf der Ebene der Perrons des Hauptbahnhofs Bern.
3. Der eigentliche aktive Setzungsausgleich wird in einem dritten Schritt und nur dann realisiert, wenn es trotz der anderen setzungsmindernden Massnahmen notwendig ist. Bei Bedarf werden zwei temporäre Stahlstützkonstruktionen pro Postliftschacht installiert, die es erlauben, die gesamte Fundamentlast der Postliftschächte aufzunehmen, wodurch es möglich wird, die Postliftschächte zu schneiden, das Gebäude vom unteren Teil seiner Fundamente abzukoppeln, mit Hilfe von hydraulischen Pressen zu heben und somit allfällige unzulässige Setzungen aktiv auszugleichen.

Um eine aktive Setzungskompensation an den Perronstützen vornehmen zu können, werden sie mit Stahltürmen und hydraulischen Pressen abgefangen (Bild 14). Um den Einfluss auf die Personenhydraulik auf der Ebene der Perrons des Hauptbahnhofs Bern möglichst zu minimieren, werden diese Massnahmen nicht a priori, sondern nur im Bedarfsfall implementiert. Als Entscheidungsgrundlage dient der Überwachungsplan mit den darin definierten Interventionswerten.

4 Zulaufstrecke – Abschnitte 2–7

4.1 Bahnhofeinfahrt – Abschnitt 2

Der Abschnitt 2 befindet sich unterhalb der östlichen Gleiszufahrt des Hauptbahnhofs Bern (Bild 2). Er ist 300–350 m lang und beinhaltet die Zusammenfügung/Entflechtung der vier Gleise zwischen den Bahnhofskavernen und dem Verzweigungsbauwerk (Abschnitt 3, Kapitel 4.2). Ab dem östlichen Ende der Bahnhofskavernen verlaufen die vier Gleise zuerst in jeweils einem Einspurtunnel mit einem Ausbruchquerschnitt von 51 m² (Bild 16). Aus diesen werden zuerst die zwei mittleren Einspurtunnel zu einem Doppelspurtunnel zusammengefasst. Anschliessend, auf den letzten 20 m in Richtung Eilgut, kommt ein Brillenprofil zur Anwendung. Das Brillenprofil besteht aus dem mittig liegenden Doppelspurtunnel und jeweils einem aussen liegenden Einspurtunnel (Bild 17). Alle Bauwerke in diesem Abschnitt sind zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

Die Vortriebe des Abschnitts 2 erfolgen vom Eilgut her (Abschnitt 3, Kapitel 4.2). Der Ausbruch erfolgt mit kurzen Abschlagslängen als maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF) im Kalottenvortrieb und als seitliche Erweiterung. Die Überdeckung beträgt 5–12 m. Die Ausbruchsicherung besteht aus systematisch eingebauten Stahlbögen und Spritzbeton. Im Bereich der Unterquerung des bestehenden RBS-Bahnhofs (mit einem Abstand zwischen Tunneln und Fundamenten von 7 m) sowie in Bereichen mit geringer

temporary solid concrete collars ($L = 9.8$ m, $W = 4.6$ m, $H = 1.6$ m) around the postal elevator shafts in order to allow the loads to be transferred into the temporary steel support structures of the third package of measures. These works take place at the level of the platforms of Bern Central Station.

3. The actual active settlement compensation is implemented in a third step and only if it is required in spite of the other settlement-reducing measures. If necessary, two temporary steel support structures per postal elevator shaft are installed. These structures are able to take the full foundation load of the postal elevator shafts, thus making it possible to cut through the postal elevator shaft, uncouple the building from the lower portion of its foundations, elevate the building using hydraulic presses and thus actively compensate for any excessive settlements.

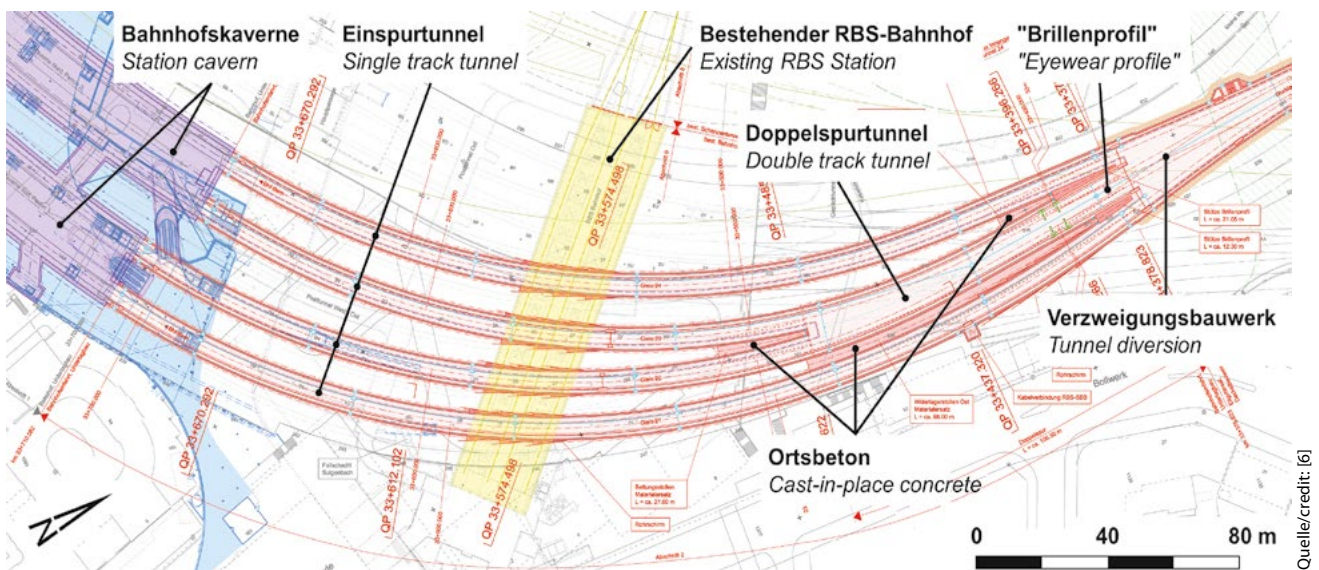
In order to be able to apply active settlement compensation to the platform columns, they are propped up by means of steel towers and hydraulic presses (Fig. 14). In order to minimise as far as possible the influence on pedestrian dynamics at the level of Bern Central Station platforms, these measures are only implemented if required rather than a priori. The basis for this decision is the monitoring plan and the intervention values defined therein.

4 Access Line – Sections 2–7

4.1 Station Entrance – Section 2

Section 2 is located under the eastern track entrance to Bern Central Station (Fig. 2). It is 300–350 m long and comprise the point at which the four tracks enter the station caverns and the branch-off point (Section 3, Chapter 4.2). From the eastern end of the station caverns, the four tracks initially extend into one single-track tunnel each, each with an excavation cross-sectional area of 51 m² (Fig. 16). From there, the two central tunnels initially merge into a double-track tunnel. Then, for the last 20 m towards Eilgut, an «eyewear profile» is used. The «eyewear profile» consists of the central double-track tunnel and one outer single-track tunnel on either side (Fig. 17). All structures in this section have double-layered lining and are partially waterproofed.

Excavation work in Section 2 starts at Eilgut (Section 3, Chapter 4.2). It occurs with short round lengths and take the form of mechanically assisted tunnelling in rock for top heading excavation and lateral expansion. The cover is 5–12 m. The excavation support consists of systematically installed steel arches and shotcrete. In the region where the access line undercuts the existing RBS Station (with a distance between the tunnel roof and foundation of 7 m) as well as in regions with a small cover, pre-support measures consisting of pipe umbrellas and face bolting are additionally provided. Where necessary, the top heading abutments are reinforced with micropiles and relief bores are made in the face. In regions where the distance between the tunnels is short (< 3 m), the existing rock has to be replaced with other material. For



16 Bahnhofs-einfahrt – Situation
Station entrance – situation

Überdeckung sind zusätzlich eine vorausseilende Sicherung mit Rohrschirmen sowie eine Ortsbrustankerung vorgesehen. Wo erforderlich, werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt und Entlastungsbohrungen in der Ortsbrust angeordnet. In Bereichen mit geringem Abstand (< 3 m) zwischen den Tunnelröhren ist ein Materialersatz des anstehenden Felsens notwendig. Dafür werden zusätzliche Stollen ausgebrochen, in die eine Stützkonstruktion betoniert wird (Bild 16). Ein ähnliches Vorgehen ist für den Bau des Brillenprofils erforderlich (Bild 17).

Die mittels 2D-FE-Berechnungen prognostizierten Setzungen sowie eine Nachrechnung des bestehenden RBS-Bahnhofs haben gezeigt, dass dessen Voutendecke vorgängig zu verstärken ist. Diese Verstärkung erfolgt mittels eingeborhter Schubdübel. Zusätzlich wird eine Hilfskonstruktion aus Stahl eingebaut, die im Bedarfsfall einen Teil der Kräfte aufnehmen wird.

4.2 Eilgutareal – Abschnitt 3

Der 170 m lange Abschnitt 3 befindet sich unterhalb der Abstellanlage Eilgutareal und der Strassenzufahrt zum SBB-Areal ab Neubrücke-Strasse (Bild 2). In diesem Abschnitt erfolgt die Zusammenlegung/Auffächerung der vier- zur zweispurigen Gleislage zwischen der Aufweitung der Bahnhofs-einfahrt (Abschnitt 2, Kapitel 2) und dem Doppelspurtunnel (Abschnitte 4–7, Kapitel 4.3–4.6). Das Bauwerk erstreckt sich über eine Länge von 150 m, weist eine Breite von 11,5–27 m auf, ist 21 m tief und umfasst vier Untergeschosse (Bild 18): Im untersten Untergeschoss befindet sich die RBS-Gleisanlage; in den anderen Untergeschossen sind technische Räume, bahntechnische Anlagen und Dienstparkplätze für die RBS und die SBB beherbergt. Auf der Südseite des Bauwerks befindet sich ein Notausstieg. Die Abdichtung der Bauwerke erfolgt nach dem drainierenden Prinzip.

for this purpose, additional tunnels are excavated into the rock in which a support structure is concreted into (Fig. 16). A similar procedure is also required for the construction of the «eyewear profile» structure (Fig. 17).

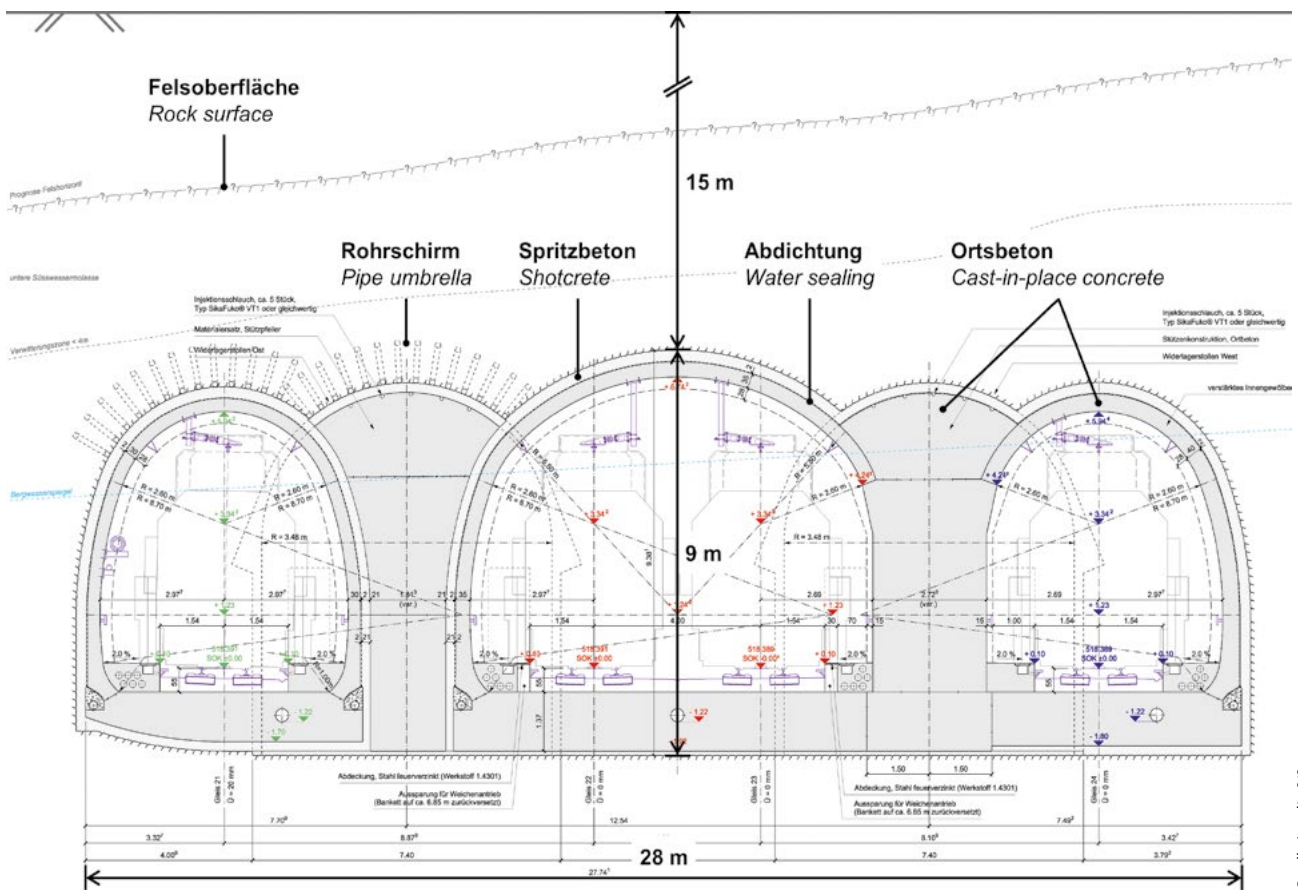
The settlements predicted by means of 2D FE calculations and a recalculation of the existing RBS Station have shown that the angle vaulted ceiling thereof has to be reinforced beforehand. This reinforcement consists of shear connectors drilled into the ceiling. Additionally, a steel auxiliary structure is installed, which can absorb some of the forces when needed.

4.2 Eilgutareal – Section 3

The 170 m long Section 3 is located underneath the Eilgutareal storage sidings and the road entrance to the SBB site from the Neubrücke-Strasse (Fig. 2). This section is where the four tracks merge to form two tracks between the widening of the station entrance (Section 2, Chapter 2) and the double-track tunnel (Sections 4–7, Chapter 4.3–4.6). The structure extends for a length of 150 m, with a width of 11.5–27 m, a depth of 21 m and four underground levels (Fig. 18): The lowest level houses the RBS track system; the other levels house technical rooms, rail technology systems and RBS and SBB employee parking lots. There is an emergency exit on the south side of the structure. The structures are waterproofed according to the drainage principle.

In the upper region as well as in form of a channel near to the access shaft, the structure lies through partially water-bearing soils. These are mainly ice-dammed lake deposits and moraine deposits as well as artificial backfilling close to the surface. The thickness of the soil layers varies between 7 m (west side) and 18 m (east side), and therefore the structure has to contend with mixed geology. The groundwater level is 7 m below the surface here.

Quelle/credit: [6]



Quelle/credit: [6]

17 Bahnhofsanfahrt – Querschnitt Brillenprofil (Blick in Vortriebsrichtung)
Station entrance – cross section of «eyewear profile» (looking in direction of advance)

Im oberen Bereich sowie in Form einer Rinne beim Zugangsschacht liegt das Bauwerk in teilweise wasserführenden Lockergesteinen. Dabei handelt es sich vorwiegend um Rückstausedimente und Moränenablagerungen sowie, oberflächennah, um künstliche Auffüllungen. Die Mächtigkeit der Lockergesteine variiert zwischen 7 m (Westseite) und 18 m (Ostseite), sodass das Bauwerk in gemischter Geologie zu liegen kommt. Der Grundwasserspiegel liegt 7 m unterhalb der Geländeoberkante.

Aufgrund der geringen Überdeckung (< 2 m), der anstehenden Geologie und der erforderlichen Abmessungen des unterirdischen Bauwerks wird dieser Abschnitt als Tagbautunnel in der Deckelbauweise erstellt (Bild 18 und Bild 19). Der Deckel ist auf überschnittene Bohrpfähle (Ø = 1,3 m, L = 24 m) gelagert und wird in drei Etappen realisiert, um den Erfordernissen des Bahnbetriebs des Hauptbahnhofs Bern (kürzestmögliche Ausserbetriebnahme der Abstellgleise) Rechnung zu tragen. Im Bereich der minimalen Bauwerksbreite überbrückt der 1,2 m starke Deckel die gesamte Spannweite stützenfrei, während im Bereich der Aufweitung eine zusätzliche Abstützung mit Scheiben vorgesehen ist.

Der Aushub unter dem Deckel erfolgt vom angrenzenden Zugangsschacht her. Die im Zugangsschacht dreilagige und im Tagbau einlagige Spriessung der Bohrpfahlwände erfolgt

Due to the small cover (< 2 m), the geology and the dimensions required for the underground structure, this section is created as a cut-and-cover tunnel (Figs 18 and 19). The cover is mounted on overcut bored piles (d = 1.3 m, L = 24 m) and is created in three stages in order to account for the requirements of railway operation in Bern Central Station (shortest possible interruption to operation of the storage sidings). In the region where the structure is at its thinnest, the 1.2 m thick cover spans the entire width without supports, whereas in the region of the widening, an additional support means with vertical slabs is provided.

The excavation work under the cover starts from the adjacent access shaft. The bored pile walls are braced with double ROR profiles at a distance of 4.5 m. This bracing consists of three layers in the access shaft and one layer in the open-cut tunnel. When choosing the support concept, requirements relating to construction logistics also had to be taken into consideration in addition to the static requirements. For this purpose, the ceiling of the fourth underground level, for example, is implemented as an additional bracing layer and suspended on the cover of the open-cut tunnel by means of temporary steel profiles. This steel structure as well as additional, temporary piles for supporting the cover are only used during the construction phase and are taken down once the inner support structure has been completed.

mit doppelten ROR-Profilen in einem Abstand von 4,5 m. Neben den statischen Anforderungen mussten bei der Wahl des Stützkonzepts vor allem die Randbedingungen aus der Baulogistik mitberücksichtigt werden. Dazu wird beispielsweise die Decke des vierten Untergeschosses bereits im Bauzustand als zusätzliche Spriesslage erstellt und mittels temporärer Stahlprofile am Deckel des Tagbaus aufgehängt. Diese Stahlkonstruktion sowie zusätzliche, temporäre Pfähle zur Abstützung des Deckels dienen nur dem Bauzustand und werden nach Erstellung des inneren Tragwerks wieder zurückgebaut.

4.3 Henkerbrännli – Abschnitt 4

Der Abschnitt 4 ist 114 m lang und befindet sich unterhalb der Neubrücke und der Strassenkreuzung Henkerbrännli (Bild 2). In diesem Abschnitt ist der Tunnel zweispurig (mit einem maximalen Ausbruchquerschnitt von 119 m²), und die Überdeckung beträgt 9–11 m (Bild 20). Der Tunnel wird zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

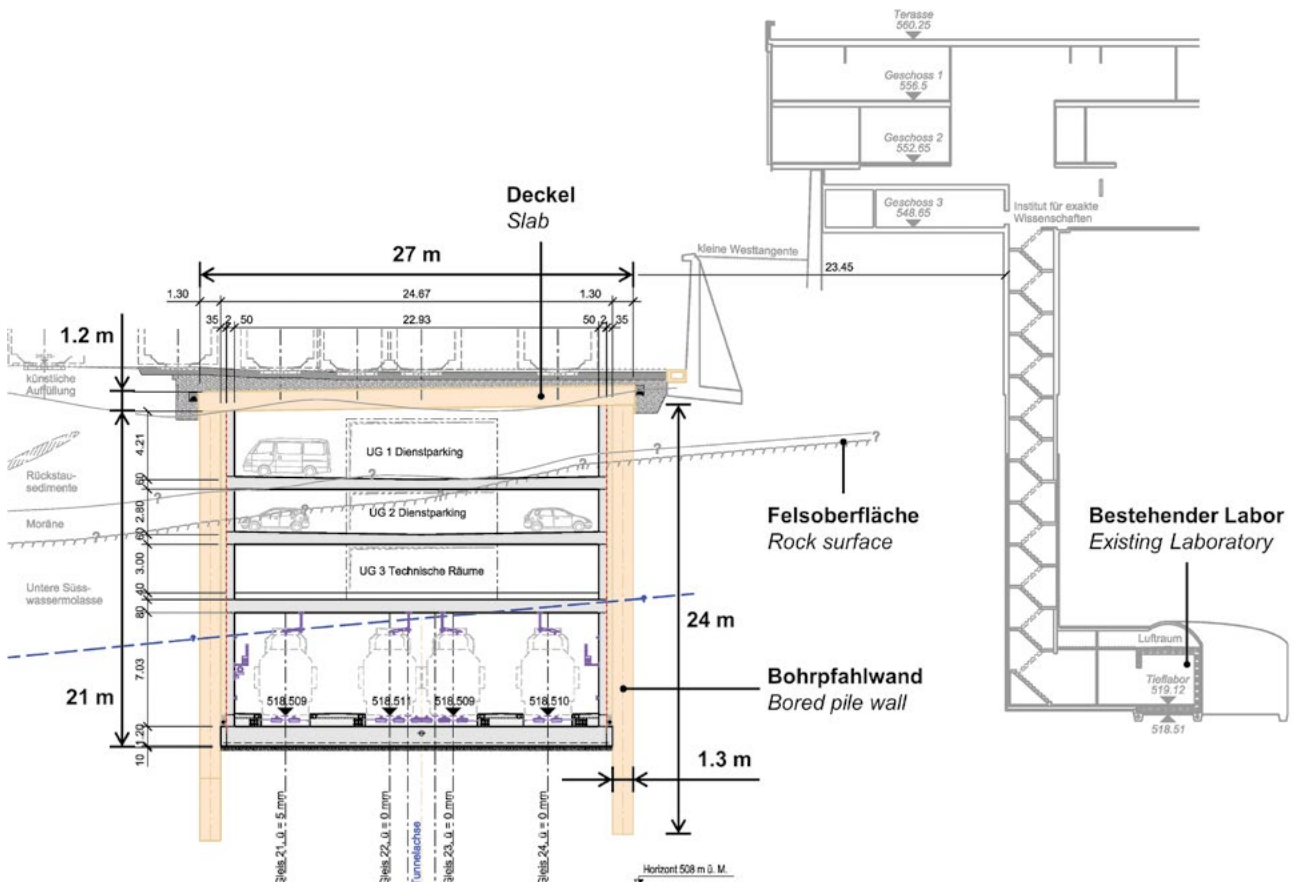
Auf der Westseite (Richtung Eilgutareal) befindet sich die Klotte vollumfänglich im Lockergestein (dieselben Lockergesteine wie im Abschnitt 3, Kapitel 4.2) mit gesättigten Sandlinsen, während in der Strosse und in der Sohle Fels erwartet wird. Richtung Abschnitt 5 (Kapitel 4.4) steigt die Felsoberfläche bis zum Tunnelfirst.

4.3 Henkerbrännli – Section 4

Section 4 is 114 m long and located below the Neubrücke and the Henkerbrännli crossroads (Fig. 2). In this section, the tunnel has two tracks (with a maximum excavation cross-sectional area of 119 m²) and the cover is 9–11 m (Fig. 20). The tunnel has two-layered lining and is partially waterproofed.

On the west side (towards Eilgutareal), the top heading extends fully within soils (the same soils as in Section 3, Chapter 4.2) with saturated sand lenses, whereas the bench and invert are expected to be in rock. The top of the rock layer rises to the level of the tunnel roof as it approaches Section 5 (Chapter 4.4).

Tunnelling starts at Section 5 and takes the form of mechanically assisted tunnelling in soft ground during top heading excavation (Fig. 20). A double, grouted pipe umbrella (35 + 22 pipes, 15 m long and with 5 m overlap), systematic face bolting (43 face bolts, 16 m long and with 6 m overlap) and pre-drilling of drainage pipes (3 pipes, 35 m long and with 5 m overlap) are provided as preventive auxiliary measures. The excavation support consists of shotcrete, steel arches and backfilling concrete with a total thickness of 35 cm. Where necessary, the top heading abutments are reinforced with micropiles.



18 Eilgutareal – Querschnitt (Blickrichtung West)
Eilgutareal – cross section (looking west)



Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS

19 Eilgutareal – Betonierarbeiten Deckel (Blickrichtung Hauptbahnhof Bern)
Eilgutareal – concreting works for cover (looking towards Bern Central Station)

Der Vortrieb erfolgt vom Abschnitt 5 her als maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL) im Kalottenvortrieb (Bild 20). Als vorausseilende Bauhilfsmassnahmen sind ein doppelter ausinjizierter Rohrschirm (35 + 22 Rohre mit 15 m Länge und 5 m Überlappung), eine systematische Ortsbrustankerung (43 Ortsbrustanker mit 16 m Länge und 6 m Überlappung) sowie vorausseilende Drainagebohrungen (3 St. mit 35 m Länge und 5 m Überlappung) vorgesehen. Die Ausbruchsicherung besteht aus Spritzbeton, Stahlbogen und Hinterfüllbeton mit einer Gesamtstärke von 35 cm. Wo erforderlich, werden die Kalottenwiderlager mit Mikropfählen verstärkt.

4.4 Bierhübeli – Abschnitt 5

Im 277 m langen Abschnitt 5 befindet sich der Doppelspurtunnel im Nahbereich der ansteigenden Neubrückstrasse Richtung Bierhübeli (Bild 2). In diesem Abschnitt nimmt die Überdeckung von 11 m bis auf 25 m zu. Auch hier wird der Tunnel zweischalig ausgebaut und teilabgedichtet.

Der Vortrieb erfolgt als maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF) von der Baugrube im Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) her. Die Abmessungen des Tunnels sowie das Vortriebs- und Sicherungskonzept sind grundsätzlich dieselben wie für den Abschnitt 4 (Kapitel 4.3, Bild 20). Die

4.4 Bierhübeli – Section 5

The 277 m long Section 5 comprises the double-track tunnel close to where the Neubrückstrasse rises towards Bierhübeli (Fig. 2). In this section, the cover rises from 11 m to 25 m. Here, too, the tunnel has a double-layered lining and is partially waterproofed.

Excavation work takes the form of mechanically assisted tunnelling in rock, starting at the construction trench in Wildpark (Section 6, Chapter 4.5). The dimensions of the tunnel and the excavation and support concept are in principle the same as for Section 4 (Chapter 4.3, Fig. 20). The main differences are that the pipe roofing umbrella in Section 5 is a single (31 pipes, 13 m long and with 3 m overlap) as opposed to a double system and that the face bolting is less dense (15 face bolts, 16 m long and with 6 m overlap). The decision to use a single pipe roofing umbrella over the entire length of Section 5 was made for the following reasons: better control of geological hazards (e.g. cave-in); uniformity of the excavation and support concept over two sections (with a total length of 391 m); uniformity of decision-making; greater cost and schedule security.

4.5 Wildpark – Section 6

Section 6 is located in the region of the so-called Wildpark and comprises the 163 m long, two-track junction from the

Hauptunterschiede bestehen darin, dass der Rohrschirm im Abschnitt 5 einfach (31 Rohre mit 13 m Länge und 3 m Überlappung) und nicht doppelt ausgeführt wird und dass die Ortsbrustankerung weniger dicht ist (15 Ortsbrustanker mit 16 m Länge und 6 m Überlappung). Der Entscheid, einen einfachen Rohrschirm über die gesamte Länge des Abschnitts 5 einzubauen, wurde aus folgenden Gründen getroffen: bessere Beherrschung der geologisch bedingten Gefährdungsbilder (z. B. Niederbruch); Vereinheitlichung des Vortriebs- und Sicherungskonzepts über zwei Abschnitte (mit einer Gesamtlänge von 391 m); Vereinheitlichung der Entscheidungsfindung; grössere Kosten- und Termisicherheit.

4.5 Wildpark – Abschnitt 6

Der Abschnitt 6 befindet sich im Bereich des sogenannten Wildparks und beinhaltet die 163 m lange, zweispurige Abzweigung ab dem bestehenden RBS-Schanzentunnel (Bild 2), die im Tagbau in einer offenen Baugrube (Bild 21) realisiert wird. In diesem Abschnitt wird zudem ein Notausstieg mit technischen Räumen erstellt.

Die Baugrube erstreckt sich über eine Länge von 165 m, ist 22–40 m breit und bis zu 31 m tief, wobei sich die obere Hälfte im Lockergestein befindet (Bild 21). Der Baugrubenabschluss besteht aus überschnittenen und aufgelösten Bohrpfahlwänden, die mit bis zu fünf Ankerlagen rückverankert sind (Bild 22). Zudem kommen noch rückverankerte Rühlwände, Mikropfahlwände und Nagelwände zum Einsatz.

Um die neue Zulaufstrecke in die bestehende RBS-Infrastruktur schleifend einzubinden, sind die vorherige Freilegung und der Abbruch des bestehenden RBS-Schanzentunnels unter Betrieb erforderlich. Für die sehr anspruchsvolle und einzigartige Massnahme wird das bestehende, unbewehrte Gewölbe vorgängig mittels HEB-Stahlbögen alle 0,8 m sowie einer Längsaussteifung mit überlappenden Gewindestangen und Schalungsgittern als Schutz vor Abplatzungen verstärkt (Bild 23). Die Freilegung des bestehenden Gewölbes erfolgt schonend und unter ständiger Überwachung durch geodätische und Erschütterungsmessungen sowie regelmässige visuelle Kontrollen und Rissaufnahmen. Der Abbruch erfolgt nach vorheriger Segmentierung der Gewölbeabschnitte in Querrichtung während Totalsperren am Wochenende. Aus bahnbetrieblichen Gründen sind dazu mehrere Wochenenden vorgesehen. Die nachfolgenden Bauarbeiten für den Neubau der Abzweigung erfolgen mit wenigen Ausnahmen unter Bahnbetrieb.

Der Tagbautunnel (Neubau) weist eine Überdeckung von 20 m auf. Er besteht aus einem halbkreisförmigen Gewölbe mit einem Durchmesser von 13 m, welches auf 2,5 m hohe, gewölbte Wände übergeht und durch eine 1 m dicke horizontale Bodenplatte abgeschlossen wird (Bild 21).

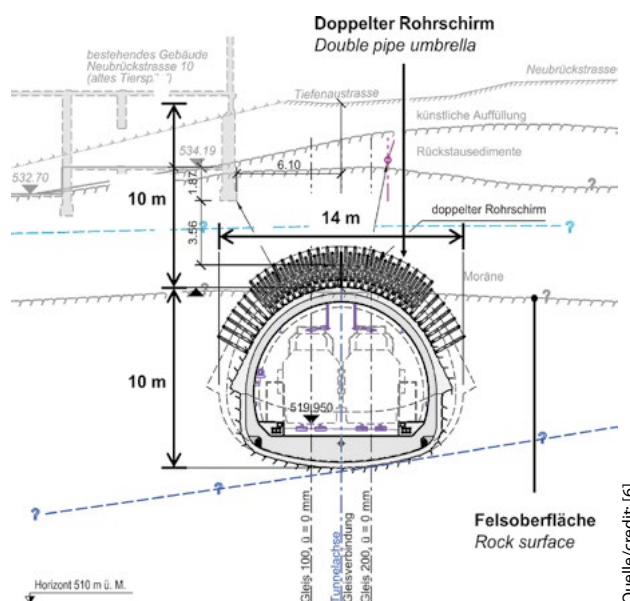
Da aufgrund des Bahnbetriebs maximal ein Gleis für wenige Wochen in den Sommerferien total gesperrt werden

existing RBS Schanzentunnel (Fig. 2). This fork is constructed using the cut-and-cover method in an open construction trench (Fig. 21). In this section, an emergency exit with technical rooms is also provided.

The construction trench extends for a length of 165 m, with a width of 22–40 m and depth of 31 m, the upper half of the trench extending through soil (Fig. 21). The construction trench is supported with overcut and undercut bored pile walls that is back-anchored by means of five layers of rock bolts (Fig. 22). In addition, back-anchored soldier pile walls, micropile walls and soil nail walls are used.

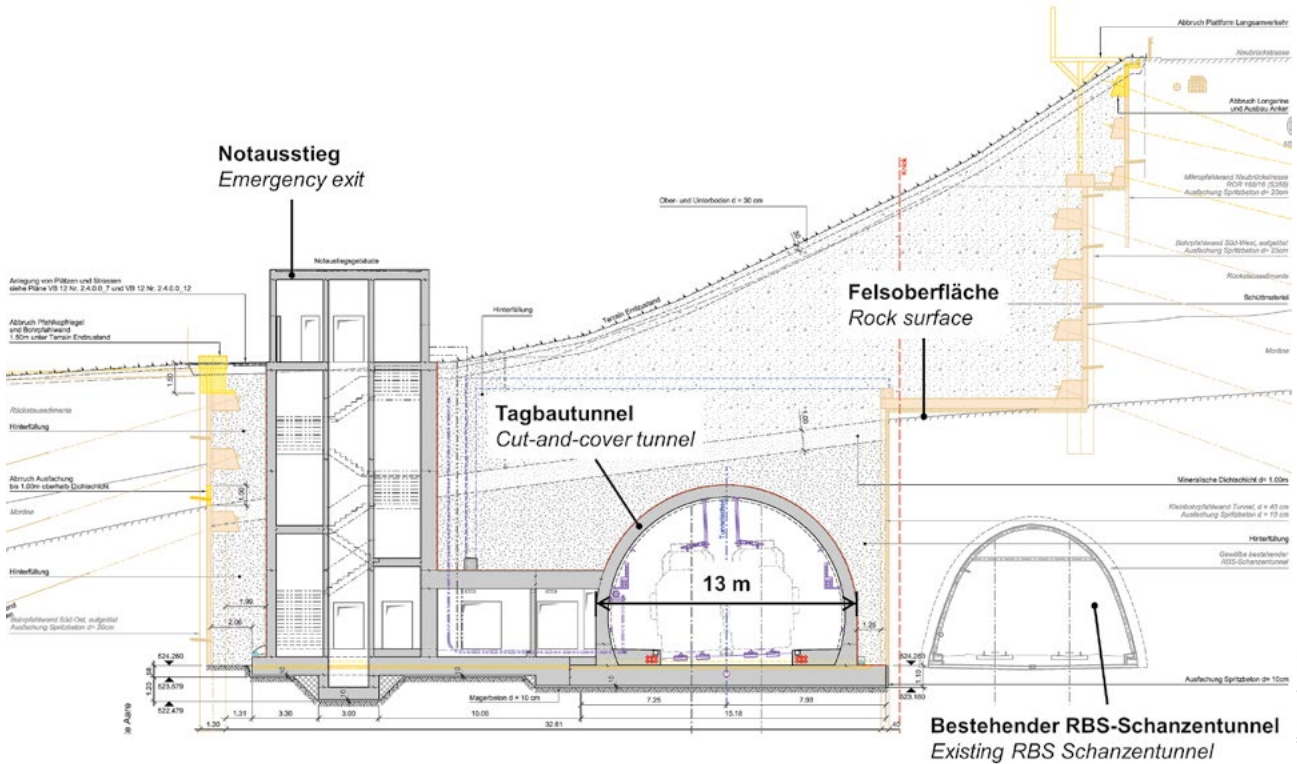
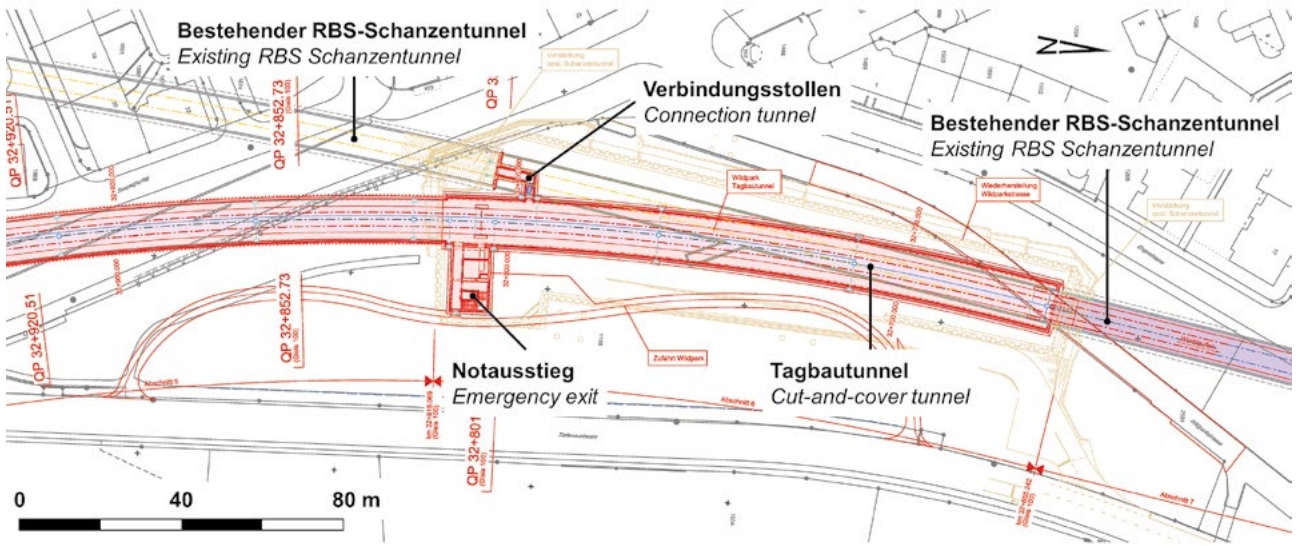
In order to link the new access line with the existing RBS infrastructure, the existing RBS Schanzentunnel has to be uncovered and demolished while still in operation. This highly demanding and exceptional measure requires the existing, non-reinforced vault to be reinforced beforehand by means of HEB steel arches every 0.8 m as well as longitudinal bracing with overlapping threaded rods and formwork mesh as protection against spalling (Fig. 23). The existing vault is opened carefully and with continuous monitoring by means of geodetic and tremor measurements as well as regular visual inspections and crack monitoring. Demolition takes place after segmentation of the vault portions in the transverse direction during total closure of the tunnel at weekends. For railway operation reasons, several weekends are planned for this. The subsequent construction works for the new junction takes place while the railway is still operating, with few exceptions.

The cut-and-cover tunnel (new) has a cover of 20 m. It consists of a semicircular vault with a diameter of 13 m, which runs over 2.5 m high, curved walls, and finally there is a 1 m thick, horizontal floor slab (Fig. 21).



20 Henkerbrünnli – Querschnitt (Blick in Vortriebsrichtung)
Henkerbrünnli – cross section (looking in direction of advance)

Expansion of Bern RBS Station • Challenging Urban Tunnel Construction



21 Wildpark – Situation (oben) und Querschnitt (unten, Blickrichtung Süd)
 Wildpark – situation (top) and cross section (bottom, looking south)

kann, ist die Erstellung der Bodenplatte in vier Längsetappen über mehrere Jahre verteilt erforderlich. Die Verschwenkung vom alten auf das neue Gleis mit Inbetriebnahme des neuen RBS-Bahnhofs erfolgt mittels provisorischer Weichen. Das Tunnelgewölbe kann aufgrund der schneidenden Verbindung zwischen neuem und altem Trasse erst nach der Inbetriebnahme des neuen RBS-Bahnhofs erstellt werden. Der Bau des Tunnelgewölbes sowie die Abdichtung und anschließende Wiederauffüllung erfolgen vollumfänglich unter laufendem Bahnbetrieb.

Because it is only possible to completely close a single track for a few weeks during the summer holidays, the floor slab has to be created bit by bit in four longitudinal sections over several years. The switching from the old to the new track upon commissioning of the new RBS Station is done by means of a temporary set of switch points. Due to the intersecting connection between the new and old line, the tunnel vault can only be created after the new RBS Station has been commissioned. The construction of the tunnel vault as well as the waterproofing and subsequent backfilling take place entirely while the railway is in operation.

Quelle/credit: [6]

4.6 Schanzentunnel (Bestand, Zufahrtstunnel) – Abschnitt 7

Der Abschnitt 7 beinhaltet die Instandsetzung des bestehenden RBS-Schanzentunnels entlang der 442 m, welche zwischen dem Bereich Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) und dem bestehenden Portal an der Tiefenastrasse verlaufen und weiterbetrieben werden (Bild 2). Dabei werden Unterbau (Tunnelsohle) und Oberbau der bestehenden Bahnanlage neu erstellt. Die Bauarbeiten erfolgen im Dreischichtbetrieb (die Hauptarbeiten nachts) unter einspurigem Bahnbetrieb während der Sommerferien.

5 Ausserbetriebnahme der bestehenden Anlagen – Abschnitte 8–9

5.1 Schanzentunnel (Bestand, Ausserbetriebnahme) – Abschnitt 8

Der Abschnitt 8 beinhaltet die Ausserbetriebnahme des bestehenden RBS-Schanzentunnels (Bild 2) zwischen dem Bereich Wildpark (Abschnitt 6, Kapitel 4.5) und dem bestehenden RBS-Bahnhof (Abschnitt 9, Kapitel 5.2). Die bahntechnischen Installationen werden rückgebaut. Der Schotteroberbau wird im Tunnel belassen. Der bestehende RBS-Schanzentunnel wird beim Portal zur Baugrube im

4.6 Schanzentunnel (Existing, to be Access Tunnel) – Section 7

Section 7 involves repairing the existing RBS Schanzentunnel along the 442 m extending between the Wildpark area (Section 6, Chapter 4.5) and the existing portal on Tiefenastrasse. This stretch of track will continue to be operated (Fig. 2). The substructure (tunnel floor) and superstructure of the existing railway track is rebuilt. The construction works are carried out in three shifts (the main work takes place at night) with one track remaining operational during the summer holidays.

5 Decommissioning the Existing Facilities – Sections 8–9

5.1 Schanzentunnel (Existing, to be Decommissioned) – Section 8

Section 8 involves decommissioning the existing RBS Schanzentunnel (Fig. 2) between the Wildpark area (Section 6, Chapter 4.5) and the existing RBS Station (Section 9, Chapter 5.2). The railway installations are dismantled. The ballast superstructure is left in the tunnel. The existing RBS Schanzentunnel is sealed off at the portal to the construction trench in Wildpark by means of a concrete wall. A man-sized connection tunnel between the existing tunnel and



22 Wildpark – Baugrube (Blickrichtung Süd)
Wildpark – construction trench (looking south)

Quelle/credit: Planergemeinschaft RBS-verbündet



Quelle/Credit: Planergemeinschaft RBS/Verbindet

23 *Bestehender RBS-Schanzentunnel – Verstärkung mit Stahlbögen*
Existing RBS Schanzentunnel – reinforcement with steel arches

Wildpark hin mit einer Betonwand verschlossen. Für Unterhaltsarbeiten und Kontrollgänge wird ein begehbare Verbindungsstollen zwischen bestehendem und neuem Tunnel erstellt. Auf der Seite des bestehenden RBS-Bahnhofs wird ebenfalls eine Abschlusswand erstellt. Diese wird mit einem Servicetor mit Tür ausgestattet und stellt einen mit einem Kleintransporter befahrbaren Zugang dar.

5.2 RBS-Bahnhof (Bestand, Ausserbetriebnahme) – Abschnitt 9

Neben dem bestehenden RBS-Schanzentunnel (Abschnitt 8, Kapitel 5.1) wird auch der bestehende RBS-Bahnhof (Bild 2) ausser Betrieb genommen (Abschnitt 9). Alle bahntechnischen Installationen inklusive Gleise und Schotteroberbau werden rückgebaut. Anschliessend wird der bestehende RBS-Bahnhof im Rohbau der SBB übergeben.

6 Schlussbemerkungen

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» wurde vom Bundesamt für Verkehr (BAV) im Mai 2017 bewilligt [1]. Die Bauarbeiten starteten im Juli 2017 [3]. Bis Ende 2019 (Zeitpunkt des Verfassens des vorliegenden Beitrags) konnten der Schacht Laupenstrasse (Abschnitt 1, Kapitel 3.2), Teile der setzungsmindernden Massnahmen beim PostParc (Abschnitt 1, Kapitel 3.5), Teile des Deckels im Eilgutareal (Abschnitt 3, Kapitel 4.2) und Teile der Baugrube im Wildpark sowie die vorgängige Verstärkung des abzubrechenden Gewölbes des bestehenden RBS-Schanzentunnels (Abschnitt 6, 4.5) realisiert werden. Die Bauarbeiten für den Stollen Laupenstrasse (Abschnitt 1, Kapitel 3.2) starteten im Dezember 2019. Der Baubeginn der Hauptarbeiten ist für September 2020 (Zulaufstrecke, Abschnitte 2–7, Kapitel 4) respektive November 2020 (Bahnhofskavernen, Abschnitt 1, Kapitel 3.1) geplant [5] [6]. Die Inbetriebnahme des neuen RBS-Tiefbahnhofs soll

the new tunnel is created for maintenance work and inspection purposes. A wall is also used to seal off the existing RBS Station. It is fitted with a service door with a smaller door and provides access for light commercial vehicles.

5.2 RBS Station (Existing, to be Decommissioned) – Section 9

In addition to the existing RBS Schanzentunnel (Section 8, Chapter 5.1), the existing RBS Station (Fig. 2) is also decommissioned (Section 9). All railway installations including tracks and ballast superstructure are dismantled. Then, the shell of the existing RBS Station is transferred to the SBB.

6 Final Remarks

The project «Expansion of Bern RBS Station» was approved by the Federal Transport Office (BAV) in May 2017 [1]. Construction work started in July 2017 [3]. The Laupenstrasse Shaft (Section 1, Chapter 3.2), parts of the settlement-reducing measures for the PostParc (Section 1, Chapter 3.5), parts of the cover in Eilgutareal (Section 3, Chapter 4.2) and parts of the construction trench in Wildpark as well as the preliminary reinforcement of the vault to be demolished of the RBS Schanzentunnel (Section 6, 4.5) were completed by the end of 2019 (the time at which this report was written). The construction works for the Laupenstrasse Tunnel (Section 1, Chapter 3.2) started in December 2019. The main works are scheduled to start in September 2020 (access line, Sections 2–7, Chapter 4) and November 2020 (station caverns, Section 1, Chapter 3.1) [5] [6]. Commissioning of the new RBS underground station is expected to take place in December 2027 [5]. End of construction is scheduled for July 2030 [6].

The total cost of the project «Expansion of Bern RBS Station» amounts to CHF 614 million [1] [3].

The project «Expansion of Bern RBS Station» is another example of a unique Swiss underground construction project that presents diverse challenges for all involved. Safe and efficient construction of the new RBS infrastructure in an urban environment while maintaining railway operation (of the SBB and RBS) and partially within existing facilities requires specific, sophisticated and, at times unusual, solutions that could only and can only be implemented through professional and constructive cooperation between all involved.

Literatur/References

- [1] <https://www.rbs.ch/der-neue-rbs-bahnhof-bern/>; 10.01.2020.
- [2] <https://www.zukunftbahnhofbern.ch/de/home/>; 10.01.2020.
- [3] Spring, D. (2018): Ausbau RBS-Bahnhof Bern – Projektentwicklung bis heute und Herausforderungen aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Congress 2018, Fachtagung für Untertagbau, Luzern; 124–137; FGU Fachgruppe für Untertagbau.

im Dezember 2027 erfolgen [5]. Das Bauende ist für Juli 2030 geplant [6].

Die Kosten für das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» belaufen sich auf 614 Millionen Schweizer Franken [1] [3].

Das Projekt «Ausbau Bahnhof Bern RBS» stellt ein weiteres einmaliges Projekt des schweizerischen Untertagbaus dar, das in mehrfacher Hinsicht für alle Beteiligten herausfordernd ist. Der sichere und effiziente Bau der neuen RBS-Infrastruktur in städtischer Umgebung, unter Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs (der SBB und der RBS) und teilweise im Bestand erfordert spezifische, durchdachte und auch nicht alltägliche Lösungen, die nur dank der professionellen und konstruktiven Zusammenarbeit aller Beteiligten implementiert werden konnten respektive zu implementieren sein werden.

- [4] Ramoni M., Meystre N., Spring D. (2017): The new RBS railway station: the excavation of two large shallow caverns below the railway main station of Bern (Switzerland). Underground solutions, ITA World Tunnel Congress, Bergen; 1–10; Norwegian Tunnelling Society.
- [5] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.3 Bahnhof. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 17.06.2019.
- [6] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausschreibung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitte 2 bis 6, 8 und 9; Los 2.4 Untertag- und Tagbau. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 12.04.2019.
- [7] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Bauprojekt. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 31.01.2016.
- [8] Ausbau Bahnhof Bern RBS, Ausführung. Teilprojekt 1 – Rohbau; Abschnitt 1; Los 1.4 Stollen Laupenstrasse. Planergemeinschaft RBS^{verbindet}, 10.12.2019.

PROJEKTDATEN

Geografische Lage

Schweiz, Kanton Bern, Gemeinde Bern
RBS-Strecke Worblaufen–Bern,
Bahn-km 32.213–33.942

Bauherr, Projekt- und Oberbauleitung

Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS),
Worblaufen/CH

Planung und Bauleitung

Planergemeinschaft RBS^{verbindet}:
Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH;
B+S AG, Bern/CH;
Emch+Berger AG, Bern/CH;
Theo Hotz Partner AG, Zürich/CH;
diverse Subplaner

Ausführung/Inbetriebnahme [3] [5] [6]

2017–2030/2027

Kosten [1] [3]

614 Millionen Schweizer Franken

Hauptmengen [7]

Aushub (Tagbau), fest:	170 000 m ³
Ausbruch (Untertagbau), fest	265 000 m ³
Abbruch/Rückbau, fest:	35 000 m ³
Beton/Spritzbeton inkl. Rückprall:	160 000 m ³
Stahl:	16 000 t
Kies (Hinter- und Auffüllung, Planie):	80 000 m ³

PROJECT DATA

Geographical location

Switzerland, Canton of Bern, Municipality of Bern
RBS line Worblaufen–Bern,
rail km 32.213–33.942

Client, project management and senior site management

Regionalverkehr Bern-Solothurn AG (RBS),
Worblaufen/CH

Planning and site management

Planergemeinschaft RBS^{verbindet}:
Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH;
B+S AG, Bern/CH; Emch+Berger AG, Bern/CH;
Theo Hotz Partner AG, Zürich/CH;
various subcontractors

Construction/commissioning [3] [5] [6]

2017–2030/2027

Costs [1] [3]

614 million Swiss francs

Key quantities [7]

Excavation (open cut), solid:	170,000 m ³
Tunnelling (underground), solid:	265,000 m ³
Demolition/dismantling, solid:	35,000 m ³
Concrete/shotcrete incl. rebound:	160,000 m ³
Steel:	16,000 t
Gravel (backfilling, grading):	80,000 m ³



Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works

The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

Gianluca Comin, TBM Production Manager, Ghella S.p.A./IT
 Florent Martin, Project Director, Spie Batignolles Génie Civil/FR
 Calogero Acquista, TBM Site Manager, Ghella S.p.A./IT
 Giovanni Giacomini, Tunnel Division Director, Ghella S.p.A./IT

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works

The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

A single-shield 11.25-metre hard-rock TBM bored the first 8.7-kilometre long drive, between Saint-Martin-La-Porte and La Praz, of the Mont-Cenis base tunnel in the new high-speed railway link Lyon–Turin in France. The geology is characterised by fault zones with a high coal content, high fractured rock mass and high water inlets. The paper highlighted all of the exceptional events encountered during the excavation and all of the method statements applied to overpass these critical zones.

1 Framework of the Project

Saint-Martin-La-Porte 4 is the first lot excavated in the axis of the new high-speed railway link Lyon–Turin. This project includes the excavation of 10.5 km of the future two 57-kilometre long tunnels in the Mont-Cenis base tunnel between France and Italy. The project is a key element of the new European transport network RTE-E. The client is the public promoter TELT sas, the works management was entrusted to Egis/Alpina and the tender was awarded by JV Spie Batignolles-Eiffage-Ghella-CMC-Cogeis.

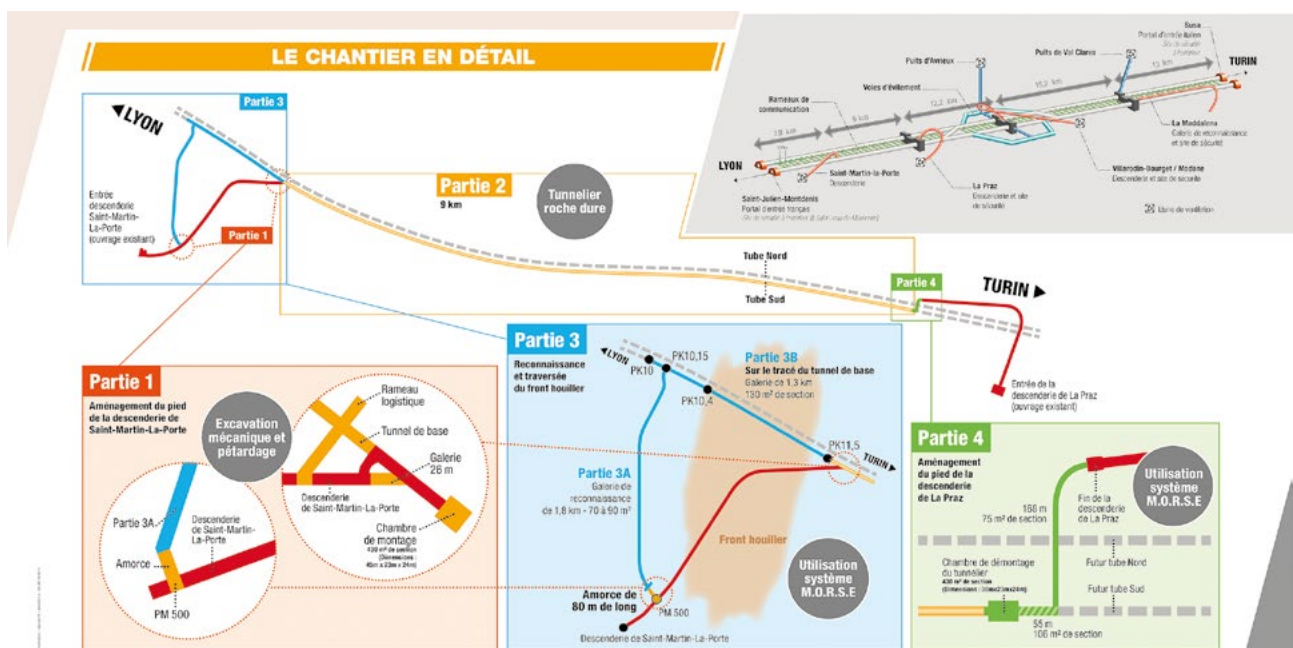
The contract is divided into four operational parts: three starting from the 2.4-kilometre long Saint-Martin-La-Porte access tunnel (parts 1 and 3A–3B by conventional methods and part 2 by mechanised tunnelling) and one developing

from the 2.5-kilometre long La Praz access tunnel by conventional methods (part 4).

2 Geology

The overall geology of the project is enclosed, from Saint-Martin-La-Porte to La Praz, in two main formations: Zone Sub-Briançonnaise (ZSB) and Zone Houillère Briançonnaise (ZHB). ZSB gradually changes into ZHB passing from an overlapping tectonic contact named Front Houillère (FH).

- ZSB => marly limestone, massive limestone and calc-schist
- FH => anhydrite, gypsum and cornelian
- ZHB => divided from east to west into four geological units: Encombres, Brequin-Orelle, La Praz and Forneaux,



1 Mont-Cenis base tunnel overview and Saint-Martin-La-Porte site

Credit: Groupement S/M/P4

Erkundungsarbeiten bei Saint-Martin-de-la-Porte

Erste TBM-Tunnelbohrung an der Achse des künftigen Mont-Cenis-Basistunnels

Saint-Martin-de-la-Porte ist ein Schlüsselement des «mediterranen Korridors» Nr. 3 des transeuropäischen Transportnetzes RTE-T. Die Kosten für dieses Projekt belaufen sich auf 391 Millionen Euro (422.4 Millionen Schweizer Franken) und verteilen sich zu 50 % auf die Europäische Union und zu jeweils 25 % auf Frankreich und Italien. TELT vergab den Auftrag im Oktober 2014 an das Joint Venture der Unternehmen Spie Batignolles, Eiffage TP, Ghella, CMC und Cogeis. Für das Baustellenmanagement wurden Egis und Alpina verpflichtet. TPM begann im August 2016 mit den Vortriebsarbeiten, am 23. September 2019 konnte schliesslich der Durchbruch gefeiert werden. Mit der Tunnelbohrung gewann man bessere geologische Kenntnisse über diesen grenzüberschreitenden alpinen Streckenabschnitt, die nun bei sämtlichen künftigen Ausschreibungen berücksichtigt werden können.

Travaux exploratoires de Saint-Martin-La-Porte

Le premier passage de tunnelier sur l'axe du futur tunnel du Mont-Cenis

Le chantier de Saint-Martin-La-Porte est un élément-clé du « Corridor Méditerranée » nombre 3 du RTE-T. Ce projet représente un cout de 391 millions d'euros (422,4 millions CHF) et il est financé à 50 % par l'Union européenne, 25 % par la France et 25 % par l'Italie. Le contrat a été attribué par le maître d'ouvrage TELT au groupement Spie Batignolles-Eiffage-Ghella-CMC-Cogeis en octobre 2014. La maîtrise d'œuvre a été confiée à Egis et Alpina. Le tunnelier a commencé le creusement en aout 2016 et le percement a été célébré le 23 septembre 2019. L'objectif d'exploration de cette galerie a permis d'améliorer la connaissance de la géologie de cette section frontalière pour les futurs appels d'offres.

Opere esplorative di Saint-Martin-La-Porte

La prima TBM Drive sull'asse del futuro tunnel del Moncenisio

Il cantiere di Saint-Martin-La-Porte è un elemento chiave del «Corridoio Mediterraneo» n° 3 del TEN-T. Questo progetto rappresenta un costo di 391,0 milioni di euro (422,4 milioni CHF) ed è finanziato al 50 % dall'Unione Europea, al 25 % dalla Francia e al 25 % dall'Italia. Il contratto fu affidato dal committente TELT al raggruppamento temporaneo di imprese Spie Batignolles-Eiffage-Ghella-CMC-Cogeis nell'ottobre 2016. La direzione lavori fu confidata a Egis e Alpina. La fresa iniziò lo scavo nell'agosto 2016 e l'abbattimento fu celebrato il 23 settembre 2019. L'obiettivo geognostico della galleria ha consentito di migliorare la conoscenza geologica di tale sezione transfrontaliera in vista di tutte le future gare di appalto.

substantially from arenaceous and black shale with coal levels to sandstone and conglomerate. Coal faults and shale with a high coal fraction were foreseen in the preliminary project.

Parts 3A and 3B respectively are inscribed in the ZSB and directly inside the contact FH/ZHB. Instead, parts 2 and 4 settled in the two middle geological units of the ZHB. From Saint-Martin-La-Porte to La Praz, coal content was increasingly lower until its absence. Heterogeneity constantly affected the face conditions but, towards the closing to La-Praz, better geotechnical properties were encountered; water inflow up to 80 l/s affected the TBM boring with the contemporary augmentation of the thermic gradient and water temperature from 20°C to 36/38°C.

Part 2 was bored inside the ZHB passing from the Brequin-Orelle unit to the La Praz unit. Part 2 starts from the TBM assembly cavern at PK11+793 to its disassembly cavern at PK20+588, so a 8.7-kilometre long tunnel with a nominal excavation diameter of 11.25 m. Part 2 was an exploratory tunnel needed to improve the lack of vertical exploration holes drilled generally from the surface (approximately one

probe/km), justified by the high overburden ranging between 800 to 1,100 metres and due to the complicated terrain which made surface access in parts impossible.

From the preliminary geological synthesis, several uncertainties along the tunnel alignment remained. These concerned:

- Discretisation of faults and coal levels
- Presence of mixed face, characterised by intensive fracturing and heterogeneity
- Variability of the inclination of the schistosity compared with the theoretical face plan
- Presence of high hydraulic loads and localisation of water inlets

This paper is focalised on the Saint-Martin-La-Porte (SMP4) part 2.

3 Chronology of Encountered Events During Excavation

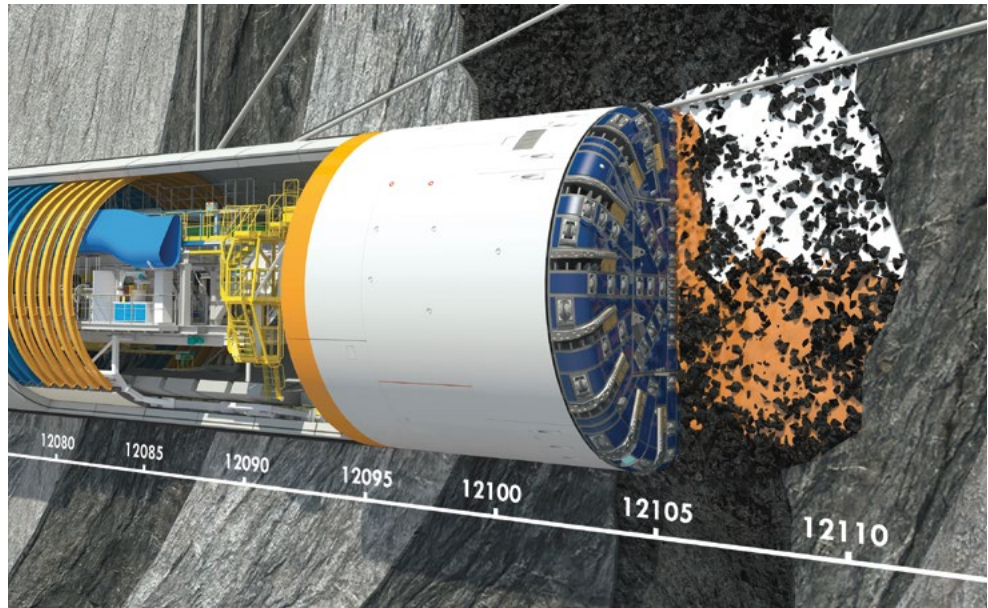
Seven main relevant events, from E1 to E7, influenced the boring of the TBM drive of the SMP4 part 2. The summary of these events is shown in Table 1.

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works • The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

external core drilling machine (this coring unit was assembled by an external society directly on a platform close to the shield).

3.1.2 TBM Exceptional Mode

Under regular/normal circumstances, the invert element would be installed with the use of the segment hoist above ring N-13. In exceptional mode, the invert was directly built above the second-to-last ring mounted. In order to perform this operation, a conceived TBM



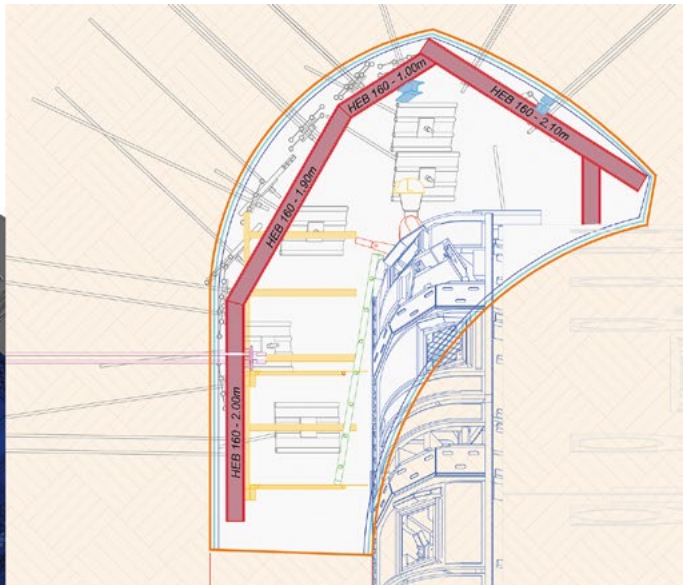
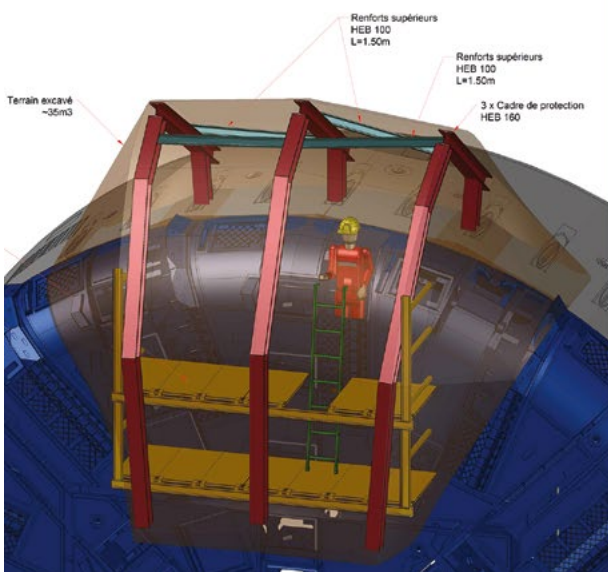
Credit: Groupement SMP4

3 3D view of face treatments applied to overpass the first fault zone



Credit: Groupement SMP4

4 Additional coring with an external drill machine installed on CB and a cutterhead arm filled by expansive resin and polystyrene blocks



Credit: Groupement SMP4

5 3D view and lateral view of the first welding chamber for TBM cutterhead refurbishment

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works • The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

conversion was needed to dismantle the segment feeder, installing two extension beams for the invert hoist, installing twin crutching cylinders (necessary to permit the cantilevered translation of the invert hoist) and installing, alternatively with the ring building, the clamping tool for steel rib elements. The invert hoist is in parking position as standard and exclusively used in exceptional mode. During exceptional conditions, eight to 12 working hours are necessary on average for a complete 1.5-metre-long cycle.

3.1.3 Tunnel Face and Surrounding Treatments

Different types of face treatments were performed during E1:

- Partial filling of the cutterhead chamber with bi-component expansive resin to limit the inflow of material (in addition to that and to reduce the resin consumption, polystyrene blocks were added). Approx. 8,600 kg of resin were used to perform this operation.
- 1-metre-long fibreglass bolts were drilled into the face through the disc cutter pockets and injected with bi-component expansive resin. A total of approx. 5,200 kg of resin was used.
- 8-metre-long casing pipes, both inclined and horizontal, equipped with an injection packer to create a resin-proof barrier were drilled into the face in front of the cutting wheel. A total of approx. 10,800 kg of resin was used.
- 12-metre-long casing pipes, both inclined and horizontal, equipped with an injection packer to improve the cohesion of the fault ground by the injection of a bi-component chemical liquid binder – injections performed with a high-pressure pump. Approx. 39,500 kg of chemical liquid was used.

With regard to the treatment of the machine vicinity, multiple injections were carried out at the face and at the extrados of the shield with water-based organic biodegradable high-viscosity polymer, with bentonite and with a foaming agent (the latter is normally used on EPB machines for face stabilisation).

3.1.4 Ring Reinforcement and Cutting Wheel Opening Ratio Reduction

22 HEB 180 steel ribs and 30 HEB 240 steel ribs between rings 187 and 212 and several self-drilling anchors were installed with the use of pneumatic hammers to reinforce the segmental lining close to the shield. Moreover, multiple expansive resin barriers were realised surrounding the last rings to completely block the segmental lining through bi-component injections.

The opening ratio of all cutterhead muck buckets was reduced from 8% to 4.5% by adding four steel plates in all 16 bucket openings and an additional fifth plate in only 8 of the 16 muck buckets. This modification limited the inflow of liquid muck into the inside of the cutter head and reduced the overloading of the TBM conveyor.



Credit: Caroline Moureaux



Credit: Groupement SMP4



Credit: Groupement SMP4

6 First welding chamber: replacement of anti-wear plates and replacement of supports of bucket tools



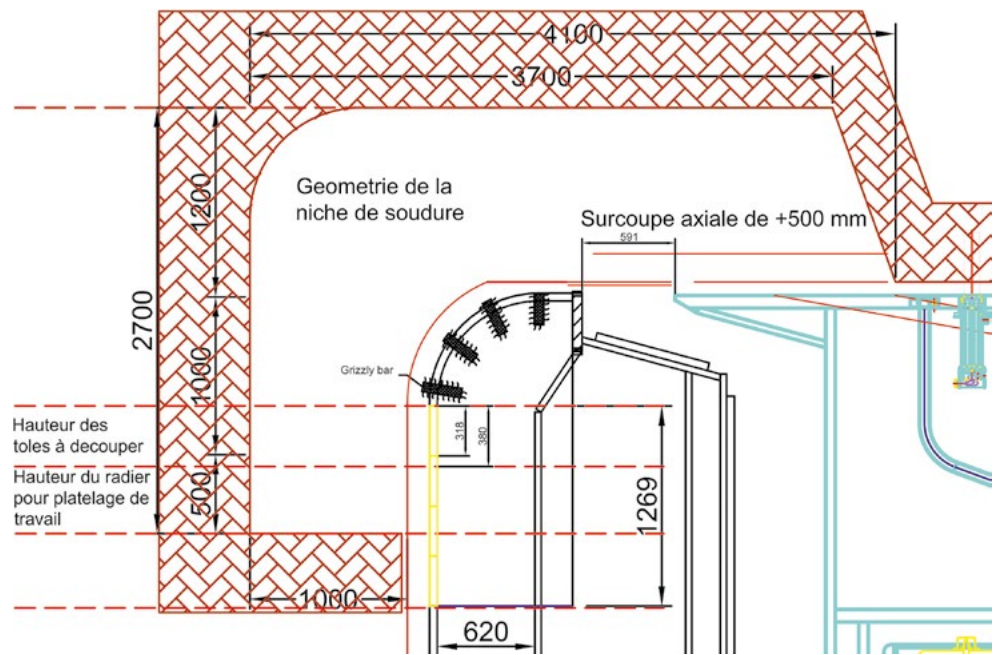
Credit: Groupement SMP4

7 Practical method statement for annular grout injection in three stages

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works •
The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

3.2 First Cutting Wheel Maintenance

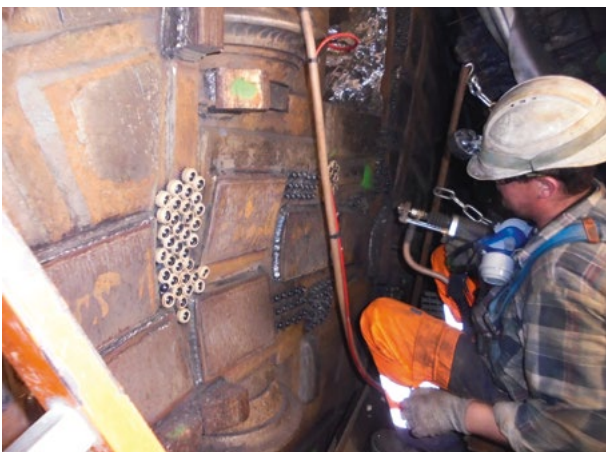
All along the TBM alignment, a systematic void between the face and cutterhead (ranging between 50 cm and 3.5 m) and the heterogeneity of the unstable blocky face resulted in a premature damaging of the anti-wear plates and the muck buckets on all arms. Moreover, two significant grooves in the cutterhead structure were observed corresponding to the points where the excavated material entered into each arm. A chamber in the crown area in front



8 Second welding chamber: repairing of the radial cutterhead rim with trapezoidal anti-wear plates and weld of carbide studs



Credit: Groupement SMP4



Credit: Groupement SMP4



Credit: Groupement SMP4

9 Example of repair works on cracks that appeared in disc tool housings

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works •
The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel



Credit: Groupement SMP4



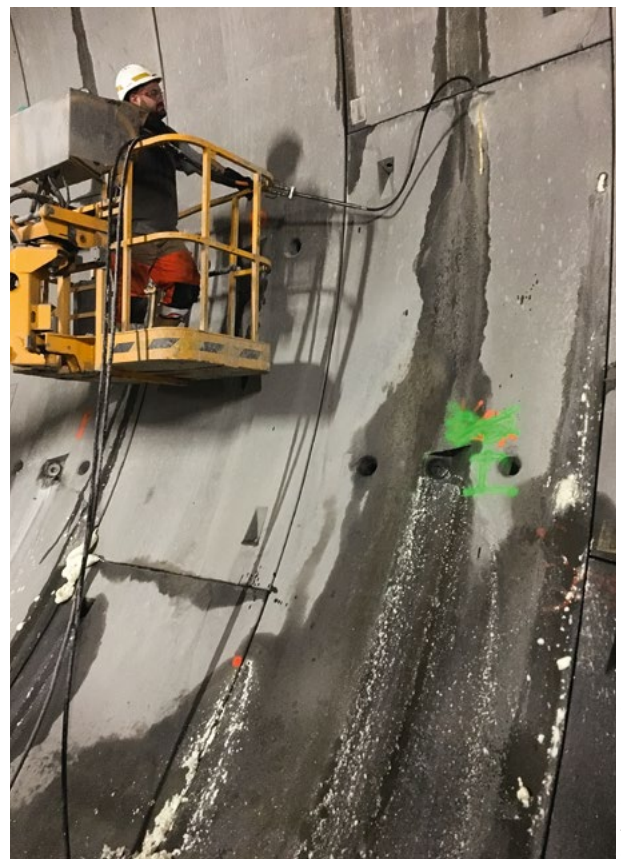
Credit: Groupement SMP4

of and above the cutterhead, with the dimension of $6 \times 5 \times 1.35$ m, was built from the inside of the cutterhead (excavated by traditional methods using emulsion cartridge explosives, drilling the face with handheld pneumatic hammers and supported by Swellex type bolts), a room just big enough to allow the repair works by an external welding society supervised by the TBM manufacturer. The activity focused on the replacement of parts of the anti-wear plates, the welding of additional steel "V" element as shock protection for the disc cutters and the replacement of all bucket wear support blocks as used on EPB cutterheads.

Concerning the working time: five days were required for the excavation of the chamber (including installation of roof support) and 70 days for welding works (24 hours a day, 7 days a week with 3 shifts per day).

3.3 Second Coal Fault

E3 was a 15-metre-long fault characterised by a huge tectonic grade and a high fracturing grade, implying an excavated material without cohesion with an important presence of fines (no coal found). This involved an unstable face and an uncontrolled muck flow into the chamber of the cutting wheel. The breakout torque value of the cutterhead reached at ring 2,209 a peak torque of 29 MNm and a measured muck flowrate of 8 tons/mm. Between rings 2,213 and 2,217, the total weight of material excavated was at 15,700 tons with a peak of 5,200 tons at ring 2,216. During the corresponding standstill:



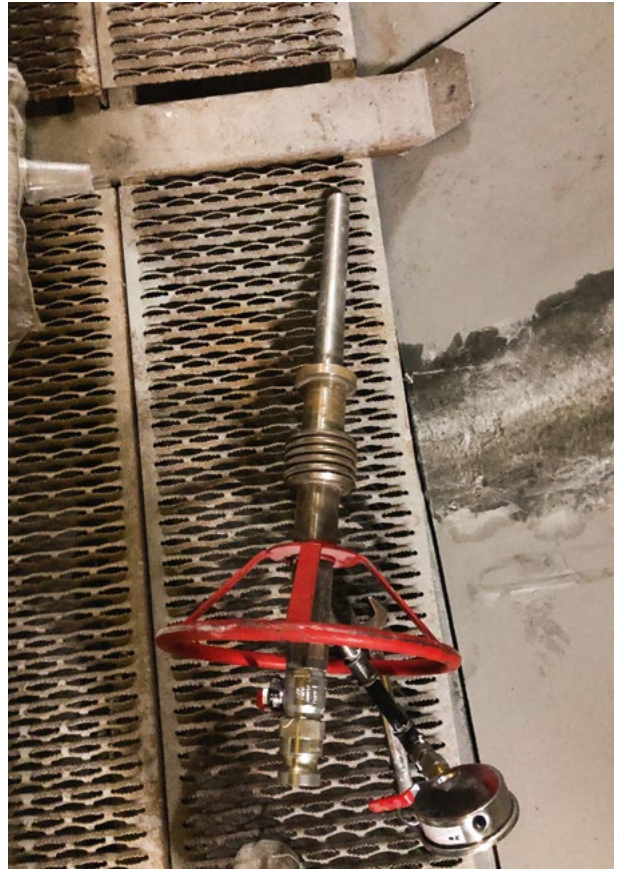
Credit: Groupement SMP4

10 Typical water inflow in zone A and implementation of a water-reactive resin barrier

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works •
The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel



Credit: Groupement SMP4



Credit: Groupement SMP4



Credit: Groupement SMP4

11 Premixed grout injection in zone A with worm pump and type of injection lance used

- Four core drilling were carried out (each one 67 mm in diameter), globally 62.3 m of core samples were obtained, showing the residual extension of the fault from 5 to 8 m (localised at the right side of the face)
- Complete closing of eight muck buckets out of 16 with special bolted steel plates instead of scrapers (replacing the arduous method of filling each arm with expanding resin)
- Three stages of gap grouting through the probe holes and casing pipes using a high-pressure pump; approx. 24 m³ of a mix of water, bentonite, cement, plasticiser and retarding agent were injected in a total of three days
- Installation of 15 HEB 180 steel ribs and 11 HEB 240 steel ribs between rings 2,207 and 2,220 as a safety measure

3.4 Second Cutting Wheel Maintenance

The periodic checking of the cutting wheel status permitted the assessment of the necessity to intervene on the peripheral drill rim. The radial cutterhead rim is placed on the backward circumference of the cutting wheel where the excavated material tends to accumulate before being charged by the rear scrapers. It was affected by a huge wear, directly exposing the internal structure of the cutterhead. Another chamber to allow welding works, with dimensions 4 × 2.7 × 1 m, was excavated using exactly the same method as the first one. The welding activity, always performed by an external specialised company, focused on renewing the welding seams surrounding the anti-wear plates and attaching these onto the cutterhead, filling the grooves of washed-out welding seams on the inside of the cutterhead, weld-

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works • The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

ing the trapezoidal wear plates on the circumference of the cutterhead and the welding of anti-wear tungsten carbide studs.

Time needed for the refurbishment: five days for excavation of the chamber and 25 days for welding works (24 hours a day, 7 days a week with 3 shifts per day).

3.5 Third Cutting Wheel Maintenance

At the end of the TBM drive, just before the last 500 m of excavation, refurbishment of the disc cutter housings had to be carried out by TBM site maintenance shift welders. Cracks developed inside the cutter housing caused by vibrations between the disc cutter and its supports (casted in the housing). These vibrations deformed the housing supports where the blocking edges were placed, causing, at the same time, the breaking of the disc cutter fixing bolts. The damage required a rebuild of the supports by re-welding the damaged area, closing of all cracks and re-welding of the seams fixing each housing to the cutterhead main structure.

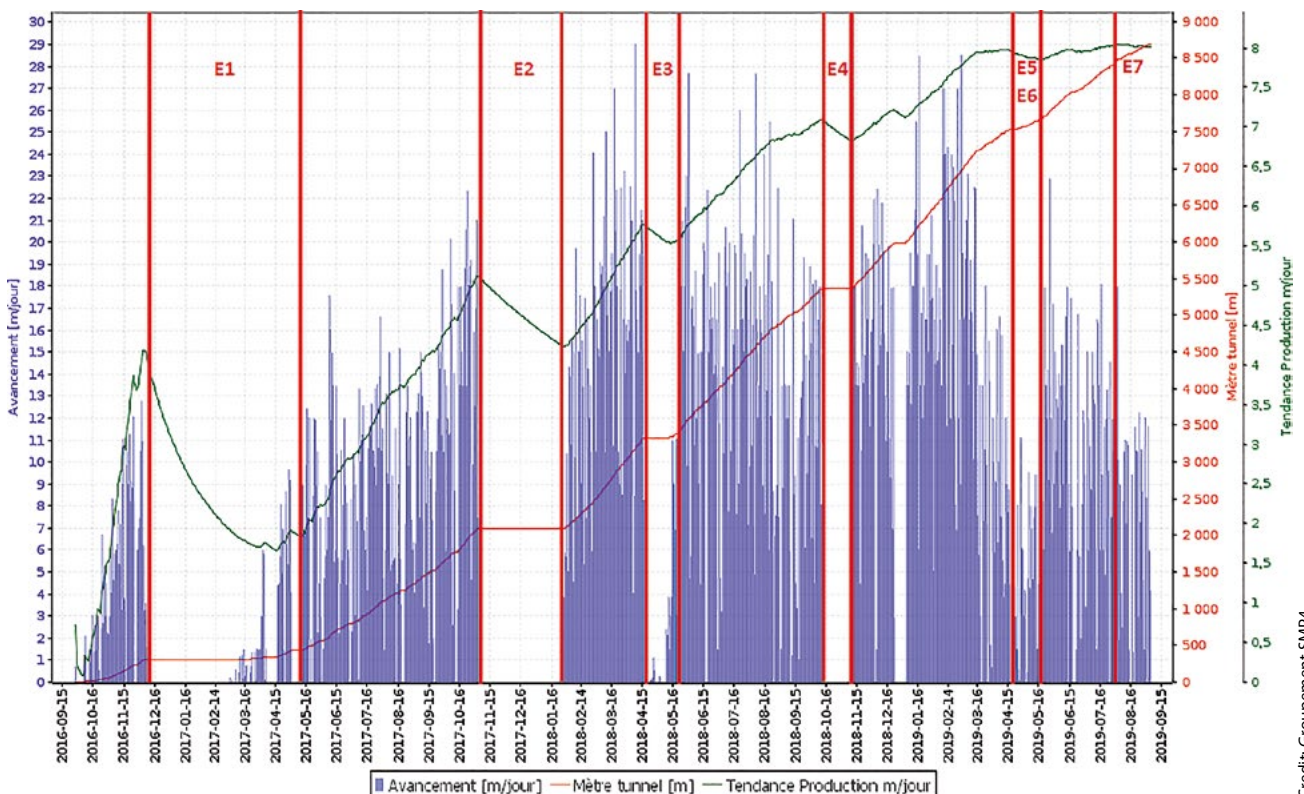
Time required for the repair works: six days in total (1,5 shifts per day, 12 hours a day).

3.6 First High Water Inlets Zone

E6 impacted sensibly the TBM excavation, causing the slowdown of the advance rate from 14.5 to 5.5 m/day. High water inflows from 10 to 80 l/s on the conveyor when boring and inside the tail shield (overflowing from the

main drive passages) during standstill involved the obligation to:

- Add, at the normal excavation cycle, the time needed to clean the significant accumulation of muck inside the backup with dumpers and excavators
- Add, at the normal excavation cycle, the time needed to empty the chamber (rotating the cutting wheel) by the water accumulated during the ring building or standstill
- Add a drainage pump at the bottom of the middle shield of 150 m³/h connected to the existing 8-inch pipe to increase the drainage speed of water in the tail shield
- Add two additional cleaning teams, one in the TBM and one along the access tunnel, with one excavator (2.8-ton capacity) and two dumpers (6-ton capacity) each
- Considerably increase the time spent on the cleaning operations of the mud pumps in the frontal shield (with a large number of replacing pumps damaged by this encountered situation)
- Constantly clean the drainage duct inside the invert element plugged entirely with mud and fine material several times in advance
- Increase the cleaning operation frequency of pumping basins at the beginning of the part 2 tunnel, doubling up the assistance of the vacuum trucks (huge quantity of fine particles clogged, at an exceptional speed, the pumping stations placed for water drainage to the yard)
- Carry out exceptional cleaning operation on the settling tanks in the depuration plant on the yard due to the huge deposit of compacted mud causing the blocking of mixing paddles



12 TBM production rate with exceptional events (E)

Credit: Groupement SMP4

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works • The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel



Credit: Groupement SMP4

13 TBM breakthrough in La Praz

Moreover, these high water inflows impacted the capacity of the bi-component injection to correctly fill the annular void. The bi-component injection material was flushed out in this section (not assuring a homogeneous filling) and a non-negligible ovalisation of several rings culminated, resulting in the cracking of the top part of the segmental lining. In order to limit this phenomenon, a series of expansive bi-component resin barriers were implemented through the injection sockets at atmospheric pressure in the last-built ring after an advance. The problem was the type of resin applied up until that moment. It did not swell in contact with water, tending to be washed out. At this stage, water-reactive resin was applied using mechanical packers fixed in holes preliminarily drilled radially through the segment ring. Cracks typically appeared immediately after the tubbing ring was pushed out of the tail shield, worsening subsequently. The cracks were continuously monitored in the months following the excavation, with some showing gaps of up to 20 mm. A potential reparation approach could be applied, if confirmed by the client, through the injection of structural epoxy resins combined with other special sealing products.

Huge impacts were noticed along the muck conveying line from TBM to the disposal areas, resulting in several and continuous malfunctions of the entire chain. The accumulation of mud at the return station of each conveyor (below its supporting structures, between drums, etc.) and the high amount of water above the rubber belt resulted in unpre-

dictable situations that involved long and random periods of dead time. Above all, the storage capacity of the temporary disposal areas was extremely reduced due to the liquid mud status of the excavated material. Its consistence did not allow the exploitation of the primary disposal area in Saint Felix because the gradient of the two conveyors was too high to permit the evacuation of the liquid part of the muck. So, even if the available storage space on the yard was strictly limited to emergency situations, this area was used to discharge the liquid muck, creating with loaders a contour barrier and managing it with 24-hour monitoring by a 30-ton excavator.

3.7 Second High Water Inlets Zone

E7 impacted the TBM production in a limited way compared with E6, with the slowdown of the advance rate from 10.8 to 8.2 m/day. These low performances in the last tunnel section, almost never over 10 m/day, were above all due to a prominent problem with the tensioning hydraulic winch of the belt storage. This 120-metre-long zone was affected by the same problems described for E6 but to a lesser extent due to the significantly lower water inlets (measuring between 5 and 30 l/s).

E6 and E7 impacted respectively an A section (between ring 5000 and ring 5150, so 225 m) and B section (between ring 5630 and 5730 so 135 m). These sections were treated with the secondary injection of a premixed grout characterised by

Saint-Martin-La-Porte Exploratory Works • The First TBM Drive on the Axis of the Future Mont-Cenis Tunnel

Event (E) and Normal Boring Period (T)	From	To	Duration (Days)	Advance (m)	Daily Advance Rate		Monthly Advance Rate			
					Average	Maximum	Average	Maximum		
T1	28.09.2016	05.12.2016	69	290.5	5.1	12.8	126.3	190.6		
E1	06.12.2016	12.05.2017	158	129.0	1.5	9.7	24.5	96.5		
T2	13.05.2017	03.11.2017	175	1,665.8	9.7	22.5	285.6	406.7		
E2	04.11.2017	26.01.2018	84	Standstill for first cutterhead maintenance => zero advance						
T3	27.01.2018	16.04.2018	80	1,219.2	15.2	29.4	457.2	540.0		
E3	17.04.2018	23.05.2018	37	106.3	3.4	14.4	86.2	250.6		
T4	24.05.2018	10.10.2018	140	1,929.7	14.1	43.6	413.5	477.1		
E4	11.10.2018	12.11.2018	33	24.0	4.0	13.5	21.8	24.0		
T5	13.11.2018	17.04.2019	156	2,156.2	14.9	30.0	414.7	516.1		
E5	18.04.2019	22.04.2019	5	4.5	1.1	4.4	27.0	–		
E6	17.04.2019	22.05.2019	36	184.6	5.4	17.9	153.8	256.7		
T6	23.05.2019	31.07.2019	70	738.2	11.0	22.9	316.4	334.0		
E7	01.08.2019	14.08.2019	14	115.6	8.3	18.0	247.8	228.2		
T7	15.08.2019	04.09.2019	21	134.7	7.1	12.6	192.4	228.2		

Table 2 TBM performances in E and during normal boring periods (T)

great resistance to washout even with water under pressure. This special grout injection was preceded by the compartmentation of these zones into subzones with the creation of water-reactive resin barriers (Approximately one barrier every 10 or 15 rings equal to 15 and 22,5 m). Two bi-component pumps for resin and one worm pump with mixer for grout, supplied electrically by a 45 kVA generator, were used to fill all residual cavities in the annular gap of these zones.

3.8 TBM Performances

In Fig. 12 and in Table 2, the TBM performance is summarised and shown. T1 to T7 represents the boring periods in normal excavation conditions. E1 to E6 are all events impacting the TBM advance rate. In these events, the TBM was stopped or significantly slowed down. From the start of the TBM at the beginning of September 2016 to its breakthrough in September 2019, 1,126 calendar days passed with a daily average production rate of 7.7 m/day, a weekly average production rate of 54.1 metres per week and a monthly average production rate of 231.8 m/month. Maximum TBM advance rates, daily and monthly respectively, of 30 m/day and 540.0 m/month were reached.

3.9 Conclusions

This project is a clear example of how much the uncertainty of geological knowledge could influence the advance of a tunnel boring machine. The single-shield hard-rock TBM employed was greatly modified and adapted to cope with all particular geological incidents encountered along the alignment. Even though it was already conceived at the design stage with a series of special devices in order to face difficult boring conditions, the exceptionality of the events found necessitated the reinvention of methods and equipment to overpass each geological singularity.

References

- [1] Long and deep single-shield TBM in very complicated geology under the Alps. Saint Martin La Porte, C. Acquista, G. Giacomini, F. Martin and G. Comin.

PROJECT KEY DATA

Region

Savoy, France

Client

TELT sas (Tunnel Euralpin Lyon-Turin)

Design, site supervision and construction management

- Egis
- Alpina

Execution

Spie Batignolles Génie Civil, Eiffage Génie Civil, Ghella, CMC di Ravenna, Cogeis

Key data

Construction period: 7 years

Start of operations: 3 November 2014

Construction costs: 391.0 million euros
(422.4 million Swiss francs)

Length: 8.7-kilometre long tunnel
(south tube of the base tunnel)

Excavated cross

section: 99.3 square metres

Special features

Single-shield hard-rock TBM equipped with special devices such as steel rib ring, bolting/coring ring, bi-component injection system, secondary grouting system, invert hoist for exceptional conditions and steel rib clamping system for erector.



Tunnel de Ligerz

Une longue histoire

Philippe Cornaz, référent, ingénieur ETS/HES, CFF Infrastructure, Lausanne/CH
Marie-France Maillard-Duc, co-auteure, CFF Infrastructure, Lausanne/CH

Tunnel de Ligerz

Une longue histoire

Sur la ligne CFF du Pied du Jura, le tronçon entre Ligerz et Twann est le dernier tronçon à simple voie. Le projet prévoit le doublement de celui-ci sur une longueur de 4,5 km avec la réalisation d'un tunnel de 2,13 km dont les portails seront situés à Schafis et Kleintwann. Les contraintes paysagères, culturelles, historiques, topographiques et géologiques rendent ce projet très complexe.

Ligerz Tunnel

A Story That Goes Far Back

The section of track between Ligerz and Twann is the last remaining single-track segment on the Swiss Railways (SBB) Jurasüdfuss line. The project includes doubling the track over a 4.5 km section, and building a 2.13 km tunnel between Schafis and Kleintwann. The project faces a number of challenges, with the terrain, topography and geology presenting difficulties, as well as the historical and cultural barriers to overcome.

1 Historique

Le 3 avril 1857, le Grand Conseil bernois accorde une concession et une subvention de 2 millions de francs à la Compagnie Est-Ouest pour poser les voies Bienne-Berne et Bienne-La Neuveville. Le 3 décembre 1860, la ligne Bienne-Neuchâtel est ouverte au trafic.

Dès 1942, les CFF projettent le doublement de la voie de la ligne du Pied du Jura.

Les travaux sont interrompus en 1957 après le doublement de la voie entre La Neuveville et Schafis, car le projet d'aménagement de la route cantonale (actuelle N5) n'était pas assez abouti. À cet endroit, les deux projets sont intimement liés en raison de la géologie (présence de craies lacustres sur les terrains du bord du lac, éperons rocheux menaçants, source d'eau potable alimentant les villages) et de l'exiguïté des lieux (topographie tourmentée et zones habitées).

En 1966, un nouveau projet de doublement de la voie est lancé conjointement avec celui de la route cantonale N5. Le tracé ferroviaire devait passer par le bord du lac. La population et les autorités ont fait massivement opposition à ce projet. Au début des années 70, plusieurs variantes de tracé ont été élaborées, mais elles ont été rejetées lors des consultations. La seule variante qui avait l'aval des autorités était celle avec un tracé en tunnel. Cette variante en tunnel aurait entraîné une dépense supplémentaire d'au moins 30 millions de francs par rapport au projet officiel. Les CFF ne pouvant supporter un tel surcoût, le projet a été abandonné.

1 Background

On 3 April 1857, Berne's Grand Council granted a concession and a sum of 2 million francs to the Compagnie Est-Ouest to create the Biel/Bienne–Bern and Biel/Bienne–La Neuveville railways. On 3 December 1860, the Biel/Bienne–Neuchâtel line opened for the first time.

Starting in 1942, the SBB laid out plans to double the track on the Jurasüdfuss line.

After the track between La Neuveville and Schafis had been doubled, the works were suspended in 1957, as the project to develop the main road (now the N5) had shown disappointing results. In this part of the country, the two projects are closely linked. They both confront geographical features such as lacustrine chalk on the lakefront, troublesome rocky spurs and sources of drinking water that the villages depend on, as well as a lack of space as a result of the inhabited areas being squeezed in amongst the complicated terrain.

In 1966, a new plan to double the track was launched together with the N5 main road plan. The plan included the railway line passing by the lake, and was met with significant opposition from the authorities and citizens alike. In the early 1970s, a number of alternative routes were proposed, but each was rejected during the consultation phase. The only alternative supported by the authorities involved a tunnel, which would have cost an additional CHF 30 million over and above the original plan. The SBB's budget couldn't stretch far enough, and the project was put on ice.

Der Ligerztunnel

Eine lange Geschichte

In der Vergangenheit sind viele Strassen- und Schienenprojekte gescheitert. Bei diesem neuen Projekt wurden von Anfang an alle öffentlichen und privaten Umweltakteure eingebunden: Der Grundwasser- und Landschaftsschutz sowie archäologische Fundstätten fanden dabei auf besondere Weise Berücksichtigung. Die komplizierte Geologie der Region, die begrenzten Platzverhältnisse sowie die Notwendigkeit, den Betrieb der Strassen- und Schienenwege aufrechtzuerhalten, tragen weiter zur technischen Komplexität des Projektes bei. Die Kosten für den Tunnel belaufen sich auf rund 410 Millionen CHF; die Inbetriebnahme ist frühestens für 2026 geplant.

Galleria di Ligerz

Una lunga storia

In passato, molti progetti stradali e ferroviari sono falliti. Questo nuovo progetto ha coinvolto fin dall'inizio tutti i protagonisti ambientali, pubblici e privati. Il paesaggio, l'acqua, l'ecosistema della regione e i reperti archeologici sono oggetto di una particolarissima attenzione. La geologia complicata della regione, la particolarità dei luoghi e la necessità di mantenere in servizio le vie di circolazione stradali e ferroviarie sono dei parametri che dimostrano la complessità tecnica del progetto. L'investimento previsto è di circa 410 milioni di CHF, mentre la messa in servizio è prevista al più tardi per il 2026.

En 1992, dans le cadre du programme Rail 2000, les CFF lancent un nouveau projet de doublement de la voie. Le projet prévoyait un tunnel, dont le portail ouest se situait dans le village de Ligerz, et la construction d'une nouvelle gare. Ce projet a également suscité plus d'une centaine d'oppositions. Dès 1991, le programme Rail 2000 doit être redimensionné. Les CFF abandonnent notamment le projet de doublement de la voie à Ligerz. Les objectifs du programme sur la ligne du Pied du Jura seront toutefois atteints par l'achat de nouveau matériel roulant pendulaire (ICN). Pour des raisons liées à la protection des sites construits et des rives, ainsi qu'à la limitation des nuisances (bruits/vibrations). La commune de Ligerz s'est par la suite prononcée en faveur de la construction d'un tunnel plus long entre Schafis et Twann dont le portail ouest serait situé au niveau du tunnel routier actuel. La commune était prête à renoncer à la halte ferroviaire au profit d'une desserte par bus.

Afin de stabiliser l'horaire et de garantir la fluidité du trafic, les CFF initient dès 2013, un nouveau projet de doublement de la voie avec un tracé en tunnel qui contourne le village de Ligerz (version longue). Ce projet est inscrit à titre de mesure « Gléresse–Douanne: extension de la capacité » dans l'Arrêté fédéral sur l'étape d'aménagement 2025. Son financement

In 1992, the SBB launched a new track-doubling project as part of the Rail 2000 programme. The project involved building a tunnel, with its west portal in the village of Ligerz, and a new station. However, this project was also met with significant opposition, with over 100 objections to the plan. From 1991, the scope of the Rail 2000 programme was altered, and one of the projects that the SBB abandoned was the track-doubling in Ligerz. However, it was still possible to achieve the goals of the Jurasüdfuss programme by purchasing new tilting rolling stock. This was chosen to protect built-up areas and the lakefront, as well as to reduce noise and vibrations. Ligerz subsequently gave its support to the construction of a longer tunnel between Schafis and Twann, with a western



1 La gare de Twann aux environs de 1900
Twann station around 1900

Quelle/credit: inconnue/unknown

est assuré par l'Arrêté fédéral portant règlement du financement et de l'aménagement de l'infrastructure ferroviaire (FAIF) accepté en votation le 9 février 2014. Dans ce qui suit, nous aborderons plus en détail les nombreux défis de ce projet.

Le tronçon à simple voie entre Ligerz et Twann représente le dernier goulet d'étranglement sur la ligne ferroviaire du Pied du Jura. À l'horizon 2035, le nombre de trains sur cette ligne est estimé à 370 trains par jour, trafics voyageurs et marchandises confondus.

Cette ligne ferroviaire du Pied du Jura est un axe déterminant pour les trains de marchandises assurant la liaison entre la Suisse romande et la Suisse alémanique. Ceci s'explique par le fait que la ligne Lausanne-Berne-Olten comporte des rampes de 20 ‰ entre Lausanne et Palézieux, mais aussi de nombreux secteurs sinueux. A contrario, celle du Pied du Jura a toutes les caractéristiques d'une ligne de plaine avec des déclivités ne dépassant pas 10 ‰ et un tracé relativement rectiligne.

2 Les contraintes de la région

La rive gauche du lac de Biemme représente un objet d'intérêt national du point de vue paysager, culturel et historique. La région est répertoriée dans l'inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale (IFP). Certains sites sont mentionnés dans l'inventaire fédéral des sites construits d'importance nationale à protéger en Suisse (ISOS) et des tronçons de route sont inscrits à l'inventaire fédéral des voies de communication historiques de la Suisse (IVS).

Fortes des expériences passées, les CFF ont initié un nouveau projet en étroite collaboration avec les communes de La Neuveville, Ligerz, Twann-Tüscherz, Biemme, le canton de Berne et les associations œuvrant pour la protection de la rive gauche du lac de Biemme (Patrimoine bernois, Réseau lac de Biemme) réunis au sein de la Conférence Rive gauche du lac de Biemme. Il est à relever que la Commission fédérale pour la protection de la nature et du paysage (CFNP) a également été consultée dans le cadre de cette conférence.

Dès l'étude préliminaire, les membres de la conférence se sont penchés sur l'intégration des différents ouvrages d'art dans ce paysage protégé. Durant la phase d'avant-projet, les membres ont exigé l'étude de l'intégration paysagère de ces ouvrages par un architecte paysager. Pas moins de huit variantes de maquettes, pour chacun des portails du tunnel, ont été nécessaires pour aboutir à un consensus.

Mais les défis du projet ne se limitent pas à la protection de ces objets inventoriés.

L'eau représente également un élément majeur dans cette région. Outre la proximité du lac de Biemme et de ses rives,

portal located alongside the current road tunnel. The town was prepared to give up its train station, with a bus transfer service in its place.

In order to fix the timetable and ensure good traffic flow, SBB launched a new track-doubling project in 2013 with a tunnel portion bypassing Ligerz, this being the longer of the possible routes. The project was included in the Swiss Federal Decree on the 2025 development phase under the title "Gléresse-Douanne: capacity increase". It was financed by the Federal Decree on Financing Development for Railway Infrastructure, which was approved by a vote of the Federal Assembly on 9 February 2014. Over the next few pages, we will look at the challenges faced by the project in more detail.

The single-track section between Ligerz and Twann is the last bottleneck on the Jurasüdfuss line. Between passengers and freight, the line is expected to see 370 trains per day by 2035.

The Jurasüdfuss line is a crucial corridor for freight, as it links the French-speaking and German-speaking parts of Switzerland. This is because the Lausanne-Bern-Olten line includes 20 ‰ gradient sections between Lausanne and Palézieux, as well as generally being very winding. The Jurasüdfuss line on the other hand is comparatively direct and far flatter, with no slopes exceeding 10 ‰.

2 Regional Constraints

The countryside of the north-western lakefront of Lake Biel along with its cultural and historical significance make it a site of national interest. In fact, the region is listed in the Federal Inventory of Landscape and Natural Monuments of National Importance. Some specific sites are included in the Inventory of Swiss Heritage Sites, while some sections of road are listed in the Swiss Inventory of Historic Transport Routes.

Using its past experience as a foundation, the SBB launched the new project in close cooperation with the municipalities of La Neuveville, Ligerz, Twann-Tüscherz and Biel/Bienne, the canton of Bern, and associations working on the conservation of Lake Biel, including Patrimoine Bernois and Réseau Lac de Biemme, who all gathered at the Lake Biel North-West Lakeside Conservation Conference. It is worth noting that the Federal Commission for the Conservation of Nature and the Countryside was also consulted during the conference.

From the very first study, the conference attendees examined ways to integrate the various engineering works into the protected countryside. During the drafting stage, they requested that a landscape architect carry out a study on integrating the works into the countryside. No fewer than eight different models for each tunnel portal had to be created before a consensus could be reached.

le tracé ferroviaire doit traverser une zone de protection des eaux où se trouvent des sources d'eau potable alimentant trois villages. Le patrimoine archéologique de la région doit aussi être pris en compte en raison de la présence de pieux palafittes protégés par l'UNESCO. L'économie locale, principalement viticole, est également touchée par le projet puisque ce dernier prévoit une emprise de plus de 20 000 m² de surface viticole.

La géologie compliquée de la région, le manque d'espace disponible et la nécessité de conserver les voies de circulation routière et ferroviaire en service sont des paramètres qui doivent être pris en compte et qui augmentent la complexité technique du projet.

Ces divers aspects montrent la grande attention qui doit être accordée à la bonne intégration du projet dans le paysage et à la prise en compte des parties prenantes dans la conception et les lignes du tunnel, afin d'atteindre le meilleur degré d'adhésion possible.

3 Description du projet

Le nouveau projet, devisé à env. 410 millions CHF, prévoit le doublement de la voie sur une longueur de 4,5 km, le creusement d'un tunnel de 2,13 km dont les portails seront situés à Schafis (portail ouest) et Kleintwann (portail est), la construction d'un nouveau viaduc pour la demi-sortie de la route N5, la démolition partielle de la gare de Twann et de nombreuses mesures de compensations environnementales. À ces travaux s'ajoute également le renouvellement des infrastructures ferroviaires à La Neuveville et Tüscherz, ligne de contact et enclenchement, qui arriveront en fin de vie à l'horizon 2025/2026.

However, the project's challenges weren't limited to how to protect listed sites.

Water also plays a key role in the region. In addition to being close to Lake Biel, the railway line has to pass through a water protection area which contains sources of drinking water supplying three different villages. It was also vital to take into account the region's archaeological heritage, not least because of the UNESCO-protected pile dwellings. The local economy, in particular the viticultural sector, is also affected by the project, since it has to use over 20,000 m² of wine-growing land.

The region's complicated geography, the lack of available space and the need to keep the existing road and rail routes all had to be taken into account, making the project even more challenging.

Such a range of factors shows how much focus had to be put on properly integrating the project into the countryside and involving the stakeholders in the design of the routes and the tunnel, in order to get as many people as possible on board.

3 Description of the Project

This new project, which is expected to cost around CHF 410 million, involves doubling the track over a length of 4.5 km, digging a 2.13 km tunnel with portals in Schafis (west end) and Kleintwann (east end), constructing an overpass for the N5 road exit, partially demolishing the station in Twann, and implementing a number of environmental compensation measures. In addition to these works, the railway infrastructure, overhead lines and interlocking in La Neuveville and Tüscherz all need to be refurbished, with the works expected to be completed in 2025/26.



2 Situation du projet de doublement de la voie sur la rive gauche du lac de Biene
Location of the track-doubling project on the north-west side of Lake Biel



Quelle/credit: CFF

3 Maquette du portail ouest à Schafis
Model of the west portal in Schafis

3.1 Secteur ouest

La géométrie de la voie dans ce secteur doit être revue pour permettre une circulation des trains à 150 km/h en dehors et à 160 km/h à l'intérieur du tunnel. De plus, l'intégration du tunnel dans le bâti existant nécessite l'adaptation de la demi-sortie N5.

3.2 Tunnel

L'excavation du tunnel sera réalisée de manière traditionnelle, à l'explosif, en raison des conditions géologiques particulières et du manque de place pour les installations de chantier. Afin de réduire au maximum les nuisances pour les riverains, le tunnel sera équipé d'une voie bétonnée avec un tapis amortisseur (Fig. 4).

Quatre galeries d'évacuation seront creusées et connectées à la galerie de secours existante de la route N5 ; un dispositif d'intervention sera coordonné entre les CFF et l'Office fédéral des routes (Fig. 5).

3.3 Secteur est

La géologie et la topographie de ce secteur représentent un véritable défi pour le projet. Un passage inférieur sous les voies doit être aménagé pour la route reliant Bipschal à Twann. L'exiguïté du secteur nécessite d'effectuer un remblayage lacustre afin de garantir la place nécessaire à la construction de la route, du tracé ferroviaire à double voie ainsi que du chemin des rives.

De plus, tant le tracé ferroviaire que le routier se situent actuellement dans une zone de protection des eaux S1. Selon la législation en vigueur, il n'est pas envisageable de reconstruire ces infrastructures dans une zone de source S1.

Les communes concernées ont lancé un projet de construction d'une nouvelle centrale de traitement des eaux. Dès la mise en service de ces installations, une nouvelle délimitation des zones de protection des eaux pourra entrer en vigueur, permettant la réalisation du nouveau tracé routier et ferroviaire.

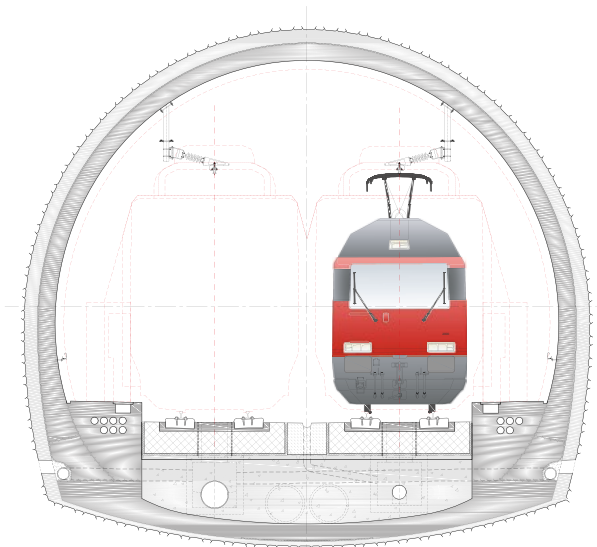
3.1 Western Area

The track geometry in this area needs to be reworked so that trains can travel at 150 km/h outside and 160 km/h inside the tunnel. Moreover, the exit of the N5 has to be adapted in order to integrate the tunnel into the existing structure.

3.2 Tunnel

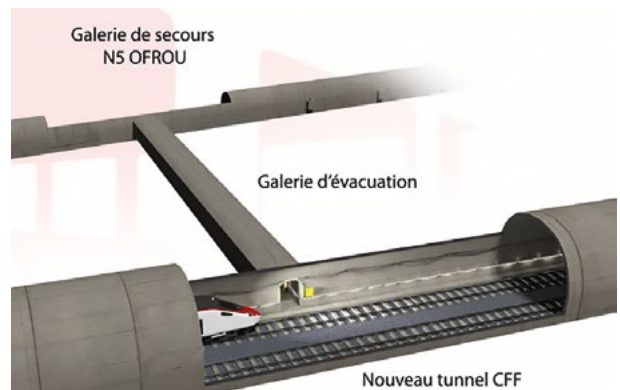
The tunnel will be excavated in a traditional fashion using explosives. This is because of the specific geological properties of the area and the lack of space for construction facilities. In order to minimise disturbances for residents, the tunnel floor will be concreted and equipped with a rail damping pad (Fig. 4).

Four escape tunnels will be dug and connected to the existing emergency tunnel for the N5. An emergency plan will be coordinated between the SBB and the Swiss Federal Roads Office (Fig. 5).



Quelle/credit: CFF

4 Coupe type du tunnel à double voie
Cross section of the double-track tunnel



Quelle/credit: CFF

5 Connexion entre le tunnel CFF et la galerie de secours N5 de l'Office fédéral des routes
Connection between the SBB tunnel and the Federal Roads Office's N5 emergency tunnel



Quelle/credit: CFF

6 *Maquette du portail est*
Model of the east portal

La nécessité de pourvoir à l’approvisionnement en eau d’extinction pour les tunnels a conduit les CFF et l’Office fédéral des routes à financer deux nouveaux captages. Ces derniers seront mis en service en même temps que la nouvelle centrale de traitement des eaux et permettront également de couvrir le besoin en eau potable de la région.

3.4 Secteur Kleintwann et Twann

La géométrie des voies entre le nouveau tunnel et la gare de Twann sera corrigée afin de permettre la circulation des trains à 150 km/h.

La gare de Twann va subir une transformation considérable.

En raison de la présence de pieux lacustres dans la couche archéologique située sous la gare, le bâtiment voyageur sera partiellement démoli afin d’y aménager les nouvelles rampes d’accès qui doivent être conformes à la Loi sur l’égalité pour les handicapés (LHand). Les installations techniques actuellement dans le sous-sol de la gare seront déplacées dans un nouveau local technique situé dans le tunnel. Le quai central sera supprimé en faveur de deux quais latéraux. Un nouveau pôle d’échange rail/bus sera réalisé sur la place de la gare à la suite de la suppression de la halte de Ligerz.

3.5 Mesures environnementales

De nombreuses mesures de compensation environnementale sont incluses au projet. Un accent particulier est porté à l’intégration des murs de soutènement dont une partie sera réalisée avec des revêtements en pierres sèches. De nouvelles liaisons écologiques entre le lac et la montagne sont prévues pour le cheminement de la faune et des aménagements liés à la protection des rives seront réalisés à plusieurs endroits dans le lac de Biene.

La gestion des matériaux s’inscrit dans la même approche. Le transport des matériaux excavés, tant ceux utilisés pour le

3.3 Eastern Area

The geology and topography in this area are a significant challenge for the project. An underpass running beneath the lines needs to be made for the road that runs between Bipschal and Twann. Because the area is so small, part of the lake will need to be filled in to create enough space to construct the road, the double-track railway line and the lakeside path.

Moreover, both the railway line and the road are currently located in an S1-class water protection area. Based on the legislation, it isn’t currently feasible to rebuild this infrastructure in an S1 water source area.

The municipalities that use this water source have launched a project to build a new water treatment centre. Once the new centre is in place, it is likely that the water protection areas will be adjusted, making it possible to complete work on the new road and railway line.

Because a water supply is needed for extinguishing fires in the tunnels, the SBB and the Swiss Federal Roads Authority have funded two new water catchments. These will come into operation at the same time as the new water treatment centre, and will also help to supply drinking water in the region.

3.4 Kleintwann and Twann Area

The track geometry between the new tunnel and Twann station will be adjusted so that trains can travel at 150 km/h.

Twann station will be substantially refurbished.

Because of the lakeside pile dwellings located in the archaeological layer beneath the station, the passenger building will be partially demolished to allow for new access ramps that meet the requirements of the Disabled Equality Act. The technical facilities that are currently located below ground in the station will be moved to a new location within the tunnel. The central platform will be replaced by two side platforms. A new rail/bus transfer terminal will be constructed in the area just



Quelle/credit: CFF

7 *Gare de Twann (situation actuelle)*
Twann station at present

remblayage lacustre que ceux recyclés en cimenterie, seront transportés par barge, un tapis roulant assurant la liaison entre les installations de chantier et la plateforme provisoire de chargement sur le lac.

Après la mise en service du nouveau tronçon, le démantèlement de l'ancienne ligne sera réalisé par moyen ferroviaire afin d'en minimiser les nuisances.

3.6 Plan directeur intercommunal

Parallèlement, et en partenariat avec les CFF, les communes concernées ont initié la réalisation d'un nouveau plan directeur intercommunal qui traite de la réaffectation des espaces libérés par l'ancien tracé ferroviaire, soit environ 31 000 m², et permettra de planifier l'aménagement de zones vertes, viticoles et d'utilité publique.

Lors de la construction de la route cantonale en 1835 et de la voie ferroviaire en 1860, les collectivités publiques et les riverains se sont vus privés de nombreux mètres carrés mis à disposition pour la réalisation de ces infrastructures. La suppression du tracé ferroviaire représente une chance unique de regagner une partie de ces surfaces perdues.

Ce plan directeur vise à réaménager la transition entre le lac, les villages et les vignes de façon harmonieuse. Il a été approuvé par les autorités compétentes à l'automne 2019.

4 Conclusion

Le projet a été soumis à une enquête publique en février 2019. Il a suscité 44 oppositions, dont 13 émanant de personnes privées.

C'est un succès à mettre au bénéfice de l'approche « ouverte » voulue par la direction du projet qui a intégré les parties prenantes dans son élaboration au moyen d'un processus itératif et participatif. La communication active envers la population durant les différentes phases a également participé à la bonne acceptation de ce nouveau projet.

Mais le chemin menant à la phase de réalisation est encore long. Les étapes d'approbation ne sont pas terminées et les négociations se poursuivent avec les opposants.

La mise en service du tunnel est planifiée pour décembre 2026 au plus tôt. Dès qu'il sera terminé, le démantèlement de la voie actuelle pourra être réalisé.

Références/References

- [1] SBB History
- [2] Wikipedia: *Chemin de fer de l'ouest suisse* [West Switzerland railway]
- [3] Website: History of the Jura area from Roman times to the present day

outside the station once the smaller station in Ligerz has been removed.

3.5 Environmental Measures

The project includes a number of environmental compensation measures. There is a particular focus on integrating the retaining walls, some of which will be given dry stone coverings, into the surroundings. New ecological links between the lake and the mountain are planned in order to track wildlife, while other measures will be developed to protect the lakefront at several sites along Lake Biel.

The same approach is being taken for managing resources. The materials used for lake filling and the material to be recycled as cement will be transported by boat, with a conveyor or being used to move them between the construction site facilities and the temporary loading platform on the lake.

Once the new section has been completed, the old line will be dismantled and removed by train in order to make the operation as clean and quiet as possible.

3.6 Intercommunity Management Plan

Meanwhile, the SBB has worked with the communities affected by the project to create a new intercommunity management plan to handle the reallocation of the roughly 31,000 m² of space to be freed up by the old line, which could be used to create green areas, vineyards and public spaces.

During the construction of the main road in 1835 and subsequently the railway in 1860, public authorities and residents lost large areas of land to accommodate these projects. Removing the railway line represents a unique opportunity to reclaim some of this land.

The management plan, which was approved by the authorities in autumn 2019, seeks to harmoniously redevelop the transition areas between the lake, the villages and the vineyards.

4 Conclusion

The project was put to a public inquiry in February 2019. There were 44 objections, 13 of them coming from private citizens.

This is a clear win for the project's "open" approach of involving all stakeholders from the drafting stage, and creating a step-by-step procedure with full participation. The active communication with residents during each phase also helped the project to receive such strong support.

However, there is still a long way to go before the implementation stage. There are still some approval steps remaining, and negotiations are ongoing with those opposing the project.

The tunnel is expected to be commissioned in December 2026 at the earliest. Upon completion, the current line will be able to be dismantled.

DONNÉES DE PROJET

Région

Rive gauche du lac de Biene, Canton de Berne

Ingénieurs civils

Groupement d'ingénieurs Gilig: Stucky SA – Gruner AG – Gähler und Partner AG

Conception, supervision du site et gestion générale des travaux

CFF et Groupement d'ingénieurs Gilig

Exécution

CFF, Groupement d'ingénieurs Gilig et entreprises de construction

Données clés

Période des travaux: 2021 – 2026 (planification actuelle sans recours)
 Début des travaux: 2026 (au plus tôt)
 Coût des travaux: env. 150 millions de CHF
 Longueur: 4,5 km
 Longueur du tunnel: 2,13 km
 Section excavée: 11,73 m (126 m²)

PROJECT DATA

Region

North-West side of Lake Biel, Canton of Bern

Civil Engineers

Gilig Engineering Group: Stucky SA – Gruner AG – Gähler und Partner AG

Design, site supervision and general management of the work

SBB and Gilig Engineering Group

Execution

SBB, Gilig Engineering Group and construction companies

Key data

Duration:	2021–2026 (current plan assuming no outside influences)
Commissioning:	2026 at the earliest
Tunnel construction costs:	approx. 150 million CHF
Total length:	4.5 km
Tunnel length:	2.13 km
Excavated cross section:	11.73 m (126 m ²)

SWISS TUNNEL KOLLOQUIUM 2020

**Materialtechnologische Innovationen
im Tunnelbau**

**Material Technology Developments
in Tunnel Construction**

3. Juni 2020



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



Entwicklung im Untertagbau Rückblick und Ausblick

*Felix Amberg, Dipl. Bau.-Ing. ETH/SIA,
Amberg Group AG, Regensdorf/CH*

Entwicklung im Untertagbau

Rückblick und Ausblick

Der Vortrag stellt wesentliche Entwicklungen im Untertagbau der letzten ca. 40 Jahre vor und setzt sie in den Kontext wichtiger Projekte. Neben technischen und technologischen Entwicklungen werden auch Aspekte erläutert, die den Untertagbau in dieser Zeit massgeblich beeinflusst haben. Abschliessend werden auch Herausforderungen und Notwendigkeiten zukünftiger Entwicklung dargestellt.

Tunnel Excavation

Review and Outlook

This paper presents major developments in underground construction over the past 40 years and puts them in the context of important projects. In addition to technical and technological developments, it also explains aspects that have had a significant influence on underground construction during that time. Finally, it also presents the challenges and necessities of future development.

Die vergangenen 50 bis 60 Jahre waren im Untertagbau eine Zeit mit vielen grossen Veränderungen, nicht nur in der Schweiz, sondern weltweit. Diese Veränderungen fanden im ständigen Wechselspiel zwischen Nachfrage und technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten statt, die sich in starkem Masse gegenseitig beeinflussten. Wenn im Weiteren vorwiegend technisch-wirtschaftliche Innovationen im Untertagbau dargestellt werden, so lohnt es sich deshalb, die Bedürfnisse der unterschiedlichen Nachfrager nach unterirdischen Infrastrukturen kurz zu beleuchten.

War es in der Schweiz anfänglich der Ausbau der Wasserkraft, der grosse Vorhaben im Untertagbau mit sich brachte, so wurde ab den 1960er-Jahren die zunehmende Mobilität die treibende Kraft hinter dem wachsenden Bedarf an unterirdischen Infrastrukturen.

Wasserkraftanlagen in der Schweiz, die unterirdische Infrastrukturen benötigen, sind in der Regel sogenannte Hochdruckanlagen in den Alpen. Die unterirdischen Anlageteile sind dabei Wasserstollen und Schrägschächte mit verhältnismässig kleinem Durchmesser sowie grosse unterirdische Kavernen. Die Kavernenanlagen werden dabei zwangsweise in guten bis sehr guten geologischen Verhältnissen und so nah als möglich zu der Oberfläche platziert. Mit den Wasserstollen müssen hingegen eine Vielzahl geologischer Formationen durchquert werden und sie werden in der Regel ebenfalls oberflächennah trassiert, damit ihre Länge durch Zwischengriffe unterteilt und die Bauzeit damit verkürzt werden kann.

Parallel mit dem Rückgang der Nachfrage im Wasserbau stieg die Anzahl der Tunnels, vor allem im Zusammenhang mit dem Nationalstrassenbau. Von wenigen Ausnahmen abge-

The past 50 to 60 years have seen a number of considerable changes in underground construction, not just in Switzerland but around the world. These changes took place through the constant interplay between demand and technical-economic possibility, which significantly influenced each other. If the following primarily presents technical and economic innovations in underground construction, it is therefore worth briefly examining the needs of different underground infrastructure customers.

While it was initially the expansion of hydropower in Switzerland that brought with it major underground construction projects, increasing mobility became the driving force behind the growing need for underground infrastructures from the 1960s onwards.

In general, hydropower plants in Switzerland that require underground infrastructures are "high-pressure plants" in the Alps. The underground sections of the plant are water tunnels and inclined shafts with a relatively small diameter, as well as large underground caverns. The cavern systems are compulsorily placed in good to very good geological conditions as close as possible to the surface. The water tunnels, on the other hand, have to pass through a large number of geological formations and are usually also routed close to the surface so that they can be divided up by intermediate headings to reduce the construction time.

In parallel with the decline in demand in hydraulic engineering, the number of tunnels increased, particularly in connection with the construction of national roads. With a few exceptions (summit tunnel for national roads crossing the Alps), most of the tunnels also ran close to the surface, usu-

Développement dans la construction souterraine

Bilan et perspectives

Si le développement technologique dans la construction souterraine a été soutenu essentiellement par la demande en diverses infrastructures souterraines (centrales hydrauliques, tunnels routiers ou ferroviaires), la mécanisation et l'automatisation ont aussi été des facteurs décisifs. De plus, le développement de nouvelles technologies a aussi été fortement encouragé par le fait que la construction de tunnels en milieu urbain en particulier ne peut prendre en compte que de façon très limitée les contraintes telles que la géologie ou les aménagements. Même si le BIM et la transition numérique sont aujourd'hui au centre de toutes les attentions, la mise en œuvre d'innovations techniques dans la construction de tunnels reste toujours au cœur de toute solution pour relever les défis à venir.

sehen (Scheiteltunnel bei alpenquerenden Nationalstrassen) verliefen die meisten der Tunnels ebenfalls oberflächennah, anfänglich meistens in den Voralpen oder den Alpen. Die Nord- und Südrampe der A2 zwischen Amsteg respektive Bodio und dem Scheiteltunnel zeigen das in extremis. Städtischer Strassentunnelbau war anfänglich nur vereinzelt anzutreffen (z.B. der Milchbucktunnel in Zürich), da die Mobilität primär durch die Verbindung der Städte und Ortschaften befriedigt wurde. Im Vergleich zu Wasserkraftanlagen waren die Strassentunnels selbst der ersten 20, 30 Jahre gross in ihren Querschnittsabmessungen. Im Zuge des zunehmenden Verkehrs und der wachsenden Bedeutung der Sicherheit vergrösserten sich auch die Querschnitte der Strassentunnels. Das Wachstum der Agglomerationen und Städte in den Ballungsräumen führte ab den 1990er-Jahren zu einer Verschiebung der Projekte in das Mittelland und in den städtischen Untergrund. Die rigideren Trassierungselemente des Strassenbaus führten vermehrt dazu, dass Strassentunnels in unterschiedlichen und auch tunnelbautechnisch schlechten und schwierigen Gebirgs- respektive Bodenverhältnissen ausgeführt werden mussten.

Dieser Trend wurde noch dadurch verstärkt, dass auch die SBB ab den 1970er-Jahren vermehrt ihr Bahnnetz ausbaute, typischerweise ebenfalls im Mittelland und in den städtischen Agglomerationen. Die Trassierungselemente einer Bahn sind noch einmal deutlich weniger flexibel als bei der Strasse, was wiederum verstärkt dazu führt, dass schwierigen geologisch-hydrogeologischen, trassenahen Überbauungen etc. nicht ausgewichen werden kann. Von Bedeutung ist aber auch, dass die Querschnittsabmessungen eines doppelspurigen Eisenbahntunnels denjenigen eines zweispurigen Autobahntunnels in etwa entsprachen, sodass die Nachfrage sich hier gegenseitig verstärkte und Innovationen deshalb eher umgesetzt wurden.

Lo sviluppo della costruzione sotterranea

Uno sguardo al passato e uno al futuro

Lo sviluppo tecnologico nella costruzione sotterranea è stato fortemente stimolato dalla grande domanda di infrastrutture sotterranee (energia idroelettrica, costruzione di strade, costruzione di ferrovie); tuttavia, anche la meccanizzazione e l'automazione hanno svolto un ruolo importante. Anche il fatto che, soprattutto nella costruzione di gallerie negli spazi urbani, sia possibile tenere in considerazione solo molto poco le condizioni di contorno, come ad esempio la geologia o la presenza di edifici, ha a sua volta spinto fortemente allo sviluppo di nuove tecnologie. Anche se oggi l'attenzione si concentra soprattutto su BIM e digitalizzazione, si tratta comunque di mettere in pratica le innovazioni nella tecnica di costruzione delle gallerie per vincere le sfide del futuro.

ally starting in the foothills of the Alps or in the Alps themselves. The northern and southern ramp of the A2 between Amsteg or Bodio respectively and the summit tunnel demonstrate the farthest reaches of this. To begin with, urban road tunnel construction was only occasionally found (e.g. the Milchbuck Tunnel in Zurich), since mobility was primarily satisfied by the connection between the towns and cities. Compared to hydropower plants, the cross-sectional dimensions of the road tunnels were large even for the first 20 or 30 years. Given the rise in traffic and the growing importance of safety, the cross-sections of the road tunnels also increased. From the 1990s, the growth of agglomerations and cities in the metropolitan areas led to a shift in the projects in the Mittelland and the urban underground. The more rigid routing elements of road construction increasingly meant that road tunnels had to be built in different rock or soil conditions which make tunnel construction difficult.

This was reinforced by the fact that SBB also expanded its rail network from the 1970s onwards, typically in the Mittelland and the urban agglomerations. The routing elements of a railway are significantly less flexible than those on the road, which further means that difficult geological/hydrogeological structures near the line etc. cannot be avoided. It is also significant, however, that the cross-sectional dimensions of a double-track railway tunnel roughly corresponded to those of a two-lane motorway tunnel, so the demand increased mutually and innovations were more likely to be implemented.

In addition to the railway tunnels in the Mittelland, there were occasional major construction projects in the Alpine region, particularly for narrow-gauge railways, mostly in the form of single-track tunnels. The limited financial and organisational resources available to the railways, the confined space conditions owing to the loading gauges, and the

Neben den Eisenbahntunnels im Mittelland gab es vereinzelte grössere Bauvorhaben im alpinen Raum, vor allem für Schmalspurbahnen, meistens in der Form von Einspurtunnels. Die geringeren finanziellen und organisatorischen Ressourcen, die den Bahnen dabei zur Verfügung standen, die aufgrund der Lichtraumprofile engen Platzverhältnisse und die oft tunnelbautechnisch anspruchsvollen Gebirgs- und Überlagerungsverhältnisse machten aus diesen Vorhaben oft eigentliche Innovations-Inkubatoren, die nicht zuletzt für den Bau der beiden NEAT-Tunnels am Lötschberg und am Gotthard entscheidende Kenntnisse und Technologien lieferten.

Neben dem Neubau von Tunnels, der hier im Zentrum der Darstellung steht, wurde auch im Bereich der Tunnelinspektion und -sanierung in den letzten Jahrzehnten viel Innovationsarbeit geleistet.

Gleiches gilt es zu sagen für die Vielzahl unterirdischer Anlagen wie Wasserleitungs- und Überleitungstollen, Entwässerungstollen, Leitungstollen ganz allgemein, Kavernenanlagen aller Art etc. Diese Anlagen profitierten in erheblichem Masse von den Innovationen und den technischen Entwicklungen in den anderen Infrastrukturen, weshalb hier nicht näher auf sie eingegangen wird.

Wenn man den Blick öffnet und über die Schweiz hinausschaut, so kann man in Ergänzung zum Bild, das der Schweizer Tunnelbau bietet, noch festhalten: Eine unvergleichlich höhere Anzahl an Bauwerken in geologisch sehr schwierigen, in der Schweiz völlig unbekanntem Verhältnissen («quick clay», setzungsempfindliches wassergesättigtes «reclaimed land», vulkanische oder stark verkarstete Geologien, tektonisch aktive Zonen etc.) und Grössenordnungen (z.B. der Metrobau in China, wo mehr TBM eingesetzt werden als in der gesamten übrigen Welt) haben den Untertagbau weltweit technologisch enorm verändert und technologisch weitergebracht.

Ausgehend von den skizzierten Randbedingungen kann man diese Entwicklung im Untertagbau in einzelne Schwerpunkte gliedern.

1 Grösser, schneller – und überall

Bedingt durch die zunehmend grösseren Querschnitte mussten bei allen Arbeitsschritten grössere und leistungsfähigere Verfahren und Maschinen eingesetzt werden. Betrachtet man die einzelnen Arbeitsschritte eines konventionellen Tunnelvortriebes, so wird erkennbar, dass dies einer der Haupttreiber für die Innovation war.

Im Kraftwerksbau erfolgte das Bohren der Sprenglöcher noch weitgehend pneumatisch und mit händisch bedienten Hämmern. Nur schon das vergleichsweise geringe Gewicht der Hämmer, die manuelle Bedienung und die materialtechnischen Grenzen des Gestänges und der Kronen limitierten die Bohrleistung, erforderten viel Logistik und gleichzeitig relativ viele Mineure an der Ortsbrust.

often difficult rock and overlay conditions for tunnel construction usually made these projects into hotbeds of innovation, which provided crucial knowledge and technologies not least for the construction of the two NRLA tunnels at the Lötschberg and the Gotthard.

In addition to the construction of new tunnels, which is the focus of this presentation, a great deal of innovation has also occurred in the areas of tunnel inspection and tunnel renovation in recent decades.

The same applies to the large number of underground systems such as water supply and connecting tunnels, drainage tunnels, line tunnels in general, cavern systems of all kinds, etc. These systems considerably benefited from the innovations and technical developments in the other infrastructures, which is why they will not be expanded on here.

If you look beyond Switzerland, you can gain a more detailed picture than the one provided by Swiss tunnel construction: An incomparably high number of constructions in very difficult geological conditions completely unknown within Switzerland (“quick clay”, settlement-sensitive waterlogged “reclaimed land”, volcanic or heavily karstified geologies, tectonically active zones, etc.) and large-scale projects (e.g. metro construction in China, where more TBMs are used than anywhere else in the world) have changed and advanced the technology of underground engineering enormously the world over.

Based on the drafted boundary conditions, this development in underground construction can be divided into individual focal points.

1 Larger, Faster – and All Over

Owing to the increasingly large cross-sections, larger and more efficient machines and processes had to be used in all work stages. If you look at the individual work steps for conventional tunnelling, you can see that this was one of the main drivers of the innovation.

In power plant construction, blast hole drilling was still largely pneumatic and manually operated with hammers. Only the comparatively low weight of the hammers, the manual operation, and the material limits of the rod and crown limited drilling performance, required a huge amount of logistics and at the same time a relatively large number of miners on the heading face.

During construction of the San Bernardino Tunnel, such hammers were installed on a “ladder drilling system” to drill the larger profile and to save scaffolding work for each drilling round, but a little while later the pneumatic hammers were guided on drill-feed booms (rather than ladders), which in turn were mounted on vehicles. This resulted in much greater flexibility, made the face more accessible and dras-

Beim Bau des San-Bernardino-Tunnels wurden solche Hämmer auf einem sogenannten Leiter-Bohrwagen installiert, um das grössere Profil abbohren und um Gerüstarbeiten für jeden Abschlag sparen zu können, doch schon kurze Zeit später wurden die pneumatischen Hämmer auf Lafetten geführt (anstelle von Leitern), die wiederum auf Fahrzeugen montiert wurden. Damit wurde eine wesentlich höhere Flexibilität erreicht, die Ortsbrust war besser zugänglich und der Bedarf an Mineuren sank drastisch. Der nächste substanzielle Innovationsschub kam mit der Einführung der elektrohydraulischen Bohrhämmer, die schon beim Bau der ersten Röhre des Gotthard-Strassentunnels eingesetzt wurden. Hydraulik kann gegenüber Luftdruck wesentlich besser gesteuert werden und in der Folge nahmen das Gewicht und die Leistungen der Bohrhämmer immer mehr zu.

Ein wesentlicher Vorteil der lafettengeführten Hämmer liegt aber in der höheren Präzision der Bohrarbeiten. Nur auf diese Weise konnten die vorher verwendeten Keileinbrüche, die mit Lafetten schwierig zu bohren sind, ersetzt werden durch die Paralleleinbrüche, womit auch längere Abschlagslängen und eine bessere Profilhaltigkeit erreicht wurden.

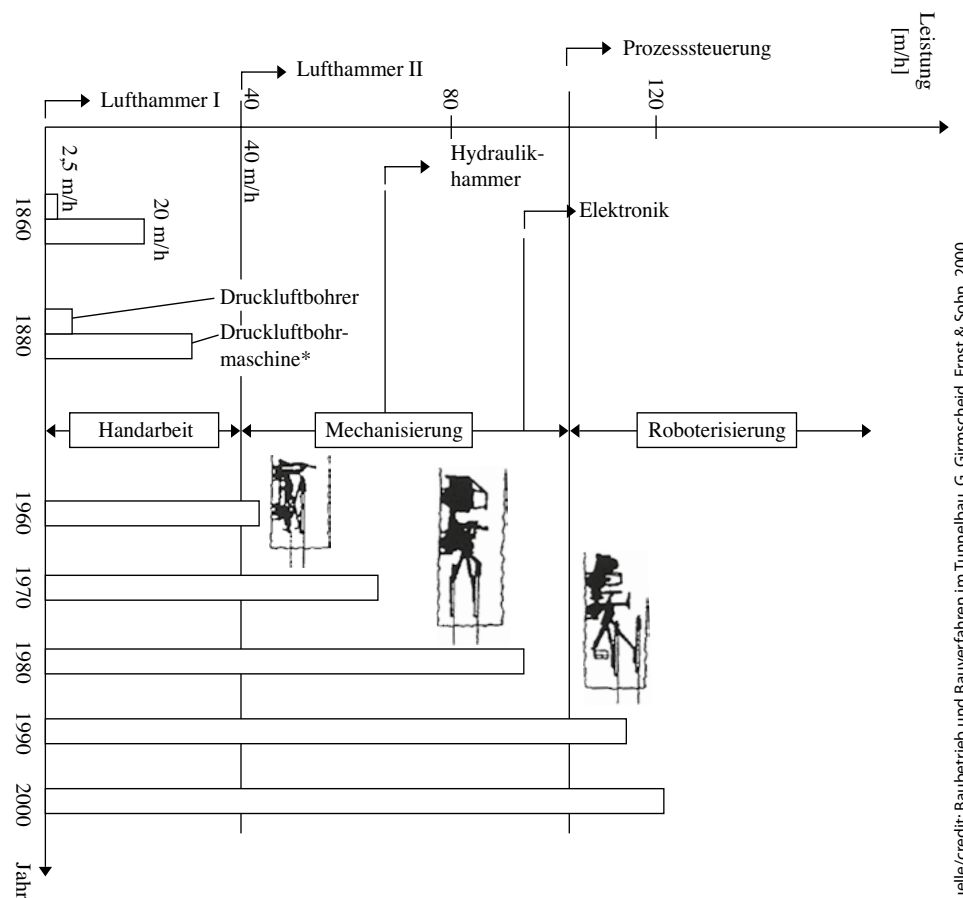
Die Ladarbeiten für die Sprengungen waren lange Zeit noch weitgehend manuell auszuführen, die hauptsächlichen Entwicklungen fanden in der Konfektionierung und der Verbesserung der Wirkungsweise der Sprengstoffe statt. Dies war verbunden mit einer Steigerung der Leistungen, vor allem aber mit einer Erhöhung der Sicherheit und einer Verbesserung der Arbeitshygiene. Erwähnenswert sind dabei die während des Baus des Furka-Basistunnels entwickelten Wassergel-Sprengstoffe, die deutlich weniger schädliche Sprenggase abgeben. Damit wurde es möglich, die Ventilation von saugend auf blasend umzustellen, womit auch Kunststoff-Lutten eingesetzt werden konnten, die leichter im Gewicht und flexibler sind.

Obwohl es schon in den 1960er-Jahren Ansätze gab, den Sprengstoff nicht mehr patroniert in die Bohrlöcher einzubringen, kamen erst nach der Jahrtausendwende mit den Slurry-Sprengstoffen wirklich neue Technologien zum Tragen. Diese Sprengstoffe ergeben einerseits einen

tically reduced the need for miners. The next substantial boost in innovation came with the introduction of electrohydraulic rotary hammers, which were already used in the construction of the first section of the Gotthard road tunnel. Hydraulics are much easier to control than air pressure, which increases the weight and performance of the rotary hammers more and more.

One major advantage of feed-guided hammers is the increased precision of the drilling work. This was the only way to replace the wedge cuts used previously, which are difficult to drill with carriages, with parallel cuts, which also resulted in longer rounds and improved profile retention.

For a long time, the loading work for the blasts largely had to be done manually; the main developments took place in assembly and improving the effectiveness of the explosives. This was associated with an increase in performance, but in particular with an increase in safety and an improvement in occupational hygiene. The water-gel explosives developed during the construction of the Furka base tunnel, which emit significantly less harmful explosive gases, are worth mentioning here. They made it possible to switch the ventilation from sucking to blowing, which also enabled the use of plastic ducts, which are lighter and more flexible.



1 Zunahme der Bohrleistung in m/h
Increase in drilling performance in m/h

Quelle/credit: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, G. Girmscheid, Ernst & Sohn, 2000

optimalen Füllungsgrad im Bohrloch und werden andererseits erst im Bohrloch zu Sprengstoff, was erhebliche Vereinfachungen im Transport und eine Erhöhung der Sicherheit bedeutet.

Auch die Zündung der Ladungen hat sich erheblich verändert. Die in den 1960er-Jahren eingeführten elektrischen Millisekundenzündler erlauben eine viel präzisere Steuerung des Sprengvorganges, die dann nochmals gesteigert wurde durch die elektronischen Zünder, die ab den 1990er-Jahren verfügbar waren. Damit einher geht eine viel höhere Profilhaltigkeit. Bezüglich Sicherheit vor allem gegenüber elektrischer Beeinflussung bieten sich heute Nonel-Zündsysteme an. Damit sind massgeschneiderte Sprengungen mit hohem Sicherheitsgrad praktisch unter jeglichen Randbedingungen möglich.

Die Ver- und Entsorgung der Baustellen, vor allem des Vortriebes, erfuhr über die Jahrzehnte ebenfalls substanzielle Veränderungen, die vor allem durch die zunehmenden Transportvolumina getrieben waren. In den kleinquerschnittigen Wasserstollen kamen noch spezielle Überkopf-Ladegeräte und Transportwaggons («Hägglunds») mit integriertem Kratzboden zur Anwendung, weil schlicht kein Raum zur Verfügung stand. Das Gleis wies eine 60-cm-Spur auf und war meist auf der ausgebrochenen Sohle verlegt, was Gleisinstabilitäten und viele Entgleisungen zur Folge hatte. Nach der Bau des Furkatunnels litt unter einer solch ineffizienten Logistik in ganz erheblichem Masse. Die Bedeutung einer stabilen, sauberen Sohle und einer mindestens 1-m-Spur bei Gleisbetrieb für eine leistungsfähige Logistik wurde evident, wobei zunehmend auch Transporte auf Pneu in Kombination mit Bandanlagen bei grossen Querschnitten zur Anwendung kamen. Trotz alledem stellt die Logistik noch immer eine grosse Herausforderung dar, was sich zum Beispiel bei TBM-Vortrieben zeigt, wo es kaum möglich ist, die Einsatzdauer der TBM über ca. 45 % hinauszutreiben, oft auch aus Gründen ungenügend leistungsfähiger Logistik.

2 Mechanisierung, Automatisierung

Ein über die ganze Zeit anhaltender Trend war und ist die zunehmende Mechanisierung und die Automatisierung, die beide heute noch nicht abgeschlossen sind.

Zentral ist dabei sicherlich die stark gewachsene Bedeutung der sogenannten mechanisierten Vortriebe, wobei hier die kreisrunden Vortriebe mit Tunnelbohrmaschinen im Vordergrund stehen.

Ausgehend von den bahnbrechenden Ansätzen von Rick Robbins in den 1950er-Jahren für Felsvortriebe über die Entwicklungen von Slurry- und EPB-Maschinen mit aktiver Bruststützung sind mechanisierte kreisrunde Vortriebe heute in praktisch allen geologischen Verhältnissen anwendbar, und dies auch bei Grundwasserdrücken von bis zu 15 bar.

Anfänglich standen Fräsvortriebe in mittelharten Gesteinen im Vordergrund, doch schon bald wurden TBM auch in den

Although there were attempts as early as the 1960s to stop inserting explosives in cartridge form into the boreholes, it was only after the turn of the millennium that new technologies with slurry explosives really came into play. These explosives provide an optimal degree of filling in the borehole and only become explosives once they are in the borehole, which significantly simplifies transportation and increases safety.

Detonation of the loads has also changed considerably. The electrical millisecond detonators introduced in the 1960s allow much more precise control of the blasting process, which was further increased by the electronic detonators that were available from the 1990s. This brings with it much greater profile retention. For safety, particularly against electrical interference, Nonel detonation systems are now available. They make custom blasting with a high degree of safety possible under practically any boundary conditions.

Supply and disposal of materials and muck on construction sites, particularly at the excavation face, has also undergone substantial changes over the decades, which were primarily driven by the increasing transport volumes. Special overhead mucking systems and transport wagons (“Hägglunds”) with integrated scraper floors were used in the narrow water tunnels because there was simply no space available. The rail line had a 60 cm track and was mostly laid on the blasted-out base, which resulted in track instability and many derailments. The construction of the Furka tunnel suffered considerably under such inefficient logistics. The importance of a stable, clean floor and a gauge of at least 1 m for rail operation became evident for efficient logistics, while transport on tyres in combination with conveyor systems with large cross sections were increasingly used. Nevertheless, logistics continues to pose a major challenge, which can be seen, for example, in TBM drives, where it is barely possible to extend the service life of the TBM by more than 45 %, usually because the logistics are not efficient enough.

2 Mechanisation, Automation

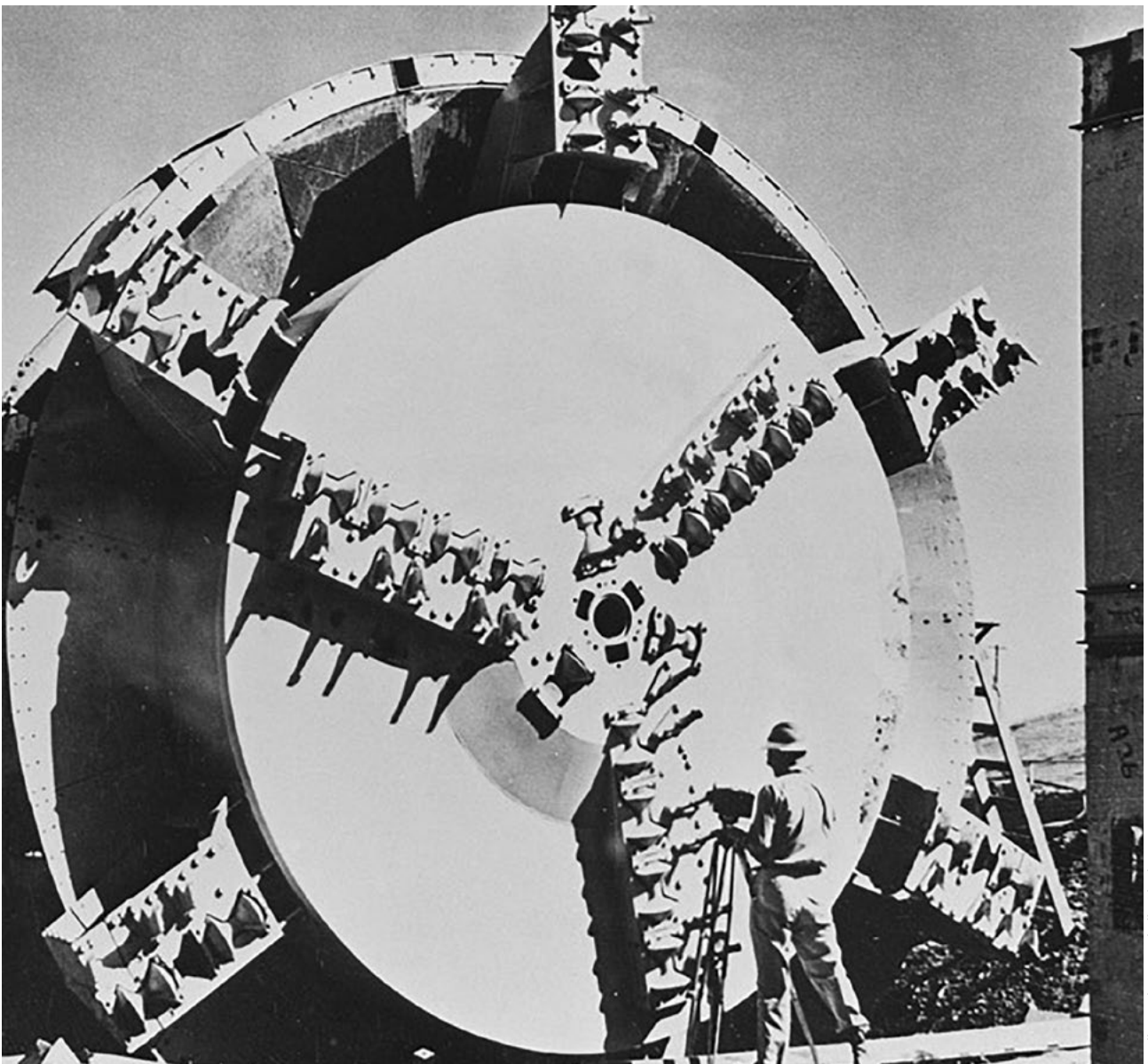
A trend that has persisted throughout this time is the increasing mechanisation and automation, both of which are ongoing.

The strong rise in importance of the “mechanised excavation” is central to this; the circular drives with tunnel boring machines are paramount here.

Starting with the groundbreaking approaches of Rick Robbins in the 1950s for rock tunnel boring and the development of slurry and EPB machines with active face support, mechanised circular tunnel boring can now be used in practically all geological conditions, even at groundwater pressures of up to 15 bar.

harten Graniten und Gneisen eingesetzt, etwa im Stollenbau für Wasserkraftanlagen in den 1980er- und 1990er-Jahren. Die Schweizer Tunnelbauindustrie war dabei bei diversen Entwicklungsschritten massgebend mitbeteiligt. Fehlschläge waren dabei nicht zu vermeiden, so zum Beispiel der Schildvortrieb im Los Hutegg am Seelisbergtunnel und der Einsatz von «Big John». Gerade dieses Beispiel zeigt sehr schön, dass man am meisten aus Fehlern lernen kann, hat doch Martin Herrenknecht als junger On-site-Maschineningenieur aus diesem Fehlschlag seine Ideen entwickelt und darauf basierend die heutige Firma aufgebaut. Schweizer Unternehmer setzten aber TBM auch innovativ beim Bau von Schrägschächten in Norwegen erfolgreich ein, wodurch die mühsamen und gefährlichen händischen Vortriebe mit Alimak-Ausrüstungen ersetzt werden konnten. Diese Pionierleistung geriet aber mit dem Rückgang des Wasserkraftbaus

Initially, tunnel boring in medium-hard rocks were predominant, but soon TBMs also came into use in hard granites and gneisses, such as in tunnel construction for hydropower plants in the 1980s and 1990s. The Swiss tunnelling industry was deeply involved in various development steps. Failures were unavoidable, for example the shield tunnelling in Los Hutegg at the Seelisberg Tunnel and the use of “Big John”. This example in particular shows very well that you learn most from making mistakes: Martin Herrenknecht, a young on-site mechanical engineer, developed his ideas from this failure and built the company we see today on that basis. Swiss contractors have also found success innovating with TBMs in the construction of inclined shafts in Norway, where laborious and dangerous manual tunnelling could be replaced with Alimak equipment. However, this pioneering achievement was somewhat forgotten with the decline in



Quelle/credit: Tunneltalk, Oktober 2012

2 Robbins-TBM für das Oahe-Dam-Projekt 1952
Robbins TBM for the Oahe Dam project in 1952

etwas in Vergessenheit und wurde erst in jüngster Zeit wieder aufgenommen.

Weitere massgebende Innovationen fanden im Bereich grosser TBM statt, so etwa beim Bau des Heitersbergtunnels 1971, wo eine offene TBM mit einem Durchmesser von ca. 11 m zum Einsatz kam. Diese TBM wurde durch die Bauherrin SBB bestellt, finanziert und dem Unternehmer zur Verfügung gestellt – ein heute undenkbares Engagement eines Bauherrn zur Einführung innovativer Technologien im Untertagbau. Die Erfahrungen mit einer offenen Grippermaschine in der Molasse waren nicht sehr positiv, es kam zu vielen Firstablösungen, welche die Vortriebleistungen drückten. Die gleiche Maschine wurde deshalb für den Bau des Gubristtunnels umgerüstet auf eine Schildmaschine mit Tübbingausbau – ein Konzept, das in der Folge auf faktisch alle weiteren Tunnels mit einem Durchmesser von 11 bis 12 m erfolgreich angewendet wurde. Eine ähnliche Pionierleistung fand mit dem Fräsvortrieb am Sonnenbergtunnel 1970 statt, bei dem eine Aufweitungsmaschine eingesetzt wurde. Die Aufweitungsstufe als offene Maschine wurde dabei in einem gefrästen Pilotstollen verspannt, wodurch der Vortrieb vom Ausbau entkoppelt war und der Pilotstollen noch zur Ventilation genutzt werden konnte. Dieser Typ von Maschine wurde zum letzten Mal beim Bau des rund 14 m im Durchmesser messenden Uetlibergtunnels (1998) eingesetzt. Revolutionär war in diesem Falle, dass die Brust durch die sogenannte Hinterschneidtechnik abgebaut wurde und das Profil nicht kreisrund, sondern leicht abgeplattet war. Leider fand dieser technologische Ansatz keine weitere Entwicklung mehr, genauso wenig, wie diverse andere Konzepte zur Herstellung nicht kreisrunder Profile und/oder andere Abbauverfahren als mit Disken und Messern sich nicht wirklich durchsetzen konnten. Auch 30, 40 Jahre Entwicklung haben hier keinerlei substanziellen Fortschritt gebracht.

Ganz anders war dies der Fall beim Einsatz sogenannter Mixschilder, der erstmalig beim Bau des Grauholztunnels in der Schweiz erfolgte. Ausgehend von Entwicklungen in Japan, den USA und Deutschland zur Stützung der Ortsbrust mit einem Wasser-Bentonit-Gemisch kam beim Bau des Grauholztunnels (1989) erstmals eine TBM zum Einsatz, die anfangs im Lockermaterial mit Grundwasser und anschliessend umgebaut auch in der Molasse eingesetzt wurde. Heute sind Mixschilder verbreitet im Einsatz.

In den 1970er- und 1980er-Jahren waren in der Schweiz am meisten TBM mit grossen Durchmessern weltweit eingesetzt und viele technologische Entwicklungsschritte fanden hier erstmalig ihre Anwendung. Daran schloss sich fast nahtlos der Einsatz von Hartgesteins-Grippermaschinen mit grösserem Durchmesser beim Bau tiefliegender langer Tunnels in den Alpen an. Diese Ära begann mit dem Vereinatunnel mit Überlagerungen von über 1500 m und sehr hohen Gesteinsfestigkeiten der durchfahrenen Gneise und Amphibolite und fand sicherlich mit dem Lötschberg- und dem Gotthard-Basistunnel mit noch höheren Überlagerungen ihren Höhepunkt.

hydropower construction and has only recently been taken back up.

Other significant innovations took place in the area of large TBMs, such as the construction of the Heitersberg tunnel in 1971, where an open TBM with a diameter of approximately 11 m was used. This TBM was ordered, financed and provided to the operators by the contractor SBB, – today such commitment from a contractor in introducing innovative technologies to underground engineering would be inconceivable. The experiences of using an open gripper machine in the molasse were not very positive: it caused a number of roof displacements which affected the tunnelling progress. The same machine was therefore converted into a shielded machine with a system to install a segmental lining for the construction of the Gubrist Tunnel – a concept that was subsequently applied successfully to virtually all other tunnels with a diameter of 11 to 12 m. A similar pioneering achievement took place in 1970 with the cutting of the Sonnenberg tunnel, where a tunnel reaming machine was used. The reamer (reaming stage) in form of an open machine was braced in a smaller pre-drilled pilot tunnel. Due to the separation of excavation followed by tunnel support and lining works, the pilot tunnel could still be used for ventilation. This type of machine was last used to construct the Uetliberg Tunnel measuring approximately 14 m in diameter in 1998. In that case, it was revolutionary that the face was removed using “undercutting technology” and the profile was not circular, but slightly flattened. Unfortunately, this technological approach was not developed any further, just as various other concepts for the production of non-circular profiles, other excavation methods and discs and cutters could not really prevail. Even 30 or 40 years of development have not brought any substantial progress here.

It was a completely different case with the use of “mix shields”, which first took place with the construction of the Grauholz Tunnel in Switzerland. Based on developments in Japan, the USA, and Germany to support the open face with a water/bentonite mixture, a TBM was first used in 1989 for construction of the Grauholz Tunnel; it was initially used in loose material with groundwater and then converted for use in the molasse. Today, mix shields are used widely.

In the 1970s and 1980s, TBMs with large diameters were mostly used in Switzerland, and many steps in technological development were used for the first time there. This was followed almost seamlessly by the use of hard rock gripper machines with larger diameters in the construction of deep, long tunnels in the Alps. This era began with the Vereina Tunnel with overburden of more than 1,500 m and very high rock hardness of the gneisses and amphibolites they run through, and peaked with the Lötschberg and Gotthard base tunnels with even higher overburden.

Neben der Mechanisierung mit TBM hat sich auch das konventionelle Bohren und Sprengen in den letzten Jahren weiter mechanisiert und automatisiert. Moderne Bohrwagen bohren ein Bohrbild positionsgerecht und profilgenau automatisch ab, verfügen über Anti-Festbohr-Ausrüstungen und nehmen – wie das auch auf den TBM der Fall ist – laufend eine Vielzahl von Bohrparametern während des Bohrens auf (MWD), die dann zur Optimierung des Bohrvorganges, aber auch zur Erkundung der Felsverhältnisse genutzt werden können. Diese umfangreichen Datensätze bilden auch die Grundlage für die weitere Automatisierung des Ausbruchvorganges unter Verwendung von Ansätzen des Machine-Learnings: Im Jahre 2019 wurde in Kuala Lumpur eine TBM erfolgreich ferngesteuert von der Oberfläche aus betrieben, wobei die Betreiber explizit darauf hinwiesen, dass dieser Ansatz gerade bei schwierigen Verhältnissen der traditionellen menschlichen Steuerung überlegen ist.

Auch in der Logistik von Bohr- und Sprengvortrieben vor allem für Einspurttunneln wurden in der Schweiz innovative Techniken entwickelt. Die schmale Sohle und das hohe Profil eines Einspurttunneln führten beim Bau des Südloses des Vereinatunneln dazu, dass ein sogenannter Nachhänger mit allen darauf montierten Installationen für Strom, Luft etc. an der Kalotte aufgehängt und mit dem Vortrieb mitgeführt wurde, ähnlich wie das bei TBM-Vortrieben mit dem Nachläufer erfolgt. Dadurch liessen sich die Arbeitsstellen für die Herstellung der Sohle inklusive Gleismontage von der Beschickung der Schutterzüge trennen und die Versorgung des Vortriebes konnte industrialisiert werden.

Unbestritten verbunden mit allen Entwicklungen und Innovationen sind die ganz erheblichen Fortschritte im Bereich «health and safety». Noch immer sind die Arbeitsbedingungen auf Tunnelbaustellen hart und gefährlich, doch wurden grosse Fortschritte in der Arbeitssicherheit erreicht. Die Mechanisierung und die Automatisierung werden diesbezüglich noch weitere Verbesserungen bringen.

3 Alte Probleme – neue Lösungen

In den vergangenen Jahrzehnten wurden für verschiedene alte Probleme völlig neuartige Technologien entwickelt. Als herausragendes Beispiel sind hier sicherlich Vortriebe in nicht oder schwach wasserführenden Lockermaterialien zu nennen.

Lange Jahrzehnte wurden solche Zonen, wie auch Störzonen mit Lockermaterialcharakter, durch kleinquerschnittige Teilausbrüche im Marciavanti-Verfahren vorgetrieben. Dabei werden auf Stahlbogen aufgelegte Stahlbleche im flachen Winkel nach oben und aussen in den Boden getrieben, bis ein neuer Stahlbogen unterstellt werden kann. Die Abmessungen dieser Stollen lassen faktisch nur Handarbeit und Kleingeräte zu, was in einer geringen Vortriebsleistung und den sich daraus ergebenden nachteiligen Folgen resultiert.

In addition to mechanisation with TBM, conventional drilling and blasting has also been mechanised and automated in recent years. Modern drilling jumbos automatically drill a hole pattern in the correct position with an accurate profile, have anti-jamming equipment and – like the TBM – continuously record a number of drilling parameters during drilling (MWD), which can then be used to optimise the drilling process, but also to explore the rock conditions. These extensive data sets also form the basis for further automation of the excavation process with machine learning approaches: In 2019, a TBM in Kuala Lumpur was successfully operated from the surface by remote control, and the operators explicitly stated this approach is better than the conventional human control, particularly in difficult conditions.

Innovative techniques have also been developed in Switzerland for the logistics of drill and blast operations, particularly for single-track tunnels. In the case of the construction of the southern section of the Vereina Tunnel, the narrow floor and high profile of the single-track tunnel meant that a hanging back-up trailer with all the installations mounted for electricity, air, etc., was hung below the tunnel crown and carried along with the drive, similar to the TBM drives with their back-up systems. This made it possible to separate the workstations for production of the floor including track assembly from the loading of the muck trains and enabled industrialisation of the drive supply.



3 Hängebühne, Vereinatunnel Süd
Hanging scaffold, Vereina Tunnel South

Quelle/Credit: Rowa AG

Im Sinne einer Teilmechanisierung und um grössere Profile in solchen Verhältnissen auffahren zu können, wurden bis weit in die 1990er-Jahre zur Durchörterung solcher Lockermaterialstrecken sogenannte Schilde eingesetzt. Es konnte sich dabei um kreisförmige Vollschilde oder hufeisenförmige Schilde handeln. Ähnlich wie bei TBM sollen die Schilde den Hohlraum stützen bis zum Einbau einer Verkleidung und diese Verkleidung gleichzeitig nutzen, um sich vorwärts zu bewegen. Bei grossen Vollschilden wurde die Ortsbrust durch Arbeitsplattformen unterteilt und die grosse Ortsbrust teilweise mit Platten gestützt, die Messerschilde kamen meist in Kalottenvortrieben zum Einsatz, wobei am Umfang einzelne Stahlbleche vorgeschoben werden konnten. Alle diese Schilde waren schwierig zu steuern, neigten zum Verklemmen einzelner Teile und waren anfällig auf Setzungen, was oft erhebliche Konsequenzen, zum Beispiel Unterprofil im Scheitel, zur Folge hatte. Vor allem aber boten sie eine völlig ungenügende Stützung der Ortsbrust und der Überprofile, kaminartige Einbrüche bis hin zu Tagbrüchen waren gefürchtete Folgen davon, die dann mit viel zusätzlichem Aufwand saniert werden mussten. Auf solche Vortriebe trifft das geflügelte Wort «Oft rühmt man sich im Nachhinein einer Tunnelbaumethode, mit der man die grossen Schwierigkeiten gemeistert habe, ohne zu bemerken, dass diese Methode Ursache der Schwierigkeit gewesen war» in grossem Masse zu.

Erst das in den 1990er-Jahren aufkommende horizontale Jetting und die horizontalen Rohrschirme führten zu einer wesentlichen Verbesserung bei solchen Vortrieben. Zusammen mit Entwicklungen von Injektionen, vor allem mit Mikroementen und Kunststoffen, und den Konzepten zur Stützung der Ortsbrust mit einer intensiven Brustankerung oder horizontalen Jetpfählen ergaben sich Baumethoden, die verlässlich plan- und umsetzbar waren und mit denen sich solche Verhältnisse beherrschen lassen.

Sie erlauben auch den Einsatz grosser Baumaschinen und geordnete, mechanisierte und teilautomatisierte und daher leistungsfähige Arbeitsabläufe. Ein Paradebeispiel dafür ist die Durchörterung des Tavetscher Zwischenmassivs beim Gotthard-Basistunnel, das in sehr schlechten Verhältnissen bei grosser Überlagerung einen sicheren, konstanten und jederzeit kontrollierten Vortrieb eines 13 m grossen Kreisprofils ermöglichte.

Auch im Bereich der Felssicherung sahen die letzten Jahrzehnte grosse Veränderungen, vor allem beim Spritzbeton. Während Jahrzehnten wurde Spritzbeton im sogenannten Trockenspritzverfahren händisch aufgetragen mit Leistungen von 4–5 m³/h. Zwar gab es schon Ansätze für Spritzmaschinen, doch die geringen Leistungen machten den Einsatz unwirtschaftlich. Das Spritzgut wurde trocken gemischt und erst an der Spritzdüse mit Wasser und Beschleuniger versetzt, was auch ganz erhebliche Staubemissionen zur Folge hatte. Der Einsatz von Trockengemischen machte zwingend kurze Transportdistanzen nötig; im Furka-Basistunnel wurde das Gemisch deshalb unter Tage in kleinen Anlagen faktisch vor

Undoubtedly connected with all the developments and innovations is the very considerable progress in the area of “health and safety”. Working conditions at tunnel construction sites are still tough and dangerous, but great progress has been made in occupational safety. Mechanisation and automation will bring further improvements in this regard.

3 Old Problems – New Solutions

Over the past few decades, completely new technologies have been developed for a number of old problems. One outstanding example of this is tunnelling in loose materials that are not aquiferous or are only weakly aquiferous.

For many decades, such zones, as well as fault zones characterised by loose material, were driven through by means of excavations with small cross sections in the Marciavanti process. Steel sheets placed on steel arches are driven upwards and outwards into the ground at a flat angle until a new steel arch can be placed underneath them. The dimensions of these tunnels only allow for manual work and small appliances, which results in low drive performance and the associated negative consequences.

In respect of partial mechanisation and to be able to excavate larger profiles in such conditions, “shields” were used until well into the 1990s to penetrate such sections of loose material. That includes full circular shields or horseshoe-shaped shields. Similar to TBMs, shields are designed to support the cavity until inner lining is installed and to use this inner lining to move forward. In the case of large full shields, the open face was divided up by working platforms and partially supported with plates; the blades of a cutting shield were mostly used in calotte drives, where individual steel sheets could be pushed forward at the circumference. All of these shields were difficult to control, tended to jam individual parts and were susceptible to settlement, which often had major consequences, for example an underbreak in the crown. Moreover, they offered completely inadequate support for the face and excess profiles. Feared consequences of this were chimney-like break-ins and even surface breaks, which then had to be remedied with much additional effort. The dictum “one often boasts of a tunnel construction method in retrospect when one has mastered the great difficulties, without realising that the method was precisely the cause of the difficulty” applies to a great extent to such drives.

It was only in the 1990s that horizontal jetting and horizontal pipe umbrellas brought about a significant improvement in such drives. Together with developments in injections, particularly with micro-cements and plastics, and the concepts for supporting the face with intensive face bolting or horizontal jet piles, building methods resulted that could be reliably planned and implemented and with which such conditions could be overcome.

Ort hergestellt. In den 1990er-Jahren fand das dannzumal in Norwegen schon weitestgehend eingesetzte Nassspritzverfahren auch in der Schweiz seine Anwendung, verbunden mit vielen weiteren Innovationen. Das Nassspritzverfahren brachte eine höhere Leistung von bis zu 15 m³/h, es konnten und mussten leistungsfähige Maschinen eingesetzt werden, die Betontechnologie erfuhr einen eigentlichen Innovationsschub mit der Verwendung von speziellen Tunnelzementen, neuartigen alkalifreien Beschleunigern, anfangs in Pulverform, später in flüssiger Form, mit Verzögerern und Verflüssigern etc., etc. Einen nicht unerheblichen Anteil an diesen Entwicklungen hatten wiederum die Basistunnels durch die Alpen, da zum Beispiel die AlpTransit Gotthard AG ein Zulassungsverfahren für Betonmischungen durchführte, bei dem strenge Vorgaben durch die Betonzulieferindustrie erfüllt werden mussten. Diese Vorgaben ergaben sich aus den speziellen Herausforderungen der Anwendung (z. B. hohe Felstemperaturen, lange Transportwege), aber auch aus der Tatsache, dass die Verwendung des Ausbruchmaterials als Zuschläge den Bauherrn sozusagen in die Lieferkette einband.

Obwohl schon zu den Zeiten des Trockenspritzens Fasern als Alternative zu einer Netzarmerung untersucht wurden, gelangte diese Technologie erst richtig beim Nassspritzverfahren zum Durchbruch. Heute ist das Angebot an Fasern aus Stahl oder Kunststoff kaum mehr zu überblicken. Verbunden mit der Mechanisierung der Spritzbetonapplikation wurden auch viele Ansätze der Automatisierung des Spritzvorganges verfolgt. Damit sollten die Qualität und die Leistung verbessert werden. Alle diese Ansätze sind aber nur in sehr speziellen Fällen erfolgreich gewesen. Hier bietet nur der Einsatz des Machine-Learnings wirklich eine Perspektive zur Verbesserung.

4 Alte Probleme – noch immer die gleiche Lösung?

Noch immer gibt es aber Probleme, die man heute mit letztlich den gleichen technischen Ansätzen zu beherrschen versucht, wie sie auch schon vor 30, 40 Jahren zum Einsatz kamen. Sicherlich, es gab – und gibt – auch hier Fortschritte, sei das in materialtechnischer, in systemischer oder applikationstechnischer Hinsicht etc., doch bleibt die zugrundeliegende Technologie noch immer dieselbe.

Hauptsächlich sind hier zwei Bereiche anzusprechen: die Abdichtung gegen Wasserzutritte und die Verkleidung unterirdischer Bauwerke.

Wasser ist noch immer der grösste und vielseitigste Feind im Lebenszyklus einer unterirdischen Anlage, sei das durch Wasserzutritte, verbunden mit chemischen oder elektrolytischen Korrosionsphänomenen an Bauteilen oder am Innenausbau, sei das durch Versinterungen von Drainageleitungen, durch den Aufbau von Wasserdrücken und/oder den Eintritt von Wasser in den Tunnel mit oder ohne Vereisungserscheinungen etc. – der Phänomene sind viele. Aber noch immer besteht die hauptsächliche bautechnische

They also enable the use of large construction machines and orderly, mechanised, partially automated, and therefore efficient work processes. A prime example of this is the excavation through the Tavetsch Intermediate Massif at the Gotthard base tunnel, which, in very bad conditions and with large overburdens, enabled safe, constant and always controlled excavation of a 13 m circular profile.

The past few decades have also seen major changes in the area of rock consolidation, particularly with shotcrete. For decades, shotcrete was applied manually by means of a “dry-spraying process” with outputs of 4–5 m³/h. There were already approaches for spraying machines, but the low performance made their use uneconomical. The spray material was mixed dry and first mixed with water and accelerator at the spray nozzle, which also resulted in considerable dust emissions. The use of dry mixtures made short transport distances necessary; in the Furka base tunnel, the mixture was therefore produced on site underground in small plants. In the 1990s, the wet-spraying process, which was mostly used in Norway, was also used in Switzerland, in combination with many other innovations. The wet-spraying process achieved a higher output of up to 15 m³/h and powerful machines had to be used; concrete technology experienced a real boost in innovation with the use of special tunnel cements, new alkali-free accelerators, first in powder and then in liquid form, with retarders and liquefiers, etc. The base tunnels through the Alps again had a not inconsiderable share in these developments, since, for example, AlpTransit Gotthard AG conducted an approval process for concrete mixes in which strict requirements had to be met by the concrete supply industry. These requirements resulted from the special challenges of the application (e.g. high rock temperatures, long transport routes), but also from the fact that the use of the excavated material as aggregates involved the contractor in the supply chain, so to speak.

Although fibres were already being investigated as an alternative to mesh reinforcement back when dry spraying was in use, this technology only really achieved a breakthrough in the wet-spraying process. Today, the range of fibres made of steel or plastic can hardly be overlooked. In connection with the mechanisation of the shotcrete application, many approaches to the automation of the spraying process were pursued. This should improve quality and performance. All of these approaches, however, were successful only in very specific cases. Here only the use of machine learning really offers the prospect of improvement.

4 Old Problems – Same Solution?

There are still problems, however, that continue to be tackled with the same technical approaches that were used 30 or 40 years ago. Certainly, there has been progress in this area too, be it in terms of materials technology, systems or applications, etc., but the underlying technology remains the same.

Lösung in der Platzierung von Abdichtungsfolien, mehrheitlich aus PVC, dessen Dauerhaftigkeit begrenzt ist. Wohl gab es in den vergangenen 30 bis 40 Jahren mehrfach Ansätze für gespritzte Folien, trotzdem konnten sie sich nur bei sehr speziellen hydrogeologischen Verhältnissen als wirkliche Alternative zu Folienabdichtungen positionieren. Ähnliches muss über die heute verfügbaren chemischen Massnahmen gegen Versinterungen gesagt werden: In für den Unterhalt zugänglichen Bereichen, zum Beispiel bei Drainageleitungen, vermögen sie Versinterungen zu minimieren, doch die übrigen Bereiche bleiben davon unberührt und ein allfälliger Aufbau eines Wasserdruckes hinter der Abdichtung kann nicht verhindert werden. Auch das in Norwegen entwickelte Konzept der Abdichtung des Gebirges durch Injektionen vor dem eigentlichen Ausbruch konnte sich nicht wirklich durchsetzen – Injektionen ins Gebirge und in Lockergestein sind noch immer mit Unsicherheit behaftet und es gibt noch immer keine verlässliche Methode, um den Injektionserfolg wirklich beurteilen zu können.

Alles in allem eine sehr unbefriedigende Situation, wenn man um die Wichtigkeit der Beherrschung der Wasserverhältnisse für die Dauerhaftigkeit unterirdischer Anlagen und ihrer Einbauten weiss.

Etwas Ähnliches muss auch bei der Verkleidung unterirdischer Bauwerke festgestellt werden – zumindest in der Schweiz. Einschalige Auskleidungen mit vorfabrizierten Tübbingens sind bei TBM-Vortrieben sowohl im Fels als auch im Lockermaterial und auch im Grundwasser schon längst etabliert und akzeptiert. In der Schweiz jedoch nicht oder nur in Ausnahmefällen. Wir leisten uns noch immer einen zweischaligen Ausbau. Gleiches muss auch bei konventionellen Vortrieben gesagt werden: Obwohl es in der Schweiz bis in die 1990er-Jahre einen hohen Wissensstand hinsichtlich einer erfolgreichen Anwendung der wirtschaftlich interessanten einschaligen Spritzbetonbauweise gab (viele Tunnel von Schmalspurbahnen sind auf diese Art gebaut und saniert worden), wurde diese Technologie nicht weiterverfolgt mit dem Ergebnis, dass heute die Anwendung bei Bauten im Ausland, wie etwa bei Crosslink im UK, als grosser Fortschritt deklariert wird. Neben der einschaligen Spritzbetonbauweise gab es auch während Jahrzehnten keine wirklichen Anstrengungen für einen einschaligen Ausbau mit vorfabrizierten Elementen in konventionellen Vortrieben, noch immer werden diese mehrheitlich zweischalig gebaut. Ansätze dazu gibt es auch hier, wiederum bei Schmalspurbahnen und der Sanierung ihrer Tunnel, so zum Beispiel bei der RhB mit der von ihr vorangetriebenen «Normalbauweise».

Die Kostenanteile sowohl der Abdichtung als auch der Verkleidung an den Gesamtkosten einer unterirdischen Anlage sind substanziell, sodass es schwer verständlich ist, weshalb auf diesem Gebiet nicht wirklich Fortschritte gesucht und gefördert werden.

There are two main areas to be addressed here: waterproofing and the lining of underground structures.

Water is still the worst and most versatile enemy in the life cycle of an underground system, be it through water ingress, combined with chemical or electrolytic corrosion on components or interior linings, through sintering of drainage pipes, the build-up of water pressures and/or the entry of water in the tunnel with or without ice, etc. – there is a variety of phenomena. But the main structural solution is still the placement of sealing membranes, mostly made of PVC, which has limited durability. In the past 30 to 40 years there have been multiple approaches to sprayed foils, but they have only been able to position themselves as a real alternative to foil seals in very specific hydrogeological conditions. The same must be said of the chemical measures against sintering that is available today: In areas that are accessible for maintenance, such as drainage pipes, they can minimise sintering, but the other areas remain unaffected and any build-up of water pressure behind the seal cannot be avoided. The concept of waterproofing the rock by injection before the actual break-out, which was developed in Norway, could not really stand the test of time – injections into the rock and loose rock are still fraught with uncertainty and there is still no reliable method to really assess the success of the injection.

All in all, a very unsatisfactory situation if you know the importance of getting to grips with the water conditions for the durability of underground systems and their installations.

Something similar must also be found for the lining of underground structures – at least in Switzerland. Single-shell linings with prefabricated segments have long been established and accepted in TBM tunnelling, for rock, loose material and groundwater. Not in Switzerland, however, or only in exceptional cases. We still favour two-shell expansion. The same must also be said for conventional tunnelling: Although there was a high level of knowledge in Switzerland up until the 1990s regarding the successful application of the commercially interesting single-shell shotcrete construction method (many tunnels of narrow-gauge railways were built and renovated in this way), this technology was not followed up, with the result that the use of constructions abroad today, such as Crosslink in the UK, is declared to be a major step forward. In addition to the single-shell shotcrete construction, there has been no real effort for a single-shell expansion with prefabricated elements in conventional tunnelling for decades; most of them are still built with two layers. There are also approaches here, again with narrow-gauge railways and the renovation of their tunnels, such as the RhB using the “standard tunnel construction method” that it is promoting.

The proportion of costs both of waterproofing and of cladding as part of the total costs of an underground system is substantial, making it difficult to understand why progress is not really sought and promoted in this area.

5 Mehr wissen – mehr können? Mehr können – mehr wissen?

Das Wissen um die Planung und den Bau unterirdischer Bauvorhaben hat aufgrund der vielen in den letzten Jahrzehnten erstellten Bauwerke enorm zugenommen.

Mit diesem Wissen können wir heute auch sehr viel mehr – ein Tunnelbauvorhaben orientiert sich kaum mehr an geologischen und hydrogeologischen Bedingungen, sondern an übergeordneten Bedürfnissen. Es wird, sicherlich nicht zu Unrecht, vorausgesetzt, dass die Tunnelbauer für alle Probleme eine technisch sichere Lösung besitzen.

Geologische Erkundungen mit gelenkten Bohrungen, geophysikalische Methoden von der Oberfläche aus, in Bohrlöchern oder während des Baus aus dem Tunnel heraus ermöglichen sehr viel tiefer gehende Einblicke in die geologischen Verhältnisse, als dies früher je der Fall war.

Numerische Modellierungen geotechnischer, hydrogeologischer und/oder statischer Phänomene in 2- oder 3-D, zeitabhängig und unter Berücksichtigung diverser Stoffgesetze, scheinen für alle Szenarien verlässliche Aussagen zu ermöglichen.

Projekt- und Qualitätsmanagement auf mehreren Stufen, mehrstufiges Risikomanagement, verbunden mit messtechnischer Überwachung von Maschinen, Prozessen, Arbeitsschritten, vorbereitete Notfallpläne, Berücksichtigung von Expertenwissen mit speziellen Task-Forces und/oder Begleitemen zur Anwendung des Vieraugenprinzips etc. versuchen sicherzustellen, dass das akkumulierte Wissen auch zielgerichtet und optimal in Können umgewandelt wird.

Weshalb denn die Fragezeichen im Titel? Weil man eben auch feststellt, dass das gemeinsame geteilte Wissen der am Bau Beteiligten abgenommen hat. Es hat eine eigentliche Fragmentierung des Wissens und Könnens stattgefunden, was für eine Ingenieurwissenschaft, die naturwissenschaftliche Erkenntnisse in der Praxis anwendet, längerfristig verheerend ist. Für diese Entwicklung gibt es viele Ursachen. Ein wesentlicher Punkt ist sicherlich, dass eine immer deutlicher erkennbare Trennung zwischen dem Design im weiteren Sinne und der Ausführung erkennbar wird. Auch sind massgebende Funktionen der Ingenieurwissenschaft an Nichtingenieure abgegeben worden – in allen Phasen des Lebenszyklus einer unterirdischen Anlage. Erfahrungen aus dem Bau finden immer schwerer Eingang in eine Planung und umgekehrt, das akkumulierte Wissen und Können wird nicht ausgetauscht und weitergegeben. Eine kritische Reflexion dieser Situation wäre sicherlich angebracht, vor allem auch vor dem Hintergrund der stattfindenden Digitalisierung.

6 Standardisierung einer «Commodity»

Nach rund 50, 60 Jahren Tunnelbau in allen denkbaren Abmessungen und in völlig unterschiedlichen geologischen, hydrologischen, topografischen, baulichen etc. Verhältnissen

5 Know More – Able To Do More? Able To Do More – Know More?

Knowledge of the design and construction of underground construction projects has increased enormously due to the many structures that have been built in recent decades.

With this knowledge we are able to do a lot more today – a tunnel construction project is no longer oriented towards geological and hydrogeological conditions, but overriding needs. It is assumed, not without reason, that the tunnel builders will have a technically safe solution for all problems.

Geological exploration with guided drilling, geophysical methods from the surface, in boreholes or during construction from the tunnel enable a much deeper insight into the geological conditions than ever before.

Numerical modelling of geotechnical, hydrogeological and/or static phenomena in 2-D or 3-D, time-dependent and taking into account various substance laws, seem to enable reliable statements to be made for all scenarios.

Project and quality management on several levels, multi-level risk management, combined with metrological monitoring of machines, processes, work steps, prepared emergency plans, consideration of expert knowledge with special task forces and/or advisory boards for the application of the four-eyes principle etc. seek to ensure that the accumulated knowledge is also purposefully and optimally converted into skills.

Why the question marks in the title? Because it is clear the shared knowledge of those involved in construction has decreased. There has actually been a fragmentation of knowledge and ability, which is devastating in the long term for engineering science that applies scientific knowledge in practice. There are a number of reasons for this development. It is significant that there is an increasingly clear distinction between the design in the broader sense and the construction. Crucial engineering roles have also been given to non-engineers – in all phases of the life cycle of an underground system. It is harder and harder to find construction experience in design and vice versa; the accumulated knowledge and skills are not exchanged or passed on. A critical reflection of this situation would be appropriate, particularly in the context of the digitisation that is taking place.

6 Standardisation of a “Commodity”

After around 50 or 60 years of tunnel construction in all conceivable dimensions and in completely different geological, hydrological, topographical, structural conditions etc., one has to admit – even if it is difficult to hear as a tunnel builder –, that the construction of an underground infrastructure largely becomes a “Commodity” which is logically subject to increasing standardisation today. The standardisation is not

muss man feststellen – auch wenn man das als Tunnelbauer nicht gerne hört –, dass der Bau einer unterirdischen Infrastruktur weitgehend zu einer «Commodity» geworden ist, die damit logischerweise heute einer zunehmenden Standardisierung unterworfen ist. Die Standardisierung ist dabei nicht nur technischer Natur und drückt sich nicht nur in Normen, Richtlinien, Vorgaben, Nachweisen, Risikomanagement etc. aller Art aus. Die Standardisierung umfasst auch das Vertragswesen, die Vergütung, die Projektabwicklung etc., etc. Von einzelnen Ländern und Vorhaben abgesehen sind Tunnelbauvorhaben auch immer mehr eingebettet in Gesamtplanungen und -lieferungen, womit die Bedeutung der entsprechenden Ingenieur- und Bauleistung sinkt.

Noch immer sind Innovationen möglich, doch ist das Korsett viel enger geworden: Die finanziellen Margen haben abgenommen und machen den Mut zum unternehmerischen Risiko oft zu wirtschaftlichem Leichtsinne, das gegenseitige Verständnis unter den an Tunnelbauprojekten Beteiligten ist geschwunden und damit sinkt auch die Bereitschaft zur partnerschaftlichen Risikobeteiligung, die angesprochene Standardisierung führt zu einer Best-Practice-Philosophie, die oft nur wenig Raum lässt für Innovationen etc.

Auch hier wäre eine kritische Reflexion angebracht, wiederum vor dem Hintergrund der schon vorher angesprochenen Digitalisierung.

7 Wo bleibt das Ingeniöse?

Heute sind Building Information Modeling (BIM) und die Digitalisierung das grosse Thema im Bau. Sie stellen sicherlich eine grosse Herausforderung dar, das sei nicht bestritten. Es sei aber die These gewagt, dass diese Herausforderung nicht so sehr in der Technik liegt, sondern in den Prozessen und damit in der Zusammenarbeit unter den Projektbeteiligten. BIM und Digitalisierung haben grosse technische Komponenten, doch werden sie zwangsweise zu einer völlig veränderten Zusammenarbeit der am Bau Beteiligten führen – und das ist erfahrungsgemäss für Ingenieure viel schwieriger zu meistern als jede technische Herausforderung. Zudem: Was unter dem Stichwort BIM in der Bauindustrie heute erfolgt, hat zum Beispiel die Maschinenindustrie schon vor Jahrzehnten eingeführt: CAD, CAM, «just in time delivery» etc. – all das kennt die Maschinenindustrie schon lange. Der Bau wird aufgrund der immens wachsenden Möglichkeiten in der IT nun gezwungen, diese Schritte ebenfalls zu tun. Der grosse Unterschied liegt lediglich darin, dass in der Maschinenindustrie die Fertigung in Produktionshallen an definierten Standorten und durch definierte Player erfolgt, während der Bau noch immer von Projekt zu Projekt zieht, und dies in wechselnder Zusammensetzung der Beteiligten.

BIM und die Digitalisierung sind aber nicht ingeniös, sie bringen den Tunnelbau nicht in der Substanz weiter. Es besteht vielmehr die Gefahr, dass eine Fokussierung auf BIM, Digitalisierung etc. davon ablenkt. In zentralen Bereichen

only of a technical nature and is not only expressed in standards, guidelines, specifications, evidence, risk management etc. of all kinds. Standardisation also includes contracting, remuneration, project management, etc., etc. Apart from individual countries and projects, tunnelling projects are also increasingly incorporated in overall planning and deliveries, reducing the importance of the corresponding engineering and construction work.

Innovations are still possible, but there is much less room for manoeuvre: The financial margins have decreased and there is a fine line between the courage to take entrepreneurial risk and economic recklessness; mutual understanding among those involved in tunnelling projects has waned and therefore the willingness to share in risks has also decreased; the standardisation mentioned above gives rise to a best practice philosophy that often leaves little room for innovations, etc.

A critical reflection would also be appropriate here, again in the context of the digitisation mentioned above.

7 Where's the Ingenuity?

Today Building Information Modelling (BIM) and digitisation are the big issues in construction. They certainly pose a major challenge; that is not contested. However, one can hazard the theory that this challenge is not based so much in technology, but in processes, and therefore in the cooperation between the project participants. BIM and digitisation have large technical components, but they will inevitably lead to a completely new way of cooperating between those involved in construction – and experience has shown that this is much more difficult for engineers to overcome than any technical challenge. Moreover, work that is carried out today under the keyboard BIM was introduced in the machine industry, for example, decades ago: CAD, CAM, “just in time delivery”, etc. – all of that has been part of the machine industry for a long time. Owing to the rapidly growing opportunities in IT, construction now has to take these steps as well. The only major difference is that, in the machine industry, production takes place in production halls at defined locations and through defined players, while construction still moves from project to project with different participants involved.

However, BIM and digitisation are not ingenious; they do not advance the substance of tunnelling. Rather, there is a risk that focussing on BIM, digitisation, etc., will be nothing more than a distraction. There has been no significant technical progress in key areas of underground construction for a long time. There may have been plenty of developments, optimisations, improvements, etc., but no real groundbreaking progress has been made. We are still using rotary drills just as we were decades ago, and the same basic technologies are still being used in expansion, waterproofing and mechanical drives.

des Untertagbaus sind seit längerem nicht mehr signifikante technische Fortschritte erzielt worden. Sicher, es gab viele Weiterentwicklungen, Optimierungen, Verbesserungen etc., aber wirklich bahnbrechende Fortschritte wurden nicht gemacht. Noch immer bohrt man drehschlagend wie vor Jahrzehnten, sind im Ausbau, in der Abdichtung und auch bei den maschinellen Vortrieben die gleichen grundlegenden Technologien in der Anwendung.

Interessant ist an dieser Stelle ein Seitenblick auf die Automobilindustrie: Auch sie baut – trotz CAD und CAM – noch immer Autos mit dem hergebrachten Verbrennungsmotor, auch wenn die heutigen Autos von ganz anderer Qualität sind als vor Jahrzehnten noch. Doch genau diese Industrie muss sich heute von Grund auf neu orientieren, weil aus Gründen der Nachhaltigkeit die Zukunft nicht mehr in den hergebrachten Technologien liegt. Und wenn man weiss, dass rund 30% des CO₂-Footprints auf die Bauindustrie entfallen, so müsste sich die Bauindustrie eigentlich schon lange aufgemacht haben, um neue Technologien zu entwickeln.

Und hier liegt auch das Ingeniöse: das Erforschen und Entwickeln nachhaltiger Technologien für den Tunnelbau der Zukunft. Das ist der Kern des ingenieurmässigen Handelns: die Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für ingeniose innovative Lösungen und nicht primär die Vollstreckung von Normen und die Anwendung der letzten Software-Releases.

It is interesting to consider the automotive industry in this regard: despite CAD and CAM, cars continue to be built with the traditional internal combustion engine, even if today's cars are of a completely different quality than they were decades ago. However, this very industry needs to reorient itself from scratch today because, for reasons of sustainability, the future no longer lies in the traditional technologies. And considering that around 30% of the CO₂ footprint is attributable to the construction industry, the construction industry should have set about developing new technologies long ago.

And this is where the ingenuity lies: the research and development of sustainable technologies for the tunnel construction of the future. This is the core of engineering action: the use of scientific knowledge for ingenious innovative solutions and not primarily the enforcement of standards and the application of the latest software releases.



Roboterunterstützte Tübbingproduktion

Erfahrungsbericht, Vor- und Nachteile, Grenzen des aktuell Machbaren

Dipl. Bauing. ETHZ Paul Freudiger, Marti Tunnel AG, Moosseedorf/CH

Dipl.-Ing. Stefan Medel, Herrenknecht Formwork Technology GmbH, Schwanau/DE

Industrial Engineer Kuno Hamm, Herrenknecht Formwork Technology GmbH, Schwanau/DE

Roboterunterstützte Tübbingproduktion

Erfahrungsbericht, Vor- und Nachteile, Grenzen des aktuell Machbaren

Die Marti Tunnel AG und die Herrenknecht Formwork GmbH haben sich zusammengesetzt, um die Tübbingfertigung zu optimieren. Nach dem Studium unterschiedlicher Möglichkeiten wurde eine roboterunterstützte Lösung entwickelt. Das weltweit einzigartige innovative Resultat kann sich sehen lassen – ein Verfahrportal mit einem Roboter, welcher flexibel an mehreren Stellen der Produktionslinie sicher und fehlerfrei arbeiten kann.

Nach einer zweijährigen Entwicklungs- und Installationsphase ist die Anlage Anfang August im Tübbingwerk der Marti Tunnel AG in Betrieb genommen worden. Aktuell werden zusammen mit der Herrenknecht Formwork Technology GmbH die ersten Erfahrungen in der Produktion gesammelt und ausgewertet.

Der Einsatz eines Roboters eröffnet neben der effizienteren Tübbingfertigung eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Optimierung und Automatisierung, wie zum Beispiel das Betonieren und Glätten, die Vermessung sowie die Vernetzung der einzelnen Prozesse in einem Managementsystem.

Robot-Assisted Production of Tunnel Segments

Progress Report, Advantages and Disadvantages, Limits of Current Feasibility

Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork GmbH have joined forces to optimise segment manufacture. Having examined various options, the companies developed a robot-assisted solution. The result, which is the only one of its kind the world over, is a feat of innovation – a positioning unit with a robot that has the versatility to work on several positions along the production line, safely and without error.

After a two-year development and installation phase, the system was put into operation at the Marti Tunnel AG segment factory in early August. The first experiences of using this system in production are currently being collected and evaluated in conjunction with Herrenknecht Formwork Technology GmbH.

In addition to more efficient segment production, using a robot opens up a whole host of other possibilities in terms of optimisation and automation, such as concreting and smoothing, measurement and networking of the individual processes in a single management system.

1 Einleitung

Das Schweizer Unternehmen Marti Tunnel AG als Hersteller von Betonfertigteilen und Herrenknecht Formwork als Lieferant von Tübbingproduktionsequipment haben ihre Erfahrung und Expertise zusammengebracht, um ein innovatives Konzept für den Einsatz von Robotern in der Tübbingproduktion auszuarbeiten.

Die Marti Tunnel AG produziert in der Schweiz am Standort Klus-Balstahl sowohl Tübbing- als auch die sogenannten Werkleitungskanalelemente, kurz WELK. Die WELK werden mittels Standschalungen gefertigt, die Tübbinge hingegen auf einer Umlaufanlage produziert.

1 Introduction

The Swiss company Marti Tunnel AG, which manufactures precast concrete parts, and Herrenknecht Formwork, which supplies equipment for the production of tunnel segments, pooled their experience and expertise in order to come up with an innovative concept for the use of robots in segment production.

At its site in Klus-Balstahl, Switzerland, Marti Tunnel AG produces tunnelling and service duct segments. The service duct segments are manufactured using a stationary formwork, whereas the tubings are produced as part of a production cycle.

Production de voussoirs robotisée

Rapport d'expérience, avantages et inconvénients, faisabilité actuelle

Les sociétés Marti Tunnel AG et Herrenknecht Formwork GmbH se sont unies pour optimiser la fabrication de voussoirs. Après étude des différentes possibilités, une solution robotisée a été développée. Innovant et unique au monde, le résultat est impressionnant : un portique mobile doté d'un robot capable de travailler de façon flexible en plusieurs points de la ligne de production – en toute sécurité et sans commettre d'erreur.

Après une phase de développement et d'installation de deux ans, la mise en service a eu lieu début août dans l'usine de voussoirs de Marti Tunnel AG. Les premières expériences de production sont actuellement collectées et évaluées avec Herrenknecht Formwork Technology GmbH.

Outre le rendement accru du processus de fabrication, le recours à un robot ouvre tout un éventail de nouvelles possibilités en matière d'optimisation et d'automatisation, notamment en ce qui concerne le coulage de béton et le lissage, la mesure et la mise en réseau des processus individuels dans un système de gestion.

Produzione di conci robotizzata

Esperienze, vantaggi e svantaggi, limiti di fattibilità attuali

La Marti Tunnel AG e la Herrenknecht Formwork GmbH si sono unite per ottimizzare la produzione di conci. Dopo lo studio delle diverse possibilità, è stata sviluppata una soluzione robotizzata. Il risultato innovativo e unico al mondo è ammirevole: un portale mobile con un robot, in grado di operare flessibilmente in diversi punti della linea di produzione – in modo sicuro e privo di errori.

Dopo una fase di sviluppo e installazione durata due anni, l'impianto è stato messo in funzione all'inizio di agosto presso lo stabilimento di produzione di conci della Marti Tunnel AG. Attualmente si stanno raccogliendo e valutando le prime esperienze di produzione in collaborazione con la Herrenknecht Formwork Technology GmbH.

L'impiego di un robot, oltre ad aumentare l'efficienza della produzione di conci, spalanca un gran numero di possibilità in fatto di ottimizzazione e automazione, ad esempio nel campo del betonaggio e della lisciatura, della misurazione e del collegamento in rete dei singoli processi in un sistema di gestione.

Bei der Umlauffertigung sind die einzelnen Schritte getaktet. In den meisten Fällen ist das Betonieren der Elemente zeitkritisch und massgebend für die Taktzeiten. Dies bedeutet, dass die vorhergehenden Arbeitsschritte auf die massgebende Taktzeit abgestimmt werden müssen. Diese Arbeiten – wie zum Beispiel Öffnen und Schliessen der Schalung, Reinigung, Einbau der Dichtungen sowie Einlegen der Bewehrung – sind sehr zeit- und personalintensiv.

Mit dem Ziel, Ausfallstunden zu reduzieren und die Produktion effizienter zu gestalten, haben Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork diverse Möglichkeiten geprüft, die entsprechenden Arbeitsschritte analysiert und Lösungen ausgearbeitet.

2 Mögliche Ansätze

Die ersten Ideen wurden im Sommer 2017 auf der Basis von Handskizzen diskutiert. Zwischen verbesserten Schliessmechanismen der Schalung, dem Einsatz von Hydraulikkomponenten und der Verwendung eines Roboters wurden die Möglichkeiten ausgelegt und analysiert. Die Verbesserung der Mechanik wurde als zu wenig, der Robotereinsatz als zu waghalsig eingestuft. Deshalb hat man sich anfänglich dafür entschieden, die Lösung mit den Hydraulikkomponenten weiterzuentwickeln. Dieser Entscheid wurde auch durch die Tatsache bestärkt, dass die Marti Tunnel AG für die WELK-

In a production cycle, the individual steps are closely timed. In most cases, the concreting of the segments is extremely time-sensitive and crucial to the cycle times. It is therefore essential that the preceding work steps adhere to their own cycle times. These processes, which include opening and closing the formwork, cleaning, fitting the seals and inserting the reinforcement, are extremely time-consuming and labour-intensive.

With the aim of reducing downtime and making production more efficient, Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork tested out a wide range of options, analysed the relevant work steps and developed the right solutions.

2 Possible Applications

The initial ideas were discussed in summer 2017, based on a series of hand-drawn sketches. The various options were drawn up and analysed, from improved closing mechanisms on the formwork, to the use of hydraulic components or robots. Improving the mechanics seemed too little a change, while the use of robots was considered too daring. That is why the initial decision was to continue developing the solution involving the use of hydraulic components. Another major factor behind this decision was that Marti Tunnel AG had already used fully hydraulic formwork for the first time in service duct production –

Produktion erstmalig vollhydraulische Schalungen für die Produktion der Elemente des Gubristtunnels eingesetzt hat. Die Resultate waren jedoch für eine Tübbingproduktion mittels Umlaufanlage und Wärmekanal nicht zufriedenstellend. Der Hydraulikeinsatz erleichtert sicherlich die verschiedenen Arbeiten, bringt jedoch die angestrebte Stundenreduktion nur teilweise mit. Zudem ist neben anderen technischen Eigenschaften das Verhalten der Hydraulikkomponenten in der warmfeuchten Umgebung des Härtetunnels nicht unproblematisch. Kostenmässig brachte diese Lösung den angestrebten Vorteil ebenfalls nicht. Somit wurde entschieden, diesen Ansatz für die Umlaufanlagentechnik vorerst beiseitezulegen. In einer Produktion mit Standschalungen kann sich der Einsatz von Hydraulikunterstützungen jedoch durchaus als sinnvoll erweisen.

3 Die gewählte Lösung: roboterunterstützte Tübbingproduktion

Nach der Entscheidung, die Hydrauliklösung beiseitezulegen, stellte sich die Frage des weiteren Vorgehens. Die anfänglich als zu ambitiös eingestufte Lösung der Roboter-technik wurde erneut aufgegriffen und im Team diskutiert. Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork begannen, die einzelnen Arbeitsvorgänge auf der Arbeitslinie vor dem Betonieren im Detail zu untersuchen und für die einzelnen Arbeitsschritte Lösungsansätze auszuarbeiten. Die Grundlage der Vorschläge bildete die technische Machbarkeit der einzusetzenden Roboter. Der anfänglich relativ einfach formulierte Ansatz einer Roboterunterstützung erwies sich innerhalb dieser ersten Überlegungen und Analysen als komplex

to manufacture the components of the Gubrist Tunnel. However, the results of the hydraulics were not satisfactory when used for segment manufacture as part of a production cycle with a heat treatment tunnel. Although a hydraulic system does in fact make the various jobs easier, it does not reduce cycle times by the desired amount. In addition, alongside their other technical properties, the behaviour of hydraulic components in the hot, humid environment of the curing tunnel is not without its faults. This solution also failed to result in sufficient cost savings. It was therefore decided to put this approach aside for the time being, at least for cyclical production. For production using stationary formwork, the use of hydraulic supports may still prove useful.

3 The Chosen Solution: Robot-Assisted Segment Production

After deciding to discard the hydraulic solution, the next question was which direction to take next. The solution involving robot technology, which was initially considered too ambitious, was picked back up and discussed within the team. Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork began to thoroughly examine the individual production processes that take place prior to concreting, and to work out solutions for those individual steps. Proposals were made based on the technical feasibility of the robots to be used. These initial considerations and analyses showed that the integration of robotic assistance, which initially seemed relatively simple, would actually be highly complex and – from a technical perspective – pretty challeng-

ing. Due to the increasing complexity, the team from Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork gradually brought in additional specialists from the field of automation technology.

The team carried out detailed analysis of the individual steps, based on the fundamental question as to the extent to which manual tasks could be performed by the robot. For this, it was necessary to consider the properties of the robot, in terms of range, load capacity, torque and geometry.

The team examined various options, including the use of robots with horizontal and vertical



Quelle/credit: Marti Tunnel AG

1 Der Roboter im Einsatz mit der Reinigungsbürste
The robot in use with the cleaning brush

und technisch eher anspruchsvoll. Aufgrund der zunehmenden Komplexität zog das Team um Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork sukzessive zusätzliche Spezialisten aus der Automatisierungstechnik heran.

Die detaillierte Analyse der einzelnen Schritte basierte auf der grundsätzlichen Frage, inwiefern manuelle Tätigkeiten durch den Roboter übernommen werden können. Hierzu musste vor allem den Eigenschaften des Roboters in Bezug auf Reichweite, Tragfähigkeit, Drehmoment und Geometrie Rechnung getragen werden.

Das Team hat diverse Möglichkeiten untersucht, wie zum Beispiel den Einsatz von Robotern mit horizontaler und vertikaler Bewegung an einem oder mehreren Portalen, aber auch die Verwendung von stationären Robotern. Nach eingehender Analyse der verschiedenen Möglichkeiten haben sich Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork dafür entschieden, einen fünfachsigigen Roboter, adaptiert auf einem zweiachsigem Verfahrportal, zu entwickeln und einzusetzen. Somit stehen sieben Achsen zur Verfügung, die es ermöglichen, auf jede individuelle Anforderung auf der Arbeitslinie einzugehen. Die Gründe für die Wahl lagen in den folgenden Punkten:

- Der Einsatz einer durchgehenden Verfahrachse ermöglicht eine hohe Flexibilität. Die Anzahl der Roboter kann jeweils auf die einzelnen Bedürfnisse eines Projektes abgestimmt werden. Die Anlage kann so schrittweise ausgebaut beziehungsweise angepasst werden.
- Mit einem verfahrbaren Roboter ist die Erreichbarkeit der einzelnen Arbeitspositionen auch bei grossen Tübbingen gut gewährleistet. Gegenüber einem Standroboter in einer fixen Position können durch die Modularität einer Verfahrachse vergleichsweise kleine Roboter eingesetzt werden, welche die Zugänglichkeit zu den entsprechenden Arbeitspositionen der Schalung deutlich verbessern.
- In den aufgestellten Kostenschätzungen unterschieden sich die untersuchten Lösungen nur unwesentlich voneinander. Die Kosten für das zweiachsige Verfahrportal werden durch die Reduktion der Roboteranzahl kompensiert. Der Umstand der annähernden Kostenäquivalenz trug erfreulicherweise dazu bei, dass man sich auf die Technik fokussieren konnte.

4 Erste Erfahrungen

Unter den etlichen wertvollen Erfahrungen in der Zusammenarbeit zwischen Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork in diesem Pilotprojekt bedürfen die folgenden Punkte eines etwas detaillierteren Beschriebs:

4.1 Zeitverhältnisse

Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork arbeiten seit über zwei Jahren an dem Konzept einer unterstützten Fertigung. Die Analyse der Machbarkeit, das Studium der Varianten und die entsprechenden Kostenschätzungen nahmen ungefähr ein Jahr in Anspruch. Die beiden Partner fällten im August 2018 auf der Basis der erstellten Dokumente die Entscheidung zur Weiterverfolgung und Ausarbeitung des Projektes.

movement on one or more gantries, as well as the use of stationary robots. After an in-depth analysis of the various options, Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork decided to develop and implement a five-axis robot, adapted on a two-axis positioning unit. With seven axes available, it is therefore possible to respond to every individual requirement on the production line. The decision was based on the following factors:

- The use of a continuous traversing axis provides a high degree of flexibility. The number of robots can be tailored to the individual project requirements. The system can be expanded or adapted step by step.
- With a movable robot, the accessibility of the individual working positions is guaranteed, even with large segments. In comparison to stationary robots in a fixed position, the modularity of traversing axes means that comparatively small robots can be used, which significantly improves the accessibility of the respective operating positions on the formwork.
- In terms of the cost estimates, there were only minor differences between the various solutions examined. The costs for the two-axis positioning unit are compensated for by reducing the number of robots. It was partly due to the estimated cost equivalence that the team was able to focus on the technology.

4 Initial Findings

The collaboration in this pilot project between Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork resulted in many useful findings. However, the following points require a more detailed description:

4.1 Timescales

Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork have been working on the concept of robot-assisted manufacturing for over two years. Analysing the feasibility, examining the variants and drawing up the relevant cost estimates took approximately one year. Based on the documents that were put together, in August 2018 the two partners made the decision to follow up and develop the project.

They then began the detailed work, creating a time schedule, working on the statics for the unit and evaluating potential suppliers for the key components.

It soon became clear that the specified schedule for starting production in the spring of 2019 was too ambitious and had to be adjusted accordingly. The adjustments to the time-line were informed by the partners' understanding of the detailed processing, as well as the availability of the key components such as positioning units, system control, robots and tools.

In conclusion, regardless of the contingencies put in place when planning, it always takes more time than planned to set up a system like this. In order to avoid putting

Roboterunterstützte Tübbingproduktion •

Erfahrungsbericht, Vor- und Nachteile, Grenzen des aktuell Machbaren

Daraufhin begann die Detailarbeit mit der Erstellung eines Zeitplanes, der Ausarbeitung der Statik für das Portal sowie der Evaluation der Lieferanten für die Hauptbestandteile.

Es wurde rasch ersichtlich, dass der vorgegebene Zeitplan für einen Start der Produktion im Frühling 2019 zu forsch war und dementsprechend laufend angepasst werden musste. Verantwortlich für die jeweiligen Anpassungen der Zeitschiene waren sowohl die Erkenntnisse in der Detailbearbeitung als auch die Verfügbarkeit der Hauptkomponenten wie Verfahrportale, Anlagensteuerung, Roboter und Werkzeuge.

Fazit ist, dass der Aufbau einer solchen Anlage trotz Einplanung von Reserven immer mehr Zeit in Anspruch nimmt als geplant. Um die Automatisierung nicht unnötig unter zusätzlichen Druck zu setzen, sollte deshalb, wenn möglich, ein nicht zeitkritisches Projekt als Basis gewählt werden.

4.2 Komplexität

Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork haben die Herstellung der Sohltübbinge für den Hochwasserentlastungsstollen Sarnen (HWS) für den Aufbau der Anlage vor allem aus den folgenden Gründen als geeignet eingestuft:

- genügend Zeit für die Herstellung und Auslieferung der Elemente;
- einfache Geometrie und Eigenschaften der Steine (keine Verschraubung, Dichtung etc.);
- identische Schalungen.

Obwohl die Tübbinge und die entsprechenden Schalungen einfach ausgebildet sind, taten sich in der Bearbeitung rasch viele Fragen auf. Die folgenden Punkte möchte der Bericht etwas näher aufzeigen: Die Evaluation des Roboters aufgrund der Vorgaben musste rasch erfolgen. Neben Eigenschaften wie Kinematik, Ausladung, Tragkraft sowie erforderliche Drehmomente mussten auch das Durchfüh-

rennenden Druck auf die Automatisierung, Projekte sollten daher basieren auf einem nicht zeitkritischen Ansatz, wo möglich.

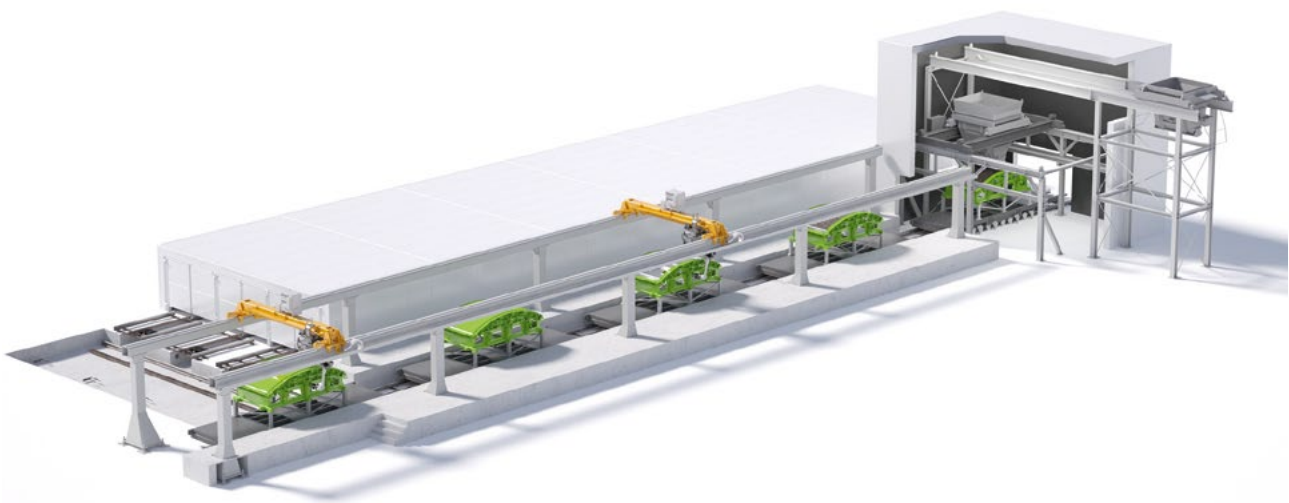
4.2 Complexity

Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork determined that the manufacturing process for the floor segments for the Sarnen flood relief tunnel would be suitable for the construction of the system. The main reasons were as follows:

- there was sufficient time for the manufacture and delivery of the components;
- the simple geometry and properties of the segments (no screw connections, no seals etc.) provided favourable conditions;
- the formworks were identical.

Although the design of the segments and the respective formworks were quite simple, questions quickly started to arise when work got under way. This report would like to highlight the following points in more detail: the evaluation of the robot according to the specifications had to be carried out very quickly. As well as features such as kinematics, reach, load capacity and the required torques, the passage of media (air, oil, etc.) and the inclusion of various tools also had to be dealt with in great depth. Together with the specialists, Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork opted for the Yaskawa GP88.

The decision to use a two-axis positioning unit proved to be the right one. The relatively high costs compared to several of the smaller units are more than offset by the increased flexibility of the two-axis system. However, the complexity of designing the steel structure itself was somewhat underestimated in the concept studies. The high degree of force created by the robot's movements (acceleration, braking, etc.) has to be absorbed by its steel structure, with-



2 Produktionslinie mit Verfahrportal
Production line with positioning unit

Quelle/credit: Herrenknecht Formwork Technology GmbH

ren von Medien (Luft, Öl etc.) sowie die Aufnahme verschiedenster Werkzeuge im Detail bearbeitet werden. Zusammen mit den Spezialisten haben sich Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork für den Typ Yaskawa GP88 entschieden.

Die Entscheidung, ein zweiachsiges Verfahrportal einzusetzen, erwies sich als richtig. Die etwas höheren Kosten gegenüber mehreren kleineren Portalen werden durch eine erhöhte Flexibilität mehr als wettgemacht. Die Auslegung der Stahlkonstruktion selbst wurde in den Konzeptstudien jedoch etwas unterschätzt. Die entstehenden hohen Kräfte der Roboterbewegungen (Beschleunigen, Abbremsen etc.) müssen schwingungsfrei von der Stahlkonstruktion aufgenommen werden. Dies erfordert eine äusserst steife Konstruktion, welche nicht mit einem klassischen Stahlbau (Kranbahn) verglichen werden kann. Die Projektierung zur Erstellung und Montage einer solchen Konstruktion erwies sich als entsprechend zeit- und kostenaufwendig.

Die Schalungen mussten den Gegebenheiten des Roboters angepasst werden. Sowohl die Schraubverbindung der beweglichen Seitenteile als auch die Kinematik der Deckel mussten so konzipiert werden, dass sie für den Roboter zugänglich sind bzw. von ihm manipuliert werden können. Im Verlauf der Arbeiten haben sich Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork entschieden, für HWS gänzlich auf den Deckel zu verzichten und diesen durch einen Deckel in der Betonierstation zu ersetzen.

Die Einbauteile für den HWS-Tübbing sind eher einfach aufgebaut, da sie sich auf ein zylindrisches Profil zur Injektion und als Aufnahme für den Erektorgreifer beschränken. Lieferant für die Einbauteile ist die Firma Optimas aus dem französischen Sarreguemines. Der Einbau der Elemente und die entsprechenden Halterungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten entwickelt und so konzipiert, dass der Roboter die Teile einsetzen kann. Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Dichtigkeit der Fixierung sowie der Verformung der Teile werden diese Bereiche sukzessive verbessert, sodass der Einbau der Teile zukünftig problemlos automatisch erfolgen kann.

4.3 Werkzeuge

Für die entsprechenden Roboteranwendungen mussten spezielle Werkzeuge projektiert werden. Alle Werkzeuge wurden jeweils als eigenständige Einheit in die Gesamtsteuerung implementiert.

Auf der vollautomatischen Arbeitslinie kommen vier Werkzeuge zum Einsatz, die auf dem Verfahrwagen des Roboterportals «mitfahrend» platziert sind, um den schnellstmöglichen Werkzeugwechsel mit kurzen Verfahrwegen zu gewährleisten:

1. Eine rotierende Walzenbürste mit Elektroantrieb fährt die gesamte Schalungsoberfläche vertikal und horizontal ab und reinigt sie auch. Die optimale Abstimmung von Borstenbeschaffenheit und Drehgeschwindigkeit der Walzenbürste

out causing it to vibrate. This requires a construction that is extremely rigid – to a far greater extent than most conventional steel structures (e.g. a crane runway). As a result of this, the project planning for the design and assembly of such a construction proved to be correspondingly time-consuming and costly.

The formworks had to be adapted to the conditions of the robot. The threaded connection of the movable side parts, as well as the kinematics of the lids, had to be designed in such a way that the robot would be able to access and manipulate them. During the course of the project, Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork decided to completely do away with the lid for the flood relief tunnel, and to replace it instead with a cover in the concreting station.

The design of the installation parts for the flood relief tunnel segments is relatively simple, since they are limited to one cylindrical profile for both the injection port and to accommodate the gripping pin of the segment erector. The supplier for the parts to be installed into the concrete segment (dowels, pins, etc.) is Optimas, a company based in Sarreguemines, France. The installation of the elements and the corresponding brackets inside the formwork were developed in collaboration with the supplier and designed in such a way that the robot would be able to use the parts. After a few initial difficulties with the tightness of the fastenings and the parts becoming deformed, these areas are gradually being improved so that, in the future, it will be possible for parts to be installed without any issues.

4.3 Tools

Special tools had to be configured for the corresponding robotic applications. Each of the tools was implemented as an independent unit in the overall control system.

Four tools are used on the fully automated production line. These are placed on the carriage of the gantry robot and travel with it, which ensures that tools can be changed as quickly as possible, with short travel distances.

1. An electrically driven rotating roller brush sweeps and cleans the entire surface of the formwork both vertically and horizontally. One of the major challenges was achieving optimum coordination of the bristle qualities and the speed of rotation of the roller brush. This is due to the fact that the brush has to clean both coarse concrete residues and a fine layer of cement from the formwork.
2. In addition, an air–oil combination tool is also used. The air bar blows air along the formwork after cleaning in order to remove any loosened dirt residues. Then, as an additional step, the oil spray nozzles on the cleaning bar spray the formwork with form oil.

Roboterunterstützte Tübbingproduktion •

Erfahrungsbericht, Vor- und Nachteile, Grenzen des aktuell Machbaren



Quelle/credit: Marti Tunnel AG

3 Reinigen der Schalung mittels Bürste *Brush-cleaning the formwork*

war dabei eine der grossen Herausforderungen, da es zum einen grobe Betonrückstände und zum anderen eine feine Zementschleierschicht an den Schalungen zu reinigen gilt.

2. Des Weiteren kommt ein Luft-Öl-Kombiwerkzeug zum Einsatz. Der Luftbalken wird zum Abblasen der Schalung nach der Reinigung eingesetzt, um gelöste Schmutzrückstände aus der Schalung rückstandslos zu entfernen. Mit an dem Reinigungsbalken zusätzlich angeordneten Ölsprühdüsen wird die Schalung anschliessend in einem zusätzlichen Arbeitsschritt mit Schalöl eingesprüht.
3. Mit einem Universal-3-Finger-Greifsystem wird die Schalung mit allen notwendigen Einbauteilen bestückt. Die Einbauteile mussten so konzipiert werden, dass sie mit dem Greifsystem sicher und positionsgenau aufgenommen werden konnten.
4. Das komplexe Werkzeug zum Öffnen und Schliessen der kompletten Schalungen ist der elektrische Drehmoment-

3. With a universal three-finger gripping system, the formwork is fitted with all the necessary installation parts. The installation parts had to be designed so that they could be picked up safely and precisely with the gripping system.
4. The electric torque screwdriver is used to open and close the entire formwork. This is a highly complex tool in terms of its capacity to locate the screws and its integration into the overall control of the system, which is achieved through continuous torque detection and control. The hexagonal attachment had to be constructed individually so that it could move independently to locate screws, while also maintaining the high level of stability required for series application.

All tools are integrated into a pneumatic quick-change head system permanently installed on the robot.



Quelle/credit: Herrenknecht Formwork Technology GmbH

4 Projektierte Werkzeuge für den Roboter *Tools planned for use with the robots*

Robot-Assisted Production of Tunnel Segments •

Progress Report, Advantages and Disadvantages, Limits of Current Feasibility

schrauber hinsichtlich der Schraubenfindung und der Integration in die Gesamtsteuerung mit permanenter Drehmomentabfrage und -kontrolle. Für den Sechskantaufsatz war eine individuelle Konstruktion hinsichtlich der individuellen Beweglichkeit zur Schraubenfindung und gleichzeitig der erforderlichen hohen Standhaltigkeit für den Serieneinsatz erforderlich.

Alle Werkzeuge werden über ein pneumatisches Schnellwechselkopfsystem aufgenommen, das fix am Roboter installiert ist.



Quelle/credit: Marti Tunnel AG

5 Setzen eines Einbauteils
Fitting an installation part



Quelle/credit: Marti Tunnel AG

6 Der Drehmomentschrauber im Einsatz an der Schalung
The torque screwdriver in use on the formwork

4.4 Arretierung

Im Serienlauf muss die Wiederholgenauigkeit und damit die Positioniergenauigkeit der Schalungen nach jedem Arbeitstakt gewährleistet werden.

Das heisst, jeder Schalungstyp muss nach jedem Umlauf in der entsprechenden Arbeitszelle wieder exakt auf der gleichen Arbeitsposition ankommen.

Dazu wurden spezielle Schalungsarretierungen entwickelt.

Obwohl die Lokalisierung der individuellen Schalung über ein RFID-System ermittelt werden kann, bedarf es trotzdem einer grundsätzlich «mechanischen» Positionsgenauigkeit. Dadurch werden Positionierungsprobleme, die üblicherweise mit einem Stillstand verbunden sind, vermieden.

4.5 Sicherheitstechnik

Die komplette Arbeitslinie wurde über einen Sicherheitszaun unzugänglich abgeriegelt und in vier individuelle Arbeitszellen unterteilt:

1. In Zelle 1 wird die Schalung geöffnet.
2. In Zelle 2 wird der Tübbing entformt.
3. In Zelle 3 wird die Schalung gereinigt und eingeölt.
4. In Zelle 4 werden die Einbauteile eingesetzt und die Schalung geschlossen.

Jede Arbeitszelle wurde über ein Lichtschrankensystem und über je eine überwachte Sicherheitstür abgeschirmt. Die komplette Anlage ist im Betrieb vollumfänglich überwacht und darf nicht betreten werden. Des Weiteren mussten die in der Produktionshalle befindlichen Brückenkranen in die Sicherheitstechnik implementiert werden, sodass ein Überfahren des Roboters im Betrieb nicht möglich ist. Alle in der Anlage befindlichen Einzelsysteme werden über ein speziell entwickeltes übergeordnetes Master-System überwacht und gesteuert.

5 Grenzen des Machbaren

Das Arbeiten mit einem Roboter ohne Kamera bedingt, dass alle Positionen auf der Schalung für die Verschraubungen sowie für die aufzunehmenden Teile millimetergenau angefahren werden müssen. Das Anfahren der verschiedenen Schraubköpfe ist für einen «blinden» Roboter äusserst komplex und zeitintensiv und liegt somit an der Grenze des wirtschaftlich Machbaren. Die Elemente für die Verbindungen und die Kinematik der Schalungsteile müssten dem Roboter künftig besser angepasst werden. Die Ausarbeitung der entsprechenden Lösungen ist im Gange.

Die Elemente einer Tübbingverschraubung (Ring- oder Längsfuge) konnten nicht getestet werden, dies sollte jedoch für einen Roboter machbar sein. Da der heutige Trend eher weg von Verschraubungen und hin zu Verbindungen mit Steckelementen geht, wird sich dies auf die Arbeit des Roboters positiv auswirken.

4.4 Locking

In series production, the repeat accuracy and therefore the positioning accuracy of the formwork must be guaranteed for each work cycle.

This means that each type of formwork must arrive back in exactly the same position after each cycle in the corresponding work cell.

To ensure that this would be the case, special formwork locks were developed.

Although the location of the individual formwork can be determined using an RFID system, basic mechanical positional accuracy is still necessary. This helps to prevent positioning problems, such as those resulting from a standstill.

4.5 Safety Measures

A locked safety fence around the entire production line prevented access during operation. It was also divided into four individual work cells:

1. In cell 1, the formwork is opened.
2. In cell 2, the segment is removed from the mould.
3. In cell 3, the formwork is cleaned and oiled.
4. In cell 4, the installation parts are inserted and the formwork is closed.

Each work cell was protected by a light barrier system and a monitored safety door. The entire system is fully monitored during operation and entry is strictly prohibited. Furthermore, the gantry cranes in the production hall had to be integrated into the safety system to ensure that the robot is not run over during operation. All of the individual elements within the whole system are monitored and controlled via a specially developed overarching master system.

5 Limits of Feasibility

Working with a robot without a camera requires the robot to employ millimetre precision when navigating to all the positions on the formwork for both the screw connections and the parts to be picked up. For a “blind” robot, locating the various screw heads is extremely complex and time-consuming, and therefore goes to the very limit of economic feasibility. Going forward, the components required for the connections and the kinematics of the formwork parts would have to be adapted to make them more suitable for this type of robot. Work is currently under way to develop the relevant solutions.

It was not possible to test the components of a segment screw connection (ring or longitudinal joint), but this should be feasible for a robot. The current trend is moving away from screw connections and more towards connections with plug-in mechanisms, which will have a positive effect on how the robot works.

Das Einbringen von Dichtungen stellt aus heutiger Sicht ebenfalls eine Grenze des Machbaren dar. Das Packen des richtigen Dichtrahmens und dessen genaues Eindrücken in die vorgesehene Nut ist robotertechnisch eine weitere Herausforderung. Die Zukunft wird zeigen, ob es gelingen wird, diesen Schritt ebenfalls in die Robotertechnik zu integrieren.

6 Ausblick

Neben der Unterstützung der Arbeitslinie und dem automatisierten Öffnen und Schliessen der Schalung mittels Hydraulik gibt es einige weitere Möglichkeiten für eine rentable Automatisierung in der Tübbingproduktion.

Ein Beispiel ist das automatisierte Betonieren, bei dem der Beton mit Schalungs-ID und erforderlicher Menge über RFID an der Schalung und RFID-Reader auf der Arbeitslinie automatisch abgerufen wird, aber auch das automatisierte Oberflächenfinish.

Das Aushärten des Betons könnte in Zukunft grösstenteils mit energiesparenden Automatik-Systemen erfolgen. Dabei erhält jede Schalung einen Temperatursensor, und es kann für jede Schalung eine eigene optimierbare Erhärtungskurve eingestellt werden.

Grosses Automatisierungspotenzial bietet auch der Bereich der Vermessung.

Zur Steigerung der Effizienz einer Tübbingproduktion spielt jedoch neben der Automatisierung der einzelnen Arbeitsschritte auch die Vernetzung aller Prozesse eine entscheidende Rolle. Modulare Produktions- und Logistikmanagementsysteme wie zum Beispiel das SDS-System der Firma VMT dirigieren, kontrollieren und dokumentieren alle wesentlichen Vorgänge im Rahmen der Produktion und Lagerung von Tübbing und erfassen deren Positions- und Einbaudaten im Tunnel. Neben dem reinen Aufzeichnen von Daten für die Dokumentation können diese Informationen auch dazu genutzt werden, die einzelnen Prozesse zu optimieren und letztlich die Produktivität der Anlage und die Qualität der Tübbinge zu steigern. Dazu werden sämtliche Komponenten wie Mischanlage, Heizung, Vermessung, SPS-Steuerung der Anlage, Roboter, Sicherheitstechnik, Datenmanagement etc. miteinander vernetzt. Dadurch werden wichtige Informationen wie Leistung pro Tag, Ausschuss und Massenkontrolle aufgezeichnet, und die gesammelten Daten bieten zusätzlich eine verlässliche Grundlage für ein 3-D-BIM-Modell.

Mit der roboterunterstützten Tübbingproduktion haben Marti Tunnel AG und Herrenknecht Formwork einen ersten Schritt gemacht; die Einsatzmöglichkeiten und das Potenzial für deren Weiterentwicklung sind jedoch – wie vorhin aufgelistet – noch immens.

As things currently stand, the introduction of seals also represents a limit to feasibility. Picking up the correct sealing frame and inserting it precisely into the groove provided is another challenge for the technology of the robot. Time will tell whether it will be possible to integrate this step into robot technology in the future.

6 Outlook

In addition to supporting the production line and the automated opening and closing of the formwork using hydraulics, there are several other potential uses of automation in segment production that increase profitability.

One example is automated concreting, in which RFID is integrated into the formwork, with an RFID reader on the production line. The system automatically requests the concrete with the right formwork ID and in the required quantity, and the surface finish is automated too.

In the future, the concrete could be cured predominantly using energy-saving automated systems. To do this, each formwork is fitted with a temperature sensor, and an individual hardening trajectory can be configured for each formwork, which can then be optimised for specific applications.

The field of measurement also offers huge potential for automation.

It is not only the automation of the individual steps, but also the networking of all the processes that has a key role to play in increasing the efficiency of segment production. Modular production and logistics management systems – such as the SDS system from the company VMT – direct, control and document all the key processes involved in the production and storage of segments and record information about their position and installation within the tunnel. As well as recording data purely for documentation purposes, this information can also be used to optimise individual processes and – ultimately – to increase the productivity of the system and the quality of the segments. For this purpose, all components such as the mixing unit, heating, measurement, PLC control of the system, robots, safety technology and data management are networked with each other. This allows important information to be recorded, such as daily performance, reject and quantity control. The data collected also provides a reliable basis for a 3D BIM model.

With their robot-assisted segment production, Marti Tunnel AG and Herrenknecht Formwork have taken an important first step. However, as stated previously, there is still a vast amount of unexplored possibilities and potential for further developments in this field.



Innovationen im Bereich Logistik

Alberto Belloli, Dr. sc., Dipl. Masch.-Ing. ETH
Heinz Jenni, Masch.-Ing. ETA
Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen/CH

Innovationen im Bereich Logistik

Megaprojekte erfordern und begünstigen innovative Logistiklösungen. Insbesondere in den Bereichen Ver- und Entsorgung, Innenausbau, elektromechanische Ausrüstung sowie Unterhalt und Ertüchtigung hat der Tunnelbau in jüngerer Zeit eine hohe Innovationskraft bewiesen.

Innovations in Logistics

Megaprojects require and promote innovative logistics solutions. Particularly in the areas of supplies and waste disposal, inner lining, electromechanical equipment as well as maintenance and strengthening, tunnelling has recently proved to be highly innovative.

1 Einleitung

Moderne, leistungsfähige und innovative Logistiklösungen sind unabdingbare Schlüsselemente für erfolgreiche Streckenvortriebe, Aus- und Einbau im rückwärtigen Bereich sowie Unterhalt und Ertüchtigung im laufenden Betrieb. Im nachfolgenden Aufsatz werden fünf Beispiele aufgegriffen und kommentiert.

2 Ver- und Entsorgung

2.1 Pneu- anstatt Gleisbetrieb

In den letzten 20 Jahren haben sich sogenannte Multi Service Vehicles als valable und effiziente Alternative zur konventionellen gleisgebundenen Stollenbahn etabliert, insbesondere zur Versorgung kurzer Tunnelvortriebe mit grösseren Durchmessern. Neu ist der Einsatz auch für längere Streckenvortriebe.

1 Introduction

Modern, high-performance and innovative logistics solutions are indispensable key elements for successful section excavation, removal and installation in the back area as well as maintenance and strengthening in ongoing operations. The article below looks at and comments on five examples.

2 Supplies and Waste Disposal

2.1 Tyre Operation Instead of Rail

Over the last 20 years, multiservice vehicles have established themselves as a valuable and efficient alternative to the conventional rail-mounted tunnel railway, in particular for supplies to short tunnel excavations with larger diameters. Use even for longer section excavations is new.



Quelle/credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ

1 RowaTrain zur gleislosen Versorgung des Erkundungsstollens am BBT, Baulos Ahrental (links);
Durchfahrt am Fuss des Zufahrtstollens mit $R = 30$ m (rechts)

RowaTrain for rail-free supplies in the exploration tunnel at the BBT, Ahrental construction lot (left);
passage at the foot of the access tunnel with $R = 30$ m (right)

De l'innovation dans la logistique

Les mégaprojets ont besoin de solutions innovantes en matière de logistique. Mieux, ils les favorisent. En particulier dans les domaines de l'approvisionnement et de l'évacuation, dans l'aménagement intérieur, dans l'équipement électromécanique, ainsi que dans l'entretien et la réhabilitation, la construction de tunnel a fait preuve ces derniers temps d'une forte capacité d'innovation. Des solutions logistiques modernes, efficaces et innovantes sont la clé indispensable pour réussir le creusement des galeries, les démantèlements et les installations dans les zones reculées, ainsi que l'entretien et la réfection en conditions d'exploitation. L'article suivant traite de ces aspects à l'aide de cinq exemples commentés.

Innovazioni nel campo della logistica

I megaprogetti richiedono e favoriscono le soluzioni logistiche innovative. La costruzione di gallerie ha dimostrato in tempi recenti una grande forza innovatrice, in particolare nei settori dell'approvvigionamento e dello smaltimento, delle opere murarie di finitura, delle dotazioni elettromeccaniche, della manutenzione e dell'irrobustimento. Le soluzioni logistiche moderne, performanti e innovative sono elementi chiave imprescindibili per scavi di gallerie vincenti, smantellamenti e installazioni in aree arretrate e interventi di manutenzione e irrobustimento senza interruzioni dell'esercizio. Nel contributo seguente verranno affrontati e commentati cinque esempi.

RowaTrain (MSV) wurde entwickelt zur direkten gleislosen Versorgung des Erkundungsstollens am Brenner-Basistunnel, Baulos Ahrental – mit einem Durchmesser von 6,90 m und einer Fahrstrecke bis zu 22 km (4 km Zufahrt und 18 km Streckenvortrieb) ein enger und sehr langer Stollen. Alle zum TBM-Betrieb benötigten Materialien können vom Installationsplatz durch den steilen Zufahrtsstollen auch um enge Radien und über weite Strecken ohne Umlad angedient werden.

RowaTrain orientiert sich im Tunnel und erkennt Hindernisse mittels Laserscanner und Radarsensorik. Alle Achsen sind lenkbar und folgen einer von der ersten Achse definierten «virtuellen Schiene». Der Lenkassistent (elektronische iterative Achssteuerung – kein Deichselprinzip) unterstützt die Spurtreue des bis zu 60 m langen Gespanns. Die Selbstfahrfähigkeiten garantieren Flucht und Rettungsbetrieb auch unter schwerer Rauchentwicklung. Anlässlich eines Showcases fuhr ein RowaTrain autonom und vollbeladen vom Installationsplatz bis in den 15 km entfernten Bahnhof des TBM-Nachläufers. Obschon die juristischen Grundlagen

RowaTrain (MSV) was developed for direct rail-free supplies for the exploration tunnel at the Brenner Base Tunnel, Ahrental construction lot – a narrow and very long tunnel with a diameter of 6.90 m and a route of up to 22 km (4 km access route and 18 km section excavation). All materials required for the TBM operation can be delivered from the installation location through the steep access tunnel, around tight bends and over long routes without reloading.

RowaTrain orients itself in the tunnel and detects obstacles using a laser scanner and radar sensors. All axles are steerable and follow a "virtual rail" defined by the first axle. The steering assistant (electronic iterative axle control – not a towing bar principle) supports the directional stability of the combination, which can be up to 60 m long. The self-drive capabilities guarantee emergency and rescue operation even when there is heavy smoke development. During a showcase, a RowaTrain drove autonomously and fully loaded from the installation location to the station of the TBM back-up 15 km away. Although the legal foundations are not yet



Quelle/credit: Rowa Tunneling Logistics AG, Wangen SZ

2 Einfahrt am Portal des Zufahrtsstollens beim Installationsplatz (links); Kreuzen im Erkundungsstollen – Versorgungszug und Rettungszug (rechts)
Entry at the portal of the access tunnel at the installation location (left); crossing in the exploration tunnel – supply train and rescue train (right)

noch nicht vorhanden sind, konnte damit die Fähigkeit von RowaTrain zur fahrerlosen Versorgung unter Tage gezeigt werden.

Tagesbestleistungen über 60 m und Monatsleistungen im Bereich von 800 m untermauern die eindruckliche Leistungsbilanz des modularen bereiften teilautonomen Versorgungszugs. Um dies zu ermöglichen, wird der 12 % steile Zufahrtstunnel mit reduzierter Geschwindigkeit und das 18 km lange Flachstück mit bis zu 25 km/h befahren. Zusätzliche Zeitersparnis und eine Reduktion des Personalaufwandes ergeben sich durch den Wegfall jegliches Materialumschlags unter Tage. Einbau und Ausbau der Gleisanlage entfallen, damit kostspielige und zeitraubende Tätigkeiten, welche ausserdem eine notorische Unfallursache darstellen.

Die gleislose Versorgung des Vortriebs leistet somit einen Beitrag zur Verbesserung der Arbeitssicherheit, erhöht die Produktivität und Flexibilität und reduziert die Investitions- und Betriebskosten sowie die Bauzeit. Weitere modulare gleislose Versorgungslösungen mit Lenkassistentz werden von anderen Marktteilnehmern für den Bau des Tunnels Euralpin Lyon-Turin vorgesehen und gegebenenfalls realisiert.

2.2 Kontinuierliche Entsorgung von klebrigem Ausbruch

Wird eine hohe Schutterleistung benötigt, stellt eine kontinuierliche Entsorgungslogistik die robustere und wirtschaftlichere Alternative dar. Umlad und Übergänge zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Förderung sind möglichst zu vermeiden. Insbesondere die Schutterung über Vertikalschächte mittels herkömmlicher Lösungen wie Becherwerke, Wellenkantenförderer oder Skip-Anlagen kann bei tonartigen Böden, welche zu klebrigem Verhalten und Brückenbildung neigen, eine grosse Herausforderung darstellen.

In jüngster Zeit haben sich Vertikalförderer mit sogenannten Sandwich-Gurten bewährt, so zum Beispiel bei diversen Bauweisen des Mega-U-Bahn-Projektes Grand Paris Express.

Das Streckenband im Tunnel übergibt das Ausbruchmaterial auf den unteren Gurt in einem kurzen, flachen Bandabschnitt. Weiter in Förderrichtung wird der obere Gurt auf das Ausbruchmaterial mittels eng aneinander gereihter Anpressrollen gepresst. Die Anpresskräfte erhöhen die innere Reibung im Material sowie die Reibung zwischen Gurten und Ausbruch, sodass die Erdanziehungskraft kompensiert werden kann.

Die Fördergurte drehen sukzessive in die Vertikale und fördern den Ausbruch schonend durch den Vertikalschacht. Am Schachtkopf fahren die Fördergurte zurück in die Horizontale und werfen den Ausbruch zur weiteren Abförderung ab.

Durch Anpassung der Anpresskraft eignet sich das Förder-system für Ausbruch mit unterschiedlichem Materialverhal-

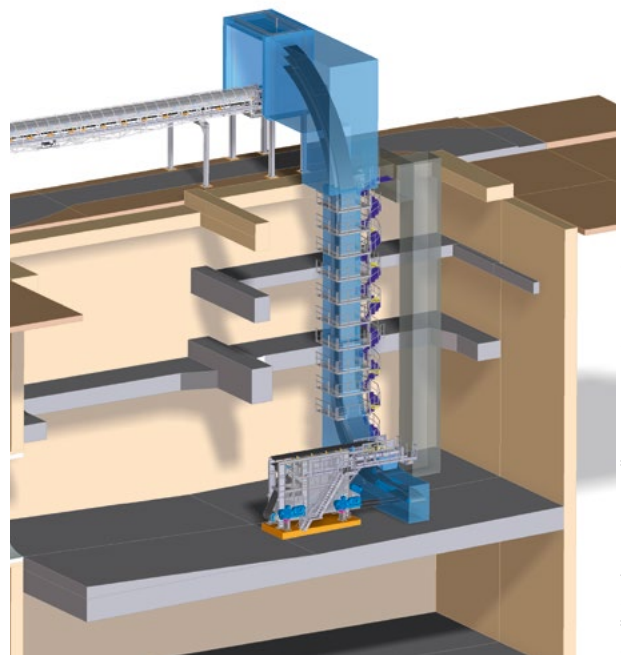
available, this shows the ability of RowaTrain to carry out driverless supply below ground.

Daily best performances of over 60 m and monthly performances in the region of 800 m underpin the impressive track record of the modular, wheeled semi-autonomous supply train. In order to make this possible, the 12 % gradient access tunnel is travelled through at a reduced speed and the 18 km long flat section is travelled on at up to 25 km/h. Additional time savings and a reduction in staff costs are produced due to the lack of any material handling below ground. There is no need to install and remove the track system, which is costly and time-consuming work that is also a notorious cause of accidents.

Rail-free supplies to the excavation therefore help to improve work safety, increase productivity and flexibility and reduce the investment and operating costs as well as the construction time. Other modular rail-free supply solutions with steering assistance are also provided and in some cases are being implemented by other market participants for the construction of the Euralpin Lyon-Turin tunnel.

2.2 Continuous Disposal of Sticky Muck

If a high level of excavation performance is required, then continuous waste disposal logistics is the more sustainable and economical option. Reloading and transitions between continuous and intermittent transport must be avoided if possible. In particular, the excavation via vertical shafts using conventional solutions such as bucket conveyor systems, waving fender conveyors or skip systems can be a big



3 Schematische Darstellung eines Vertikalförderers mit Sandwich-Gurt-Technologie

Schematic representation of a vertical conveyor with sandwich belt technology

Quelle/credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ

ten. Die Fördergurte können effektiv mittels herkömmlicher Abstreifer und Gurtwaschanlagen entladen bzw. gereinigt werden. Dies ist bei tonartigem, klebrigem Material von entscheidendem Vorteil.

3 Innenausbau

Bei langen Tunnels können zur Verkürzung der Gesamtbauzeit die Ausbauarbeiten parallel zu den Vortriebsarbeiten ausgeführt werden. Diese zeitliche Parallelität stellt besondere Herausforderungen an die Logistik und erfordert massgeschneiderte Lösungen. Bei den Baustellen für das Innengewölbe muss die gesamte Ver- und Entsorgung für die Vortriebsbaustelle durch den Arbeitsbereich hindurchgeführt werden.

Insbesondere muss die Installation zweispurig durchfahren werden, wobei eine Spur für die TBM-Ver-/Entsorgung freizuhalten ist und die zweite für die Andienung von Beton und Material für die Innengewölbebaustelle dauernd belegt wird. Weiter müssen die Versorgungsleitungen für den TBM-Vortrieb und die notwendigen Querschlagbaustellen durch den Arbeitsbereich hindurchgeführt werden.

Für das Jahrhundertprojekt Gotthard-Basistunnel wurden obige Herausforderungen mit zwei sogenannten Würmern äusserst erfolgreich gemeistert [1]. Konzepte in Anlehnung an diese Innovation werden zurzeit von den Biertergemeinschaften am Tunnel Euralpin Lyon-Turin angeboten. Dank dem grösseren Querschnitt (Durchmesser ca. 10,40 m) und entsprechend zur Verfügung stehendem Lichtraumprofil scheint die zusätzliche Durchführung eines Streckenbandes und somit eine Förderbandlösung zur kontinuierlichen Entsorgung realisierbar. Zusammen mit dem technischen Fortschritt bei der gleislosen bereiften Versorgung (siehe Abschnitt 2.1) stehen dann modernste Mittel zur Verfügung, um die gleichzeitig betriebenen Hochleistungsbaustellen (TBM-Vortrieb und Innengewölbebaustelle) zu ver- und entsorgen.

challenge in the case of clayey soils, which can be sticky and have a tendency to form bridges.

Recently, vertical conveyors with what are known as sandwich belts have proved effective, for example in various construction lots of the mega subway project Grand Paris Express.

The tunnel belt transfers the excavated material to the lower belt in a short, flat belt section. Further on in the conveying direction, the upper belt is pressed onto the excavated material using pressure rollers arranged closely together. The contact forces increase the internal friction in the material and the friction between the belts and the muck, which can compensate for gravity.

The conveyor belts turn successively in a vertical direction and gently convey the muck through the vertical shaft. At the shaft head, the conveyor belts go back to moving in a horizontal direction and discard the muck for onward conveying.

Adjusting the contact force can make the conveyor system suitable for muck with different material properties. The conveyor belts can be effectively unloaded/cleaned using conventional scrapers and belt washing systems. This is a crucial advantage for clayey, sticky material.

3 Inner Lining

In long tunnels, the lining work can be carried out in parallel to the excavation work in order to reduce the total construction time. This concurrency in terms of time poses particular challenges for logistics and requires tailor-made solutions. In the case of construction sites for the inner vault lining, all supplies and waste disposal for the excavation site must be run through the work area.

In particular, the installation must be carried out with two tracks, whereby one track must be kept free for the TBM supply/waste disposal and the second is constantly used for the



Quelle/Credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wänggen SZ

4 Wurm am Installationsplatz Bodio des Gotthard-Basistunnels (links); Arbeitsbereich Gewölbeabdichtung (rechts)
Worm at the Bodio installation location of the Gotthard Base Tunnel (left); vault-seal work area (right)

4 Elektromechanische Ausrüstung

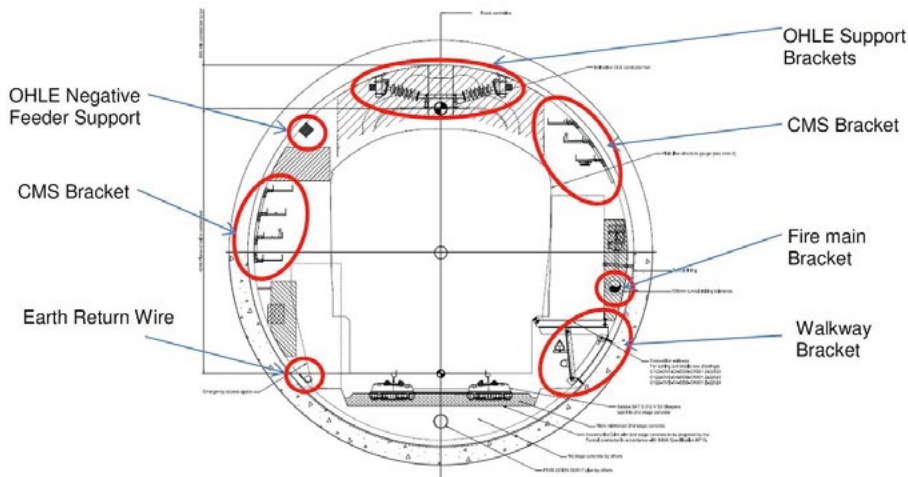
Alle Strassen- und Eisenbahntunnel werden nach dem Rohbau mit jeder Menge elektromechanischer Systeme ausgerüstet, welche an der Innenschale befestigt werden müssen. Ein hoher Mechanisierungsgrad dieses Arbeitsschrittes macht sowohl aus Sicht der Arbeitssicherheit und der Qualitätssicherung als auch der Produktivität sowie der Bauzeitreduktion Sinn.

Die neue U-Bahn-Linie Crossrail London (Ost-West-Verbindung) liefert dazu ein gutes Beispiel. Für die zwei je 21 km langen Tunnelröhren im Tübbingausbau waren über 250 000 Bohrlöcher für die Montage von Laufstegen, Oberfahrleitungen (OHLE), Kabelkanälen (CMS-Brackets), Erdungs- und Feuerlöschleitungen zu bohren.

Verschiedene durch U-Bahn-Stationen unterbrochene Bau-lose mussten in unterschiedlicher Reihenfolge abgebohrt

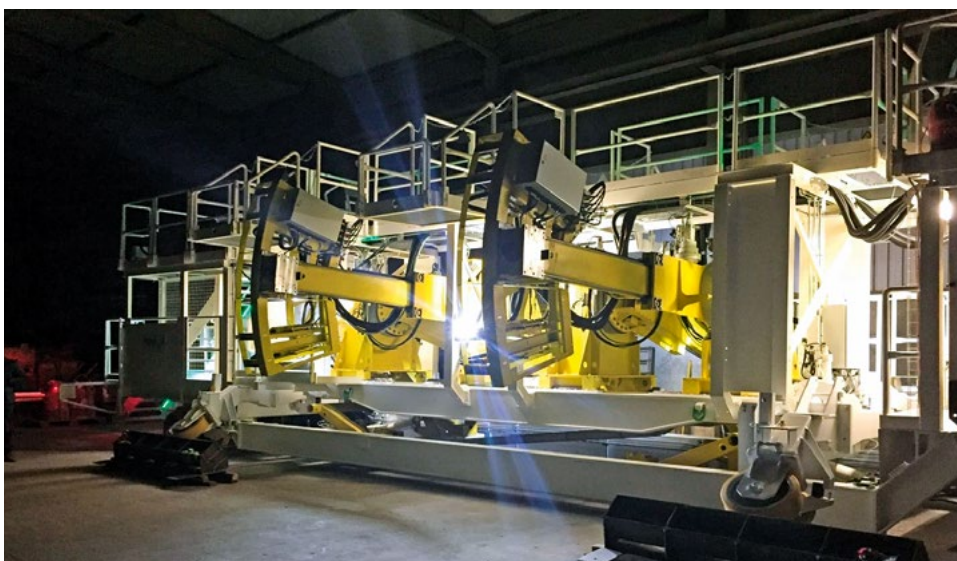
delivery of concrete and material for the inner vault lining construction site. In addition, the supply lines for the TBM excavation and the necessary cross-passage construction sites must be run through the work area.

For the Gotthard Base Tunnel centennial project, the challenges above were successfully overcome using two “worms” [1]. Concepts based on this innovation are currently offered by the bidding consortia at the Euralpin Lyon-Turin tunnel. Thanks to the larger cross section (diameter approx. 10.40 m) and the clearance profile that is consequently available, the additional running of a section belt and therefore a conveyor belt solution for continuous disposal seems to be feasible. Together with the technical progress in rail-free, wheeled supply (see section 2.1), state-of-the-art resources will then be available in order to carry out supplies and waste disposal at simultaneously operated high-performance construction sites (TBM excavation and inner vault lining construction site).



4 Electromechanical Equipment

All road and rail tunnels are equipped with a whole host of electromechanical systems following the tunnel construction, and these need to be secured to the inner lining. A high level of mechanisation in this work step makes sense both from the perspective of work safety and quality assurance, as well as productivity and construction time reduction.



Quelle/credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ

5 Crossrail C610: Querschnitt mit den zu befestigenden elektromechanischen Systemen (oben); semiautomatischer Bohrwagen mit 4 Bohrmodulen und 24 Bohrmaschinen (unten)
Crossrail C610: Cross section with the electromechanical systems to be secured (top); semi-automatic drilling jumbos with 4 drilling modules and 24 drilling machines (bottom)

The new underground line Crossrail London (east-west connection) provides a good example of this. For the two tunnel tubes, which are each 21 km long, in the segment extension, over 250,000 boreholes needed to be drilled for the installation of walkways, overhead lines (OHLE), cable channels (CMS brackets), and earthing and fire extinguisher lines.

Various construction lots interrupted by underground stations needed to be drilled in different orders. For this purpose, drilling modules with a total of 37 drilling



Quelle/credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ

6 Crossrail C610: Umsetzen des selbstfahrenden Bohrwagens (links); Bohrstaub wird direkt an jedem Bohrloch abgesaugt (rechts)
 Crossrail C610: Relocation of the self-driven drilling jumbo (left); drilling dust is suctioned off directly at each borehole (right)

werden. Bohrmodule mit insgesamt 37 Bohrmaschinen wurden dazu auf zwei Bohrwagen (12 m lang und 40 t schwer) mit mehrteiligen Wagenchassis montiert, welche für einen kontinuierlichen Betrieb ausgelegt sind. Damit liessen sich mit einer Doppelbesetzung je Bohrwagen im Schnitt 1200 Bohrlöcher oder 250 m Tunnel pro Arbeitsschicht bohren. Dies stellt eine Produktivitätssteigerung von 600 % gegenüber dem manuellen Bohren dar. Darüber hinaus kann auch eine höhere und konstantere Ausführungsqualität erzielt werden. Nach dem automatischen Abbohren der erforderlichen Befestigungslöcher gemäss BIM-Bohrbild und deren Datenerfassung (Logfile) sorgt das eingebaute Messsystem für die genaue Positionierung des Bohrwagens beim Umsetzen. Je nach Ausbaustand des Tunnels erfolgte dies über die Schienen- bzw. Pneufahrwerke.

Arbeitshygiene und -ergonomie werden entscheidend verbessert, indem das Personal nicht mehr Staub und Vibrationen ausgesetzt ist und keine Überkopparbeiten ausführen muss. Dank grosszügigen Arbeitsflächen ist sicheres Arbeiten in der Höhe jederzeit gewährleistet. Der anfallende Bohrstaub wird direkt an jedem Bohrloch über eine Staubabsaugung vollständig abgesaugt. Das verringert auch die Staubbelastung des Tunnels unter Betriebsbedingungen und die daraus resultierenden Reinigungskosten.

Die höhere Produktivität und die kürzere Bauzeit machen die anfängliche Investition mehr als wett und führen zu geringeren Gesamtbaukosten.

5 Unterhalt und Ertüchtigung

Infrastrukturbauten bedürfen des regelmässigen Unterhalts und müssen über den Lebenszyklus geplant oder ungeplant ertüchtigt werden, sei es wegen Alterung der Bausubstanz, obsolet gewordener Technologie oder unerwünschter Ereignisse.



Quelle/credit: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen SZ

7 Crossrail C610: befestigte Halterungen für die elektromechanischen Systeme
 Crossrail C610: Secured brackets for the electromechanical systems

machines were installed on two drilling jumbos (measuring 12 m in length and weighing 40 t) with multipart car chassis, which are designed for continuous operation. Therefore, with a double row on each drilling jumbo, it was possible to drill an average of 1,200 boreholes or 250 m of tunnel per shift. This represents a productivity increase of 600 % in comparison with manual drilling. In addition, a higher and more constant execution quality can be achieved. After the automatic drilling of the required mounting holes according to the BIM drilling pattern and the recording of the data (log file), the installed measuring system ensures precise positioning of the drilling jumbo when it is relocated. Depending on the excavation status of the tunnel, this was carried out using rail or tyre vehicles.

Work hygiene and ergonomics are decisively improved, as workers are no longer exposed to dust and vibrations and do not have to carry out overhead work. Thanks to generous working areas, safe work at any height is guaranteed at all times. The drilling dust that is produced is all suctioned off directly at each borehole using a dust collection system. This reduces the dust in the tunnel in operating conditions and the resulting cleaning costs.



Quelle/credit: Rowa Tunneling Logistics AG, Wangen SZ

8 Baustelle zur Sanierung der durch den Brandfall vom 24. März 1999 geschädigten Fahrbahn am Mont-Blanc-Strassentunnel
Construction site for the renovation of the carriageway of the Mont Blanc road tunnel damaged by the fire on 24 March 1999

In diesem Kontext wird hier die innovative Sanierung der Fahrbahn am Mont-Blanc-Strassentunnel vorgestellt. Während 34 Nächten wurden im Abschnitt, welcher vom verheerenden Brandfall am 24. März 1999 betroffen worden war, 555 m Fahrbahn ersetzt.

Am Vortag gesägte, 8,60 m mal 2,50 m grosse, 16 t schwere Fahrbahnteile wurden von 21.00 bis 5.00 Uhr mit fahrbaren Portalkränen auf Anhänger gehoben und abtransportiert. Zeitgleich wurden neue vorgefertigte Fahrbahnelemente angedient, mithilfe des Portalkrans versetzt, verbolzt und untermörtelt. Nach der Freigabe durch den Betreiber konnten ab 6.00 Uhr auch die 40 t schweren Lastwagen den Tunnel wieder passieren.

Die beiden 20 m langen und 3,50 m breiten Portalkräne hatten eine Tragkraft von je 20 t. Mit Aufhängung und Bremsen ausgestattet, wurden sie als Anhänger jeden Abend in nur 15 Minuten von Terminal-Zugmaschinen mit bis zu 30 km/h zur Baustelle gefahren.

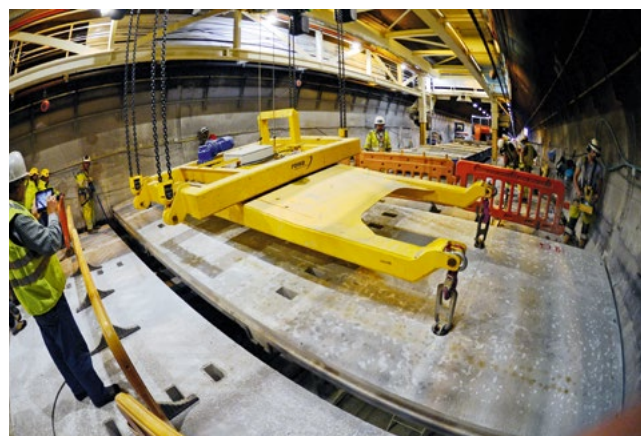
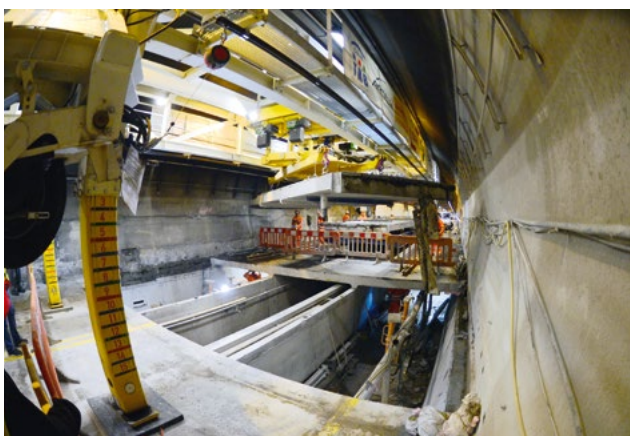
The higher productivity and shorter construction time more than make up for the initial investment and result in lower total construction costs.

5 Maintenance and Strengthening

Infrastructure projects require regular maintenance and need planned or unplanned strengthening throughout their life cycle, whether this is due to ageing of the structure, obsolete technology or adverse events.

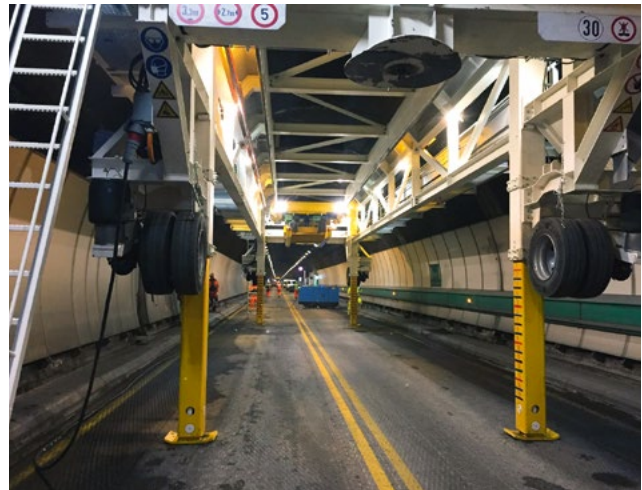
In this context, the innovative renovation of the carriageway in the Mont Blanc road tunnel is being presented. Over 34 nights, 555 m of carriageway was replaced in the section affected by the devastating fire on 24 March 1999.

Sections of carriageway measuring 8.60 m by 2.50 m and weighing 16 t that had been cut the previous day were lifted and removed using mobile gantry cranes on trailers between 9 p.m. and 5 a.m. At the same time, new prefabricated car-



Quelle/credit: Rowa Tunneling Logistics AG, Wangen SZ

9 Heben der durch den Brandfall geschädigten Fahrbahnteile (links); Versetzen der neuen vorgefertigten Fahrbahnelemente (rechts)
Lifting of the carriageway sections damaged by the fire (left); shifting of new prefabricated carriageway elements (right)



Quelle/credit: Rowa Tunneling Logistics AG, Wangen SZ

10 *Einfahrt des Portalkrans als Anhänger hinter einer Terminal-Zugmaschine (links); einsatzbereiter Portalkran mit ausgefahrenen Abstützungen (rechts)*

Entry of the gantry crane as a trailer behind a terminal tractor unit (left); gantry crane ready for use with extended supports (right)

Dort wurden die Abstützungen hydraulisch ausgefahren und der Portalkran auf die Arbeitshöhe von 5 m justiert. Der Kran wurde mittels Zahnrad längs und quer verfahren. Dank den vier funkgesteuerten Kettenzügen und dem motorisierten Drehgehänge konnten die Fahrbahnelemente präzise und sicher umgesetzt werden.

Die mobilen Portalkräne haben sich als Schlüsselement erwiesen für den Austausch von 222 Fahrbahnelementen – unter Einhaltung der Kosten, vor dem geplanten Termin und unfallfrei. Die Gesamtanierung konnte damit in kürzester Zeit (acht Wochen) realisiert werden.

6 Schlusswort

Die fünf oben genannten Beispiele zeigen, wie durch innovative Lösungen im Bereich Logistik namhafte Einsparungen an Zeit und Geld erzielt werden können, und zwar unter verbesserten Arbeitsbedingungen und erhöhter Sicherheit für alle Beteiligten.

Literatur/References

- [1] Gruber, L. R., Böckli, O., Spörri, D.: Gleichzeitigkeit von Ausbruch und Innenausbau. Swiss Tunnel Congress 2011 – Fachtagung für Untertagbau, ISBN 978-3-7625-3645-1, Luzern, 8.–9. Juni 2011, 38–48

riageway elements were delivered, shifted using the gantry crane, bolted and cemented in place. Following approval by the operator, from 6 a.m. even 40 t trucks were able to travel through the tunnel again.

The two 20 m long and 3.50 m wide gantry cranes each had a load bearing capacity of 20 t. Equipped with suspension and brakes, they were driven as a trailer by terminal tractor units to the construction site every evening in just 15 minutes at up to 30 km/h.

There, the supports were hydraulically extended and the gantry crane was adjusted to the working height of 5 m. The crane was moved vertically and laterally using a gear-wheel. Thanks to four radio-controlled chain hoists and the motorised rotation units, the carriageway elements could be moved precisely and safely.

The mobile gantry cranes proved to be a key element for the replacement of 222 carriageway elements whilst staying within budget, remaining ahead of schedule and avoiding any accidents. The entire renovation could therefore be carried out very quickly (eight weeks).

6 Closing Remark

The five examples mentioned above show how innovative logistics solutions can be used to achieve considerable savings of both time and money, and improved working conditions and with greater safety for everyone involved.



Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb Innovationen beim Bau der U5 in Berlin

Joachim Meier, Dipl.-Ing., Implenia Spezialtiefbau GmbH, Mannheim/DE
Christian Leible, Leiter Messtechnik, Implenia Spezialtiefbau GmbH, Mannheim/DE

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb

Innovationen beim Bau der U5 in Berlin

Die Haltestelle Museumsinsel in Berlin wurde als Gefriervortrieb mit geringer Überdeckung unter dem Spreekanal hergestellt. Hierfür wurden neuartige, dreifach geschützte Gefrierrohre über 105 m Länge mit einem innovativen, gesteuerten Bohrverfahren unter extremen geotechnischen Randbedingungen eingebracht. Über 2000 Sensoren, verknüpft in einem redundanten Sensornetzwerk, sicherten die Überwachung.

Drilling Technique and Measurement Technology for Excavation in Frozen Ground

Innovations in Construction of the U5 in Berlin

The Museumsinsel station in Berlin has been constructed and excavated in frozen ground with shallow cover under the Spree Canal. New types of triple-protected freeze pipes were installed along the 105 m length using an innovative controlled drilling process under extreme geotechnical boundary conditions. Monitoring was ensured with over 2,000 sensors, linked in a redundant sensor network.

1 Projektüberblick

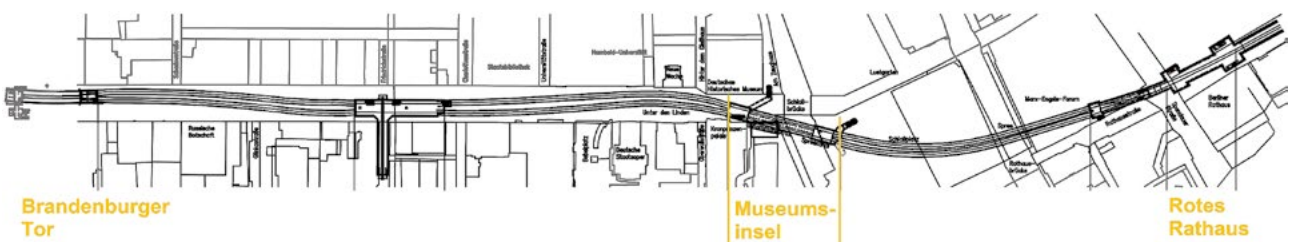
Im Zentrum von Berlin, zwischen Alexanderplatz/Rotes Rathaus und Brandenburger Tor, erstellt die Implenia AG für den Bauherrn «Projektrealisierungsgesellschaft U5 mbH», eine Tochter der Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG), auf 2,2 km Länge zwei U-Bahn-Tunnel, zwei Bahnhöfe und eine Gleiswechselanlage als Lückenschluss der Linie U5 (Bild 1).

Der dabei bautechnisch anspruchsvollste Abschnitt ist der Bahnhof umsinsel. Er ist 180 m lang und verläuft grösstenteils unterhalb des Spreekanal, der denkmalgeschützten Schlossbrücke und der Alten Kommandantur, des heutigen Bertelsmann-Hauses. Für den Bau wurde der Boden um die beiden vorab mittels TVM hergestellten Tunnelröhren herum mit circa 105 m langen horizontalen Vereisungsbohrungen temporär gefroren. Im Schutze dieser Vereisung wurde die Bahnsteighalle bergmännisch unter dem Spreekanal aufgeföhren (Bild 2).

1 Project Overview

In the centre of Berlin, between Alexanderplatz/Rotes Rathaus and the Brandenburg Gate, Implenia AG is constructing two metro line tunnels, two stations and one track-switching system to close the gap in the U5 line (Fig. 1) over a length of 2.2 km for "Projektrealisierungsgesellschaft U5 mbH", a subsidiary of Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG).

The most demanding section in terms of construction is the Museumsinsel station. It is 180 m long and mainly runs underneath the Spree Canal, the listed Schlossbrücke bridge and the Alte Kommandantur, used these days as the headquarters for Bertelsmann. For the construction, the ground around the two tunnel tubes, which were previously constructed by TBM, was temporarily frozen by means of horizontal freezing boreholes around 105 m long. With this freezing protection in place, the platform hall was excavated under the Spree Canal (Fig. 2).



1 Projektübersicht
Project overview

Quelle/credit:
Ausschreibungspläne PRG U5

Techniques de mesurage et de percement pour l'avancement en sol congelé

Innovations sur le chantier de la ligne de métro U5 à Berlin

Dans le cadre de la construction de la ligne U5 du métro de Berlin, l'avancement pour la réalisation de la station Museumsinsel a été effectué par congélation des sols sous le canal de la Spree, aux abords directs du château de Berlin et du forum Humboldt. Pour cela, 105 m de forages horizontaux rigoureusement à la même hauteur ont été mis en œuvre à l'aide d'un processus de forage et de guidage développé spécialement pour l'occasion d'après des contraintes géotechniques extrêmes. Les lances de congélation triplement protégées de nouvelle génération totalisaient une longueur de plus de 10 km. Quelque 2000 capteurs reliés entre eux dans un réseau unique alors et selon une représentation tridimensionnelle innovante ont permis de procéder au guidage des opérations de congélation en toute sécurité.

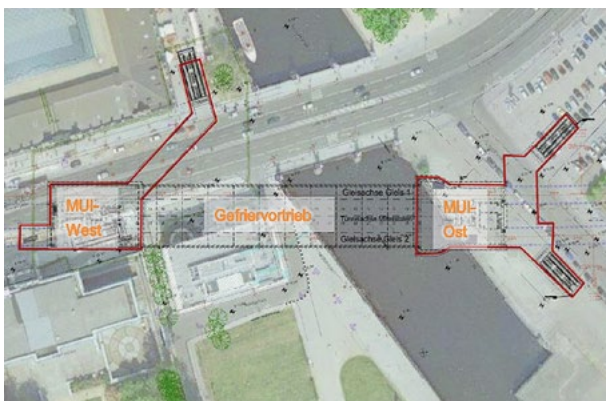
Tecnica di perforazione e misurazione per l'avanzamento tramite congelamento

Innovazioni nella costruzione dell'U5 a Berlino

Durante la costruzione della linea U5 della metropolitana, la stazione dell'Isola dei musei è stata realizzata sotto il canale della Spree direttamente accanto al castello di Berlino/forum Humboldt con il procedimento dell'avanzamento tramite congelamento. A tale fine, le perforazioni orizzontali precisissime lunghe 105 m sono state realizzate con un procedimento di perforazione e comando sviluppato in proprio in condizioni quadro geotecniche estreme. Le lance di congelamento di nuovo tipo a tripla protezione avevano una lunghezza totale superiore a 10 km. Oltre 2000 sensori, collegati in una rete di sensori unica al tempo e rappresentati tridimensionalmente in modo innovativo, hanno permesso di controllare in modo sicuro il congelamento.

2 Bauablauf Bahnhof Museumsinsel

Für den Bau des Bahnhofs Museumsinsel (MUI) wurden zwei Teilbaugruben – MUI West und MUI Ost – jeweils an den beiden Enden des Bahnhofs mit Schlitzwand und Dichtsohle erstellt. Die Vereisungs- und Messbohrungen wurden von der Startbaugrube MUI Ost bis zur östlichen Stirnwand der Baugrube MUI West vorgetrieben. Vom Schacht MUI West aus wurden kurze, ungesteuerte Gegenbohrungen für eine sichere Überlappung und dichte Anbindung des Frostkörpers an die Baugrubenwand erstellt. Die Baugrube Ost ragt teilweise in den Spreekanal. Hier war eine Rückverankerung der seitlichen Baugrubenwände ebenso unmöglich wie der Stirnseiten, da an diesen Wänden die vorab hergestellten TVM-Vortriebe die Schlitzwand der Haltestellenbaugrube durchdringen. Daher erfolgte ein abschnittsweiser Aushub mit mehreren Aussteifungsebenen.



Quelle/credit: Ausschreibungspläne PRG U5

2 Grundriss Bahnhof Museumsinsel
Museumsinsel station layout

2 Museumsinsel Station Construction Process

Two partial excavation pits – MUI West and MUI East – were constructed at either end of the station with diaphragm wall and grouted plug for the construction of the Museumsinsel station (MUI). The freezing and measurement boreholes were driven from the start excavation pit MUI East to the eastern front wall of the excavation pit MUI West. From the MUI West shaft, short uncontrolled counterbores were drilled to ensure a secure overlap and close bonding of the frozen mass to the excavation pit wall. The East excavation pit runs partially into the Spree Canal. It was impossible to anchor the side walls and front walls of the excavation pit here, as the pre-constructed TBM tunnels penetrate the diaphragm wall of the station excavation station pit. For this reason, excavation was carried out in sections with multiple bracing levels.

3 Planning and Construction Conditions

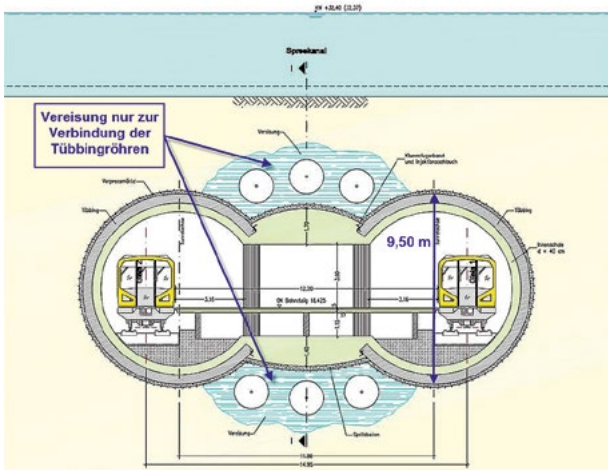
In the tender phase, the planning consortium IGN U5 (SSF/Amberg/ISP) suggested reducing the diameter of the tunnels from 9.5 m to 6.7 m. In the precedent approval design, the TBM tunnel was over-dimensioned at full project length to allow the platform hall to be installed in the tubes (Fig. 3).

In the new final draft, which was finally carried out by us, the segment-lined tunnels were demolished under the protection of a larger, self-contained frozen mass (Fig. 4).

3.1 Freezing Hole Geometry

The new design naturally increased the demands on the freezing holes in terms of precision and the ability to remove obstacles.

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb Innovationen beim Bau der U5 in Berlin



Quelle/credit: Ausschreibungspläne PRG U5

3 Genehmigungsentwurf Approval draft

3 Planungs- und Ausführungsbedingungen

In der Ausschreibungsphase brachte die Planungsarbeitsgemeinschaft IGN U5 (SSF/Amberg/ISP) die Idee ein, den Durchmesser der Streckenröhren von 9,5 m auf 6,7 m zu verkleinern. Im Genehmigungsentwurf waren die TVM-Tunnel auf voller Projektlänge überdimensioniert, um einen Einbau der Bahnsteighalle in die Röhren zu ermöglichen (Bild 3).

Im neuen, schliesslich von uns ausgeführten Entwurf wurden die Tübbingröhren im Schutze eines grösseren, geschlossenen Frostkörpers abgebrochen (Bild 4).

The tender documents now included 95 freezing and temperature measurement holes in parallel rings 105 m long around the two tunnel tubes already excavated. The drill points were distributed along the excavation pit wall at a height of approx. 10 m and a width of approx. 24 m. The two drilling rigs in use had to be able to reach all of the planned drill points in this area and at the same time be able to safely discharge the high reaction drilling forces into the drill rig support frame – up to 1,200 kN.

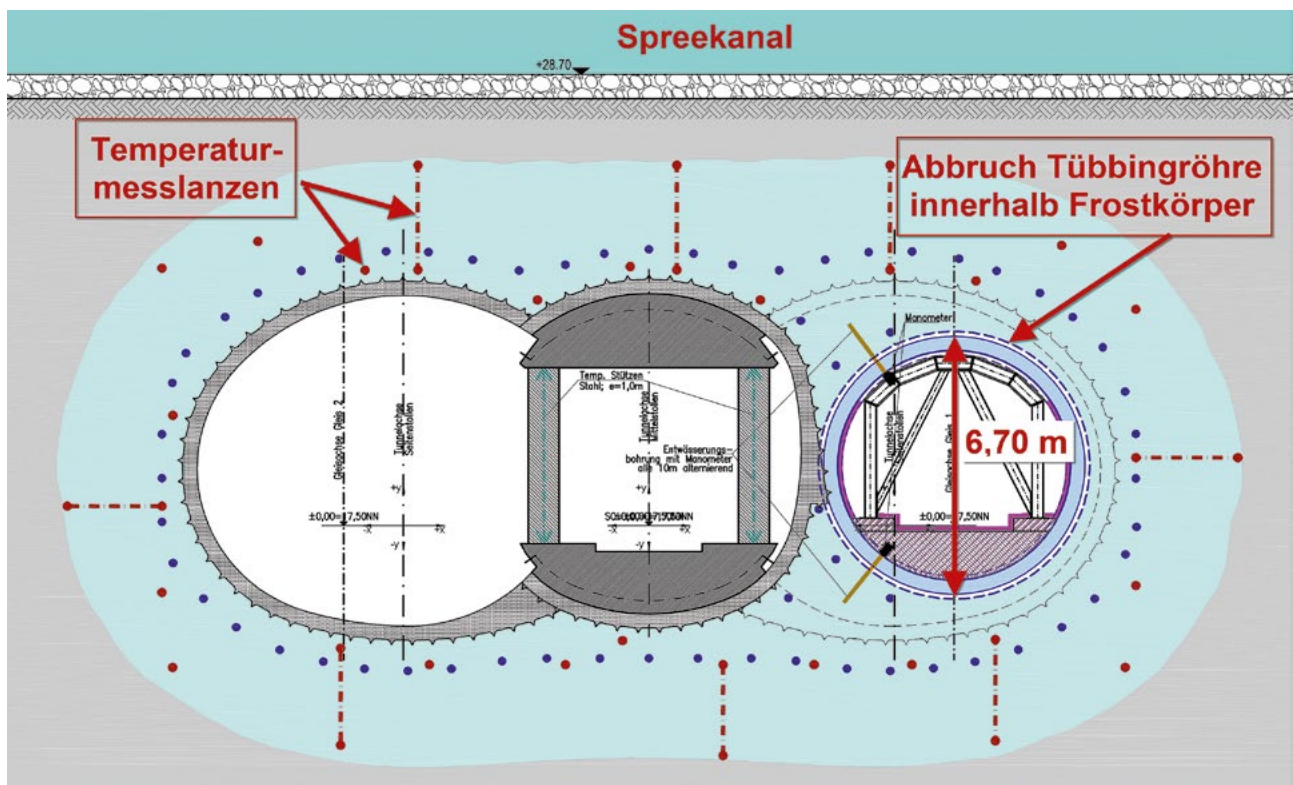
Some of the measurement holes, shown in red in Fig. 4, were to be moved to the side or inclined by around 1.5 degrees.

3.2 Geology, Groundwater

The subsoil in the Berlin glacial valley is shaped by the Ice Age. The following ground types were expected in the area of the horizontal holes (Fig. 5):

- Anthropogenic backfilling;
- Highly homogeneous sands, loosely to densely bedded and not impaired by the Ice Age (so-called Berlin quicksand), (Fig. 6);
- Local peat and gyttja deposits;
- Stone layers, blocks;
- Quartzite bedloads (coarse gravel, stones, boulders, blocks);
- Till, present here as dark clay with a stiff to semi-solid consistency with limestone concretions (Fig. 7).

The groundwater level was at up to approx. 18 m above the holes.



Quelle/credit: Ausführungspläne IG NU5

4 Ausgeführter Entwurf Constructed draft

3.1 Geometrie der Gefrierbohrungen

Durch den neuen Entwurf wuchsen natürlich die Anforderungen an die Vereisungsbohrungen hinsichtlich Genauigkeit und Hindernisbeseitigungsfähigkeit.

In den Ausschreibungsunterlagen waren nunmehr 95 Stück Vereisungs- und Temperaturmessbohrungen dargestellt, ringförmig parallel auf jeweils über 105 m Länge um die beiden bereits aufgefahrenen Tunnelröhren angeordnet. Die Bohrpunkte waren an der Baugrubenwand über ca. 10 m Höhe und 24 m Breite verteilt. Die zwei eingesetzten Bohranlagen mussten in diesem Bereich die einzelnen Bohrpunkte anfahren und die hohen Reaktionskräfte der Vortriebskraft – bis zu 1200 kN – sicher ableiten können.

Die Messbohrungen, in Bild 4 rot angelegt, waren teilweise um etwa 1,5 Grad seitlich verschwenkt oder geneigt auszuführen.

3.2 Geologie, Grundwasser

Der Baugrund im Berliner Urstromtal ist eiszeitlich geprägt. Im Bereich der Horizontalbohrungen waren folgende Bodenarten zu erwarten (Bild 5):

- anthropogene Auffüllungen;
- sehr gleichförmige Sande, locker bis dicht gelagert und nicht eiszeitlich vorbelastet (sogenannter Berliner Fließsand) (Bild 6);
- lokale Torf- und Muddeneinlagerungen;
- Steinlagen, Blöcke;
- quarzitisches Grobgeschiebe (Grobkies, Steine, Findlinge, Blöcke);
- Geschiebemergel, hier als dunkler Ton steifer bis halbfester Konsistenz mit Kalkkonkretionen vorliegend (Bild 7).

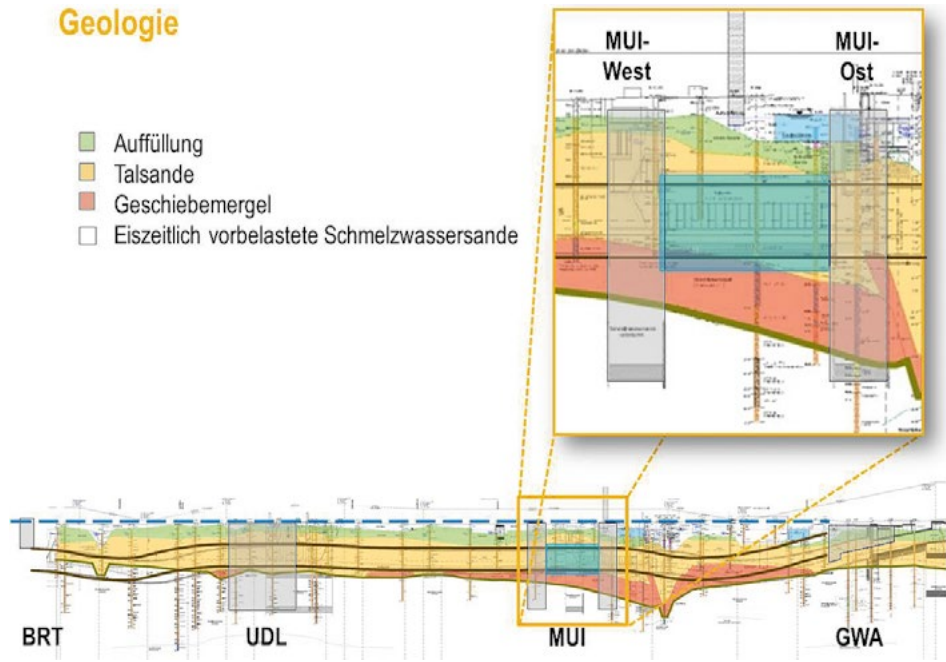
Der Grundwasserspiegel stand bis ca. 18 m Höhe über den Bohrungen an.

3.3 Nachbarbebauung

3.3.1 Alte Kommandantur, Bertelsmann-Repräsentanz
Das nach 1990 in moderner Bauweise, jedoch mit historisch nachgebildeter Fassade wiederaufgebaute Schinkel-Bauwerk ragt mit einem Tiefgeschoss über die Vortriebsstrecke. Neben dem Gefriervortrieb hat das Gebäude drei Untergeschosse, die seinerzeit in einer Schlitzwandbaugrube mit tiefliegenden DSV-Sohle hergestellt worden sind (Bild 8).

Geologie

- Auffüllung
- Talsande
- Geschiebemergel
- Eiszeitlich vorbelastete Schmelzwassersande



5 Geologisches Längsprofil
Geological longitudinal profile

Quelle/credit: Ausschreibungspläne PRG U5

3.3 Adjacent Buildings

3.3.1 Alte Kommandantur, Bertelsmann Headquarters
The basement of the Schinkel-designed building, rebuilt after 1990 in a modern style but with a historically reconstructed façade, protrudes over the excavation route. The building has three basement levels alongside the freezing excavation, constructed at the time in a diaphragm wall excavation pit with deep-set jet-grouted inverts (Fig. 8).

3.3.2 Spree Canal

The freezing boreholes could only run below the Spree Canal directly behind the abutment wall with a low cover of max. 4 m. The drilling parameters therefore had to be modified in this area in order to avoid drilling fluid leaking into the Spree Canal.

3.3.3 Timber Pile Foundations in the River Wall

Several rows of timber pile foundations along the western river wall of the Spree Canal had to be pierced without any deviation, with around 40 of the top horizontal holes.

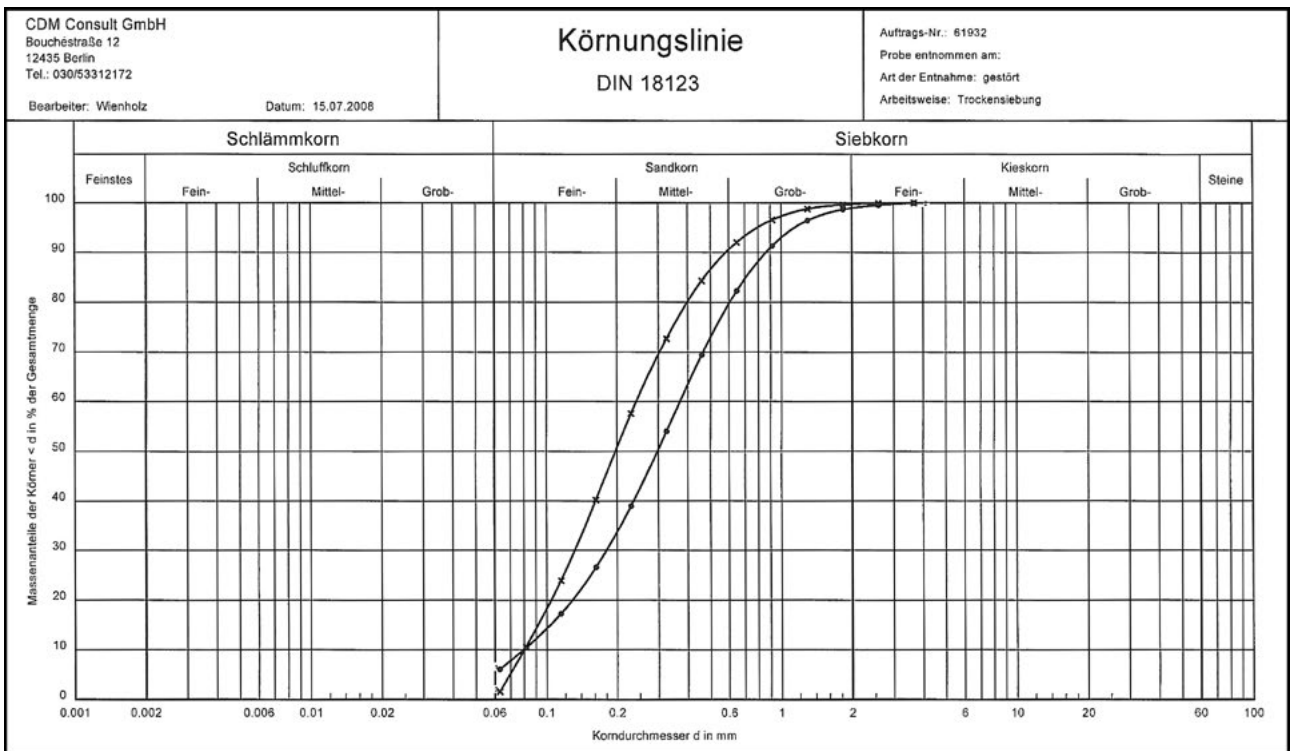
4 Development of Drilling Technique from the Bidding Phase to Construction

4.1 Situation in the Bidding Phase

In the bidding phase, a drilling process had to be estimated for which no cost or performance expectations existed. Similarly, although the subsoil was correctly outlined in geotechnical terms, the proportion of the cost-pushing bedload in relation to the total metres to be drilled was unknown. It was similarly difficult to estimate its composition and effect on the drilling progress.

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb

Innovationen beim Bau der U5 in Berlin



6 Sieblinien der Talsande
Valley sand grading curve

3.3.2 Spreekanal

Die Vereisungsbohrungen konnten den unmittelbar hinter der Anschlagwand liegenden Spreekanal nur mit einer geringen Überdeckung von max. 4 m unterfahren. Die Bohrparameter waren daher in diesem Bereich anzupassen, um einen Austritt von Bohrspülung in den Spreekanal zu vermeiden.

3.3.3 Holzpfahlgründung der Ufermauer

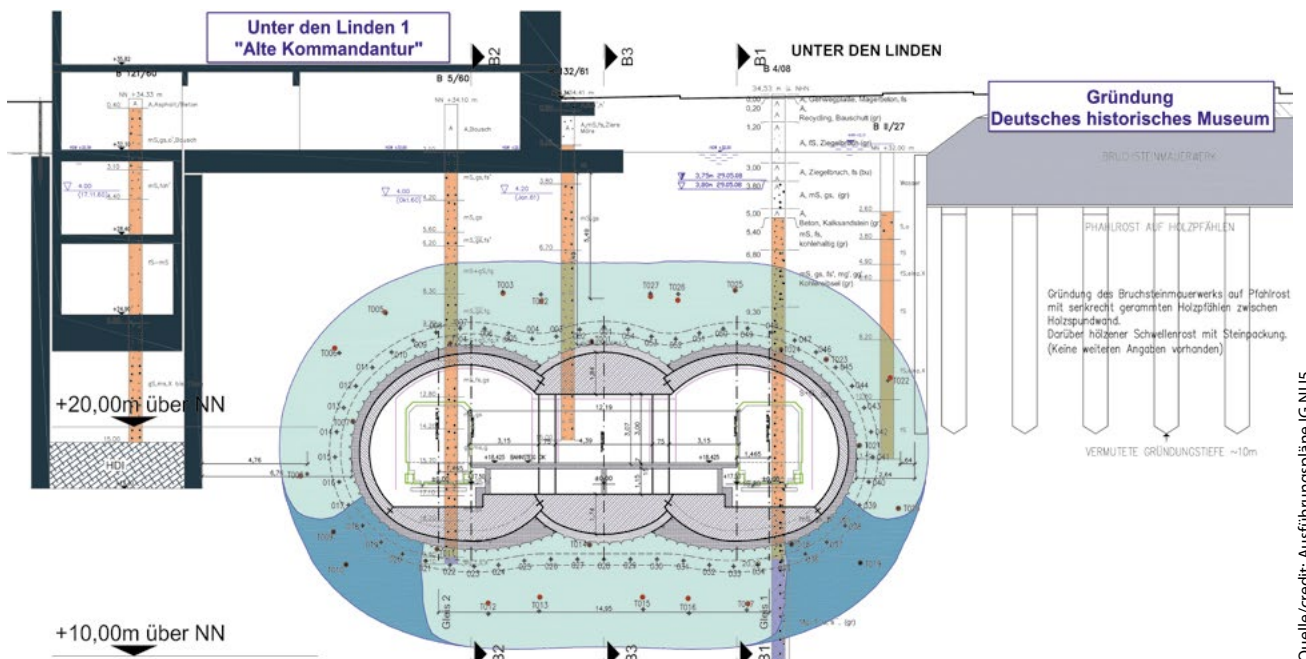
Eine mehrreihige Holzpfahlgründung der westlichen Ufermauer des Spreekanal war mit den oberen ca. 40 Horizontalbohrungen richtungstreu zu durchhörtern.



7 Saalekaltzeitlicher Geschiebemergel mit Kalkkonkretionen
Saale Ice Age till with limestone concretions

After a short but intensive market survey and several meetings with professional experts, the equipment and material procurement costs were narrowed down as closely as possible. The first issue was the drill bit survey technology, which at the time was either too large, too inaccurate or too prone to failure and often offered as an uneconomical and expensive service without assuming any responsibility. The second issue that was hard to handle were the estimation approaches for the removal of obstacles, as well as for obstacle-free soil. The drilling process for both of them was broken down into small and micro working steps and associated almost down to the minute with construction times that were partially worked out in trial runs on models. Some of the results were extremely sobering, but sound and irrefutable. In order to remove a hard obstacle after 40 metres of drilling, for example, the directional drill string would have had to be removed and replaced by another drill string with a specially developed down-the-hole hammer, as rotary drill bits do not work in the sand present at the site. After successful piercing, the down-the-hole hammer would have to be removed again and drilling would have to continue with the directional drill string. If we assume that simply piercing the obstacle would take an hour alone, this would roughly double the time taken to drill the entire borehole as the result of this event. This made it clear that there was great potential for both sides if this timing was minimised. This is why attempts were made already in the bidding phase to provide answers about unavoidable types of obstacles when drilling that were as detailed and cost-effective as possible:

Drilling Technique and Measurement Technology for Excavation in Frozen Ground Innovations in Construction of the U5 in Berlin



Quelle/credit: Ausführungspläne IG NUS

8 Nachbarbebauung: Alte Kommandantur und Deutsches Historisches Museum
Neighbouring buildings: Alte Kommandantur and Deutsches Historisches Museum

4 Entwicklung der Bohrtechnik von der Angebotsphase bis zur Ausführung

4.1 Situation in der Angebotsphase

In der Angebotsphase musste ein Bohrverfahren kalkulatorisch eingeschätzt werden, für das weder Kosten- noch Leistungserwartungen vorlagen. Ebenso war der Baugrund zwar geotechnisch korrekt umrissen, der Anteil des kosten-treibenden Grobgeschiebes an den gesamten Bohrm Metern war jedoch unbekannt. Ebenso schwer konnte dessen Zusammensetzung und Auswirkung auf den Bohrfortschritt eingeschätzt werden.

Nach einer kurzen, aber intensiven Marktschau und einigen Fachgesprächen wurden die Geräte- und Materialbeschaffungskosten möglichst gut eingegrenzt. Problematisch war erstens die Bohrkopf- und Materialbeschaffungskosten, die zum damaligen Zeitpunkt entweder zu gross, zu ungenau oder zu störanfällig war und oftmals nur als unwirtschaftlich teure Dienstleistung ohne Übernahme jeglicher Verantwortung angeboten

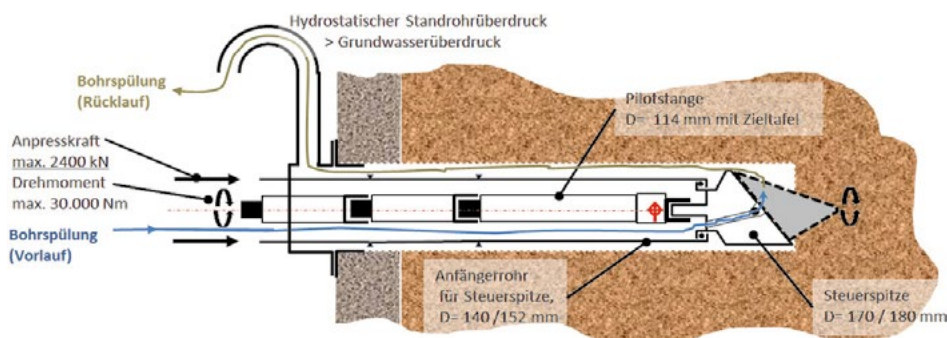
- Driven timber piles;
- Bedloads;
- Deflection during the pointed-angled transition from loose bedding (sand unaffected by the Ice Age) to the semi-solid clay (till);
- Lack of control when drilling in loosely bedded sand.

After the contract was awarded, the client and his expert planners were integrated into our technical considerations early on. We worked together to develop concepts for the fair spreading of risks. One important basis was the transparent execution of the tendered test drillings (Section 5).

4.2 Selecting the Drilling System

Some of the aforementioned requirements seemed to be contradictory. Ultimately, the technical approach for the drilling system was determined on the basis of those requirement factors that could not be met by mere further development. For example, the friction in the sand and the

issue of getting stuck in the bedload could only be overcome with the force and torque of a thrust boring machine. However, the further development of this machine for controlled drilling using a flushing drill bit to remove (flush out) cuttings seemed feasible (Fig. 9).



Quelle/credit: J. Meier/Implenia

9 Schemazeichnung des Bohrsystems
Drill system schematic drawing

4.2.1 Drilling Equipment
For this reason, a relatively powerful thrust boring unit

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb Innovationen beim Bau der U5 in Berlin

wurde. Der zweite schwer zu fassende Posten waren die Leistungsansätze für hindernisfreien Boden und für Hindernisse. Hier wurden die erforderlichen Tätigkeiten in kleine und kleinste Arbeitsschritte gegliedert und minutengenau mit Ausführungsdauern hinterlegt, die zum Teil in Arbeitsversuchen an Modellen ermittelt wurden. Die Ergebnisse waren zum Teil sehr ernüchternd, aber fundiert und unwiderlegbar. Um ein hartes Hindernis nach beispielsweise 40 Bohrmeter zu beseitigen, hätte man den Richtbohrstrang ausbauen und durch einen anderen Bohrstrang mit einem eigens weiterentwickelten Imlochhammer ersetzen müssen, da Rollenmeissel in den vorliegenden Sanden nicht funktionieren. Nach der erfolgten Durchörterung wäre der Imlochhammer wieder ausgebaut und die Bohrung mit dem Richtbohrstrang fortgesetzt worden. Nehmen wir an, die reine Durchörterungsdauer hätte nur eine Stunde betragen, so wäre die Bohrdauer für die gesamte Richtbohrung aufgrund dieses Ereignisses in etwa verdoppelt worden. Somit war klar, dass in der Minimierung dieser Zeiten sehr viel Potenzial für beide Seiten lag. Deshalb wurde bereits in der Angebotsphase versucht, möglichst detaillierte und wirtschaftliche Antworten zu geben auf die unausweichlichen bohrtechnischen Hindernisarten:

- Holzrammpfähle;
- Grobgeschiebe;
- Ablenkung beim schleifenden Übergang von der lockeren Lagerung (eiszeitlich unbelasteter Sand) in den halbfesten Ton (Geschiebemergel);
- ausbleibende Steuerwirkung beim Bohren im locker gelagerten Sand.

Nach Auftragserlangung wurden der Auftraggeber und seine Fachplaner frühzeitig in unsere technischen Überlegungen eingebunden. Gemeinsam wurden Konzepte zur gerechten Verteilung der Risiken entwickelt. Eine wichtige Grundlage bildete die transparente und partnerschaftliche Durchführung der ausgeschriebenen Probebohrungen (Abschnitt 5).



11 Rohrbiege- und Dichtigkeitsprüfung
Tunnel bend and leak test



10 Pressbohrgerät als Basis des steuerbaren Bohrsystems
Thrust boring unit as basis for controllable drill system

was chosen (Fig. 10), with added components for rotating flush drilling, down-the-hole hammer use, continuous drill bit localisation – also known as “MWD measurement whilst drilling” – and advanced electronic drilling data recording and display.

The drilling equipment provides a torque of 30,000 Nm at a speed of up to 67 rpm and a maximum pressure force of 2,400 kN (here curbed at 1,200 kN) and was adapted for cost-effective and time-saving drilling in terms of technical details:

- Quicker installation on the drill axis;
- Adjustable front and rear hydraulic bracing;
- Bundled hydraulic hose feed.

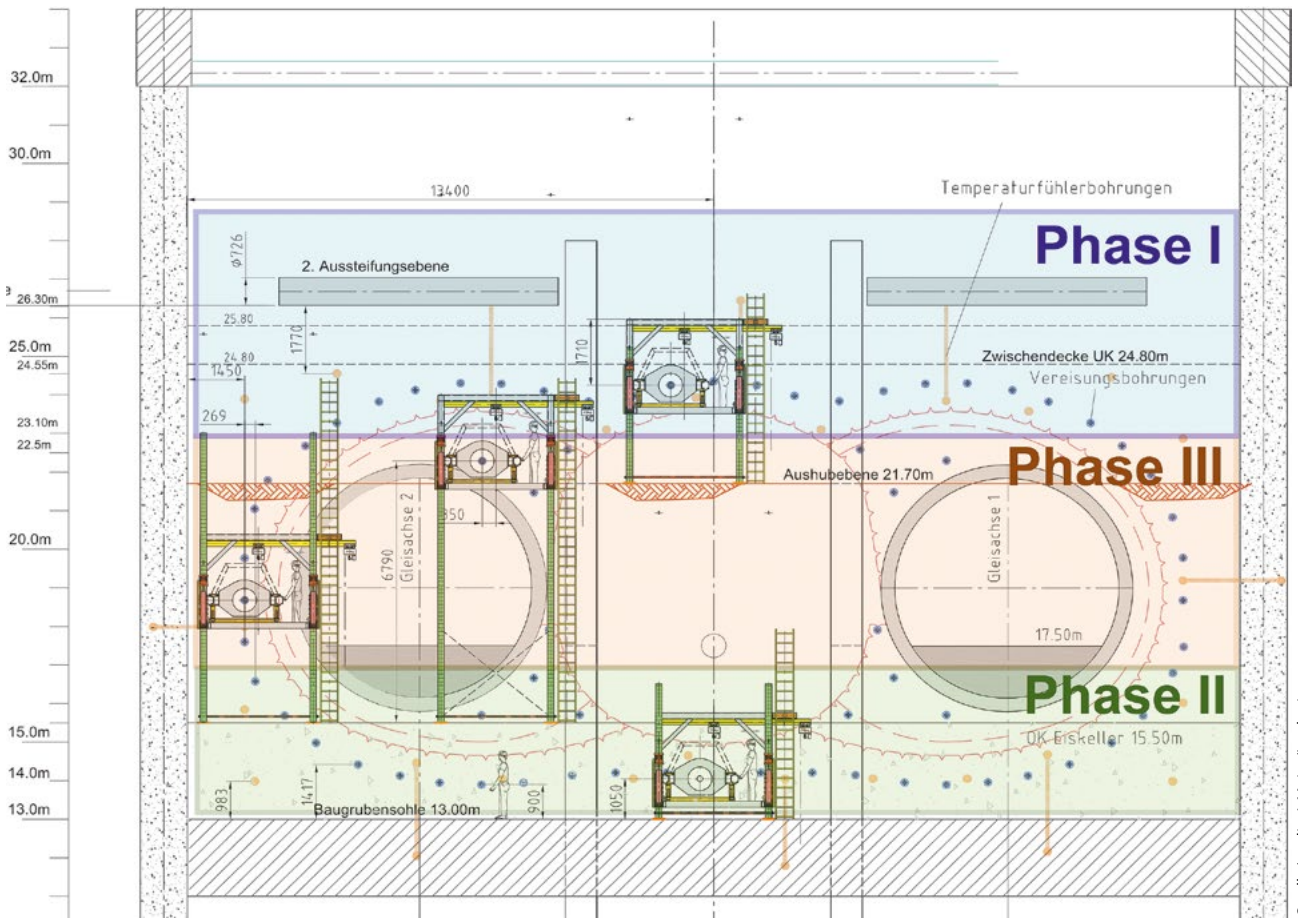
It was driven by an electro-hydraulic unit that was also set up in the excavation pit.

4.2.2 Casings

In order for the casing not to be damaged in possible curves, e.g. when bypassing the expected obstacles, and to remain reliably

leak-proof, the curve radius must not be too small and the material of the thinner-walled joint must be able to withstand the resultant stresses.

This is why the drill string measured in advance in FEM simulations was tested in a bending test (Fig. 11). The drill string was filled inside with water and in the centre exposed to pressure, gradually deflected more and more in the middle and twisted. The secure stability and pressure tightness of the casings was confirmed for curve radii up to below 50 m.



Quelle/Credit: J. Meier/Implenia

12 Bohrphaseneinteilung
Division into drilling phases

4.2 Wahl des Bohrsystems

Einige der oben genannten Anforderungen schienen sich zu widersprechen. Die Wahl der Ausgangsbasis für das Bohrsystem wurde schliesslich von denjenigen Anforderungsfaktoren bestimmt, die sich nicht durch blosser Weiterentwicklung erfüllen lassen. Beispielsweise liessen sich die Reibung im Sand und die Klemmwirkung im Grobgeschiebe nur mit der Kraft und dem Drehmoment einer Pressbohranlage überwinden. Die Weiterentwicklung dieses Systems zur kontrollierten, drehspülenden Bodenentnahme erschien dagegen machbar (Bild 9).

4.2.1 Bohrgerät

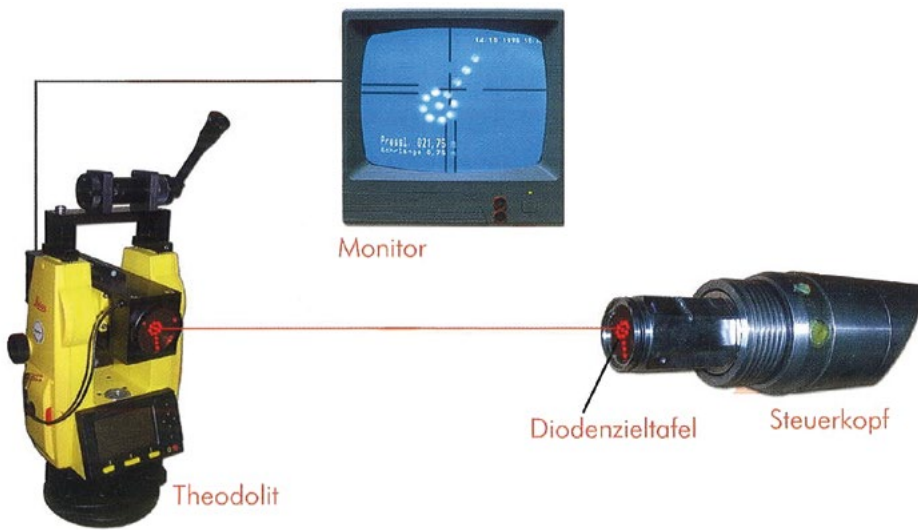
Daher wurde ein relativ starkes Pressbohrgerät gewählt (Bild 10) und um Komponenten zum drehspülenden Bohren, für Imlochhammerinsatz, für kontinuierliche Bohrkopfortung – auch «measurement whilst drilling (MWD)» genannt – sowie um eine fortschrittliche elektronische Bohrdatenerfassung und -anzeige ergänzt.

Das Bohrgerät stellt ein Drehmoment von 30 000 Nm bei einer Drehzahl bis zu 67 min^{-1} sowie eine Andruckkraft von maximal 2400 kN (hier gedrosselt auf 1200 kN) zur Verfügung und wurde für den wirtschaftlichen und zeitsparenden Bohrbetrieb in technischen Details angepasst:



Quelle/Credit: J. Meier/Implenia

13 Richtbohranlage auf ihrer Hubarbeitsbühne
Directional drilling system on work platform



14 Optische Bohrkopförtung
Optical drill bit localisation

- schnellere Einrichtung auf die Bohrachse;
 - justierbare, hydraulische Absteifung front- und heckseitig;
 - gebündelte Hydraulikschlauchzuführung.
- Der Antrieb erfolgte über ein elektrohydraulisches Aggregat, das ebenfalls in der Baugrube aufgestellt wurde.

4.2.2 Bohrröhre

Damit das Bohrrohr auch bei einer möglichen Kurvenfahrt, zum Beispiel bei der Umfahrung der erwarteten Hindernisse, nicht beschädigt wird und zuverlässig dicht bleibt, darf der Kurvenradius nicht zu klein sein bzw. muss das Material der dünnwandigeren Verbinder den auftretenden Spannungen gewachsen sein.

Daher wurde der vorab in FEM-Simulationen bemessene Bohrstrang in einem Biegeversuch getestet (Bild 11). Der Bohrstrang wurde innen mit Wasser gefüllt, mit Druck beaufschlagt, schrittweise mittig immer stärker ausgelenkt und gedreht. Die sichere Stabilität und Druckdichtigkeit des Rohres konnte für Kurvenradien bis unter 50 m bestätigt werden.

Mehrmonatige Gefrier- und Auftauversuche unter Baustellenbedingungen bestätigten die Frosttauglichkeit.

4.2.3 Bohrarbeitsbühne

Um den Bauablauf der Haltestelle mit den Bohrungen möglichst wenig zu stören, wurden die Bohrungen in drei Phasen eingeteilt (Bild 12):

Phase I: Teilaushub bis OK TVM-Vortriebe (Tübbingröhren vorher teilverfüllt). Hier Holzrammpfähle, verkitteter Sand und Kulturschutt erwartet, grösste Nähe zu Spreekanal und Nachbarbebauung.

Phase II: Aushub auf Sohle mit Abbruch der Tübbingröhren. Herstellung der endgültigen Haltestellensohle zeitgleich mit den Bohrungen hinter dem Bohrgerät. Hier Einbohren in den

Months of freezing and thawing tests under site conditions confirmed their suitability for frost.

4.2.3 Drill Working Platform

In order to disrupt the construction process of the station with the drillings as little as possible, the drillings were divided into three phases (Fig. 12):

Phase I: Partial excavation up to top edge of TBM drives (segment-lined tunnels partially back-filled in advance). Driven timber piles, cemented sand and cultural rubble

expected here, closest proximity to the Spree Canal and adjacent buildings.

Phase II: Excavation down to the invert with removal of segments from the lined tunnels. Creation of final station invert at the same time as the holes behind the drilling equipment. Drilling into the rising marlstone here, piercing the quartzite bedload.

Phase III: Partial filling and covering of the later maintenance access routes for the freeze lances. Greatest height difference between drill starting point and drilling level (over 7 m), loosely bedded and cemented sand expected.

The height-adjustable work platform required for this (Fig. 13) was optimised to reduce moving times, although the greatest challenge was to create a working platform for great heights and heavy loads (load capacity approx. 16 t) that could still allow for little wall clearance for the holes. Alongside the drive and lifting system, it also had its own casing handling crane. Implemia Maschinen- und Elektrotechnik Mannheim was responsible for the design, safety-related coordination with the supervisory authorities as well as construction, statics and production.

4.2.4 Brace Construction

The project has benefited greatly from excellent cooperation between the specialist planners and those implementing the work. For example, two diaphragm wall panels were incorporated into the plans in the centre of the excavation pit without any problems, in order to discharge the feed force, which can reach up to 1,200 kN. Horizontal steel girders were set against these individual pillar-like diaphragm wall panels, with the drilling equipment ensuring infinitely variable adjustment of the height of these girders. The drilling equipment braced against them hydraulically in a horizontal direction.

Quelle/credit: J. Meier/Implemia

Drilling Technique and Measurement Technology for Excavation in Frozen Ground

Innovations in Construction of the U5 in Berlin

aufsteigenden Mergel, Durchhörtern des quarzitischen Grobgeschiebes.

Phase III: Teilanfüllung und Abdeckung des späteren Revisionsanges für die Vereisungsanlagen. Hier grösster Höhenunterschied zwischen Bohransatzpunkt und Bohrebene (über 7 m), locker gelagerter sowie verkitteter Sand erwartet.

Die dafür erforderliche Hubarbeitsbühne (Bild 13) wurde auf die Verringerung der Umsetzzeiten hin optimiert, die grosse Herausforderung bestand jedoch darin, eine Arbeitsplattform für grosse Höhen und schwere Lasten (Nutzlast ca. 16 t) zu schaffen, die dennoch geringe Wandabstände der Bohrungen zulässt. Sie erhielt, neben dem Fahr- und Hubsystem, auch einen eigenen Gestängekran. Der Entwurf, die sicherheitstechnische Abstimmung mit Aufsichtsbehörden sowie Konstruktion, Statik und Herstellung erfolgten durch die Implenia Maschinen- und Elektrotechnik Mannheim.

4.2.4 Rücksteifekonstruktion

Das Projekt profitierte sehr von der guten Zusammenarbeit zwischen Fachplanern und Ausführenden. Beispielsweise wurden unproblematisch zwei Schlitzwandlamellen in Baugrubenmitte eingeplant, um die bis zu 1200 kN grosse Re-

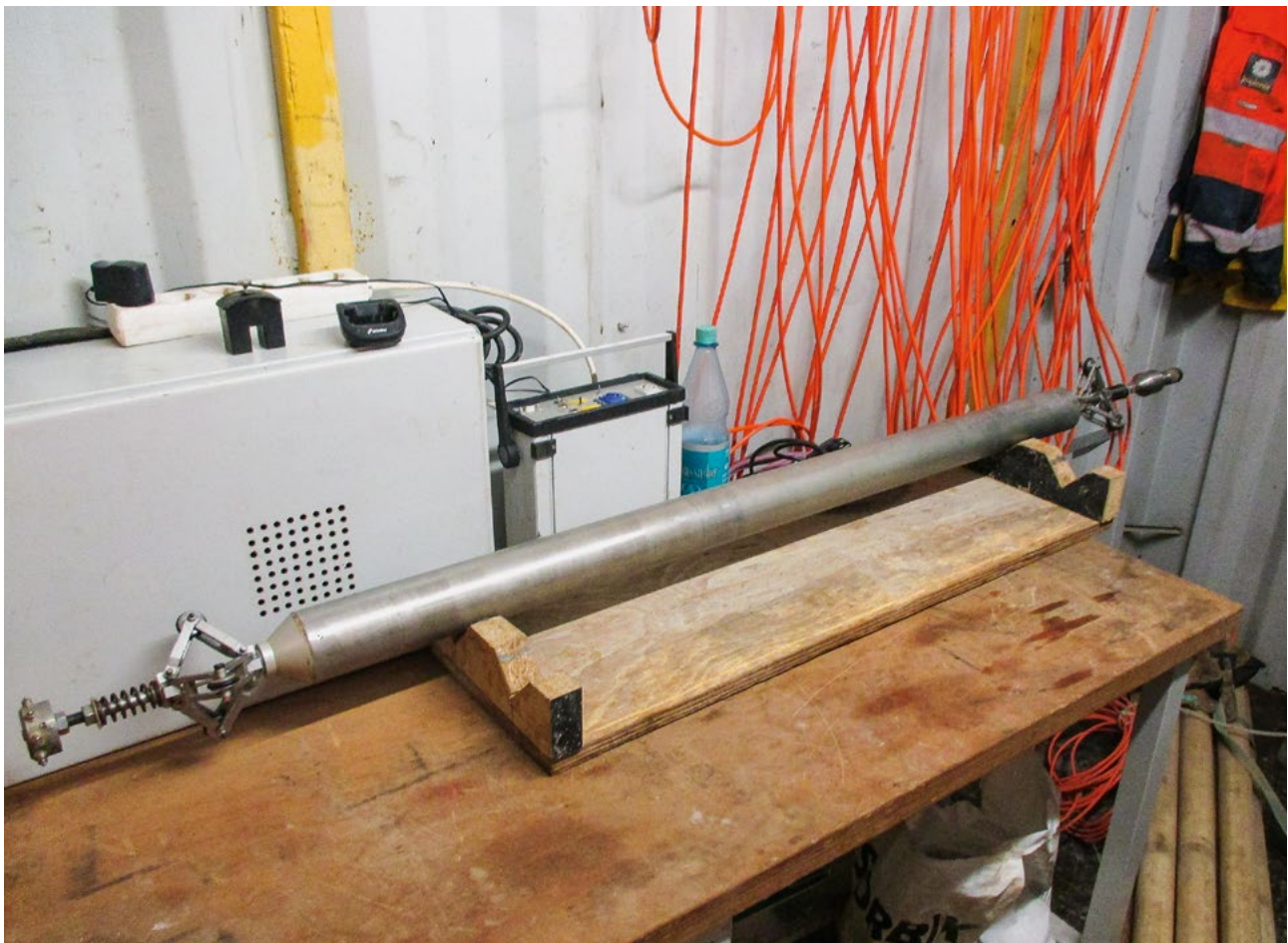
4.2.5 Borehole Survey Technology

With controlled flush drilling – also known as “HDD – horizontal directional drilling” – the usual methods for drill bit localisation such as magnetic detection or walk-over were not applicable due to environmental conditions. The proven optical method and an inertial measurement system with fibre-optic gyroscopes were therefore selected as suitable measurement methods.

In the optical system, a camera positioned behind the drilling equipment looks through the inner rods towards a self-luminous target plate in the drill bit (Fig. 14). This system is extremely precise, but restricted to a maximum deviation of 6 cm due to the internal diameter of the drill rods. If deviations exceed this value, the diode target plate will no longer be recorded by the camera.

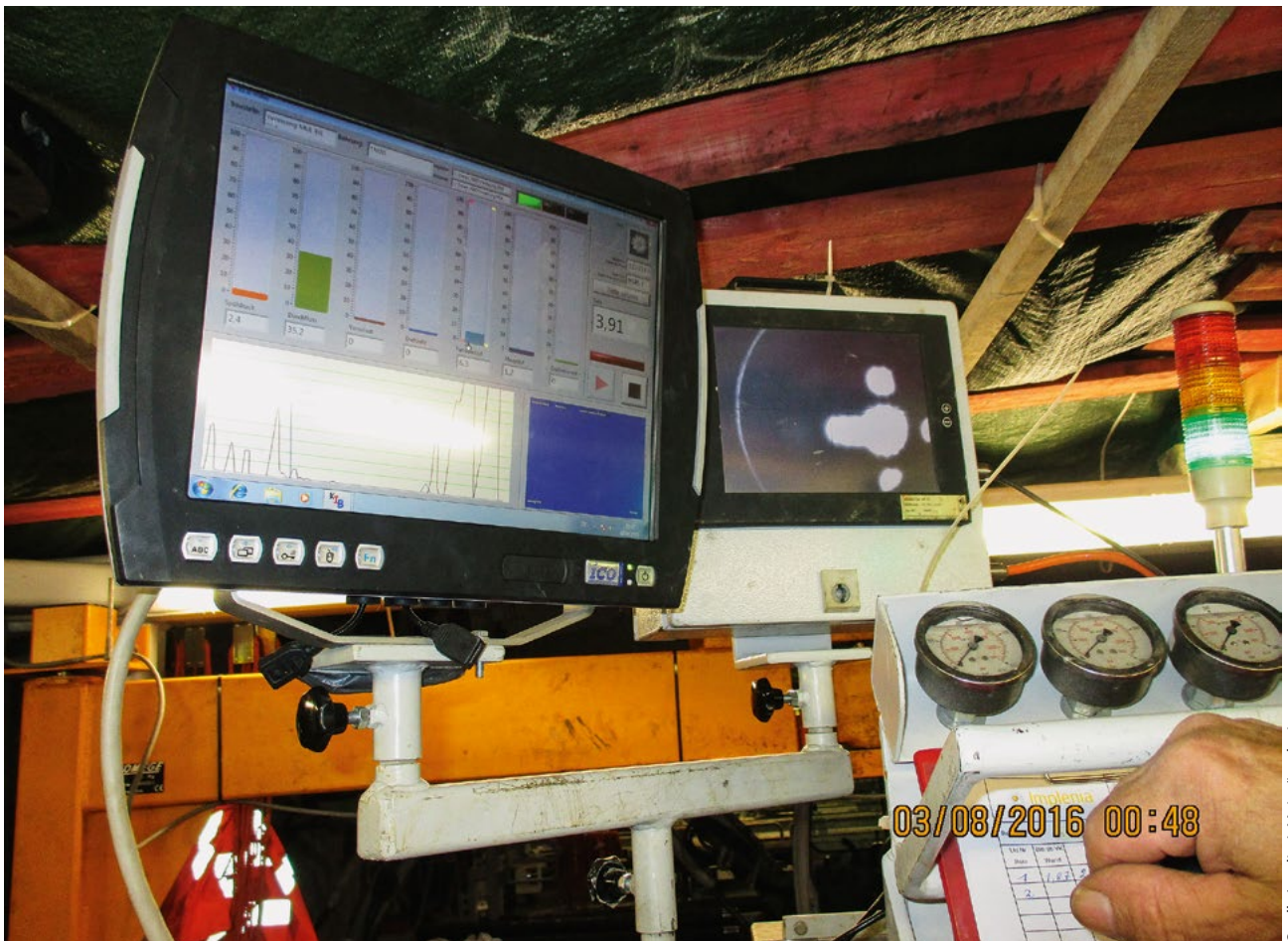
In contrast, the inertial measurement unit carries out continuous inertial navigation for the drill bit. It is based on a combination of fibre-optic gyroscopes and accelerometers that record rotational and translational acceleration.

Implenia-Messtechnik acquired a prototype of an innovative inertial system, developed it further in cooperation with the



15 Inertiale Mess- und Steuersonde
Inertial measurement and control probe

Quelle/credit: J. Meier/Implenia



Quelle/credit: J. Meier/Implenia

16 Fahrstand mit Monitoren der Bohrdatenerfassung und optischen Steueranlage
Operator's platform with monitors for drilling data recording and optical control unit

aktion der Vorschubkraft einzuleiten. An diesen pfeilerartig einzeln stehenden Schlitzwandlamellen lagen horizontale Stahlträger an, die mit dem Bohrgerät stufenlos höhenverstellbar waren. Gegen sie steifte sich das Bohrgerät horizontal hydraulisch ab.

4.2.5 Messtechnik Bohrlochverlauf

Beim gesteuerten Spülbohren – auch als «horizontal directional drilling (HDD)» bekannt – waren das übliche Verfahren zur Bohrkopffortung wie zum Beispiel Magnetsonde oder Walk-over umgebungsbedingt nicht anwendbar. Als geeignete Messverfahren wurden daher das bewährte optische Verfahren und das Inertialmesssystem mit lichtfaseroptischen Kreiseln gewählt.

Bei dem optischen System blickt eine hinter dem Bohrgerät angeordnete Kamera durch das Innengestänge auf eine selbstleuchtende Zieltafel in der Bohrkrone (Bild 14). Dieses System ist hochgenau, jedoch durch den lichten Innendurchmesser des Bohrgestänges auf eine maximale Abweichung von 6 cm begrenzt. Übersteigen die Abweichungen diesen Wert, wird die Diodenzieltafel nicht mehr von der Kamera erfasst.

inventor and adapted it to the available limited bore diameter. It is characterised by reduced dimensions while simultaneously providing an incredibly high level of long-term stability for measurement values (Fig. 15).

The equipment operator had a constant visual (MWD) of the actual position of the drill bit compared to the intended position so that he could carry out corrective actions immediately. This meant there was no need for the constant interruption of the drilling process for measurement runs with measurement systems that had to be inserted subsequently into the casing.

The equipment operator was constantly shown the drilling and machine parameters so that he could react immediately if necessary (Fig. 16). Furthermore, the data were recorded continuously. The optical control system images were also digitized continuously and saved with timestamps and depth details. Together with detailed manual records, the drilling data recording method developed in-house formed the basis for the consensual definition of allowances for obstacles. As already shown in Section 4.1, drilling obstacles had a major impact here on drilling time and production costs.

Drilling Technique and Measurement Technology for Excavation in Frozen Ground

Innovations in Construction of the U5 in Berlin

Das Inertialmesssystem hingegen führt eine laufende Trägheitsnavigation des Bohrkopfes durch. Es basiert auf einer Kombination aus Lichtfaserkreisläufen und Accelerometern, die Dreh- und Translationsbeschleunigungen erfassen.

Ein innovatives Inertialsystem wurde von der Implenia-Messtechnik im Prototypenzustand akquiriert, gemeinsam mit dem Erfinder weiterentwickelt und auf die verfügbaren beengten Bohrdurchmesser angepasst. Es zeichnet sich durch verringerte Baumasse bei einer gleichzeitig extrem gesteigerten Langzeitstabilität der Messwerte aus (Bild 15).

Die tatsächliche Lage des Bohrkopfes gegenüber der Soll-Lage wurde dem Gerätefahrer ständig optisch angezeigt (MWD), sodass er unmittelbar Korrektursteuern ausführen konnte. Ständige Unterbrechungen des Bohrablaufes für Messfahrten mit nachträglich in das Bohrrohr einfahrenden Messsystemen konnten so entfallen.

Die Bohr- und Maschinenparameter wurden dem Gerätefahrer kontinuierlich angezeigt, damit er im Bedarfsfall umgehend reagieren konnte (Bild 16). Die Daten wurden zudem durchgehend aufgezeichnet. Die Bilder des optischen Steuersystems wurden ebenfalls laufend digitalisiert und zeit- wie tiefenbezogen gespeichert. Die im eigenen Haus entwickelte Bohrdatenschreibung bildete, zusammen mit den detaillierten Handaufzeichnungen, die Grundlage für die einvernehmliche Festlegung der Vergütung von Hindernissen. Wie bereits in Abschnitt 4.1 dargelegt, hatten Bohrhindernisse hier einen grossen Hebel auf Bohrdauer und Herstellkosten.



17 Original-Gründungspfahl, im Test durchbohrt
Original foundation pile, drilled through in test

Quelle/credit: J. Meier/Implenia



Quelle/credit: J. Meier/Implenia

18 Probebohrungen in Berlin
Test holes in Berlin

5 Test Drillings

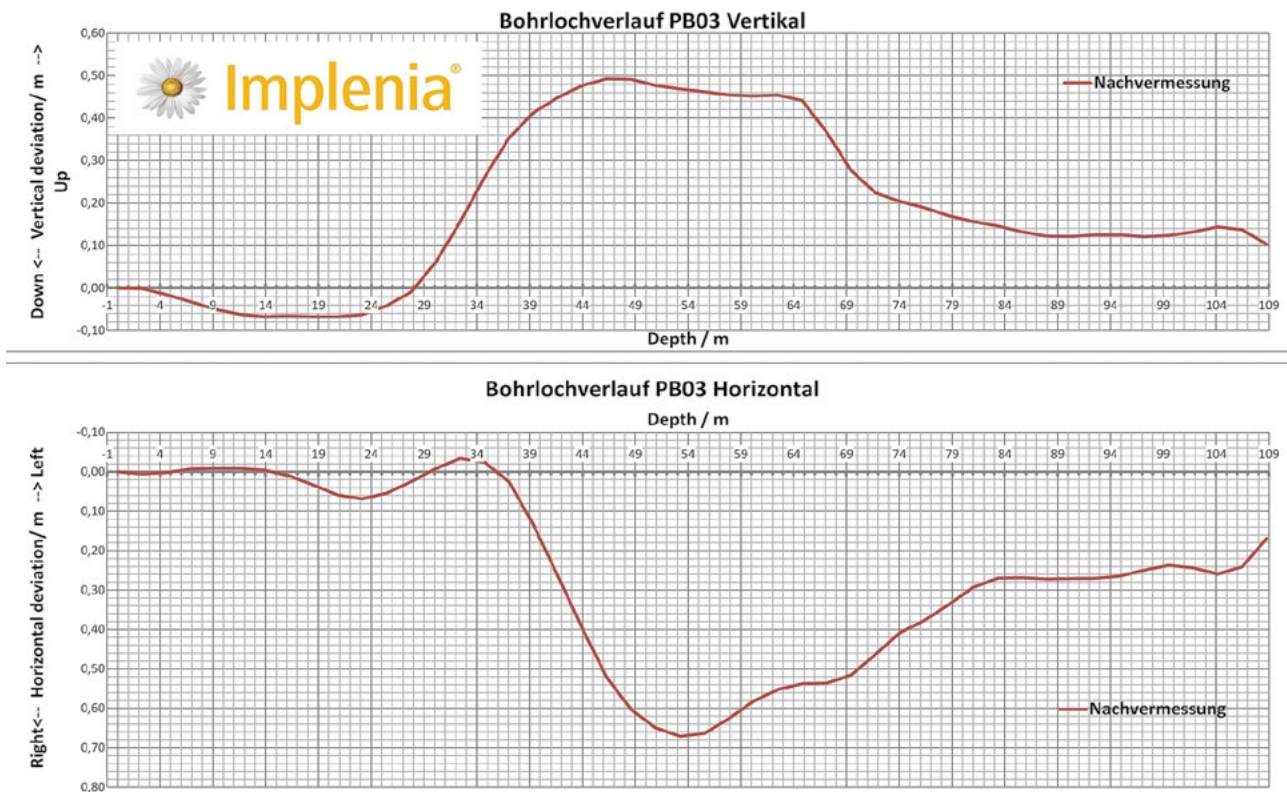
Implenia conducted its own drill tests in a drilling route prepared with obstacles, in order to optimise the drilling technique for the possible encounters of stones, boulders and wooden piles. Larch timber piles of the same type were salvaged from the Museumsinsel site and reinstalled in the test route (Fig. 17).

The tender also requested two test drillings up to approx. 105 m in length in the local subsoil. For this purpose, the client provided a drilling route starting from the excavation pit already constructed for the track-switching system (Fig. 18).

As targeted bypassing was also a further strategy for eliminating obstacles due to our advanced drill bit localisation system, the client also requested a further test drilling. A simulated obstacle was successfully bypassed and then returned to the intended drill axis (Fig. 19).

This useful test, performed at an early stage, meant that the intended drilling technique and equipment and measurement technology could be checked under real site conditions, important practical experience could be gained and possible improvements could be identified. From our point of view, we would recommend such test drillings in the project area subsoil for future projects.

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb Innovationen beim Bau der U5 in Berlin



Quelle/credit: J.Meier/Implenia

19 Bohrlochverlauf: Umfahrung eines simulierten Bohrhindernisses
Borehole alignment: bypassing a simulated drilling obstacle

5 Probebohrungen

Implenia führte eigene Versuchsbohrungen in einer zuvor mit Bohrhindernissen präparierten Bohrtrasse aus, um die Bohrtechnik für das mögliche Antreffen von Steinen, Findlingen und Holzpfähle zu optimieren. Hierfür wurden gleichartige Lärchenpfähle auf der Museumsinsel geborgen und in der Teststrecke wieder eingebaut (Bild 17).

In der Ausschreibung waren zudem zwei Probebohrungen bis ca. 105 m Länge im lokalen Baugrund gefordert. Hierzu stellte der Auftraggeber eine Bohrtrasse neben der bereits hergestellten Baugrube der Gleiswechsellanlage zur Verfügung (Bild 18).

Da aufgrund unserer fortschrittlichen Bohrkopffortung auch das gezielte Ausweichen als weitere Hindernisbeseitigungsstrategie hinzukam, ordnete der Bauherr eine weitere Probebohrung an. Hierbei wurde ein simuliertes Hindernis erfolgreich umfahren und anschliessend zur Sollbohrachse zurückgekehrt (Bild 19).

Mit diesen sinnvollen, frühzeitig ausgeführten Tests konnte die vorgesehene Bohr-, Geräte- und Messtechnik unter realen Baustellenbedingungen geprüft, wichtige Praxiserfahrung gesammelt und mögliche Verbesserungen erkannt werden. Solche Probebohrungen im Baugrund des Projektgebietes sind aus unserer Sicht für zukünftige Projekte zu empfehlen.

6 Execution of the Boreholes

It took around two working days to construct the horizontal drillings, including implementation but without drilling obstacles. The work was carried out continuously on a 24/7 basis. These performance values corresponded to the values calculated in the offer phase.

Occupational health and safety was already taken into consideration consistently in the planning of the work process, equipment and auxiliary structures. The implemented measures are recognised by the technical supervisory authorities and were checked during regular site visits.

The accident rate was far below that of the main project, due to the practice-orientated planning of the numerous technical solutions. Fortunately, there were no serious accidents.

The client's construction monitoring team was equipped with the same evaluation software as the Implenía site management team. This meant they were able to generate their own detailed evaluations of drilling data at any time.

These evaluations formed the working basis for the weekly so-called drilling conference. A small group of operating engineers from both sides discussed and agreed on the significance of the data, further procedure and allowances for removing obstacles at this weekly meeting. The decisions made at the weekly conference were also no longer questioned by the project managers on both sides.

6 Ausführung der Bohrungen

Die Ausführung einer Horizontalbohrung inklusive Umsetzen, aber ohne Bohrhindernisse benötigte etwa zwei Arbeitstage. Es wurde dabei im durchgängigen 24-Stunden-/7-Tage-Betrieb gearbeitet. Diese Leistungswerte entsprachen den in der Angebotsphase ermittelten Werten.

Bereits bei der Planung der Arbeitsabläufe, Geräte und Hilfskonstruktionen wurde der Arbeits- und Gesundheitsschutz konsequent berücksichtigt. Die getroffenen Massnahmen sind von den technischen Aufsichtsbehörden anerkannt, sie wurden bei regelmässigen Baubegehungen kontrolliert.

Aufgrund der praxisgerechten Planung der zahlreichen technischen Lösungen lag die Unfallrate deutlich unter der des Gesamtprojektes. Darunter waren erfreulicherweise keine schweren Unfälle.

Die Bauüberwachung des Bauherrn wurde mit derselben Auswertungssoftware ausgerüstet wie die Bauleitung von Implenia. So war sie in der Lage, jederzeit eigene Detailauswertungen der Bohrdaten zu erstellen.

Diese Auswertungen bildeten die Arbeitsgrundlage für die wöchentliche sogenannte Bohrkonferenz. Dort besprach und einigte sich ein kleiner Kreis operativer Ingenieure beider Seiten über die Bedeutung der Daten, das weitere Vorgehen und die Vergütung der Hindernisbeseitigung. Die dort getroffenen Festlegungen wurden auch von den Projektleitungen beider Seiten nicht mehr infrage gestellt.

Dieses Modell wurde bis zum Ende der Bohrungen zur beiderseitigen Zufriedenheit beibehalten und ermöglichte allen Beteiligten, sich auf die Bohrtechnik zu konzentrieren.

Dieser faire und offene Umgang setzte sich in der Aufgefrier- und Vortriebsphase fort.

7 Baugrundvereisung

Die Baugrundvereisung erfolgte mittels dreier Ammoniak-Kältemaschinen mit einer Kühlleistung von zusammen ca. 1,3 Megawatt (Bild 20). Als Kälte-träger fungierten ca. 81 m³ Chlorkalzium-lauge («Kühlsole») mit einer Vorlauf-temperatur von -32 bis -37 °C. Die Anlagen waren über eine hydraulische Wei-

This model was maintained to the satisfaction of both sides until the end of the drilling work and allowed all those involved to concentrate on the drilling technique.

This fair and open dialogue continued in the freezing and excavation phase.

7 Freezing the Building Ground

The building ground was frozen using three ammonia chillers with a total cooling capacity of approx. 1.3 megawatts (Fig. 20). Approx. 81 m³ of calcium chloride brine with a flow temperature of -32 °C to -37 °C was used as the coolant. The systems were combined via a hydraulic separator that also served as a storage tank and regulation reservoir at the same time. A digitally controlled multi-loop pump station facilitated the targeted distribution of the cooling capacity across the corresponding groups of lances. The planned dimensions of the frozen mass were 105 m length, 26 m width and 12 m height.

An intermittent freezing mode was set up in the maintenance phase to avoid the creation of ice lenses, particularly in the till. This meant the cooling capacity could be kept relatively even by constantly switching between the various groups of lances.

8 Temperature Analysis System (TAS)

In order to be able to reliably determine the characteristics of such a large and complex frozen mass, which spans various zones of influence, you need a quick and modular spatial



20 Gefrieranlage
Freezing plant

Quelle/credit: J. Meier/Implenia

Bohr- und Messtechnik für den Gefriervortrieb

Innovationen beim Bau der U5 in Berlin



Quelle/credit: C. Leible/Implenia

21 Digitaler Temperatursensor mit Steckverbinder
Digital temperature sensor with connector

che, die gleichzeitig als Vorrats- und Ausgleichsbehälter diente, zusammengeslossen. Eine digital gesteuerte Mehrkreis-Pumpstation erlaubte die gezielte Verteilung der Kühlleistung auf die entsprechenden Lanzengruppen. Der Frostkörper hatte eine geplante Dimension von 105 m Länge, 26 m Breite und 12 m Höhe.

In der Erhaltungsphase wurde zur Vermeidung von Eislinnenbildung, insbesondere im Geschiebemergel, ein intermittierender Gefrierbetrieb eingerichtet. Durch laufendes Umschalten zwischen verschiedenen Lanzengruppen konnte die Kühlleistung dabei relativ gleichmässig gehalten werden.

8 Temperatur-Analyse-System (TAS)

Um die Beschaffenheit eines so grossen und komplex geformten Frostkörpers, der verschiedene Einflusszonen durchmisst, sicher feststellen zu können, benötigt man ein raumbezogenes, schnelles und modulares Konzept für Erhebung, Aufbereitung, Darstellung und Analyse der Messdaten.

Zusätzlich müssen weitere Prozessparameter wie etwa Durchflussraten in den Soleleitungen und verschiedene Umgebungstemperaturen erfasst werden.

Die im eigenen Haus entwickelten Sensorplatten haben eine kleine Bauform ($D = 10 \text{ mm}$, $L = 45 \text{ mm}$) und sind mit einer Auflösung von $0,06^\circ\text{C}$ sehr präzise (Bild 21). Jedem Sensor wird eine eindeutige Adresse zugewiesen. Die Kommunikation der Sensoren untereinander erfolgt mit einem Zweidrahtbussystem und einer Steckverbindung, wodurch der Verkabelungsaufwand bei gleichzeitig maximaler Informationsdichte gering gehalten wird.

Auf diese Weise wurden insgesamt etwa 2000 Temperatursensoren an unterschiedlichen Positionen eingebaut und über ein innovatives busgestütztes Netzwerk in kürzester Zeit abgefragt. Dabei wurden die einzelnen Sensoren in einer Stern-/Kreisschaltung nur mit einer Busleitung verbunden. Vorgefertigte Analysemuster halfen im Falle einer Busstörung, die Fehler schnell zu erkennen und Ausweichlei-

concept for collecting, processing, presenting and analysing the measurement data.

Further process parameters such as flow rates in the brine lines and various ambient temperatures also need to be recorded.

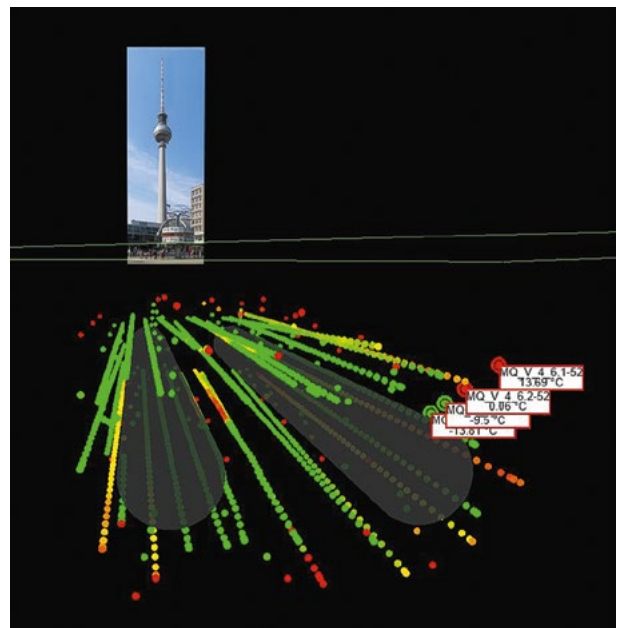
The sensor boards developed in-house are small ($D = 10 \text{ mm}$, $L = 45 \text{ mm}$) and very precise with a resolution of 0.06°C (Fig. 21). A unique address is assigned to each sensor. The communication between the sensors is carried out using a two-wire bus system and a connector, with minimal cabling but maximum information density.

In this way, a total of around 2,000 temperature sensors were installed in various positions and queried very quickly via an innovative bus-supported network. The individual sensors were connected in a star/circle connection with only one bus line. In the event of a bus malfunction, prefabricated analysis samples helped to quickly detect the errors and activate bypasses. The digital temperature sensors themselves each had an individual address, clearly assigned to a certain position in the ground.

Along with the recognised temperature-time diagrams, our web-based interface also provided a fully mobile 3D model true to the actual coordinates, which enabled all those involved to get a quick overview at any time (Fig. 22).

9 Closing Remarks

Our cooperative dealings with one another, focused on the technical solution, required a high level of trust and openness between all those involved, but it was worth it in the end:



Quelle/credit: C. Leible/Implenia

22 Voll bewegliche 3D-Darstellung des Sensorfeldes
Fully mobile 3D representation of the sensor field

tungen zu aktivieren. Die digitalen Temperatursensoren an sich besaßen jeweils eine individuelle Adresse, deren Zuordnung zu einer bestimmten Position im Boden eindeutig war.

Neben den bekannten Temperatur-Zeit-Diagrammen stellte unsere webbasierte Oberfläche auch ein koordinatentreues, voll bewegliches 3-D-Modell zur Verfügung, das allen Zuständigen stets einen schnellen Überblick ermöglichte (Bild 22).

9 Schlussbemerkung

Der partnerschaftliche und auf die technische Lösung fokussierte Umgang miteinander verlangte allen Beteiligten ein hohes Mass an Vertrauen und Offenheit ab, zahlte sich aber am Ende aus:

- Alle drei Bohrkampagnen wurden jeweils deutlich vor Termin fertiggestellt.
- Die Abweichungen im Bohrlochtieftiefen lagen grösstenteils unter 10 cm und ansonsten im Toleranzbereich der wärmetechnischen Berechnungen.
- Nur drei von etwa hundert Bohrungen wurden vor Erreichen der Solltiefe, jedoch ausschreibungskonform in Reichweite planmässiger Gegenbohrungen beendet.
- Aufgrund der akkuraten Lage der Vereisungsbohrungen wurde die Aufgefrierphase ca. zehn Tage vor Plan abgeschlossen. Der Lavinia-Tunnel (Bild 23) konnte pünktlich Anfang Mai 2018 angeschlagen und abgeschlossen werden.
- Es kam zu keinerlei relevanten Bewegungen an den benachbarten Bauwerken.

Diese aussergewöhnliche Zusammenarbeit wurde durch die Probebohrungen auf der Baustelle sehr begünstigt. Bauausführende und Bauüberwachung hatten Gelegenheit, einen gemeinsamen Modus Operandi, ja eine gemeinsame Sprache zu finden. Die Leistungsfähigkeit der Anlagen konnte unter Einsatzbedingungen für alle transparent getestet werden und schuf die Grundlage für eine gerechte Vergütung.



Quelle/credit: J. Meier/Implenia

23 Vortrieb der Bahnsteighalle im gefrorenen Boden unter dem Spreekanal
Platform hall excavation in frozen ground under the Spree Canal

- All three drilling periods were completed well before their respective deadlines.
- Deviations in the back of the boreholes were mainly below 10 cm and otherwise within tolerances for thermal calculations.
- Only three of around one hundred drillings were ended before reaching the intended depth, but they were within reach of the planned counter-drillings in compliance with the tender.
- Given the accurate position of the freezing holes, the freezing phase was completed approx. ten days ahead of schedule. The excavation of the Lavinia Tunnel (Fig. 23) could therefore be started punctually at the beginning of May 2018 and completed.
- There were no relevant movements whatsoever in the adjacent buildings.

This extraordinary cooperation was greatly facilitated by the test drillings on the site. The construction implementation and monitoring teams were able to find a joint modus operandi, you could even say a common language. The performance of the systems could be tested transparently for everyone under actual operating conditions, creating the basis for fair remuneration.



Digitalisierung und BIM bei der Ausführung am Beispiel des Neubaus des Bözbergtunnels SBB

Paul Wieser, Dipl.-Ing., Amberg Engineering AG, Regensdorf-Watt/CH
Werner Schmid, Dipl. Bau-Ing. ETH, Implenia Schweiz AG, Wallisellen/CH
Thomas Zieger, Dipl.-Ing., SBB, PONS Luzern/CH

Digitalisierung und BIM bei der Ausführung am Beispiel des Neubaus des Bözbergtunnels SBB

Im Rahmen des 4-m-Korridor-Ausbaus der Gotthard-Achse stellt der Neubau des Bözberg-Eisenbahntunnels das grösste Einzelprojekt der SBB dar. 3-D-Modellierungen und das Building Information Modelling kamen erfolgreich zum Einsatz. Sie ermöglichten unter anderem das frühzeitige Erkennen der Probleme zwischen den Bauhilfsmassnahmen im Tunnel und der Portalwand, das Festlegen des TBM-Startpunktes und die Simulation des TBM-Verschubs. Drei ausgewählte BIM-Anwendungsfälle wurden im Zuge eines Pilotprojekts ausgewählt, um die BIM-Modellierung der Kabelwege sowie die Entwicklung und Definition der Schnittstellen zum Unterhalt zu pilotieren.

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel

During the course of the four-metre corridor expansion of the Gotthard axis, the new construction of the Bözberg railway tunnel represents SBB's largest individual project. 3D modelling and building information modelling were used successfully, enabling, among other things, the early detection of problems between the auxiliary construction/support measures in the tunnel and the portal wall, determination of the TBM starting point and simulation of the TBM skidding. Three selected BIM application scenarios were selected as part of a pilot project to pilot the BIM modelling of cable routes and the development and definition of the maintenance interfaces.

1 Projektüberblick

Die alpenquerenden Gütertransporte sollen vermehrt von der Strasse auf die Bahn verlagert werden. Dazu wird die Gotthard-Achse von Basel bis Chiasso zum sogenannten



Quelle/credit: SBB AG

1 Überblick 4-m-Korridor Schweiz (rote Linie)
Overview of the four-metre corridor, Switzerland (red line)

1 Project Overview

The transportation of goods across the Alps is increasingly to be switched from road to rail. To this end, the Gotthard Axis from Basel to Chiasso will be expanded into the four-metre corridor, enabling all conventional European handling containers with a corner height of up to 4 m and a width of up to 2.6 metres (Fig. 1) to be transported.

The old Bözberg tunnel on this route is structurally unsuitable for this. The new construction of the twin-track Bözberg railway tunnel is approx. 2.7 km long and offers the most suitable alternative, thus representing SBB's largest and most significant project on the future four-metre corridor.

The new twin-track tunnel will replace the approx. 140-year-old existing tunnel, which will be used in the future as a service and rescue tunnel (SRT). The two tunnels are connected to each other approx. every 500 m by a total of five cross-passages (CP) (Fig. 2). In the event of an incident, the cross-passages enable rapid evacuation of all people from the new tunnel and targeted access by the intervention forces.

BIM et autres instruments numériques pour l'exécution des travaux dans le cas de la construction du nouveau tunnel CFF du Bözberg

Dans le cadre de l'extension du couloir de 4 mètres de l'axe du Gothard, la construction du nouveau tunnel ferroviaire du Bözberg constitue le plus gros projet propre aux CFF. Les premiers 175 m du tunnel se situent en terrain meuble et ont été creusés en méthode conventionnelle. L'avancement principal a ensuite été réalisé dans la roche à l'aide d'un tunnelier. Lors de la planification du projet, des modélisations 3D et le BIM (modélisation des informations de l'ouvrage) ont été utilisés avec succès. Ils ont notamment permis d'anticiper des conflits entre les mesures de stabilisation dans le tunnel et le mur de soutènement du portail, de définir le point de départ du tunnelier et de simuler son avancée. Trois cas d'application du BIM ont été sélectionnés dans le cadre d'un projet pilote pour la modélisation des chemins de câbles, ainsi que pour le développement et la définition des interfaces avec les interventions de maintenance. De nouvelles technologies ont pu être mises en œuvre avec succès au stade préparatoire des travaux ou directement lors des opérations de tirage des câbles sur site.

Digitalizzazione e BIM durante l'esecuzione nell'esempio della nuova costruzione della galleria del Bözberg FFS

Nel quadro dell'ampliamento del corridoio di 4 m dell'asse del Gottardo, la nuova costruzione della galleria ferroviaria del Bözberg rappresenta il più grande progetto singolo delle FFS. I primi 175 m circa della galleria si trovano in materiale sciolto e sono stati realizzati con scavo in tradizionale. L'avanzamento principale è avvenuto esclusivamente con una fresa meccanica a piena sezione in roccia. Nella progettazione è stato necessario fare ricorso alla modellazione 3D e al Building Information Modelling. Queste tecniche hanno consentito tra l'altro l'identificazione tempestiva dei problemi tra le misure di costruzione ausiliarie nella galleria e la parete del portale, la definizione del punto di partenza della fresa meccanica e la simulazione dell'avanzamento della stessa. Tre casi applicativi BIM selezionati sono stati scelti nel quadro di un progetto pilota, per pilotare la modellazione BIM dei cavi e lo sviluppo e la definizione delle interfacce per la manutenzione. Le nuove tecnologie sono state impiegate con successo quale preparazione dei lavori o direttamente nei lavori di posa dei cavi in cantiere.

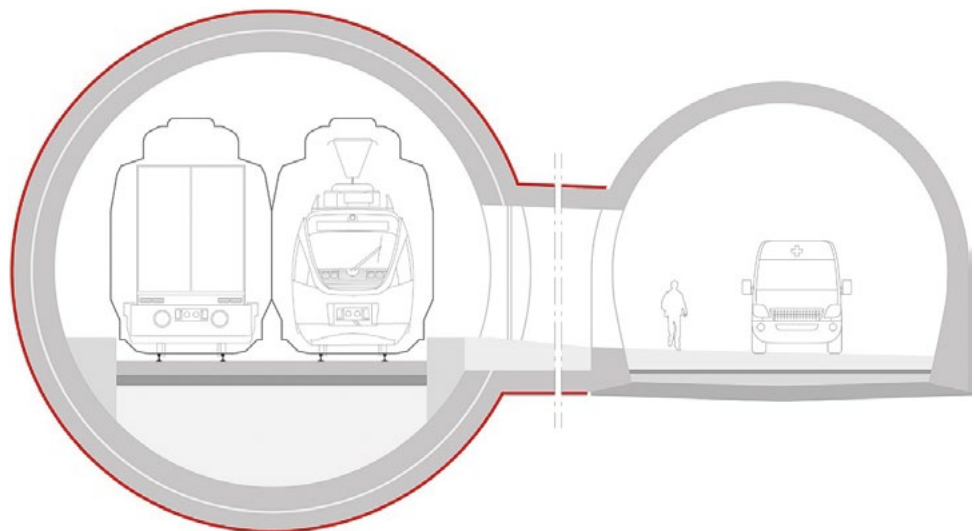
4-m-Korridor ausgebaut. Dieser ermöglicht den Transport aller europaweit gängigen Umschlagbehältnisse mit einer Eckhöhe von bis zu 4 m und einer Breite von bis zu 2,6 m (Bild 1).

Der auf dieser Strecke liegende alte Bözbergtunnel ist dafür baulich nicht geeignet. Der Neubau des rund 2,7 km langen doppelspurigen Bözberg-Eisenbahntunnels ist die geeignetste Alternative und stellt damit das wichtigste und grösste Projekt der SBB auf dem zukünftigen 4-m-Korridor dar.

Der neue Doppelspurtunnel wird die rund 140 Jahre alte bestehende Tunnelröhre ersetzen, die künftig als Dienst- und Rettungstollen (DRS) verwendet wird. Die beiden Tunnelröhren werden ca. alle 500 m durch insgesamt fünf Querverbindungen (QV) miteinander verbunden (Bild 2). Die Querverbindungen ermöglichen im Ereignisfall eine rasche Evakuierung aller Personen aus dem Neubautunnel

Furthermore, the technical systems are placed in the cross-passages, enabling maintenance work to be carried out during operation.

The excavation work began in autumn 2016 on the south portal in Schinznach-Dorf (SDO) and was successfully completed at the end of November 2017 after only 14 months with the breakthrough of the tunnel boring machine (TBM) at the Effingen portal (EFG).



2 Der neue Bözberg-Doppelspurtunnel (rot) mit Rettungstollen (Umbau des bestehenden Tunnels)
New Bözberg twin-track tunnel (red) with service tunnels (conversion of the existing tunnel)

Quelle/credit: SBB AG

und einen gezielten Zugriff der Interventionskräfte. Ferner werden die technischen Anlagen in den Querverbindungen platziert, sodass Unterhaltsarbeiten unter Betrieb ausgeführt werden können.

Die Vortriebsarbeiten begannen im Herbst 2016 am Südportal Schinznach-Dorf (SDO) und wurden Ende November 2017 nach nur 14 Monaten mit dem Durchschlag der Tunnelbohrmaschine (TBM) am Portal Effingen (EFG) erfolgreich abgeschlossen.

Die im Bözbergtunnel eingesetzte Einzelschild-TBM ist nur für einen Vortrieb im Fels ausgelegt. Da auf den ersten etwa 175 Tunnelmetern quartäre Ablagerungen und stark verwitterter Fels mit lockergesteinsähnlichen Eigenschaften auftreten, wurde dieser Bereich als Lockergesteinsvortrieb im Schutz eines Rohrschirms konventionell mit einem Bagger im Kalotten- und Strossenvortrieb aufgeföhren. Daran schloss sich der Hauptvortrieb mit der Einzelschild-TBM (Schilddurchmesser 12,36 m) und dem Tübbingausbau an. Dazu wurde die TBM durch die vorgängig im Lockergestein erstellte Startröhre bis an ihren Startpunkt verschoben. Anschliessend erfolgten der Ausbruch der Querverbindungen bis kurz vor den bestehenden Tunnel, der Einbau der Innenschale, der Innenausbau, die Ausstattung des Tunnels und der technischen Räume mit den bahntechnischen Anlagen und der Einbau der Fahrbahn. Die Rohbauarbeiten sind abgeschlossen und die technische Ausrüstung ist installiert und getestet. Sobald der neue Tunnel im Dezember 2020 in Betrieb geht, wird der alte Bözbergtunnel zum Rettungs- und Dienststollen umgerüstet. Die Querverbindungen werden vollständig ausgebrochen und an die alte Tunnelröhre angeschlossen.

Ausführungsplanung, Ausführung und Vorbereitung der Inbetriebnahme des Tunnels erfolgen im Modell Generalunternehmer+ durch die Implenia Schweiz AG. Für die Ausführungsplanung ist die Ingenieurgesellschaft (IG) Bözberg Plus als Subunternehmer von Implenia verantwortlich. Diese vereint die Firmen Amberg Engineering AG (Federführung), Basler & Hofmann AG, F. Preisig AG sowie Heierli AG.

2 Anwendung des Building Information Modelling (BIM) in Ausführungsplanung und Ausführung

2.1 Modellierung von Vortrieb und Ausbau der Lockergesteinsstrecke

Der Tunnelvortrieb startete am Voreinschnitt des Südportals in Schinznach-Dorf. Der Voreinschnitt selbst wurde in einem anderen Baulos vorgängig projektiert und hergestellt. Aufgrund der Höhe der Portalwand und der geotechnischen Gegebenheiten wurden der gesamte Voreinschnitt und insbesondere die Anschlagwand umfangreich gesichert. Die Schnittstelle der beiden Baulose Voreinschnitt und Tunnelbau liegt an der Portalwand.

The single-shield TBM used in the Bözberg tunnel is only designed for driving through rock. Since Quaternary deposits and heavily weathered rock with properties similar to soft ground appear in the first approx. 175 metres of tunnel, this soft ground area was excavated conventionally under the protection of a pipe umbrella with an excavator in the top and bench heading. After this, the main excavation was carried out using the single-shield TBM (shield diameter 12.36 m) and segment lining. For this purpose, the TBM was moved to its starting point through the starter tunnel which was previously created in the soft ground. The cross-passages were then broken out up to just before the existing tunnel. This was followed by the installation of the inner lining, interior fittings, equipment for the tunnel and technical rooms with the railway systems, and the carriageway. The final lining construction has been completed and the technical equipment has been installed and tested. As soon as the new tunnel goes into operation in December 2020, the old Bözberg tunnel will be converted into a service and rescue tunnel. The cross-passages will be fully completed and connected to the old tunnel.

Construction planning, construction and preparation for commissioning the tunnel are being carried out by Implenia Switzerland AG using the General Contractor+ model. The Bözberg Plus engineering association is responsible for construction planning as a subcontractor of Implenia. This unites the companies Amberg Engineering AG (lead management), Basler & Hofmann AG, F. Preisig AG and Heierli AG.

2 Applying Building Information Modelling (BIM) in Design and Construction

2.1 Modelling the Excavation and Expansion of the Soft Ground Section

Tunnel excavation started at the pre-cut (trench) of the south portal in Schinznach-Dorf. The pre-cut itself was previously projected and manufactured in another construction lot. Due to the height of the portal wall and the geotechnical conditions, the entire pre-cut and in particular the stop wall were extensively secured. The interface between the two construction lots, pre-cut and tunnel construction, is located on the portal wall.

Conventional excavation was carried out under the protection of a pipe umbrella and was secured using shotcrete, lattice girders and face bolts.

The excavation and inner lining of the soft ground section were planned on the basis of a parametric 3D model. Both the constructional measures (bored piles, prestressed rock bolts, shotcrete protection with soil anchors) as well as tunnel excavation support measures (shotcrete, 12-metre-long pipe umbrella stages), the inner lining made from cast *in situ* concrete, the sealing system (pressure-maintaining full sealing) and the complete interior fittings (walkways, lines, cable protection tubes, base filling) were modelled in the pre-cut itself.

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel

Der konventionelle Baggervortrieb erfolgte im Schutz eines Rohrschirms und wurde mit Spritzbeton, Gitterbögen und Ortsbrustankern gesichert.

Die Planung des Vortriebs und der Innenschale der Lockergesteinsstrecke erfolgte auf Basis eines parametrischen 3-D-Modells. Es wurden sowohl die bautechnischen Massnahmen im Voreinschnitt selbst (Bohrpfähle, vorgespannte Anker, Spritzbetonsicherung mit Bodennägeln) als auch die Ausbruchsicherung des Tunnels (Spritzbeton, 12 m lange Rohrschirmmetappen), die Innenschale aus Ortbeton, das Abdichtungssystem (druckhaltende Vollabdichtung) und der komplette Innenausbau (Bankette, Leitungen, Kabelschutzrohre, Sohlauauffüllung) modelliert.

Das 3-D-Modell wurde unter Berücksichtigung des effektiven Bauablaufs so erstellt, dass die Ausbruchsequenzen (Kalottenvortrieb mit Abschlagslängen von 1 m, Strossenvortrieb), die Rohrschirmmetappen und die Blockteilung der Innenschale entsprechend visualisiert, die Kubaturen und Mengen bestimmt und eine Verknüpfung mit dem Bauprogramm hergestellt werden konnte.

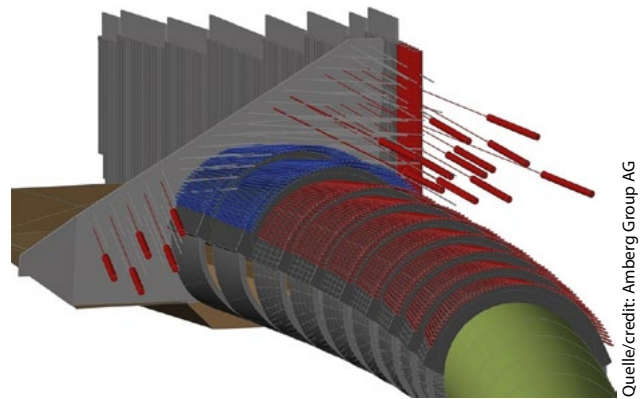
In einem ersten Schritt wurde hierzu die georeferenzierte Tunneltrasse in die Software importiert und die Tunnelprofile in 2-D entsprechend erstellt. Das Positionieren und Ausrichten der Normalprofile, die Erstellung der Volumenelemente sowie die Definition von Attributen und Familien erfolgte anschliessend in einer objektorientierten Programmierumgebung. Änderungen zum Beispiel der Ausbruchgeometrie, der Spritzbetondicke oder der Innenschalenstärke konnten auf Basis des parametrischen 3-D-Modells leicht umgesetzt werden. Die Ausführungspläne in 2-D wurden teilweise aus dem 3-D-Modell abgeleitet.

Dank des parametrischen 3-D-Modells wurden im Zuge der Vortriebsplanung und noch vor der Herstellung der Anschlagwand Kollisionen zwischen den Bauhilfsmassnahmen im Tunnel (Rohrschirm) und den vorgespannten Ankern und Bodennägeln der Portalwand erkannt. Unter Berücksichtigung von Herstellungstoleranzen wurden Lage und Richtung von Ankern und Bodennägeln so verändert, dass sie im Zuge der Rohrschirmherstellung nicht beschädigt wurden. **Bild 3** zeigt den Rohrschirmvortrieb und die Situation im Bereich der Portalwand.

2.2 Ermittlung Startpunkt TBM-Vortrieb

Im Verlauf der Tunnelstrecke ist der Übergang von Lockergestein zu Fels extrem heterogen. Der Bereich ist von unterschiedlich stark verwittertem Keuper gezeichnet.

Im Laufe des Tunnelvortriebs stellte sich die geologische Situation noch komplexer dar als ursprünglich angenommen. Mit dem Ziel, den idealen Startpunkt des TBM-Vortriebs festzulegen sowie das Quellpotenzial des Anhydrits unterhalb der Tunnelsohle zu erkunden, wurden daher zusätzliche Erkundungsbohrungen von der Oberfläche und aus dem Tunnelvortrieb heraus ausgeführt.



Quelle/credit: Amberg Group AG

3 Parametrisches 3-D-Modell der Lockergesteinsstrecke und des Voreinschnitts am Südportal

Parametric 3D model of the soft ground section and the pre-cut at the south portal

The 3D model was created taking into consideration the effective construction process so that the excavation sequences (top heading excavation with one-metre cut lengths, bench excavation), the pipe umbrella stages and block division of the inner lining were visualised accordingly, the cubature and quantities determined and a link to the construction programme could be made.

In a first step, the georeferenced tunnel route was imported into the software and the tunnel cross sections created in 2D accordingly. The positioning and adjustment of the standard cross sections, the creation of the solid elements as well as the definition of attributes and families were then carried out in an object-orientated programming environment. Changes, such as those to the excavation geometry, shotcrete thickness or inner-lining thickness could easily be implemented on the basis of the parametric 3D model. The construction plans in 2D were partly derived from the 3D model.

Parametric 3D modelling meant that collisions between the auxiliary construction/support measures in the tunnel (pipe umbrella) and the prestressed rock bolts and soil anchors from the portal wall could be detected during excavation planning and before the stop wall was constructed. Taking the manufacturing tolerances into account, the position and direction of the rock bolts and soil anchors were changed so that they were not damaged while the pipe umbrella was being drilled. **Fig. 3** shows the excavation section under the protection of the pipe umbrella and the situation in the area of the portal wall.

2.2 Determining the Starting Point for TBM Excavation

The transition between soft ground and solid rock is extremely heterogeneous throughout the course of the tunnel. The area is characterised by Keuper, which has been weathered to a varying degree.

During the course of tunnel excavation, the geological situation became even more complex than was originally as-

Als Kriterien für den optimalen Startpunkt galten erstens eine Felsüberdeckung von mindestens 4 m (entspricht ca. 1/3 des TBM-Durchmessers) über der Firste und zweitens die Lage der Tunnelsohle ausserhalb der quellfähigen Keuperschichten. Damit wird ein Anheben des ganzen Tunnels infolge Quelldrucks und fehlender Bodenauflast über der Firste verhindert.

Es wurde entschieden, ein 3-D-Baugrundmodell mit allen geologischen und geotechnischen Informationen zu erstellen. Dieses war in der Kombination mit dem Modell der Vortriebsplanung die Grundlage für die Festlegung des optimalen TBM-Startpunktes.

Für das 3-D-Baugrundmodell wurde die geologische Prognose als Ausgangsmodell verwendet. Die Informationen aus dem geologischen Befund während des Vortriebs (Ortsbrustaufnahmen) sowie die Profile der Sondierbohrungen wurden laufend georeferenziert in dieses Modell eingespeist. Es wurde ein umfassendes 3-D-Modell der ersten 300 Vortriebsmeter erstellt (Bild 4).

Um den Verlauf der Schichtgrenzen zwischen Locker- und Festgestein zu modellieren, wurde die Modellierungssoftware Leapfrog Geo (Seequent) verwendet. Anschliessend wurde diese mit dem Rohbaumodell in Revit (Autodesk) verknüpft.

Das 3-D-Baugrundmodell ermöglichte auf Basis der laufenden Daten aus Ortsbrustaufnahmen und Sondierbohrungen regelmässige Aktualisierungen des Verlaufs der lithologischen Grenzen. Bild 5 zeigt die Anordnung der geologischen Ortsbrustaufnahmen, die im Zuge des Vortriebs erstellt und im Modell entsprechend abgebildet und verknüpft wurden.

Die geologische Prognose wurde laufend aktualisiert, präzisiert und mit der Vortriebsplanung verknüpft. Das 3-D-Baugrund-

modell wurde mit dem Ziel der Bestimmung des idealen Startpunktes für die TBM-Excavation und der Erforschung des Quellpotentials der Anhydritschichten unterhalb der Tunnelsohle, zusätzliche Sondierbohrungen von der Oberfläche und vom vortreibenden Tunnel aus durchgeführt.

Die Kriterien für den optimalen Startpunkt umfassten, erstens, eine Festgesteinabdeckung von mindestens 4 Metern (entsprechend ca. 1/3 des TBM-Durchmessers) über der Tunnelsohle und, zweitens, die Lage der Tunnelsohle ausserhalb der quellfähigen Keuperschichten. Dies verhindert das Anheben des gesamten Tunnels durch Quelldruck und den Mangel an Bodenauflastung über der Sohle.

Es wurde beschlossen, ein 3D-Unterbodenmodell zu erstellen, das alle geologischen und geotechnischen Informationen enthält. In Kombination mit dem Excavationsplanungsmodell bildete dies die Grundlage für die Bestimmung des optimalen TBM-Startpunktes.

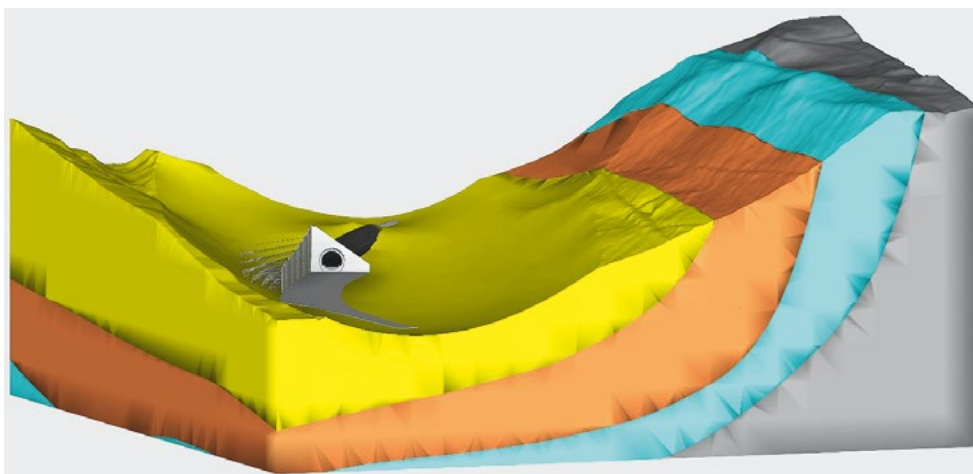
Geologische Prognosen wurden als Quelle für das 3D-Unterbodenmodell genutzt. Informationen aus den geologischen Befunden während der Excavation (Flächenkartierung) und den explorativen Bohrkreuzungen wurden kontinuierlich in das Modell in georeferenzierter Weise eingespeist. Ein umfassendes 3D-Modell wurde für die ersten 300 Excavationsmeter erstellt (Bild 4).

Die Modellierungssoftware Leapfrog Geo (Seequent) wurde zur Modellierung des Verlaufs der Schichtgrenzen zwischen lockerem und festem Gestein genutzt. Dieses wurde anschliessend mit dem Rohbaumodell in Revit (Autodesk) verknüpft.

Das 3D-Unterbodenmodell ermöglichte es, den Verlauf der lithologischen Grenzen auf Basis der kontinuierlich neuen Daten aus der Flächenkartierung und den explorativen Bohrkreuzungen regelmäßig zu aktualisieren, zu präzisieren und mit der Vortriebsplanung zu verknüpfen.

Bild 5 zeigt die Anordnung der geologischen Flächenkartierungen, die während der Excavation erstellt und im Modell entsprechend abgebildet und verknüpft wurden.

Die geologische Prognose wurde kontinuierlich aktualisiert, präzisiert und mit der Excavationsplanung verknüpft. Das 3D-Unterbodenmodell repräsentierte die lokalen Bedingungen in der Nähe des Tunnels sehr genau. Für Planer, Auftragnehmer und Bauherren führte dies zu einer konsistenten Bewertung der geologischen Situation. Auf dieser Grundlage konnte der optimale Startpunkt für die TBM frühzeitig bestimmt werden.

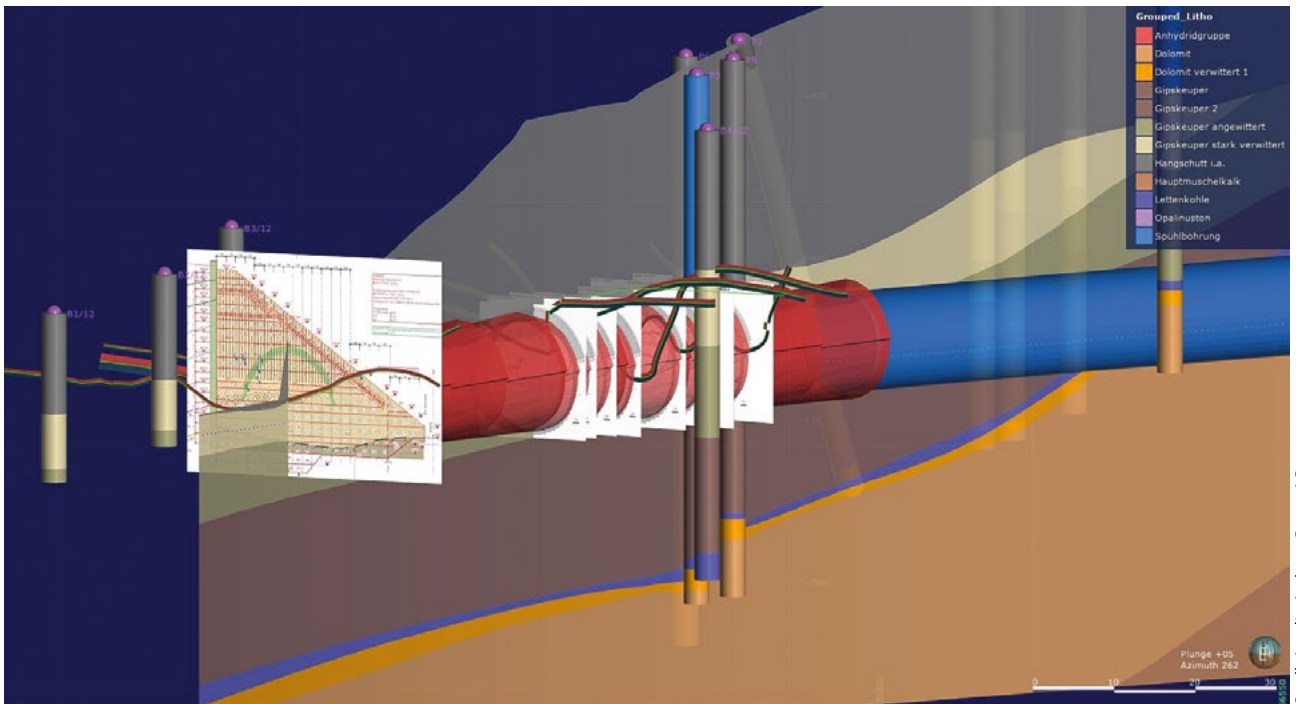


Quelle/Credit: Amberg Group AG

4 Geologisches 3-D-Baugrundmodell mit dem Südportal des Bözbergtunnels im Schweizer Faltenjura (quartäre Deckschicht nicht dargestellt). Grau: Anhydritgruppe. Blau: Muschelkalk. Orange: Trigodonus-Dolomit. Gelb: Gipskeuper

Geological 3D subsoil model with the south portal of the Bözberg tunnel in the Swiss Faltenjura ("folded Jura") (Quaternary surface layer not shown). Grey: anhydrite group. Blue: shell limestone. Orange: trigodonus dolomite. Yellow: Gipskeuper

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel



Quelle/Credit: Amberg Group AG

5 Ortsbrustaufnahmen und Kernbohrungsdaten
Face mapping and core drilling data

modell stellte die örtlichen Verhältnisse im Tunnelnahbereich sehr genau dar. Bei Planern, Unternehmern und Bauherrn führte das zu einer übereinstimmenden Beurteilung der vorliegenden geologischen Situation. Auf dieser Grundlage konnte der optimale Startpunkt der TBM frühzeitig festgelegt werden.

2.3 Simulation des TBM-Verschubs

Nach der Fertigstellung der Lockergesteinsstrecke wurde die am Portal in Schinznach-Dorf montierte TBM durch den ausgebrochenen Tunnel bis an ihren Startpunkt verschoben. Im Zuge der Abklärung über die Art und Weise des Verschubs und der Platzverhältnisse wurde eine Untersuchung für den Vershub auf Stahlschienen durchgeführt. Dabei wurden auf Basis des 3-D-Rohbaumodells mit der Software Blender folgende Aspekte analysiert:

- Minimalabstand der TBM von der Ausbruchsicherung während des Vershubvorgangs;
- Vershub der TBM auf Stahlschienen;
- Rotation der TBM um ihre Mittelachse (Verrollen).

Die Simulation des Verschubs (Bild 6) erfolgt mit einer konstanten Kraft entlang der TBM-Achse. Auf die TBM selbst wirkt zusätzlich ihr Eigengewicht. Der Vershub wird entlang vordefinierter Stahlschienen simuliert.

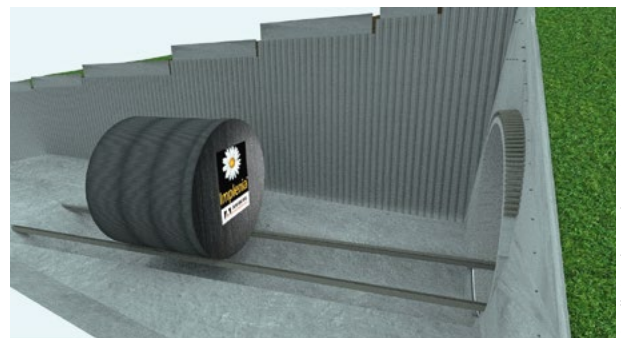
Die Software Blender wird üblicherweise für Videoanimationen (Blender Render und Cycles Render) oder für Videospieldentwicklungen (Blender Game Engine) verwendet. Dank eines anspruchsvollen Physik-Simulators können Kräfte und Bewegungen sehr gut modelliert werden. Blender Game Engine wurde für die Vershubsimulation und Blender Render zur Si-

2.3 Simulating TBM Skidding

After completion of the soft ground section, the TBM installed at the portal in Schinznach-Dorf was skidded through the excavated tunnel to its starting point. During the course of clarifying the manner of skidding and the spatial conditions, an investigation was carried out for the skidding on steel rails. The following aspects were analysed on the basis of the 3D shell model with Blender software:

- minimum distance of the TBM from the excavation support during the skidding process;
- skidding of the TBM on steel rails;
- rotation of the TBM about its central axis (rolling).

The skidding is simulated (Fig. 6) using a constant force along the TBM axis. The TBM is also affected by its own weight. The sliding is simulated along predefined steel rails.



6 Simulation Vershub TBM am Portal SDO
TBM skidding simulation at the SDO portal

Quelle/Credit: Amberg Group AG

mulation der Kollisionen beziehungsweise zur Ermittlung der Abstände zwischen der TBM und der Tunnelwand verwendet. Es sind gewisse Einschränkungen in der Simulation zu berücksichtigen, zum Beispiel müssen Kurven durch Polygonzüge dargestellt werden und durch die hier definierten Kollisionsgrenzen kann der Abstand zwischen TBM und Schienen nicht exakt modelliert werden.

Aufgrund der Modellierung wurde von der Implenia Schweiz AG ein alternativer Verschiebungsvorgang mit einem Schreitwerk gewählt und erfolgreich eingesetzt.

3 BIM-Anwendungsfälle Pilotprojekt SBB

In einem mehrstufigen Prozess wurden von der SBB in der Summe 25 Pilotprojekte für BIM-Anwendungsfälle ausgewählt. Das von der IG Bözberg Plus sowie von der Implenia Schweiz AG konzipierte BIM-Pilotprojekt für die Kabelanlage am Bözbergtunnel wurde vom SBB-Führungsteam PJ als eines dieser 25 BIM-Pilotprojekte ausgewählt.

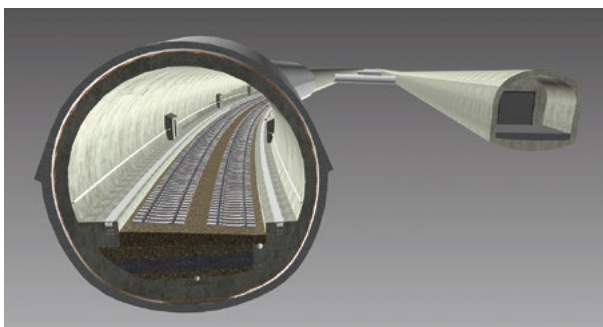
Der Fokus des Pilotprojekts liegt in der BIM-Modellierung von Kabelwegen sowie in der Entwicklung und Definition der Schnittstelle zum Unterhalt. Zusätzlich wurde der Kabeleinbau über erweiterte Realität (Augmented Reality, AR) und virtuelle Realität (Virtual Reality, VR) pilotiert.

Folgende Ziele und Anwendungsfälle wurden beim Pilotprojekt verfolgt:

- (A) digitale Bauwerksmodelle der Kabelwege im Bözbergtunnel, Erarbeitung von Modellierungsstandards für Kabelanlagen der SBB;
- (B) modellbasierte Überwachung und Unterhalt, Pilotierung der Integration digitaler Modelle beim Betrieb und Unterhalt einer Bahninfrastruktur;
- (C) BIM to Field – Pilotierung der Anwendung von Augmented/Virtual Reality beim Einbau der Kabelanlagen.

3.1 Digitale Bauwerksmodelle

Die digitalen Bauwerksmodelle (Bild 7) wurden auf Basis der Ausführungsunterlagen parametrisch in 3-D erstellt und mit ausgewählten Attributen versehen. Mit der Erstellung der digitalen Bauwerksmodelle wurde die entsprechende Grundlage



Quelle/credit: Amberg Group AG

7 Digitales BIM-Modell des Bözbergtunnels
Digital BIM model of the Bözberg tunnel

Blender software is commonly used for video animation (Blender Render and Cycles Render) or for video game development (Blender Game Engine). Thanks to a sophisticated physics simulator, forces and movements can be modelled very well. The Blender Game Engine was used for the skidding simulation and the Blender Render to simulate collisions and determine the distances between the TBM and tunnel wall. Certain restrictions have to be taken into account in the simulation; for example curves have to be represented by polygons and it is not possible to model the distance between the TBM and the rails precisely, due to the collision limits defined here.

Based on the modelling, Implenia Schweiz AG selected and successfully used an alternative skidding process with a shifting unit.

3 BIM Application Scenarios for the SBB Pilot Project

By means of a multistage process, SBB selected a total of 25 pilot projects for BIM application scenarios. The BIM pilot project designed by IG Bözberg Plus and Implenia Schweiz AG for the cable system at the Bözberg tunnel was selected by the SBB management team PJ as one of these 25 BIM pilot projects.

The pilot project focuses on the BIM modelling of cable routes and the development and definition of the maintenance interface. In addition, cable installation was piloted using augmented reality (AR) and virtual reality (VR).

The following objectives and application scenarios were pursued during the pilot project:

- (A) digital building models for the cable routes in the Bözberg tunnel, formulation of modelling standards for SBB cable systems;
- (B) model-based monitoring and maintenance, piloting the integration of digital models for operating and maintaining a rail infrastructure;
- (C) BIM to Field – piloting the application of augmented/virtual reality when installing the cable systems.

3.1 Digital Building Models

The digital building models (Fig. 7) were created parametrically in 3D based on the construction documents and furnished with selected attributes. With the creation of the digital building models, the corresponding basis for further application scenarios and cable installation was laid. As per effective cable installation, the BIM models were revised and the local situation of the cable network system A/B was incorporated accordingly ("as built" model).

Table 1 lists the modelled components and model granularity in relation to the geometric level of detail of the model (level of geometry, LoG) and the information content of the components by means of attributes (level of information, LoI).

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel

für die weiteren Anwendungsfälle sowie den Kabeleinbau gelegt. Gemäss effektivem Kabeleinbau wurden die BIM-Modelle überarbeitet und die Vor-Ort-Situation der Kabelnetzanlage A/B entsprechend eingearbeitet (As-built-Modell).

Die modellierten Bauteile und die Modellgranularität in Bezug auf den geometrischen Detaillierungsgrad des Modells (Level of Geometry, LoG) und den Informationsgehalt der Bauteile durch Attribute (Level of Information, LoI), sind in [Tabelle 1](#) aufgelistet.

3.2 Model-Based Monitoring and Maintenance

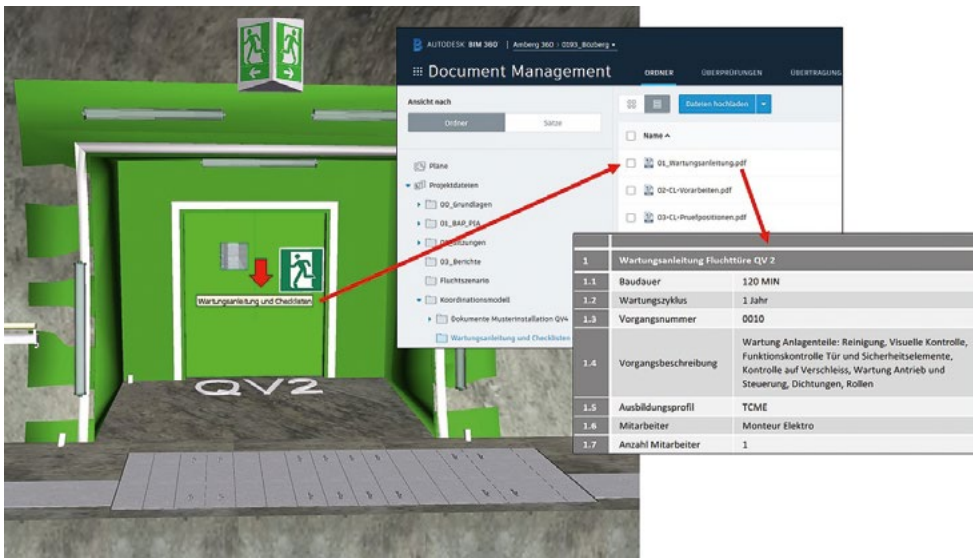
During the course of the pilot project, a rough concept for using digital models and definition for operational and maintenance purposes was developed together with SBB. Maintenance is carried out on the basis of the created BIM models and linked documents.

The information/documents relevant for maintaining (e.g. maintenance information, maintenance intervals and checklists) an SBB standard maintenance case for an emergency

Bauwerksmodell / Building model	LoG / LoI	Modellierung / Modelling
Achse / Axis	100 / 400	Achsen des gesamten Tunnelbauwerkes / Axes of the entire tunnel construction
Doppelspurtunnel Rohbau / Double-track tunnel construction	300 / 300	Aussenschale, Abdichtung und Innenschale (alle Profiltypen für Lockergesteinsstrecke MUL und TBM-Strecke) / External lining, waterproofing system and inner lining (all profile types for loose rock section/mechanically assisted tunnelling in loose rock and TBM section)
Doppelspurtunnel Unterbau / Double-track tunnel substructure	200 / 200	Sohlaufüllung / Base filling
Doppelspurtunnel Kabeltrasse / Double-track tunnel cable routing	400 / 400	Bankett beidseitig, Kabelschutzrohre, Kabelkanal, Kabelschächte mit Deckel / Walkway on both sides, cable protection tube, cable channel, cable shafts with cover
Querverbindungen Rohbau / Tunnel construction cross-passages	300 / 300	Aussenschale, Abdichtung, Innenschale, Trennwand QV, Wände Technikräume / External lining, waterproofing system, inner lining, CP separating wall, engineering rooms walls
Querverbindungen Kabeltrasse / Cable routing cross-passages	400 / 400	Sohlaufbau, Kabelschutzrohre, Kabelkanal, Kabelschächte mit Deckel, Personenschutzrisen / Base structure, cable protection tube, cable channel, cable shafts with cover, personal protection niches
Dienst- und Rettungsstollen (DRS) Rohbau / Service and rescue tunnels (SRT) tunnel construction	300 / 300	Innenhülle, Schleusen inkl. Schleusentore, Anbindung an Querverbindungen / Inner shell, locks incl. lock doors, connection to cross-passages
Bahntechnikgebäude Rohbau / Rail technology building construction	300 / 300	Bahntechnikgebäude EFG und SDO / Rail technology building EFG and SDO
Kabel Tunnel / Cables tunnel	500 / 500	Netz A/B gem. effektivem Kabeleinbau / Network A/B according to effective cable installation
Kabel Querverbindung / Cables cross-passages	500 / 500	Netz A/B gem. effektivem Kabeleinbau / Network A/B according to effective cable installation
Kabel Tunnel / Cables tunnel	400 / 400	Haupterdleiter inkl. Erdungsringe, TC, LWL-Kabel, Speisung Handlaufbeleuchtung / Main earth wire including earthing rings, TC, fibre optic cable, handrail lighting supply
Kabel Querverbindung / Cables cross-passages	400 / 400	Haupterdleiter, TC, LWL-Kabel / Main earth wire, TC, fibre optic cable
SRM und Anlagen Bahntechnik / SRM and rail technology systems	300 / 400	Ausstattung Technikräume mit Schaltschränken und Beleuchtung / Equipment of technical rooms with control cabinets and lighting
Doppelspurtunnel Fahrbahn / Double-track tunnel carriageway	400 / 400	Fahrbahn zwischen Portal SDO bei Tm 420 und Tm 1'200, Schotterstrecke SDO, feste Fahrbahn LVT Spezial / Carriageway between SDO portal at Tm 420 and Tm 1200, SDO gravel section, slab track LVT special
Leiteinrichtungen / Guidance system	400 / 400	Fluchttüre QV, Beleuchtung und Signal-Anstrich Eingang QV, Fluchtwegschilder im gesamten Tunnelbauwerk, Nottelefon, Handlauf / CP emergency doors, lighting and signal painting CP entry, escape route signs throughout tunnel construction, emergency telephone, handrail

Tabelle 1 Digitale Bauwerksmodelle mit Angaben der Modellgranularität

Table 1 Digital building model with information on the model granularity



8 Verlinkungen von Dokumenten mit dem Modell
Links from the documents to the model

3.2 Modellbasierte Überwachung und Unterhalt

Im Rahmen des Pilotprojekts wurde ein Grobkonzept für den Einsatz digitaler Modelle und die Definition für Betriebs- und Unterhaltzwecke gemeinsam mit der SBB erarbeitet. Der Unterhalt erfolgt dabei auf Basis der erstellten BIM-Modelle und der damit verknüpften Unterlagen.

Die für den Unterhalt relevanten Angaben/Unterlagen (z. B. Wartungsangaben, Wartungsintervalle und Checklisten) eines SBB-Standardwartungsfalles einer Fluchttüre in der Querverbindung wurden mit dem 3-D-Modell verknüpft. Im Modell wurden Verlinkungen zu den Dokumenten geschaffen (Bild 8), welche auf einer Projektplattform (Common Data Environment, CDE) gespeichert sind und bei Bedarf aktualisiert und ausgetauscht werden können.

3.3 Modellbasiertes Fluchtszenario

Für SBB-interne Schulungszwecke und externe Schulungen für Interventionskräfte und Ereignisdienste wurden, ausgehend vom 3-D-Bauwerksmodell, Simulationen für ein mögliches Fluchtszenario erstellt. Dies vor dem Hintergrund, dass der Neubautunnel bis zur Fertigstellung des Dienst- und Rettungstollens nur mehr vom SBB-Unterhaltungspersonal betreten werden darf.

Das Fluchtszenario wurde mittels einer Videosimulation sowie einer interaktiven Computersimulation umgesetzt. Die Videosimulation zeigt den Fluchtweg aus einem bestimmten Punkt im Tunnel bis zur Querverbindung und durch diese bis zum DRS.

Die interaktive Simulation (Bild 9) ermöglicht das selbstständige virtuelle Sichbewegen von bis zu zehn Benutzern durch das gesamte Tunnelbauwerk (Neubautunnel, Querverbindungen mit Technikräumen, Dienst- und Rettungstollens).

door in the cross-passage were linked with the 3D model. In the model, links to the documents were created (Fig. 8), which are stored on a project platform (common data environment, CDE) and can be updated and exchanged if necessary.

3.3 Model-Based Escape Scenario

For internal SBB training purposes and external training for intervention forces and event services, simulations for a possible escape scenario were created based on a 3D building

model. This is against the background that until the service and rescue gallery is completed, only SBB maintenance staff are permitted to enter the new tunnel.

The escape plan scenario was implemented using a video simulation and an interactive computer simulation. The video simulation shows the escape route from a certain point in the tunnel up to the cross-passage and through this to the SRT.

Interactive simulation (Fig. 9) enables the independent virtual movement of up to ten users through the entire tunnel structure (new tunnel, cross-passages with technical rooms, service and rescue tunnels). Users can start the simulation at selected points in the tunnel and enter all cross-passages and technical rooms.

In order to create the most realistic possible conditions, the LED lights in the handrail, the lights inside and outside



9 Interaktive Simulation durch den Tunnel
Interactive simulation through the tunnel

Quelle/credit: Amberg Group AG

Quelle/credit: Amberg Group AG

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel

Die Benutzer können die Simulation an ausgewählten Punkten im Tunnel beginnen und alle Querverbindungen und Technikräume betreten.

Um möglichst reale Bedingungen zu schaffen, werden die LED-Leuchten im Handlauf, die Leuchten innerhalb und ausserhalb der Personenschutznischen sowie die Signalleuchten am Eingang jeder Querverbindung so geschaltet, dass drei unterschiedliche Lichtverhältnisse ausgewählt werden können:

- dunkel: Betriebsmodus;
- mittel: Ereignisfall;
- hell: Umgebungslicht.

3.4 BIM to Field – Anwendung erweiterter Realität (AR) für Kabeleinbau

Der Anwendungsfall BIM to Field setzte sich in diesem Pilotprojekt aus zwei Teilaufgaben zusammen: Einerseits wurde ein modellbasierter Kabeleinbau mithilfe von AR/VR vorgenommen. Andererseits wurde das Abrufen relevanter Dokumente für die Musterinstallation im BIM-Modell (Technikraum Netz-A und QV-Fluchttür) umgesetzt.

3.4.1 Kabelzugarbeiten

Die Kabelzugarbeiten für das Netz A und B wurden mithilfe erweiterter Realität (AR) und modellbasiert in der zweiten Märzhälfte 2019 durchgeführt (Bild 10). Im Vorfeld wurde das Personal für den bevorstehenden Kabeleinbau direkt auf der Baustelle geschult und Arbeitsanweisungen wurden definiert.

Der modellbasierte Kabeleinbau, welcher eine Navigation in einem digitalen Bauwerksmodell erlaubt, hat sich als Arbeitsvorbereitung und schliesslich für den eigentlichen Arbeitsprozess auf der Baustelle als grosse Hilfe erwiesen.

Für die erweiterte Realität wurde die Software VisualLive eingesetzt, mit deren Hilfe die gesamte Kabelanlage als Modell in der Realität dargestellt werden kann.

Die Benutzung von Augmented Reality hat auch gewisse Probleme in Hinblick auf die Arbeitssicherheit auf der Baustelle gezeigt. Durch die Navigation mittels Tablets ist sich der Benutzer nicht immer im Klaren darüber, was Realität und was Modell ist; somit können offene Schächte oder Absperrungen zur Gefahrenzone werden. Die grössten Schwierigkeiten wurden beim Einrichten desjenigen Modells wahrgenommen, bei welchem Punkte im Modell und in der Realität ausgewählt werden müssen. Bei diesem Prozess muss sich der Benutzer im realen Raum bewegen und im virtuellen Modell die Punkte auswählen.

Alle Kabelzugarbeiten zum Netz A und B wurden protokolliert sowie Änderungen zur geplanten Kabellegung aufgenommen und anschliessend das 3-D-Bauwerksmodell angepasst. Dem Bauherrn liegt nun ein BIM-Modell (Bild 11) gemäss effektivem Kabeleinbau vor («as built»).

the personal protection niches and the signal lights at the entrance of each cross-passage are switched so that three different lighting conditions can be selected:

- dark: operating mode;
- medium: event;
- bright: ambient light.

3.4 BIM to Field – Applying Augmented Reality (AR) for Cable Installation

The BIM-to-Field application case in this pilot project consisted of two sub-tasks. On the one hand, model-based cable installation was carried out using AR/VR. On the other hand, retrieval of relevant documents for sample installation was implemented in the BIM model (technical room grid A and CP emergency door).

3.4.1 Cable-Pulling Work

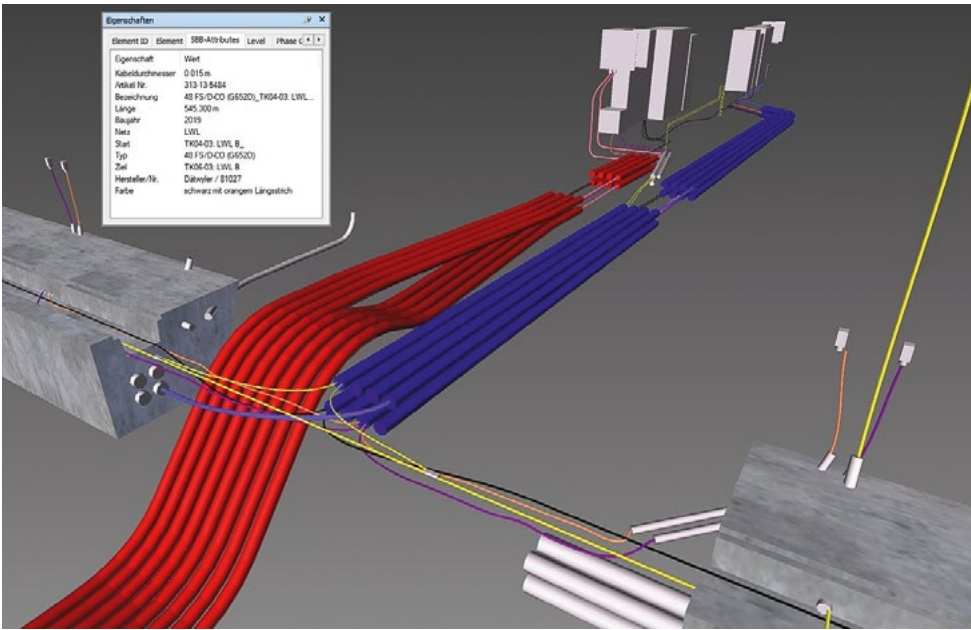
Cable-pulling work for networks A and B was carried out using augmented reality (AR) and on the basis of the modelling during the second half of March 2019 (Fig. 10). The staff for the upcoming cable installation were trained directly on the construction site in advance and the work instructions were defined.

Model-based cable installation, which facilitates navigation in a digital building model, has proven to be of great help as preparatory work and ultimately for the actual working process on the construction site.



10 AR-Anwendung auf der Baustelle
AR application on the construction site

Quelle/credit: Amberg Group AG



Quelle/Credit: Amberg Group AG

11 Digitales Kabelmodell
Digital cable model

3.4.2 Musterinstallation relevanter Dokumente

Die Hinterlegung relevanter Dokumente für eine Musterinstallation im Modell basiert auf den Grundlagen aus der modellbasierten Umsetzung des Kabeleinbaus für das Netz A/B. Mit der Umsetzung wurde eine entsprechende Bedienungsanleitung für die relevanten Dokumente für die Musterinstallation in der Querverbindung QV4 verfasst und bereitgestellt. Darin wurden aufgenommen:

- Dokumente für Schaltschränke (Netz A) im Technikraum (Bild 12) und Fluchttür;
- Verknüpfen der Dokumente mit dem BIM-Modell und der Projektplattform (CDE);
- Bedienungsanleitung.



Quelle/Credit: Amberg Group AG

12 Hinterlegte Dokumente in den Schaltschränken
Documents stored in the control cabinets

VisualLive software was used for augmented reality in order that the entire cable system could be represented as a model in reality.

The use of augmented reality has also highlighted certain problems relating to occupational safety on the construction site. Navigating by using tablets means that the user is not always clear about what is real and what is a model; open shafts or barriers may become a danger zone. When setting up the model, the greatest difficulties were observed when certain points had to be selected in the model

and in reality. During this process, the user has to move in the real environment and select the points in the virtual model.

All cable-pulling work for grids A and B were logged: changes to the planned cable laying were recorded; and subsequently the 3D building model was adapted. The client now has a BIM model (Fig. 11) as per effective cable installation ("as built").

3.4.2 Sample Installation of Relevant Documents

Storage of the relevant documents for sample installation in the model is based on the principles of model-based implementation of the cable installation for grid A/B. With the implementation, a corresponding operating manual was written and made available for the relevant documents for sample installation in cross-passage CP4. It included:

- documents for control cabinets (grid A) in the technical room (Fig. 12) and emergency door;
- document links to the BIM model and the project platform (CDE);
- an operating manual.

4 Final Consideration

Parametric 3D modelling and Building Information Modelling (BIM) were used successfully in project planning and construction.

Digitisation and BIM in Construction Using the Example of the New Construction of the SBB Bözberg Tunnel

4 Schlussbetrachtung

In der Projektplanung und Projektausführung kamen parametrische 3-D-Modellierungen und das Building Information Modelling (BIM) erfolgreich zum Einsatz.

Das parametrische 3-D-Modell des Lockergesteinsvortriebs ermöglichte ein frühzeitiges Identifizieren und Lösen der Probleme zwischen den Bauhilfsmassnahmen im Tunnel (Rohrschirm) und den vorgespannten Ankern und Bodennägeln der Portalwand.

Die Kombination des Vortriebsmodells im Lockergestein mit dem 3-D-Modell der komplexen Geologie ermöglichte es, den optimalen Startpunkt des TBM-Vortriebs frühzeitig festzulegen. Des Weiteren konnte der TBM-Verschub nach Fertigstellung der Lockergesteinsstrecke simuliert und anschliessend erfolgreich durchgeführt werden.

Die Modelle boten jederzeit Unterstützung bei der Planung der komplexen Geometrien, erlaubten eine übersichtliche Darstellung der Schnittstellen und konnten für präzise Berechnungen herangezogen werden. Das BIM-Modell des Lockergesteinsabschnitts, in das alle Submodelle eingeflossen sind, liefert Informationen, die mit traditionellen Methoden nicht zu errechnen sind. Hier ist das Ganze mehr als die Summe seiner Teile.

Die BIM-Pilotanwendungen haben das BIM-Modell des Bözbergtunnels auf das gesamte Tunnelsystem erweitert. Neue Technologien und Methoden konnten als Arbeitsvorbereitung oder direkt auf der Baustelle erprobt werden. Schnittstellen zum Unterhalt und modellgestützte Prozesse konnten erfolgreich getestet werden.

The parametric 3D model of excavation in soft ground made it possible to identify and solve the problems between the auxiliary construction/support measures in the tunnel (pipe umbrella) and the prestressed rock bolts and soil anchors of the portal wall at an early stage.

The combination of the excavation model in soft ground with the 3D model of the complex geology enabled the optimal starting point for TBM excavation to be determined early on. Furthermore, after completion of the soft ground section, the TBM skidding was simulated and then successfully carried out.

The models offered support at all times with the design of complex geometries. They enabled clear representation of the interfaces and could be used for precise calculations. The BIM model of the soft ground section, into which all sub-models have been incorporated, provides information that cannot be calculated using traditional methods. In this case, the whole is more than the sum of its parts.

BIM pilot applications have extended the BIM model of the Bözberg tunnel to the entire tunnel system. New technologies and methods could be tested as preparatory work or directly on the construction site. Interfaces for maintenance and model-based processes were successfully tested.

Literatur/References

- [1] Grossauer, K., Hürzeler, J. P., Schmid, W., Zieger, T.: BIM-Anwendungen in der Planung und Ausführung der Lockergesteinsstrecke am Bözbergtunnel [BIM applications in the design and construction of the soft ground section at the Bözberg tunnel]; Trade journal "Tunnel", Publication (01/2020), p. 16–25.



Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau

Inga-Leena Schwager, Dipl.-Ing. (TU), MBA, Amberg Loglay AG, Zürich/CH

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau

In der Bauwirtschaft ist die Produktivität in den vergangenen Jahren kaum gestiegen. Zudem gehört die Branche zu einem der am wenigsten digitalisierten Wirtschaftszweige. Dieser Artikel zeigt auf, wie interdisziplinäre Exzellenz zu einem grundlegenden Wandel der Baubranche und einer Steigerung ihrer Produktivität führen könnte. Eine «intelligente» Logistik innerhalb der Smart City wird entscheidend dazu beitragen, dass sich die herkömmliche Praxis nicht nur auf der Baustelle, sondern entlang der gesamten Wertschöpfungskette verändert.

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

The construction sector is lagging behind productivity and is one of the least digitised industries. This article will show how interdisciplinary excellence enabled by technology will shake the construction industry to its core and cause it to increase productivity. Smart logistics – through the smart city – will serve as the key player in the process of changing common practices not only on-site but also along the entire supply chain.

1 Einleitung

Bauen ist ein facettenreicher Prozess, der Ingenieure, Planer, Kunden, Financiers, Bauunternehmen, Bürger, kommunale Behörden und Ämter zusammenbringt; ein Prozess, der ein Bauprojekt mit seiner unmittelbaren Umgebung konfrontiert; ein Prozess, bei dem eine ganze Reihe hochspezialisierter Tätigkeiten koordiniert werden müssen; ein Prozess der Risikoanalyse und Massnahmenplanung; ein Prozess der Überwindung von Hürden; ein Prozess, bei dem eine Vielzahl hochdynamischer Disziplinen kombiniert werden.

Das Bauwesen spielt eine wesentliche Rolle für die Entwicklung unserer Smart Cities. Es gehört zu den Schöpfern urbaner Räume, zu den Moderatoren gegenüber kommunalen Behörden und zu den Bereitstellern des Fuhrparks im Zusammenspiel mit digitalen Netzen.

Zugleich gehört die Baubranche zu den Wirtschaftszweigen, in denen die Digitalisierung am wenigsten weit fortgeschritten ist [1]. Zurückführen lässt sich dies auf die unzähligen zu integrierenden Faktoren sowie die Zersplitterung der eingesetzten Fachkräfte.

1 Introduction

Construction is a process: a process of bringing together engineers, planners, clients, financiers, contractors, citizens, local authorities and countries; a process of bringing together a project and its environment; a process of aligning a string of highly specialised tasks; a process of risk analysis and action planning; a process of defeating the odds; a process of layering a colourful palette of highly dynamic disciplines.

Construction plays a huge role in the development of our smart cities. It is one of the creators of urban spaces. One of the facilitators to local authorities. One of the providers of heavy-duty tools merging with digital grids.

Construction is also one of the least digitised industries [1] due to the pure multitude of factors that it needs to incorporate and primarily due to the diversity of its human capital.

Digitisation is due to happen not only because it is the future, but also because construction needs accelerated efficiency. Construction has been lagging behind GDP growth by 30 % [2] over the past 20 years, with an average profit margin of around 1 % to 2 % or even lower.

Pourquoi utiliser le numérique pour l'espace souterrain et l'intégrer dans la conception architecturale ?

Innovations de la construction en hauteur appliquées au souterrain

Le secteur de la construction, à la traîne en matière de productivité, compte parmi les grands retardataires de la révolution numérique. Cet article montre comment l'excellence interdisciplinaire qui résulte de l'utilisation des technologies va secouer le secteur de la construction en son cœur et générer des gains de productivité. Une logistique intelligente – dans le cadre d'une ville intelligente – sera la clé d'un processus de changement des pratiques communes non seulement sur site, mais aussi tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Par l'exemple d'un chantier utilisant la logistique intelligente et les informations de la ville intelligente, nous montrerons ici comment améliorer la collaboration et gérer plus efficacement le temps, mais aussi l'espace disponible pour atteindre les plus hautes performances.

Perché digitalizzare lo spazio sotterraneo e farne una parte del design architettonico?

Innovazioni dall'edilizia del sopra-suolo per l'edilizia del sottosuolo

Il settore edile è in ritardo in termini di produttività ed è uno dei settori meno digitalizzati. Questo articolo mostrerà come l'eccellenza interdisciplinare resa possibile dalla tecnologia sia destinata a scuotere il settore edile nelle fondamenta e a spingerlo ad aumentare la produttività. La logistica intelligente – attraverso la città intelligente – costituirà un soggetto chiave nel processo di cambiamento delle pratiche comuni, non solo in sito, ma anche lungo l'intera catena di distribuzione. Utilizzeremo l'esempio di un cantiere che usa la logistica intelligente e le informazioni di una città intelligente per rendere possibile la collaborazione e l'uso efficiente di tempo e spazio per raggiungere la prestazione di picco.

Digitalisierung muss jedoch auch im Bausektor stattfinden – nicht nur, weil sie die Zukunft ist, sondern auch, weil die Effizienzsteigerung in diesem Sektor beschleunigt werden muss. Mit einer durchschnittlichen Umsatzrentabilität von 1 bis 2 Prozent oder sogar weniger liegt die Baubranche seit 20 Jahren um 30 Prozent hinter dem globalen Wirtschaftswachstum zurück [2].

Silodenken, Duplikation und eine ungünstige Vergabepaxis machen den Sektor hochgradig ineffizient. Der Schlüssel zu mehr Effizienz besteht in interdisziplinärer Exzellenz. Um diese zu erreichen, muss jedoch ein grundlegender Wandel stattfinden, indem bestehende Silowände eingerissen und Baustellen in die digitalen Netze der Smart City transformiert werden.

Am Anfang dieses Artikels widmen wir uns den verschiedenen Stakeholdern und Herausforderungen der Bauwirtschaft und wenden uns anschliessend dem Kontext der Smart City und möglichen Synergien zu. Unter dem Begriff «Smart City» verstehen wir in erster Linie die Infrastruktur, die es ermöglicht, Güter, Personen und Fahrzeuge datenbasiert zu mobilisieren.

Abschliessend wollen wir uns der Frage widmen, wie sich interdisziplinäre Exzellenz erreichen lässt, indem man die smarte Logistik in den Mittelpunkt der einzelnen Geschäftsprozesse rückt. Auf diese Weise können wir uns ein Bild davon machen, wie die Bauwirtschaft in naher Zukunft aussehen könnte.

Der vorliegende Artikel liefert keine Antworten auf die Frage, wie sich Innovation im Tunnelbau erreichen lässt. Vielmehr soll

Silo mentality, duplication and bad contracting practices make the sector highly inefficient. The key to efficiency is interdisciplinary excellence, and in order to achieve this, the sector will have to fundamentally change by abolishing old silo walls and transforming sites into the digital grids of the future city.

After examining the stakeholders and challenges of the construction sector, we will extend the analysis to the smart city context and possible synergies. With "smart city", we mainly mean infrastructure that enables the mobility of goods, people and traffic based on information.

We conclude with a focus on how to enable interdisciplinary excellence by putting smart logistics into the heart of each business process and operation. Doing this will allow us to create an image of what the near future could look like.

This essay is not going to give you an answer to how to innovate the tunnelling industry. It aims to engage your thoughts to extend beyond your own silo walls and meet us along the way to interdisciplinary excellence.

2 Context (or Why the Construction Industry Is Flawed)

2.1 Status Quo of the Construction Industry

In this chapter, we will briefly introduce the current common practices of the construction sector which show a strong tendency of protectionism and silo mentality.

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

- Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau

er den Leser dazu anregen, sein eigenes Silodenken zu überwinden, damit wir gemeinsam auf dem Weg zur interdisziplinären Exzellenz in der Baubranche einen Schulterchluss erzielen.

2 Kontext – oder warum sich die Bauwirtschaft wandeln muss

2.1 Der Status quo der Bauwirtschaft

In diesem Abschnitt werden wir kurz auf die gängigen Methoden und Praktiken eingehen, die derzeit in der Baubranche üblich sind und einen starken Hang zu Protektionismus und Silodenken aufweisen.

2.1.1 Stakeholder, Bedingungen, Herausforderungen

Angesichts eines allgemeinen Bevölkerungswachstums, steigender Investitionen im Immobilien- und Infrastrukturbereich sowie eines hohen Sanierungsbedarfs ist die wirtschaftliche Situation für den Bausektor vielversprechend. Demgegenüber stehen die historisch niedrigen Zinsen, die Spekulation und hohe Grundstückspreise zur Folge haben und zugleich einen Preiskampf nach unten begünstigen. Der Mangel an Fachkräften bei gleichzeitig hoher Auslastung resultiert in Produktionsdefiziten und einem Kapazitätsmangel in der Bauwirtschaft. Laut einem Artikel der *Frankfurter Allgemeinen Zeitung* (FAZ) stieg der Überhang an genehmigten, aber nicht gebauten Wohnungen in Deutschland im Jahr 2019 auf 700.000 an, weil es an qualifizierten Bauunternehmen fehlt [3]. Komplexe Bauvorschriften und eine komplizierte Vergabep Praxis zwingen Projektbeteiligte zu protektionistischem Verhalten. Dennoch ist der Wettbewerb hart und kleine Unternehmen kommen und gehen.

Langzeitentwicklungen und entsprechende Trendlinien zeigen, dass sich diese langsame, konservative Branche wandeln muss.

2.1.2 Digitalisierungstrends

Der Begriff «Building Information Modelling» – kurz BIM – ist heutzutage in aller Munde, und «Big Data» taucht als magisches Stichwort inzwischen in jedem strategischen Konzept auf. Vorfertigung, Modularisierung und Standardisierung von Planungs- und Produktionsprozessen sind die Lösungen, die am schnellsten genannt werden, wenn es um die Frage geht, wie Kosteneinsparungen erzielt werden können.

All diese wunderschönen Theorien versprechen, dass die gesamte Wertschöpfungskette in eine Reihe von mit Informationen gefüllten Elementen verwandelt werden kann, die bereit sind, von einer magischen Roboterhand montiert zu werden. Der Schlüssel zu dieser magischen Bauweise erscheint denkbar einfach und wird weltweit auf jeder Baumesse und in jedem Gremium von der Kanzel gepredigt: Zusammenarbeit. Dabei handelt es sich um ein gemeinsames Ziel, das noch nie so stark betont wurde, aber auch noch nie so weit davon entfernt war, realisiert zu werden.

Eine ganze Branche träumt von ihrer Erlösung und hält dennoch an ihrer alten Gewohnheit des Silodenkens fest. BIM,

2.1.1 Stakeholders, Conditions, Challenges

The economic situation for the construction industry is promising: population growth, an increase in real estate and infrastructure investments, high renovation demand. But low interest rates causing real estate speculation and high land prices are forcing construction prices down. A shortage of skilled labour coupled with a high workload causes production deficits and scarcity of construction companies. According to the *Frankfurter Allgemeine Zeitung* newspaper (FAZ), Germany, for example, faced a construction blockage of 700,000 housing units in 2019 due to a lack of qualified companies [3]. Complex building regulations and complicated contracting practices force stakeholders to protectionism. Nonetheless, competition is fierce, with small companies appearing and disappearing frequently.

Long-term trends and resulting trend lines are showing that this slow, conservative industry will be forced to change.

2.1.2 Digitisation Trends

Everyone is talking about BIM – Building Information Modelling. And “big data” is the magical keyword spreading and multiplying through every strategic concept. Prefabrication, modularisation and standardisation of planning and production processes is the fastest answer to cross anyone’s lips when it comes to cost savings.

These are beautiful theories promising that a whole supply chain will become one string of information-filled elements ready to be assembled by a magical robotic hand. The key to this magical way of construction seems easy and is preached at every construction expo and by every committee across the globe: collaboration. A common goal that has never been so strongly emphasised, but that has never been so far from realisation.

An industry is dreaming of its salvation and yet still holds on to its established way of working: silo mentality. BIM, big data and modularisation are practiced in silos, each one using its own code and models, limited by contracts and hierarchies.

2.1.3 Gaps and Pitfalls

The path to the completion of a project is loaded with gaps and pitfalls. Each time the construction process is interrupted, it is due to a gap between planning phases, stakeholders, building regulations, contract conditions or translation of one attribute to another attribute. This phenomenon breaches from the macro to the very micro level where, for example, each good on-site will be displaced several times before actually being installed. Accumulated labour and energy used for this process can be factored by X as a lost asset.

Displacement happens because of different planning silos: the floor plan silo, the time schedule silo, the assembly silo and delivery silo, etc. Who can bring them together if each one is listed in a different contract? Who can bring them together when experience tells us that plans are never right,

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

• Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

Big Data und Modularisierung werden in voneinander abgetrennten Silos praktiziert, die ihre je eigenen Codes und Modelle in den engen Grenzen bestehender Verträge und Hierarchien nutzen.

2.1.3 Lücken und Fallgruben

Auf dem Weg zur Fertigstellung eines Projekts lauern zahlreiche Fallgruben. Jede Unterbrechung des Bauprozesses resultiert aus einer Lücke zwischen Planungsphasen, Stakeholdern, Bauordnungen, vertraglichen Bestimmungen oder der Übersetzung von einem Attribut in ein anderes. Dieses Phänomen erstreckt sich von der Makro- bis auf die kleinste Mikroebene, wo beispielsweise jedes Material vor dem tatsächlichen Einbau mehrmals auf der Baustelle bewegt wird. Die akkumulierte Arbeit und Energie, die dafür aufgewendet werden, können als Vermögensverlust um den Faktor X multipliziert werden.

Die Ursache dafür ist das Vorhandensein mehrerer unterschiedlicher Planungssilos: Es gibt das Grundrissilo, das Terminsilo, das Montagesilo, das Liefersilo usw. Und wer könnte all diese verschiedenen und voneinander getrennten Pläne zusammenführen, wenn es für jeden Plan einen eigenen Vertrag gibt? Wer könnte sie zusammenführen, wenn wir aus Erfahrung wissen, dass Pläne niemals aufgehen, Termine niemals eingehalten werden und die Anlieferung von Baustoffen niemals läuft wie geplant?

2.2 Urbane Trends

Dieser Abschnitt liefert einige Fakten zu Urbanisierung und Smart Cities – zwei wichtige Akteure in der Diskussion über Möglichkeiten der Effizienzsteigerung in der Bauwirtschaft.

2.2.1 Urbanisierung und Megastädte

Als Megastadt werden Städte mit mehr als zehn Millionen Einwohnern bezeichnet. 2030 werden zwei Drittel der Weltbevölkerung in urbanen Räumen wohnen, die meisten davon in Mega- oder sogar Gigastädten (mit mehr als 50 Millionen Einwohnern). Die Zahl der Megastädte wird bis 2030 von heute 29 auf über 40 ansteigen [4].

Ausserdem gibt es weitere Faktoren, die das Problem verkomplizieren, beispielsweise die fortschreitende Individualisierung in unseren Gesellschaften. Das Leben in Singlehaushalten und psychologische Entwicklungen wie die «Neurourbanistik» [5] sorgen dafür, dass der soziale Stress unter Stadtbewohnern um 50 Prozent zunimmt.

Die rasend schnell voranschreitende Urbanisierung bringt besondere Herausforderungen mit sich: die Neuorganisation von Verkehr, Energie, Kultur und Wirtschaft. Oder anders gesagt: die Neuerfindung der städtischen Infrastruktur.

2.2.2 Die Ursprünge der Smart City

Wer hätte gedacht, dass die vom Schweizer Architekten und Stadtplaner Le Corbusier entworfene Idealstadt «Ville Contemporaine» [Die zeitgenössische Stadt] von 1922 in der heutigen Stadtplanung noch einmal zu solcher Prominenz kom-

time schedules never upheld and delivery never goes as planned?

2.2 Urban Trends

Here we will give some facts about urbanisation and smart cities – important players in the discussion of enabling more efficiency.

2.2.1 Urbanisation and Megacities

Megacities are, by definition, cities with a population above ten million inhabitants. By 2030, two thirds of the global population will be living in urban areas, most in megacities if not in gigacities (population above 50 million). The number of megacities will increase from 29 today to over 40 in 2030 [4].

Other factors further complicate the issue, such as the development of individualism in our society. Living in single housing units and psychological tendencies such as “neuro-urbanism” [5] cause an increase in stress levels by 50 % for people living in cities.

With rapid urbanisation come specific challenges: the new organisation of transport, energy, culture and economies. In short, a reinvented city infrastructure.

2.2.2 Smart City Origins

Who could have known that Swiss architect Le Corbusier's 1922 designs of “La Ville Contemporaine” [the contemporary city] would become so prominent again in today's urban development. The demand for the efficient use of urban space screams for revamping his ideas and bringing them into the 21st century.

Already 100 years ago, Le Corbusier's vision of creating a vertical city incorporated mobility as a major driver of urban architecture. He organised the spaces dedicated to different functions such as trains, cars, pedestrians, work, shopping and eating into vertical layers (Fig. 1) stacked one above the other in huge structures. Today, we know that separation can easily cause ghettos, isolation, monoculture and the inefficient use of space.

The smart city can help us to review separation and layering through a new lens. Urban spaces, architecture, functions, energy and people will be more and more connected with each other through data and information sharing. This makes our daily routines faster and more efficient.

What we are not aware of is that more efficiency will free up space and time – resources that we call “invisible space”.

3 Findings (or What to Target)

Let's try to put these topics into the context of construction. How can we enable a huge construction site to be supplied and built efficiently with the following factors: tackling the specific industry challenges, bridging the gap with collaboration and using a smart city grid.

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

- Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau

men würde? Denn der Bedarf an einer effizienten Nutzung urbaner Räume schreit förmlich danach, Le Corbusiers Ideen zu überarbeiten und in das 21. Jahrhundert zu überführen.

Schon vor 100 Jahren war Mobilität in Le Corbusiers Vision von der Erschaffung einer vertikalen Stadt der wichtigste Treiber der Stadtarchitektur. Le Corbusier organisierte die Räume mit ihren verschiedenen Funktionen – beispielsweise Züge, Autos, Fussgänger, Betriebe, Geschäfte und Restaurants – in vertikalen Schichten (Bild 1), die in Hochhäusern quasi übereinandergestapelt wurden. Heute wissen wir, dass eine solche Trennung allzu schnell in Gentrifizierung, Isolation, Monokulturen und eine ineffiziente Raumnutzung münden kann.

Die Smart City kann uns helfen, Trennung und Schichtung aus einer neuen Perspektive zu betrachten. Urbane Räume, Architektur, Funktionen, Energie und Menschen werden durch Daten und Informationsaustausch zunehmend miteinander verbunden sein. Das macht unseren Alltag schneller und effizienter.

Was uns häufig jedoch nicht bewusst ist: Mehr Effizienz schafft Raum und Zeit – also Ressourcen, die wir als «unsichtbaren Raum» bezeichnen.

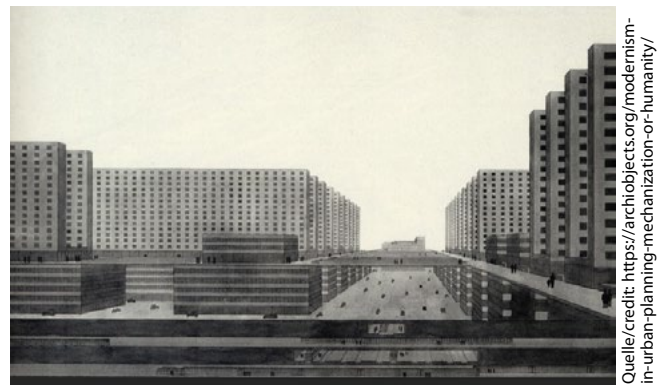
3 Erkenntnisse oder was wollen wir erreichen?

Versuchen wir nun, diese Themen auf das Bauwesen zu übertragen: Wie können wir dafür sorgen, dass Grossbaustellen effizient versorgt und bebaut werden können und zugleich branchenspezifische Herausforderungen bewältigt werden, das reibungslose Zusammenspiel aller am Projekt beteiligten Akteure gewährleistet ist und ein Smart-City-Netz genutzt wird?

3.1 Mehr Effizienz – die grösste Herausforderung der Bauwirtschaft

Drei wesentliche Herausforderungen (s. Kapitel 2) werden zwangsläufig dazu führen, dass neue Geschäftsmodelle entwickelt werden, um geringen Baupreisen entgegenzuwirken, den Fachkräftemangel zu beheben und gängige Praktiken der Vergabe und des Nachtragsmanagements zu verändern:

- In Bezug auf die Baupreise sind Bauunternehmen häufig gezwungen, Aufträge zu Preisen anzunehmen, die nicht alle Kosten und Risiken abdecken, um dann zu versuchen, Geld mit einem besseren Nachtragsmanagement zu verdienen, das jedoch auf ineffiziente Planung und ineffizientes Stakeholdermanagement spekuliert.
- Eine Baustelle ist zumeist alles andere als ein angenehmes Arbeitsumfeld und erfreut sich unter der Generation der Millennials nur wenig Beliebtheit. Der Arbeitsbeginn in den frühen Morgenstunden und die körperlich anstrengende Arbeit bei Staub, Hitze, Regen und Kälte gelten bei den meisten als unattraktiv. Dementsprechend ist die Zahl der verfügbaren Fachkräfte sehr begrenzt.



Quelle/credit: <https://archobjects.org/modernism-in-urban-planning-mechanization-of-humanity/>

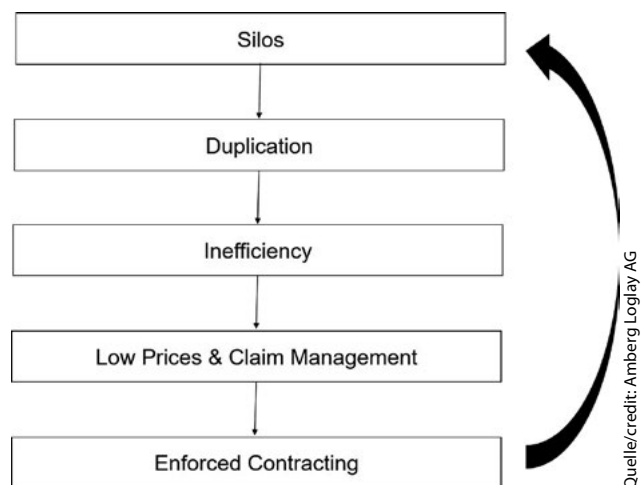
1 Le Corbusiers "La ville contemporaine" zeigt die vertikalen Ebenen in der Stadt

Le Corbusier "La ville contemporaine" showing vertical layers of the city

3.1 Industry Challenge – Improve Efficiency

Three major challenges (Chapter 2) will inevitably force new business models to evolve to tackle lower production prices, amplify human capital and alter contracting practices and claim behaviour.

- Taking a closer look at the production prices, contractors are forced to sign contracts below any positive profit margin and will try to make money using an ever-improving claim management, which is based on inefficient planning and stakeholder management.
- Working on a construction site is far from a fancy place to be and enjoys little support from the millennial generation. Working in the early morning hours, in the dust, heat, rain and cold under physically challenging conditions is not an attractive workplace. This limits the selection of qualified workers considerably.
- Knowing about contractors' claim management practices, investors and clients force contracts, quality control and payroll to inefficient levels, creating an atmosphere of distrust and aggression.



Quelle/credit: Amberg Loglay AG

2 Flussdiagramm: Prozess der gängigen Praktiken im Bausektor

Flowchart: Process of common practices in the construction sector

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

• Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

- Investoren und Kunden kennen die Nachtragsmanagementpraxis von Bauunternehmen und zwingen Verträge, Qualitätskontrolle und Bezahlung auf ein ineffizientes Niveau, wodurch eine von Misstrauen und Feindseligkeit geprägte Atmosphäre entsteht.

Die Bewältigung jeder dieser Herausforderungen setzt voraus, dass althergebrachte Vorgehensweisen komplett überholt werden, damit die Bauwirtschaft wieder lebensfähig wird. Der Sektor hat sich selbst an einen Teufelskreislauf aus gängiger Praxis gekettet (Bild 2) und hat nun Schwierigkeiten damit, aus diesem auszubrechen.

3.2 Zusammenarbeit und Digitalisierung

Daten sind Gold. Daten sind die Zukunft. Daten sind allgegenwärtig.

Nur: Wie finden wir die richtige Methode, um Daten zu erfassen und sie für unsere Zwecke zu nutzen? Wo fangen wir an und wo hören wir auf? Und wem möchten wir unsere Daten zur Verfügung stellen? Daten müssen erfasst und auf logische Weise über eine öffentliche Datenbibliothek jedermann zugänglich gemacht werden.

Die Zusammenarbeit über Open-Source-Plattformen und (BIM-)Modellierungssoftware ist entscheidend, um das Potenzial der Digitalisierung voll auszuschöpfen und die gewohnten Verhaltensweisen von Stakeholdern und damit die heutige Baubranche grundlegend zu verändern. Dabei gilt es, den Sektor in einen leistungsfähigen digitalen «Spielplatz» zu verwandeln, der für die Fachkräfte von morgen interessant ist. So wenden wir für jedes Projekt das System eines zentralen Datenbestandes an, um alle verfügbaren Daten zu erfassen und einen übergreifenden Datenaustausch zu ermöglichen (Bild 3).

Each one of these challenges needs a total overhaul of common practices to be viable again. The construction industry chained itself to a vicious cycle of common practices (Fig. 2) and is struggling to get out of it.

3.2 Collaboration – Mind the Gap

Data is gold. Data is the future. Data is everywhere.

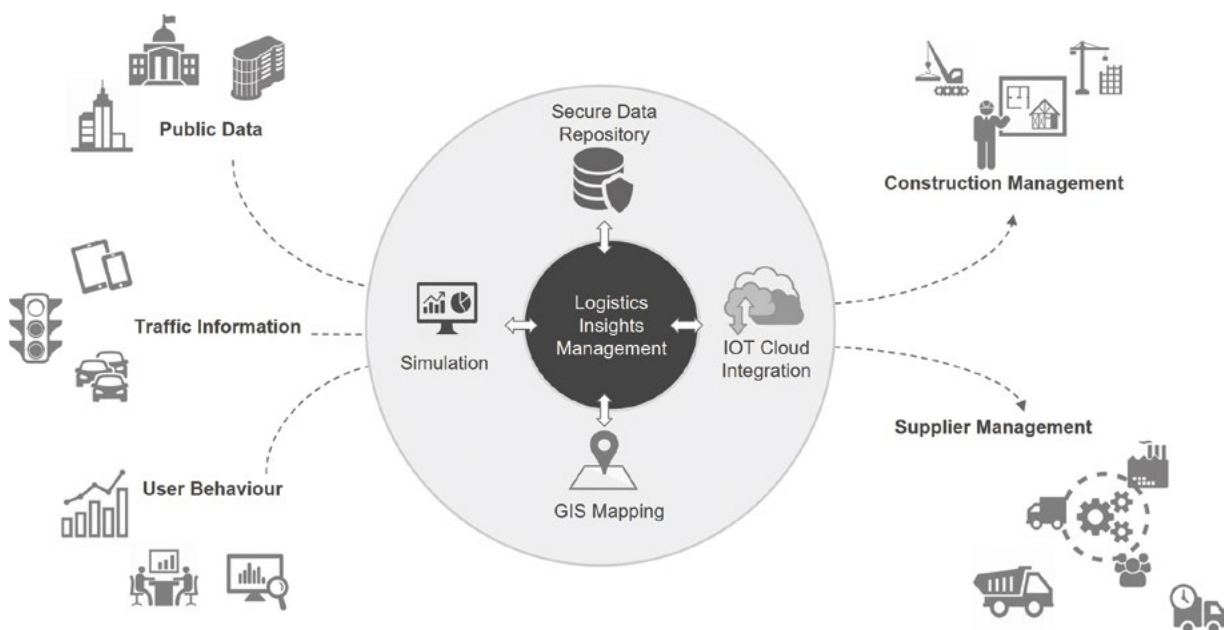
Yet, how do we find the right way of collecting and using it in our context? Where do we start and where do we end? And whom do we want to give our data? Data needs to be collected and made available in a logical way via a public library to everyone.

Collaboration through open-source platforms and (BIM) modelling software is the main concept in exploiting the potential of digitisation to fundamentally change the behaviour of stakeholders and the face of construction today to make it a high-performance digital playground which can capture the interest of the future workforce.

We apply a system of one single point of truth to each project to gather all available data, process it and enable equal information sharing (Fig. 3).

3.3 Use the Smart City Grid – Get Ready for Mega Urbanisation

Everyone is talking about the “smart city”, but what does it really mean? We cannot say, but we can choose what our definition is. A study of a Swiss working group claims that the smart city will be a place of permanent development and adaption, a “canvas of transformation” [6]. The smart city is not only limited as a physical space, but rather a space for living. Planning a space for living in the face of uncertainty

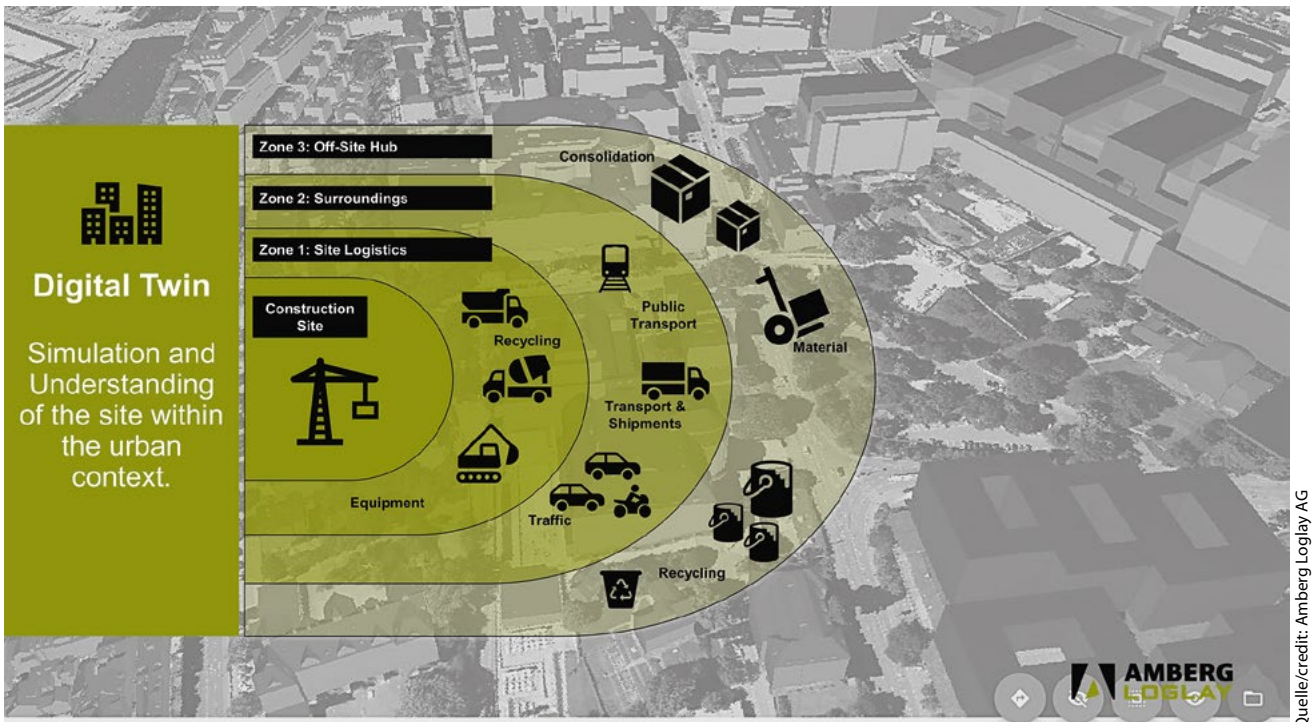


3 Plattform für intelligente Logistik: Eingabe und Ausgabe von Informationen und Datenauswertung
Smart logistics platform: Input and output of information and data evaluation

Quelle/credit: Amberg Loglay AG

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

- Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau



Quelle/credit: Amberg Loglay AG

4 Intelligente Logistik im Rahmen der Smart City
Smart Logistics within the context of the Smart City

3.3 Die Smart City als vernetzter Lebensraum – ein Erfolgsrezept für die Mega-Urbanisierung

Die «Smart City» ist heutzutage in aller Munde. Aber was genau ist das eigentlich? Eine einheitliche Definition gibt es nicht, sodass wir für uns selbst entscheiden können, was wir darunter verstehen. Die Studie einer Schweizer Arbeitsgruppe definiert die Stadt der Zukunft als einen Ort der permanenten Entwicklung und Anpassung, eine «Leinwand der Transformation» [6]. Dabei beschränkt sich die Smart City nicht auf einen physischen Raum, sondern bezeichnet vielmehr eine Art Lebensraum. Die Planung von Lebensraum angesichts einer ungewissen Zukunft setzt Flexibilität und Anpassungsfähigkeit voraus. Das System, das dabei entsteht, muss in der Lage sein, laufend dazuzulernen, und Technologie bildet somit die Basis für die Erschaffung smarter Lebensräume.

means maintaining flexibility and adaptability. It will become a system which is able to learn at all times, and technology will be the enabler to create smart living spaces.

Construction will use the dynamics of smart logistics, data and BIM technology not just on-site but more importantly for the whole supply chain (Fig. 4), using the information the smart city provides us with. Today, a construction site finishes where the land deed ends. Tomorrow, construction will be part of a smart logistics network within the smart city. We are collecting this data to create the grid.

4 Discussion/Use Case/Outlook

We are testing new thinking for smart logistics at the prominent construction site in the city of Basle for one of the

Name/Name	Neue Zentrale und hochmodernes Forschungszentrum / New headquarters and high-tech research centre
Funktion/Function	Vier Hochhäuser, davon zwei Türme / Four high-rise buildings of which two skyscrapers (mit 15 bzw. 25 Stockwerken) / (15 storeys and 25 storeys) Zwei Konferenzzentren/Two conference centres
Beschreibung/Description	Parkhaus (sechsgeschossige Tiefgarage) / Parking (six storeys underground)
Budget/Budget	ca. 1,3 Mrd. Schweizer Franken / approx. 1.3 billion Swiss francs
Bauzeitraum/Construction	2019–2023
Fläche/Volume	695.000 m ³ / 695,000 m ³

Quelle/credit: Amberg Loglay AG

Table 1 Fakten und Zahlen zum Anwendungsfall (Projektname und Kunde anonymisiert)

Table 1 Facts and figures of use case project (project name and client anonymised)

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

- Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

Im Bauwesen wird das dynamische Zusammenspiel von smarter Logistik, Daten und BIM-Technologie nicht nur auf der Baustelle genutzt – tatsächlich informiert die Smart City mit den Daten, die sie uns liefert, die gesamte Wertschöpfungskette (Bild 4). Heute ist eine Baustelle auf die Abmessung des jeweiligen Grundstücks begrenzt. In Zukunft wird das Bauwesen zu einem festen Bestandteil eines «intelligenten» Logistiknetzwerks innerhalb der Smart City. Wir erfassen schon heute die Daten, um dieses Netzwerk zu erschaffen.

4 Diskussion/Anwendungsfall/Ausblick

In diesem Abschnitt wollen wir diese neue Denkweise der smarten Logistik anhand des prominenten Baseler Bauprojekts eines der weltweit grössten Pharmaunternehmen untersuchen, das von einem namhaften Schweizer Architekturbüro entworfen wurde.

4.1 Herausforderungen des Projekts

- Bauzeit: um das Projekt innerhalb von nur vier Jahren fertigzustellen, muss im Bau kontinuierlich Höchstleistung erbracht werden. Alle Dokumente müssen fortlaufend aufeinander abgestimmt werden und jeder Planungs-, Ausschreibungs- und Bauplan sofort auf jede Verzögerung oder Gefährdung reagieren.
- Stakeholder: in einem Team, das in Spitzenzeiten aus ca. 120 Planern und 1.200 Bauarbeitern besteht, sind Abstimmungsprobleme und Lücken im Informationsaustausch die Regel, sodass ein übergreifender Datenaustausch eine echte Herausforderung darstellt.
- Materialdichte: fehlende Lagermöglichkeiten für Baustoffe und mangelndes Platzangebot zur Sicherstellung von Umlaufbestand; wenig Platz für den Transport von Baustoffen per Lastwagen; begrenzte Verfügbarkeit von Aufzügen für den Vertikaltransport.

4.2 Lösung

Unser Konzept besteht darin, smarte Logistik zum zentralen Dreh- und Angelpunkt des gesamten Bauprozesses zu machen, anstatt auf mittelmässige Logistik zu setzen, bei der lediglich Paletten von A nach B, nach C, nach XYZ bewegt werden. Zu diesem Zweck bedienen wir uns einer datenbasierten Logistik: Dieses intelligente System verbindet die Materialflüsse mit dem Bauzeitenplan und den Bauwerkstopologien, um ineffiziente Abläufe auf ein Minimum zu reduzieren (Bild 5). Jede Palette «weiss», wann sie auf der Baustelle ankommen muss und wo das gelieferte Material gelagert und eingebaut werden soll. Dadurch verkürzt sich die Bauzeit automatisch um schätzungsweise 20 Prozent.

4.2.1 Analyse und Rationalisierung

Um den Komplexitätsgrad dieses Megaprojekts zu verstehen und das smarte Logistikkonzept auf dessen Anforderungen zuschneiden zu können, führen wir zunächst eine umfassende Prozessanalyse durch. Dabei werden BIM-Daten und Zeitpläne (4D-Planung) mit dem Bauprozess und den erfassten

largest pharmaceutical companies in the world designed by famous Swiss architects.

4.1 Challenges of the Project

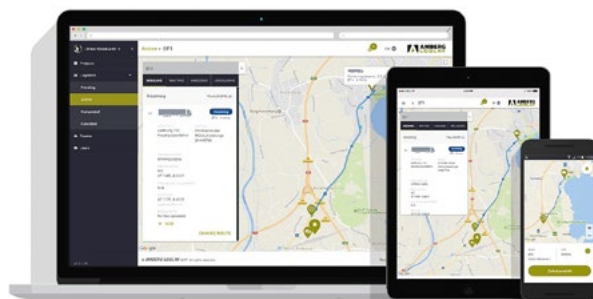
- Construction schedule: Ensuring a construction period of only four years means constructing at peak performance. Every set of documents needs to be aligned constantly. Every planning, tendering, shipping and construction schedule needs to react immediately to any kind of delay or hazard.
- Multitude of stakeholders: Collaboration problems and a high number of gaps of information are common in a team of around 120 planners and 1,200 construction workers at peak times. This is a real challenge for equal information sharing.
- Density of material: Lack of space to store material and ensure work progress as well as lack of space to transport material on-site by trucks and move vertically in a limited number of lifts.

4.2 Solution

Our concept is to put smart logistics into the heart of the construction process, not mediocre logistics, meaning pushing boxes around from A to B to C to XYZ. We will use data-driven logistics: a smart system which will link transportation flows with the construction schedules and floor plans so that all inefficiencies can be reduced to a minimum (Fig. 5). Every box will know when it has to arrive on-site and where it needs to be stored and assembled, automatically improving construction time by an estimated 20 %.

4.2.1 Analysis and Streamlining

We started with a thorough process analysis to understand the complexity of this megaproject in order to tailor its smart logistics. We linked BIM data and schedules (4D planning) with the construction process and collected data sets (Fig. 6). This way, we can identify and simulate risks, weaknesses and bottlenecks and reduce them before they happen. We structure the information to enter it into our software solution. The building process is streamlined, inefficiencies detected and eliminated, and stakeholders aligned. The information is collected on a platform which, based on the volume, resources and time, identifies the best way and timing for material to arrive.

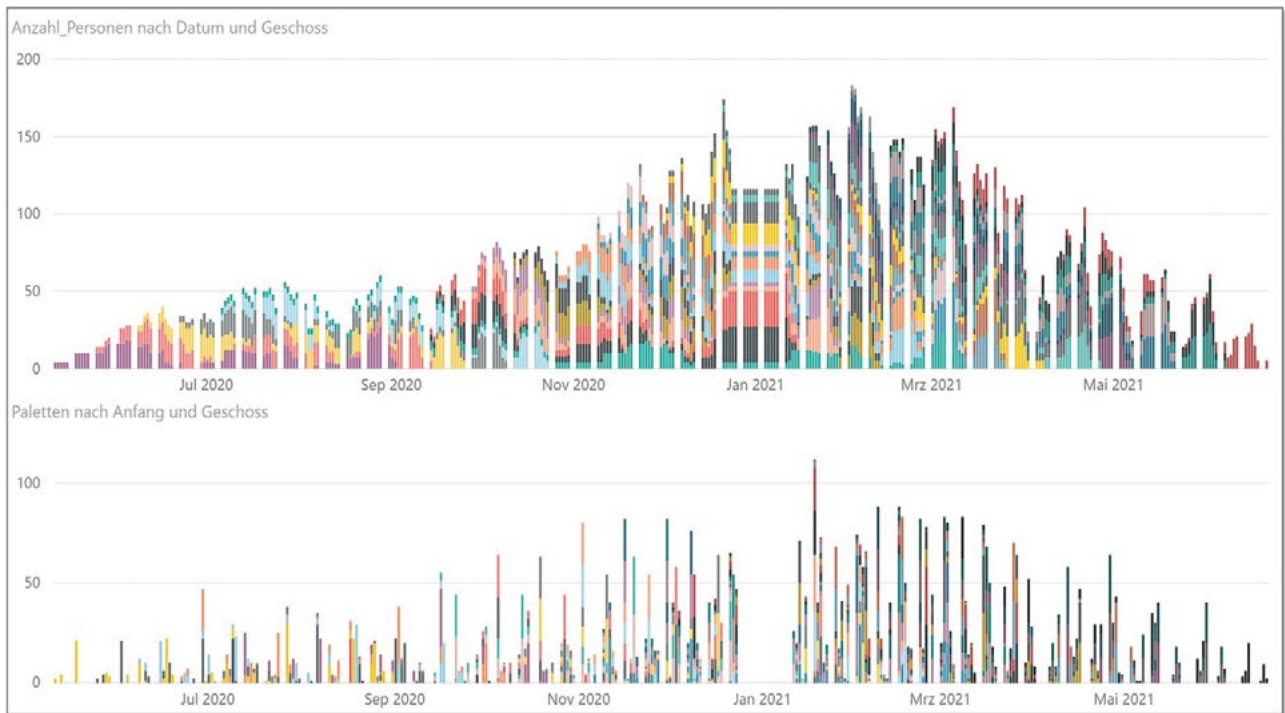


5 Amberg Loglay Logistik-Software für alle Geräte
Amberg Loglay Logistics Software for all devices

Quelle/credit: Amberg Loglay AG

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

- Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau



Quelle/credit: Amberg Loglay AG

6 Datenanalyse 1: Analyse der Nutzungshäufigkeit vertikaler Verkehrsmittel
Data Analytics Case: Analysing Frequency of Vertical Equipment Use

Datensätzen verknüpft (Bild 6). Auf diese Weise lassen sich Risiken, Schwachstellen und Engpässe ermitteln, simulieren und bereits reduzieren, bevor sie überhaupt auftreten. Die Daten werden strukturiert und in die Softwarelösung eingegeben. Der gesamte Bauprozess wird rationalisiert, ineffiziente Abläufe werden aufgedeckt und eliminiert und alle Stakeholder koordiniert. Die Daten werden auf einer zentralen Plattform gespeichert, die auf Grundlage von Volumina, Ressourcen und Zeit sowohl die bestmögliche Methode als auch den bestmöglichen Zeitpunkt für die Anlieferung des Materials ermittelt.

4.2.2 Einsatz ausserhalb der Baustelle

Ausserhalb der Baustelle nutzen wir einen Hub als Zwischenlager und Umschlagplatz, um die Versorgung der Baustelle zu optimieren (Bild 7). Das Ziel besteht darin, den Verkehr (von Fahrzeugen, Baustoffen und Personen) zur und auf der Baustelle zu reduzieren. Dazu nehmen wir das digitale Modell einer Stadt, importieren es in eine Datenbank und

4.2.2 Off-Site Usage

Leaving the site behind, we will use an off-site hub to repack and optimise delivery (Fig. 7) with the objective of reducing traffic (vehicles, goods, people) to and on-site. We take the digital model of a town, import it into a database and add all the available city information such as traffic flows. The off-site hub and the construction site are now connected via data on one platform. The time schedule will be linked to the delivery schedule and will organise all available delivery slots on-site using the volumes in the BIM model.

4.2.3 Specialised Logistics Contractor and IoT

To ensure operation, smart logistics is going to be managed by a team of logistics staff on-site and at the hub. The team will play a key role in ensuring that material flow, equipment, transport and recycling are aligned and executed according to plan. The team of humans is supported by IoT solutions such as sensors that monitor the use of lifts



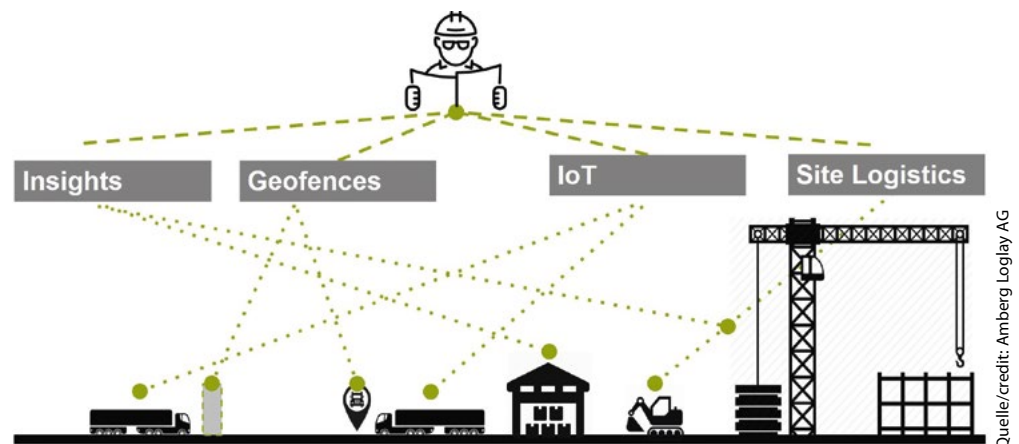
Quelle/credit: Amberg Loglay AG

7 Prozess der konsolidierten und durchgängigen Lieferungen (konventionelle Mittel)
Process of consolidated and efficient deliveries (conventional means)

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

- Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

ergänzen alle verfügbaren Daten wie z.B. Verkehrsflüsse. Der Hub und die Baustelle sind nun über einen einheitlichen Datenbestand auf einer zentralen Plattform miteinander verknüpft. Der Bauzeitplan wird mit dem Anlieferungsplan abgestimmt, sodass alle verfügbaren Zeitfenster für die Anlieferung auf Grundlage der Volumina im BIM-Modell organisiert werden können.



8 Das Spektrum von IoT und Sensoren im Einsatz bei intelligenter Logistik
The range of IoT and sensors for smart logistics

Quelle/credit: Amberg Loglay AG

4.2.3 Spezialisierter Logistikdienstleister und IoT

Um einen reibungslosen Ablauf sicherzustellen, wird die smarte Logistik von einem Team aus Logistikmitarbeitern auf der Baustelle und im Hub organisiert. Dieses Team spielt eine entscheidende Rolle, um sicherzustellen, dass Materialfluss, technische Ausrüstung, Transport und Entsorgung aufeinander abgestimmt werden und planmässig erfolgen. Die menschlichen Mitarbeiter werden von IoT-Lösungen unterstützt. So überwachen Sensoren den Einsatz von Aufzügen und das Abfallaufkommen, um die höchstmögliche Effizienz zu erreichen (Verbesserung der pünktlichen Materialanlieferung um 50 Prozent).

4.2.4 Leistungssteigerung durch den Einsatz von Sensoren

Der intelligente Einsatz technischer Anlagen wie Bauaufzüge und Gabelstapler ist entscheidend, wenn Platz und Verfügbarkeit knapp sind. Sensoren überwachen die Auslastung der Aufzüge, um Engpässe zu ermitteln und den Lieferprozess entsprechend anzupassen. Der mit dem Bauzeitenplan verknüpfte Lieferplan errechnet täglich den optimalen Zeitplan für den Einsatz der Aufzüge. Gabelstaplerpositionen werden per GPS verfolgt, um die Lagerleistung zu maximieren. Die Bediener werden durch smartes Monitoring unterstützt, um den Materialfluss zu optimieren und die jeweils am besten geeigneten Flurförderfahrzeuge einsetzen zu können.

4.2.5 Vision

Für uns ist jeder Tag ein neuer Schöpfungsprozess, in dem Arbeitsabläufe, Stakeholder und Materialien miteinander in Einklang gebracht werden. Unser lernfähiges System der voraussagenden Logistik kann die Dynamiken am Bau mit den Dynamiken in der Stadt täglich verknüpfen, um die optimale Leistung zu erzielen und die termingerechte Anlieferung von Baustoffen zu gewährleisten.

4.3 Ausblick

Laut dem McKinsey Global Institute muss die Welt bis zum Jahr 2030 Investitionen von 57 Billionen US-Dollar in die

and waste disposal amounts in order to reach maximum efficiency (50 % improvement in punctuality of material arrival).

4.2.4 Use of Sensors to Improve Performance

The smart use of equipment such as the temporary elevators and forklifts is crucial when space and availability are scarce. Sensors monitor the performance of the elevators to determine bottlenecks and link back to the delivery process. The delivery schedule linked to the construction program will calculate the best schedule for the elevator usage each day. GPS tracks forklifts to maximise stock performance. The operators will have the support of smart monitoring to streamline material flow and the best equipment at hand.

4.2.5 Vision

We consider every day to be a new process of creation, a process of bringing workflows, stakeholders and materials into harmony. Our learning system of predictive logistics can link construction dynamics with city dynamics on a daily basis to perform optimally and ensure arrival on time.

4.3 Outlook

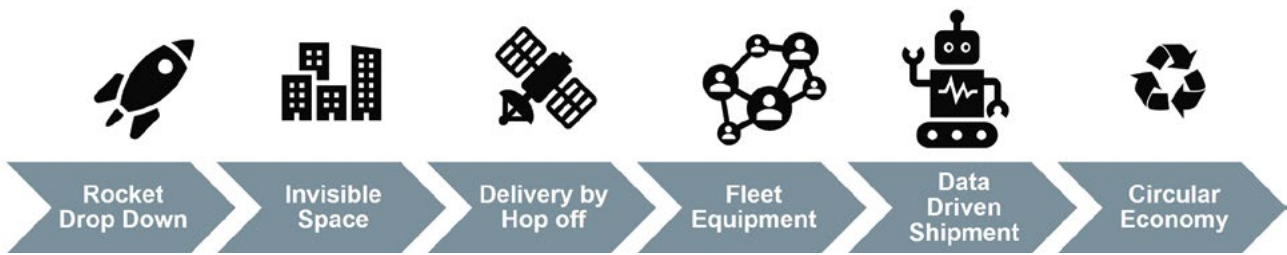
The McKinsey Global Institute estimates that the world will need to spend \$57 trillion on infrastructure by 2030 to keep up with global GDP growth [7]. This is massive potential, ready to be used.

Thinking five years ahead, how will such infrastructure work using the "invisible" infrastructure (Chapter 2.2.2), data and BIM to enable robotics-like delivery? Currently, the logistics concept is planned in conventional ways such as using trucks on the road and building a storage tent on a vacant storage area in town. We all know what conventional ways mean in construction: the inefficient use of resources.

We believe the smart city can provide numerous possibilities to the supply chain and the smart logistics concept to make it faster, more efficient and sustainable.

Die Digitalisierung des unterirdischen Raums und sein architektonisches Schöpfungspotenzial

- Innovationen aus dem Hochbau übertragen auf den Tiefbau



Quelle/credit: Amberg Loglay AG

9 Prozess der konsolidierten und durchgängigen Lieferungen (futuristische Hypothese)
 Process of consolidated and efficient deliveries (futuristic hypothesis)

Infrastruktur tätigen, um das globale Wirtschaftswachstum aufrechtzuerhalten [7]. Dieses enorme Potenzial will ausgeschöpft werden.

Doch wie genau wird diese Infrastruktur heute in fünf Jahren funktionieren, wenn sie sich einer «unsichtbaren» Infrastruktur (Kapitel 2.2.2), Daten und BIM-Technologien bedient, um eine roboterartige Anlieferung von Baustoffen zu ermöglichen? Derzeit wird das Logistikkonzept noch konventionell geplant, etwa durch den Einsatz von Lkw auf der Strasse oder den Aufbau von Lagerzelten auf freien Lagerplätzen in der Stadt. Wir alle wissen, was konventionelle Methoden im Bauwesen bedeuten – nämlich die ineffiziente Nutzung von Ressourcen.

Wir sind überzeugt, dass die Smart City zahlreiche Möglichkeiten bietet, um die Wertschöpfungskette und das Konzept der smarten Logistik schneller, effizienter und nachhaltiger zu machen.

Unser Ziel ist es, den «unsichtbaren» Raum zu nutzen – also die negativen Volumina zwischen der bebauten Umwelt, sei es Raum, Zeit oder etwas anderes. Diese Infrastrukturräume, die einen Grossteil unserer ober- und unterirdischen städti-

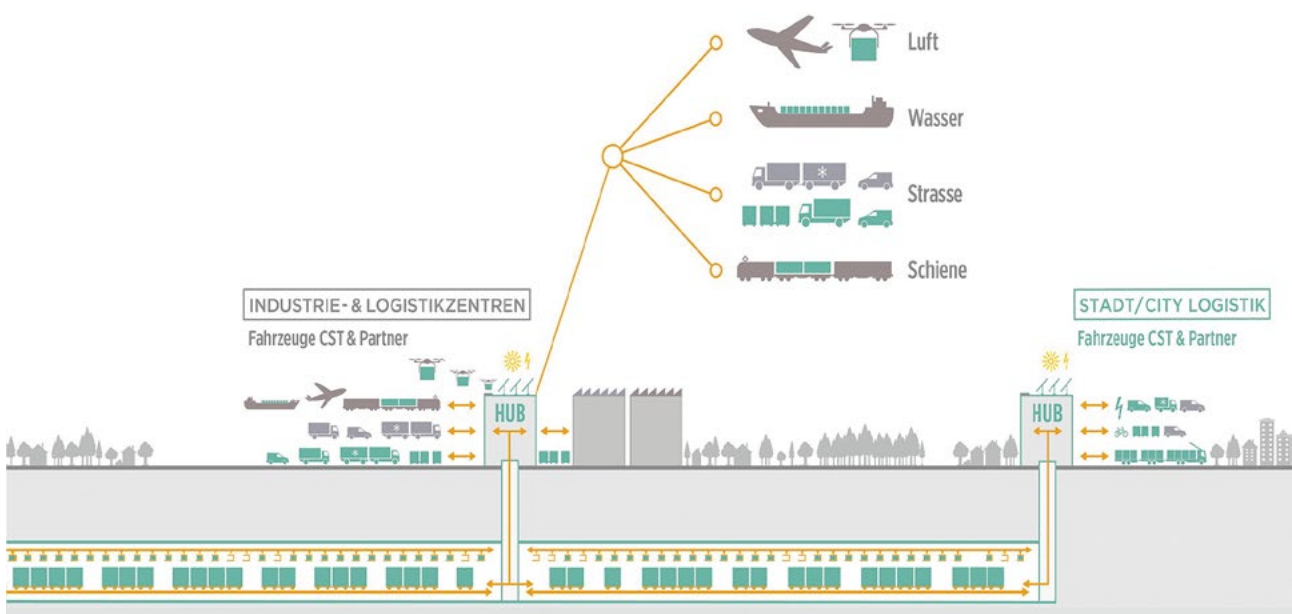
We are driven to use the “invisible” space – the negative volumes between the built environment, be it space, time or something else. We want to digitise these infrastructure spaces that take up large parts of our urban surroundings above ground and underground to enable mobility and make them visible.

5 Conclusion

We now come back to the initial question. How can we achieve interdisciplinary excellence? How can we enable a massive complex and conservative industry to fundamentally change its way of thinking?

We all know how difficult it is to get out of our very own protective silo and reach out to new disciplines. It is somewhat uncommon in our human socialisation to do so. Digitisation erases silo walls by providing information, creating visibility and transparency on a global platform but also expands people’s ability to process excess information and to relax their sense of self-protection.

And here we can see the greatest challenge of them all: collaboration of human behaviour enforced through high



Quelle/credit: Cargo Sous Terrain AG

10 Güterverteilung mittels intelligenter Infrastruktur unter- und oberirdisch
 Distribution of goods using smart infrastructure under and above the ground

Why Digitise Underground Space and Make It Part of Architectural Design?

- Innovations from the High-Rise Sector for the Underground Sector

schen Umgebungen einnehmen, wollen wir digitalisieren, um Mobilität zu fördern und diese Räume sichtbar zu machen.

5 Fazit

Kommen wir nun auf unsere Anfangsfragen zurück: Wie können wir interdisziplinäre Exzellenz in der Bauwirtschaft erreichen? Und wie können wir diese enorm komplexe und konservative Branche dabei unterstützen, ihre Denkweise grundlegend zu verändern?

Wir alle wissen, wie schwierig es ist, unser eigenes schützendes Silo zu verlassen und den Kontakt zu neuen Disziplinen herzustellen. In gewisser Weise widerspricht das unserer Sozialisation als Menschen. Digitalisierung reisst Silowände ein, indem sie Daten über eine zentrale Plattform zur Verfügung stellt und somit Sichtbarkeit und Transparenz schafft. Sie fördert aber auch die menschliche Fähigkeit, Informationsüberschüsse zu verarbeiten und den eigenen Instinkt zum Selbstschutz zu lockern.

Genau hier liegt die grösste aller Herausforderungen: die Koordination menschlicher Verhaltensweisen mithilfe moderner Technologie – zwei an sich hochkomplexe Disziplinen verschmelzen zu einem transformativen Wesen. Das klingt in der Tat nach einem spirituellen Schöpfungsprozess.

Wenn der Schlüssel zum Erfolg darin besteht, Redundanzen und Dopplungen zu eliminieren und innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette Grenzen zu überwinden, was wiederum bedeutet, dass alle verfügbaren Informationen miteinander verknüpft und allgemein zugänglich gemacht werden, um den effizientesten Produktionsprozess zu ermitteln – dann ist die smarte Logistik dieser Schlüssel. Die datenbasierte Plattform macht einheitliche Daten für jedermann verfügbar und erschafft einen modellbasierten Produktionsprozess (einen «digitalen Zwilling»), der die «unsichtbaren» Räume ausserhalb der Baustelle nutzt, die in Form von Daten zur Verfügung gestellt werden und sich auf der Baustelle «materialisieren».

Wenn die smarte Logistik der Schlüssel zum Erfolg auf der Baustelle ist und selbst auf einer Smart-City-Infrastruktur basiert, dann ist diese Infrastruktur für den Erfolg eines Projektes entscheidend. Genau hier liegt das potenzielle Bindeglied zum Tunnelbau.

Architekten entwerfen Gebäude, Landschaftsarchitekten Parks, Künstler Objekte und wir wollen die Netze entwerfen, die quasi den Puls unserer Städte der Zukunft darstellen. Bedenken wir dabei jedoch, dass diese Netze unsichtbar sein könnten.

technology. Two disciplines, each complex in its own right, merged into one transformative creature. It truly sounds like a spiritual creation process.

If the key to success is the elimination of redundancies and duplications and abolishing boundaries over the whole supply chain, which in turn means the connection and provision of all available information to determine the most efficient production route, then smart logistics is the key to success. The data-driven platform gives equal information to everyone to create a model-based production process (digital twin) which uses the “invisible” spaces off-site provided through data and “materialises” on-site.

If smart logistics is the key to success on-site, and it travels through a smart city infrastructure, then this infrastructure becomes key to the success of each project. And this is precisely the potential link to the tunnelling industry.

Architects design buildings, landscapers design parks, artists design objects, and we want to design the grids and networks – the pulse of our future cities. But be aware, they may be invisible.

Literatur/References

- [1] <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-construction-digital-future> (Schrift: Arial 11pt)
- [2] <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-construction-digital-future>
- [3] <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wohnen/bauen/baustau-700-000-wohnungen-genehmigt-aber-nicht-gebaut-16519136.html>
- [4] <https://www.allianz.com/en/press/news/studies/151130-the-megacity-of-the-future-is-smart.html>
- [5] <https://www.alfred-herrhausen-gesellschaft.de/en/neuro-urbanism.html>
- [6] Smart Cities, Versuch einer Auslegeordnung, Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP)
- [7] Smart Cities, Versuch einer Auslegeordnung, Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP)



Healthcare Innovation! Building Ecosystems for Healthcare 4.0

*Frank Kumli, PhD, MBA, Head of Innovation & Entrepreneurship,
BaselArea.swiss, Basle/CH*

Healthcare Innovation!

Building Ecosystems for Healthcare 4.0

Healthcare, pharma's business environment, is transforming rapidly. In this shifting Healthcare 4.0 business environment, the pharma industry cannot afford to lag behind. The key to success will be the ability to engage and co-create with the broader healthcare ecosystem, including with patients, healthcare providers, payers, start-ups, technology and other industry participants.

1 A Transforming Business Environment

Healthcare, the business environment for the life sciences industry is evolving rapidly. End markets have become complex, reimbursing drugs for value as opposed to product delivered. The industry has been historically plagued by low levels of trust from stakeholders and business partners. The once rapidly growing sales are stagnating, putting the industry's business model in question.

1.1 Non-Traditional Entrants

This trend is being accelerated by the entrance of non-traditional players, such as technology and retail companies, which are deploying their business models into healthcare, leveraging their know-how in data capture and management and their ability to deliver great customer experiences, and enjoying unparalleled levels of trust for customer intimacy.

1.2 Changing Business Models

There has been much talk about the "Kodak moment" coming for the pharmaceutical industry. A situation in which an industry fails to foresee changes within its business environment and drops from a market-dominant position to become a minor player or declares bankruptcy. However, after much doomsday news about a disrupted industry, followed by an initial phase of experimentation and piloting, the industry is now adapting rapidly and accelerating the transformation of its business models.

The pharma industry business model is morphing from a product-push model to a much more health-outcomes-driven business. The customer base is also evolving from physicians to including physicians, patients, payers and policymakers. The end point of this transformation can probably best be described as a data-driven platform model.

2 Five Things to Get Right in the Transformation

In the scope of this transformation, there are five things the industry will need to get right:

1. Patient-centricity. Making the patient the heart of the life sciences industry's business model is the main prerequisite for this transformation. It will mean connecting and engaging with patients, collecting longitudinal data and moving towards digital epidemiology. The combination of fitness and health data with a much broader set of data is required to enable forming the deeper insights needed to provide the right treatment to the right patient at the right time.

2. Healthcare systems. It is about widening the scope of the life sciences industry's business beyond sick care towards the broader management of health. Healthcare systems globally are extremely inefficient, mainly because of their complexity and fragmentation. The industry has a role in participating in the reduction of this fragmentation. This means broadening the attention paid to aspects related to health that were probably outside of the attention of pharma (and even of healthcare providers), such as the determinants of health.

3. Healthcare data (and ethics). The industry will need to engage and participate in the development of the ethical framework conditions necessary to enable the above (and more). Health data is of too much societal value to be siloed. Harnessing this value will require that stakeholders (including the industry) define and agree how this data is to be governed and managed.

4. Trust. The industry is plagued by the very low levels of trust most of its stakeholders have in it, from the general public through to public authorities. It will be key for the industry to regain the right level of trust by engaging with its stakeholders and demonstrating the value it is providing.

5. Innovation ecosystems. No single industry participant has all the assets required to provide a truly patient-centric approach to health(care). Collaborative approaches will be essential in order to deliver the value required by the end markets.

Innovation im Gesundheitswesen

Der Aufbau digitaler Ökosysteme für Healthcare 4.0

Das Gesundheitswesen als geschäftliches Umfeld der Pharmaindustrie unterliegt einem raschen Wandel. Die Endmärkte werden immer komplexer und Wertschöpfung spielt heutzutage eine wichtigere Rolle als Produkte. Immer neue, branchenfremde Akteure wie zum Beispiel Technologieunternehmen stossen mit kundenorientierten Lösungen auf den Markt vor. In diesem sich wandelnden Geschäftsumfeld von Healthcare 4.0 darf die Pharmaindustrie nicht den Anschluss verlieren. Der Schlüssel zum Erfolg besteht im Aufbau digitaler Ökosysteme gemeinsam mit allen anderen Stakeholdern des Gesundheitswesens – angefangen bei Patienten, Gesundheitsdienstleistern und Krankenkassen bis hin zu Start-ups, Tech-Unternehmen und anderen Branchenteilnehmern.

De l'innovation dans la santé !

Construction d'écosystèmes pour la santé 4.0

Le secteur médico-pharmaceutique se transforme rapidement. Les marchés finaux se sont complexifiés, le remboursement des médicaments se faisant désormais en fonction de leur valeur et non du produit livré. Des entrants non traditionnels tels que les sociétés du secteur de la technologie se déploient rapidement et exploitent les données privées de clients. Dans ce secteur économique de la santé 4.0, l'industrie pharmaceutique ne peut se permettre de rester en retrait. La clé du succès résidera dans la capacité à s'engager et faire preuve de créativité de façon conjointe au sein de l'écosystème du monde de la santé au sens large, en incluant les patients, les prestataires de santé, les organismes payants, et au-delà, les start-ups, ainsi que les acteurs technologiques et industriels.

Innovazione per il settore sanitario!

Costruzione di ecosistemi per la sanità 4.0

L'ambiente d'affari sanitario e farmaceutico è in rapida trasformazione. I mercati di sbocco sono diventati complessi e rimborzano in base al valore anziché in base al prodotto fornito. I concorrenti non tradizionali, quali le aziende di tecnologia, stanno rapidamente implementando e facendo leva sull'intimità col cliente. In questo ambiente d'affari in evoluzione della sanità 4.0, l'industria farmaceutica non può permettersi di perdere terreno. Il segreto del successo sarà rappresentato dalla capacità di interagire e contribuire a creare il più vasto ecosistema sanitario, da pazienti, fornitori sanitari, pagatori e oltre a startup, tecnologia e altri partecipanti industriali.

3 Transformation in Healthcare Is Hard

While there is rapid progress, transformation in healthcare is a constant uphill battle. Why?

These collaborative approaches require a different mindset and culture. Such a cultural change requires participants to move out of their comfort zone, which the industry has not yet done much up to now.

4 Innovation Ecosystems

The way forward will be for the industry to master the ability to collaboratively innovate with the ecosystem. The industry is starting to learn to do so and multiplying initiatives aimed at engaging the ecosystem in innovative approaches such as hackathons, acceleration and incubation programmes and corporate venture activities.

5 Innovation Models

Hackathons: hackathons are events that last between 8 and 48 hours in which participants are challenged to generate a technological innovation in the form of a functioning software or hardware prototype. The best

idea, selected by a jury, is rewarded with a prize. This could take the form of a monetary or non-monetary reward (e.g. access to online or offline courses, incubation or acceleration programmes, technological gadgets). Hackathons are open to different categories of participants such as business-related figures, designers and computer experts (1).

Accelerators: accelerators aim to help start-ups achieve a level of business growth in just a few months that would normally take anywhere from 12 to 18 months if they decided to do so on their own. They aim to facilitate the development of projects and provide start-ups with the tools to establish strong value propositions, in order for them to have the best chance of achieving external funding (2).

Incubators: incubators, on the other hand, assist start-ups with much longer-term business development by providing them with the time and resources necessary to design and build an efficient and sustainable business model. They seek, at the idea stage, to mould start-ups into successful self-sustaining businesses. Start-ups entering incubators may be supported for a long time period, often months, and the

equity taken in each start-up tends to be much higher than with accelerators (2).

Corporate venture fund: corporate venturing (also known as corporate venture capital) is the practice of directly investing corporate funds into external start-up companies. This is usually done by large companies who wish to invest in small but innovative start-up firms. They do so through joint venture agreements and the acquisition of equity stakes. The investing company may also provide the start-up with management and marketing expertise, strategic direction and/or a line of credit (3).

6 Extension of Internal Ways of Working

To be successful in the long term, these new approaches should not remain one-off initiatives, but rather become a natural extension of internal ways of working. These will need to be relearned in a concerted effort. This includes, for example, deploying innovation training courses and making design sprints part of the daily routine as well as setting up innovation labs to connect with the external world.

7 The Key to Transformation Success

The key to transformation success will be the ability to engage and co-create with the broader healthcare ecosystem, including with patients, healthcare providers, payers, start-ups, technology and other industry participants. This engagement is not yet there today and the pharma industry will need to earn its place at the healthcare innovation table.

This place will be earned by proactively engaging, enhancing and providing value to the healthcare ecosystem.

8 Examples of Collaborative Innovation

As part of our efforts to promote innovation, BaselArea.swiss is managing accelerators to catalyse innovation at the interface between entrepreneurs, start-ups and the business ecosystem. We do this across three industries: biotechnology, healthcare and production technologies.

Our acceleration programme dedicated to healthcare is the DayOne accelerator (4). Its current focus is paediatric health. We currently have six start-ups that are being accelerated, and we are working with coaches, industry and institutional partners to develop their business ideas:

Zoundream's goal is to help identify the messages and potential pathology communicated by the crying of babies. The sound of a newborn's cry embodies a great deal of information about the baby's needs, physical emotions and potential pathological status. Zoundream uses artificial intelligence and sound recognition to translate a newborn's crying sounds into the baby's actual needs and status. Their mission

is to help parents and babies all around the world from the very beginning.

Haako is helping parents of children with asthma to better manage their condition. Their solution, "Breathe", facilitates the tracking of the children's symptoms such as coughing and wheezing. "Breathe" uses the tracked symptoms to issue early warnings about worsening asthma control. It also shows how relevant trigger factors such as pollen and cold or humid air are to the child and provides warnings if they are currently present or forecast.

Rekonas is working on improved bedside monitoring of epilepsy. Listening in on the communication between brain regions with sub-millisecond resolution is the key to identifying damaged brain networks or misfiring regions. This allows for higher precision in seizure localisation as well as in diagnosing and monitoring the progression of multiple sclerosis – for the benefit of clinical trials and of patients.

Wello Health helps families with overweight children to improve nutrition. Based on daily activities and food tracking, and integration with smart devices if available, Wello advises parents by supplying them with a personalised meal plan that is generated automatically, based on the work of our nutrition experts. They offer a digital platform with certified information based on user location, where they recommend restaurants, diets and products. For the kids, they've created fun and entertaining games and challenges that allow interaction with family members and friends.

Nutrix is developing a nanosensor for glucose monitoring in saliva to prevent diabetes. Nutrix is a high-tech nanosensor that is placed on the tooth and detects the glucose level in the saliva and transfers the information to the app. Nutrix carries out continuous glucose monitoring in an invisible way. It targets 425 million diabetes patients globally; the number is expected to increase to 629 million by 2045.

Virtual Doctors is a telemedicine company that supports healthcare professionals who provide care in Zambia. At the intersection of technology and medicine, the Virtual Doctors telemedicine application provides a device loaded with our specially designed app to healthcare professionals working in remote rural areas. Medical professionals utilising our technology are able to get a second opinion on non-emergency cases by submitting pertinent clinical data through our secure application. A volunteer doctor in either the UK or Zambia reviews the case and offers diagnostic and treatment advice within 24 hours. They want to provide healthcare facilities with an easy-to-use mentorship/referral tool.

We are currently working with each of these companies, helping them to grow as well as learning from them and further enriching the innovation ecosystem.

References

- [1] Hackathon as Emerging Innovation Practice, Massimo Uffreduzzi, Politecnico, viewed 10 January 2020, <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10,589/137,237/5/Hackathon%20as%20Emerging%20Innovation%20Practice.pdf>
- [2] Accelerators, Incubators, and Innovation Labs, Alea Giluly-Mandel, Hartford InsurTech Hub, viewed 10 January 2020, <https://hartfordinsurtechhub.com/understanding-differences-accelerators-incubators-innovation-labs/>
- [3] What is Corporate Venturing and Corporate Venture Capital? Corporate Finance Institute, viewed 10 January 2020, <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/corporate-venturing-corporate-venture-capital/>
- [4] Congratulations to the winners of the 2019 DayOne Accelerator, supported by Fondation Botnar, <https://www.dayone.swiss/dayone/channels/reports/Accelerator/dayone-accelerator-winners-2019.html>

Acquista, Calogero	Ghella S.p.A/IT
Amberg, Felix	Amberg Group AG, Regensdorf/CH
Belloli, Alberto	Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen/CH
Brunner, Andreas	SBB Infrastruktur, Bern/CH
Comin, Gianluca	Ghella S.p.A/IT
Cornaz, Philippe	CFF Infrastructure, Lausanne/CH
Diewald, Martin	PORR Bau GmbH/Tunnelbau, Wien/AT
Eder, Klaus	PORR Suisse AG, Altdorf/CH
Egger, Jürgen	ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT
Freudiger, Paul	Marti Tunnel AG, Moosseedorf/CH
Frey, Daniel	Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Zofingen, 4800 Zofingen/CH
Giacomin, Giovanni	Ghella S.p.A/IT
Giunta, Filippo	Consortium COCIV (J.V. Salini Impregilo – Condotte – CIV), Genova/IT
Hamm, Kuno	Herrenknecht Formwork Technology GmbH, Schwanau/DE
Heim, Alexander	Implenia France/FR
Hey, Olivier	Monod-Piguet Ingénieurs Conseil SA, Lausanne/CH
Jenni, Heinz	Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen/CH
Kloth, Thomas	Bundesamt für Strassen ASTRA, Filiale Zofingen, 4800 Zofingen/CH
Kumli, Frank	BaselArea.swiss, Basle/CH
Leible, Christian	Implenia Spezialtiefbau GmbH, Mannheim/DE
Lerch, Simon	Emch+Berger AG, Bern/CH
Maillard-Duc, Marie-France	CFF Infrastructure, Lausanne/CH
Martin, Florent	Spie Batignolles Génie Civil/FR
Medel, Stefan	Herrenknecht Formwork Technology GmbH, Schwanau/DE
Meier, Joachim	Implenia Spezialtiefbau GmbH, Mannheim/DE
Meistro, Nicola	Consortium COCIV (J.V. Salini Impregilo – Condotte – CIV), Genova/IT
Osborne, John	CERN, Genf/CH
Perner, Reinhard	PORR Suisse AG, Altdorf/CH
Ramoni, Marco	Basler & Hofmann AG, Esslingen/CH
Reiling, Stephan	B+S AG, Bern/CH
Schmid, Werner	Implenia Schweiz AG, Wallisellen/CH
Schneider, Klaus	ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT
Schwager, Inga-Leena	Amberg Loglay AG, Zürich/CH
Seith, Oliver	ASTRA-Filiale Bellinzona, Thusis/CH
Stebler, Jürg	Jauslin Stebler AG, 4132 Muttentz/CH
Suter, Erich	Implenia Schweiz AG, Civil Engineering – Tunnelbau Schweiz, Wallisellen/CH
Tudora, Alexandra	CERN, Genf/CH
Wieser, Paul	Amberg Engineering AG, Regensdorf-Watt/CH
Wimmer, Albert	Deutsche Bahn Netz AG, München/DE
Zieger, Thomas	PONS Luzern/CH

Hauptsponsoren • Main Sponsors



AFRY
Å F P Ö Y R Y



Gemeinsam in die Zukunft

Making Future



We offer expertise in infrastructure construction and maintenance for more than 50 years. Our main focus is the smart use of surface and subsurface space.

The application of the latest working methods such as BIM and the use of artificial intelligence shows our innovative strength. It is our key to shaping the digital future.

www.amberggroup.com

WE ARE AMBERG

AMBERG ENGINEERING

AMBERG LOGLAY

AMBERG TECHNOLOGIES

HAGERBACH TEST GALLERY



Immer zur Stelle – mit dem dichtesten Servicenetz der Schweiz.

Sandvik Tunnelbaugeräte von Avesco setzen Massstäbe. Das flächendeckende Netz unserer Servicetechniker in allen Schweizer Regionen und der führende Tunnel-Mietpark sorgen dafür, dass dies über die gesamte Bauzeit Ihrer Projekte so bleibt. avesco.ch/tunnelbau

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



**BEI UNS STEHT
DER MENSCH
IM VORDERGRUND**

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



**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.ch



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



- Diesel- und E-Loks, Plattformwagen, Personenwagen, Schuttwagen, Nachmischer usw.
- Schienen und Schwellen, Weichen, California-Weichen
- Dumper
- Ventilationslatten, 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



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 725 Mitarbeitenden an fast 30 Standorten sind wir national und international präsent und nahe bei unseren Kunden.

www.emchberger.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



GÄHLER PARTNER
INTEGRIERTE BAUPLANUNG



GÄHLER UND PARTNER AG | SONNENBERGSTRASSE 1 | CH-5408 ENNETBADEN | TEL +41 56 200 95 11 | INFO@GPAG.CH | WWW.GPAG.CH



Gasser Felstechnik AG | 6078 Lungern | T 041 679 77 77 | felstechnik.ch

Untertag | Felssicherung | Sprengbetriebe | Spezialtiefbau | Bauservice



Heitkamp Construction Swiss
Kompetenz aus Tradition – Zukunft durch Innovation

BAHNVERBINDUNG STUTTGART-ULM

TEMPO AUF DER MAGISTRALE FÜR EUROPA

Als Teil der europäischen Ost-West-Magistrale bildet das Bahnprojekt Stuttgart-Ulm eine wichtige Eisenbahnverbindung. Herrenknecht stand drei Joint Ventures mit Expertise und umfassendem Service zur Seite. Vier innovative Tunnelbohrmaschinen aus dem badischen Schwanau bauten in fünf Jahren zielsicher und souverän fast 50 Kilometer neue Tunnel.

› www.herrenknecht.com/de/stuttgart-uhl/

Bauherr:
› Deutsche Bahn AG
Kunden:
› Implenia Construction GmbH
› ARGE ATCOST 21
› ARGE ATA Tunnel Alaufstieg

**PIONEERING
UNDERGROUND
TOGETHER**

HERRENKNECHT



Tunnelling Systems



Durch enge Zusammenarbeit setzen wir höchste Anforderungen in beste Qualität um.



www.holcimpartner.ch

Für Referenzen, Fachwissen, Lösungen und Bestellungen.

Build with Confidence.



ILF CONSULTING ENGINEERS. IHR ZUVERLÄSSIGER PARTNER.

ILF unterstützt ihre Kunden bei der erfolgreichen Realisierung bedeutender Infrastrukturprojekte und bietet gesamthafte Ingenieur- und Beratungsleistungen an.



BEWÄHRT BEI:

- 2. Röhre Gotthard Strassentunnel
- Sanierungstunnel Belchen
- 4-Spurausbau Olten-Aarau, Eppenbergtunnel
- Instandsetzung bestehende Tunnel Belchen
- Pumpspeicherwerk Linth-Limmern
- Gotthard- und Ceneri-Basistunnel
- Nordumfahrung Zürich (BSA/Tunnellüftung)
- SBB Brüttener Tunnel
- Studie Geologische Tiefenlager, Nagra
- SBB Chestenbergstunnel

ILF BERATENDE INGENIEURE AG Flurstrasse 55 · 8048 Zürich, Schweiz · Tel.: +41 / 44 435 37 50 · E-Mail: info.zrh@ifl.com

www.ilf.com/de-ch

Implenia® Die Tunnelbauspezialisten



Neuer Bözbergtunnel: Im Vertragsmodell «GU+» alles aus einer Hand:
Rohbau – Bahntechnische Ausrüstung – Ausführungsplanung

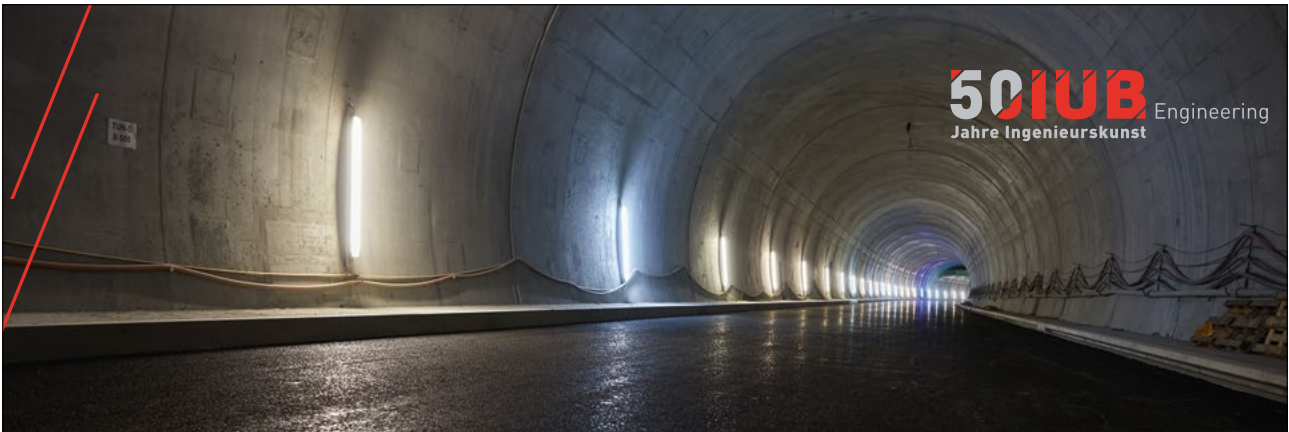
www.implenia.com



Infra Tunnel SA
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





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 Maggia Engineering SA · Via Stefano Franscini 5 · CH-6601 Locarno 1 · Tel. +41 91 756 68 11 · info@im-maggia.ch · www.engineering-group.ch
IUB Engineering AG · Belpstrasse 48 · CH-3000 Bern 14 · Tel. +41 31 357 11 11 · info@iub-ag.ch · www.engineering-group.ch



Auf neuen Wegen in alle Richtungen



Seit rund 65 Jahren bauen Kunden auf unsere Kompetenz für Bauwerke unter Tage. Lombardi bearbeitet komplexe Infrastrukturprojekte sowohl mit traditionell fachtechnischer Kompetenz als auch mit dem Einsatz neuester Technologien im Bereich BIM. Unser Ansprüche an die Innovation spornen uns an, neue Wege einzuschlagen, um unseren Kunden massgeschneiderte Lösungen in alle Richtungen zu ermöglichen.

Lombardi SA Ingegneri Consulenti | Via del Tiglio 2, 6512 Bellinzona-Giubiasco
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.

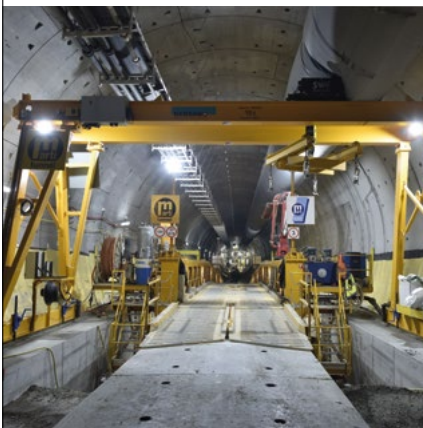
Contact us. We provide professional and precise advice and know all of the options which can be implemented for the best fulfilment of your project.

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

Marti Gruppe



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 Tunnel AG

Seedorfeldstrasse 21 CH-3302 Moosseedorf
Tel. +41 31 388 75 10 tunnel@martiag.ch www.marti-tunnel.ch



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



Foto Urs Flüeler

**RENZO TARCHINI**
CANTIERI & CONTRATTI
CONSTRUCTION & CONTRACTS CONSULTING

E CERTIFIED EXPERT
ISO 17024/SEC 01.1
TARCHINI RENZO
0019

Die Spezialisten der Baustellenleitungen

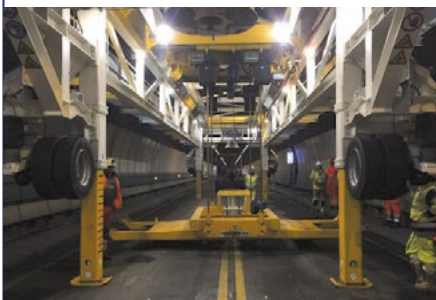
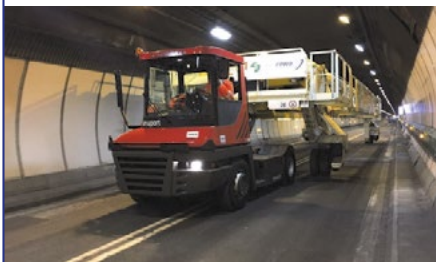
Ausschreibungen, Werkverträge,
Realisierungen

Die Spezialisten im Vertragswesen

Rechtsvertragliche Lösungen
in der Sprache der Techniker

www.tar.ch

Schneller, sicherer und wirtschaftlicher bauen



Tunnel du Mont Blanc (France / Italia)
Sanierung der Fahrbahn mittels vorgefertigter Betonelemente
Einsatz von zwei fahrenden Portalkränen während Nachtsperren

www.rowa-ag.ch



Walo Bertschinger – Ihr Partner für alle Bauwerke

Tunnel Giarson

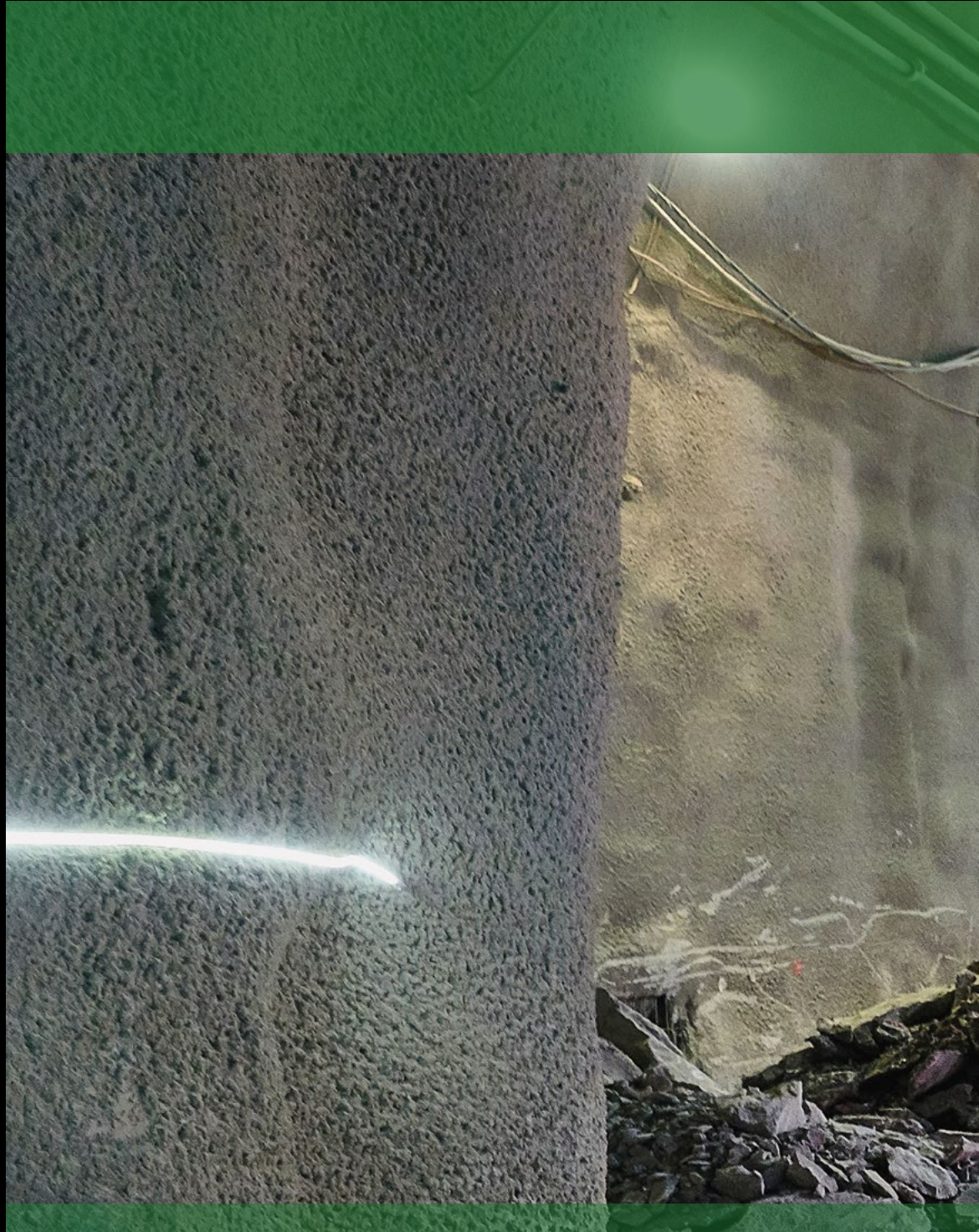
Walo Bertschinger AG
Untertagbau
Postfach, CH-8953 Dietikon 1
Tel. +41 44 745 23 11
untertagbau@walo.ch – www.walo.ch



SWISS TUNNEL CONGRESS 2020

Fachtagung für Untertagbau

ISBN 978-3-033-07750-8



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