

SWISS TUNNEL CONGRESS 2016  
Fachtagung für Untertagbau

Band 15

2016

ISBN 978-3-033-05486-8

SWISS TUNNEL CONGRESS

Fachtagung  
für Untertagbau

Band 15

SWISS TUNNEL CONGRESS 2016

Colloquium

15. Juni 2015  
in Luzern

Fachtagung

16. Juni 2015  
in Luzern



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



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 2016

## Fachtagung für Untertagbau

15. + 16. Juni 2016 in Luzern



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

## Organizing Committee

Luzi R. Gruber, Dipl. Ing.	President Swiss Tunnelling Society
Stefan Maurhofer, Dipl. Ing.	Vice President Swiss Tunnelling Society, Swiss Tunnel Colloquium
Martin Bosshard, Dipl. Ing.	Past President Swiss Tunnelling Society
Matthias Neuenschwander, Dipl. Ing.	Swiss Tunnel Congress
Iris Otter/Viktor Gjorgjiev	Secretariat

## Advisory Board

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

© 2016 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, Yvonne Lienemann, Rebekka Bude, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh/DE

Druckvorstufe: Mohn Media Mohndruck GmbH, Gütersloh/DE

Druck: Merkur Druck GmbH & Co. KG, Detmold/DE

Auflage: 850 Exemplare

ISBN 978-3-033-05486-8

Swiss Tunnel Congress 2016 – Fachtagung für Untertagbau

Umschlagfoto: Gotthard-Basistunnel: Basler & Hofmann AG/Noë Flum, mit Genehmigung AlpTransit Gotthard AG

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

<b>Åhlén, Bengt</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm/SE
<b>Andersson Ovuka, Mira</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE
<b>Badde, Jens</b>	Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH
<b>Bäppler, Karin</b>	Dr., Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweier/DE
<b>Bettelini, Marco</b>	Dr., Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH
<b>Braghini, Marco</b>	Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH
<b>Bremen, Roger</b>	Dr., Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH
<b>Brunbäck, Lillian</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE
<b>Burger, Werner</b>	Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweier/DE
<b>Calleja Martín, Marcos</b>	FCC Construcción, Madrid/ES
<b>Cassani, Giovanna</b>	Rocksoil S.p.A., Milano/IT
<b>De Candido, Luigi</b>	Elkuch Eisenring AG, Jonschwil/CH
<b>Ehrbar, Heinz</b>	DB Netz AG, Frankfurt am Main/DE
<b>Fries, Thomas</b>	Nagra Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle/CH
<b>García Aldaya, Diego</b>	FCC Construcción, Madrid/ES
<b>Grundhoff, Thomas</b>	DB Netz AG, Karlsruhe/DE
<b>Hansson, Anders</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE
<b>Heissenberger, Roman</b>	ÖBB-Infrastruktur AG, Wien/AT
<b>Hoppe, Peter</b>	Implenia Construction GmbH, Berlin/DE
<b>Klar, Sascha Björn</b>	DB Netz AG, Karlsruhe/DE
<b>Koinig, Josef</b>	ÖBB-Infrastruktur AG, Wien/AT
<b>Kummer, Urs</b>	International Fire Academy, Balsthal/CH
<b>Larsson, Bo</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE
<b>Leuenberger, Moritz</b>	Bundesrat von 1995 bis 2010, Bundespräsident in den Jahren 2001 und 2006
<b>Lierau, Michael</b>	Elkuch Group, Bendern/LI
<b>Olofsson, Olle</b>	Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE
<b>Pagani, Ettore</b>	Consorzio COCIV, Genova/IT
<b>Rigert, Samuel</b>	Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH
<b>Rödiger, Yves</b>	GIFAS-ELECTRIC GmbH, Rheineck/CH
<b>Römer, Marcus</b>	Elkuch Eisenring AG, Jonschwil/CH
<b>Sayah, Selim M.</b>	Dr., Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH
<b>Schneider, Christoph</b>	Bundesamt für Verkehr BAV, Ittigen/CH
<b>Simoni, Renzo</b>	Dr., AlpTransit Gotthard AG, Luzern/CH
<b>Späth, Christian</b>	Implenia Österreich GmbH, Salzburg/AT
<b>Thüring, Manfred</b>	Dr., Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH
<b>Wagner, Hanns</b>	ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT
<b>Wälchli, Severin</b>	Dr., Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH
<b>Walther, Beat</b>	Schadenwehr Gotthard, Göschenen/CH
<b>Yvin, Philippe</b>	Société du Grand Paris, Saint-Denis/FR
<b>Zimmermann, Christian</b>	Ulrich Imboden AG, Visp/CH

<b>6</b>	Luzi R. Gruber	Vorwort • <i>Preface</i>
<b>10</b>	Leuenberger, Moritz	Im Jahr des Tunnels • <i>In the Year of the Tunnel</i>
<b>12</b>	Yvin, Philippe	Grand Paris Express – 200 kilomètres de métro automatique pour une nouvelle mobilité en Île-de-France <i>Grand Paris Express – 200 km of Automatic Subway Line to Provide New Travel Options in Ile-de-France</i>
<b>22</b>	Späth, Christian Hoppe, Peter	Neubau der U-Bahnlinie U5 in Berlin – «Lessons learnt» <i>Construction of Berlin's New U5 "U-Bahn" Line – "Lessons Learnt"</i>
<b>38</b>	Sayah, Selim M. Thüring, Manfred Braghini, Marco Bremen, Roger	Cerro del Águila Hydro Power Plant in Peru – Design and Construction of 12 km Waterways and Utility Tunnels in Complex Geology
<b>48</b>	Pagani, Ettore Cassani, Giovanna	Terzo Valico dei Giovi – Alta velocità/alta capacità Milano–Genova <i>Terzo Valico dei Giovi – Milan–Genoa High Speed/High Capacity Line</i>
<b>58</b>	Wagner, Hanns Heissenberger, Roman Koinig, Josef	Tunnelkette St. Kanzian – Planungs- und Ausführungsstrategien für Stützmassnahmen im «Seeton» <i>The St. Kanzian Tunnel Chain – Design and Construction Strategies for Support Measures in "Lacustrine Clay"</i>
<b>72</b>	García Aldaya, Diego Calleja Martín, Marcos	Metro de Panamá, Line 1 – The First Line of the Panama City Transit System
<b>80</b>	Ehrbar, Heinz Grundhoff, Thomas Klar, Sascha Björn	Tunnel Rastatt – Ein Schlüsselprojekt in vielerlei Hinsicht <i>The Rastatt Tunnel – A Key Project in Many Respects</i>
<b>100</b>	Larsson, Bo Brunbäck, Lillian Olofsson, Olle Hansson, Anders Andersson Ovuka, Mira Åhlén, Bengt	The West Link – Challenges Both Underground and above Ground
<b>110</b>	Fries, Thomas	Tiefenlager für radioaktive Abfälle der Schweiz – Stand der Projekte und technische Herausforderungen aus Sicht des Untertagbaus <i>Deep Repository for Radioactive Waste in Switzerland – State of the Projects and Technical Challenges for Underground Construction</i>



- 122** Böppler, Karin  
Burger, Werner      Innovation Track of Multi-Mode Machines for Complex Ground Conditions –  
From Grauholz, via Zurich to Kuala Lumpur
- 130** Zimmermann, Christian      Tunnel Visp – Drei Vortriebe, drei Herausforderungen  
*Visp Tunnel – Three Excavations, Three Challenges*
- 140** Simoni, Renzo      Inbetriebsetzung des längsten Eisenbahntunnels der Welt –  
Konzept und Herausforderung beim Gotthard-Basistunnel  
*Commissioning of the World's Longest Rail Tunnel – Concept and Challenge of the Gotthard Base Tunnel*

### Swiss Tunnel Colloquium 2016

#### «Fire and Safety» für Bahn- und Strassentunnels

#### *“Fire and Safety” in Rail and Road Tunnels*

- 152** Schneider, Christoph      Brand und Sicherheit im Bahntunnel – Sicherheitsaspekte aus Sicht der Bewilligungsbehörde  
*Fire and Safety in Rail Tunnels – Safety Aspects from the Approval Authority Viewpoint*
- 162** Bettelini, Marco  
Rigert, Samuel      Ereignislüftung Strassentunnel – Eine Schlüsselkomponente in der Sicherheitskette  
*Emergency Ventilation in Road Tunnels – A Key Component in the Safety Chain*
- 172** Wälchli, Severin  
Badde, Jens      Ereignislüftung unterirdischer Bahnanlagen – Theorie und Praxis  
am Beispiel der Durchmesserlinie Zürich  
*Emergency Ventilation in Underground Rail Systems – Theory and Practical Experience  
from the Zurich Cross Rail*
- 182** Lierau, Michael  
Römer, Marcus  
De Candido, Luigi      Tunnel-Fluchttüren – Erfahrungen und Erkenntnisse aus 20 Jahren Tunnelbau  
*Tunnel Escape Doors – Findings and Recognitions Based on 20 Years of Tunnelling*
- 192** Rödiger, Yves      Fluchtwegbeleuchtungen in Strassen- und Bahntunneln –  
Aktuelle Praxis, Technik und Zukunft aus Sicht eines Schweizer Herstellers  
*Escape Route Lighting in Road and Rail Tunnels –  
Current Practice, Technology and Future Challenges from the Viewpoint of a Swiss Manufacturer*
- 204** Kummer, Urs      Schaffen von optimalen Voraussetzungen für Rettungskräfte für den Fall  
eines Brandereignisses in einem Tunnel  
*Providing Optimal Conditions for Rescue Teams in the Case of Fire Incidents in Tunnels*
- 214** Walther, Beat      Brand im Gotthard-Strassentunnel – Die Schadenwehr Gotthard im Einsatz  
*Fire in the Gotthard Road Tunnel – The Gotthard Fire and Rescue Service in Action*





Quelle/credit: Luzi R. Gruber

## Vorwort • Preface

Luzi R. Gruber

Präsident der Fachgruppe für Untertagbau

President of the Swiss Tunnelling Society

Am 1. Juni 2016 wird der Gotthard-Basistunnel, der längste Eisenbahn-Tunnel der Welt, offiziell eröffnet. Die Schweiz hat wahrlich Grund zu feiern, sie präsentiert sich als Tunnelbaunation mit den ihr eigenen Werten wie Innovation, Präzision und Zuverlässigkeit.

Die FGU veröffentlicht zu diesem Anlass das Fachbuch «Tunnelling the Gotthard», die Erfolgsgeschichte. Ziel dieses Buches ist es, die oben erwähnten Werte zu untermauern. Unsere Verkehrsministerin Doris Leuthard schreibt dazu in ihrem Vorwort: «Seid stolz!»

Aktuell fragt sich ja die ganze Schweiz, ob wir ein Volk von Tunnelbauern sind, ob uns das in die Wiege gelegt wurde oder ob es andere Gründe gibt, warum momentan so viel von Tunnelbau geredet und geschrieben wird. Angesichts der Projekte, welche dieses Frühjahr in der Presse vorgestellt wurden, ist die Frage berechtigt. Neuer Mittellandtunnel für die Bahn (Tunnelsystem Altstetten–Rapperswil), Cargo Souterrain und Grimseltunnel, eine touristische Verbindung vom Berner Oberland mit dem Goms, kombiniert mit der Elimination der Hochspannungsfreileitung – alles aktuelle Projekte. Ganz nach unserem Motto des WTC 2013 in Genf: «Underground – the way to the future». Also es gibt noch Visionen.

Und Realitäten: Das Schweizer Volk hat am 28. Februar 2016 dem Bau der zweiten Strassen-Einspurröhre am Gotthard

The Gotthard Base Tunnel, the world's longest rail tunnel, will be officially opened to traffic on the 1<sup>st</sup> June 2016. Switzerland has undoubtedly cause to celebrate, and can proudly showcase itself as a tunnel-engineering nation par excellence, embodying values intrinsic to its people, including innovation, precision and reliability.

To mark this auspicious occasion, the Swiss Tunnelling Society is publishing in May "Tunnelling the Gotthard", a richly illustrated technical work telling the story of this successful mega-project. This book aspires to underline the above-mentioned values. As Doris Leuthard, our minister of transport, writes in her foreword: "Be proud!"

All Switzerland is now asking whether we are a nation of tunnellers, whether it is an integral part of our national character, or whether there are other reasons for so much being spoken and written about the construction of tunnels in recent times. A justified question, when one reviews the projects unveiled in the press this spring. A new rail tunnel in the Central Lowlands (the Altstetten–Rapperswil tunnel system), Cargo Sous Terrain and the Grimsel Tunnel, an important link for tourism between the Bernese Oberland and the Goms region, combined with the elimination of overhead high-tension cables – all up-to-the-minute projects, and entirely in line with our motto for the 2013 WTC in Geneva: "Underground – the way to the future". Visions are not just a thing of the past!

mit grosser Mehrheit zugestimmt. Das Thema Gotthard wird uns Tunnelbauer also noch weiter in die Zukunft begleiten – und in zukünftigen STCs seinen Platz finden.

Von Mittwoch, 15. bis Freitag, 17. Juni 2016 findet der Swiss Tunnel Congress ein weiteres Mal im KKL Luzern statt. Der 15. Tagungsband, den Sie in den Händen halten, belegt, dass auch in der Schweiz nach der Ära Gotthard weiterhin herausragende und anspruchsvolle Tunnelbauprojekte geplant und realisiert werden. Nach 15 Jahren hat sich der STC als Top Event der Tunnelbauer in der Schweiz voll etabliert, er bietet eine hervorragende Gelegenheit, sich zu informieren, sich weiterzubilden und persönliche Kontakte zu knüpfen und zu vertiefen.

Das Programm beginnt wie gewohnt am Mittwochnachmittag mit dem Swiss Tunnel Colloquium, welches dem Thema «Fire and Safety» gewidmet ist.

Freuen wir uns auf die Eröffnung des Programms am Donnerstag durch das Einführungsreferat von Alt-Bundesrat Moritz Leuenberger zum Thema «Die Bedeutung des Gotthard-Basistunnels für die Schweiz und Europa».

Der Vormittag des Kongresstages ist darüber hinaus internationalen Projekten gewidmet, sei es aus unserer unmittelbaren Nachbarschaft bis hin zu Panama und Peru. Wie üblich beim STC, sind es handverlesene Perlen des Tunnelbaus, mehrheitlich mit Beteiligung von Schweizer Know-how. Eine interessante Palette von laufenden Projekten aus der Schweiz zeigt am Nachmittag, dass die Aktivitäten in unserem Lande nach wie vor voll im Gange sind, wenn auch, verglichen mit der «NEAT Blüte», auf niedrigerem Niveau.

Zum guten Gelingen des STC tragen viele bei. Ich möchte mich vorab bei Iris Otter für die jahrelange hervorragende Betreuung bedanken. Über viele Jahre hat sie umsichtig und hartnäckig dafür gesorgt, dass alles reibungslos geklappt hat. Jetzt gilt es Abschied zu nehmen, es ist ihr letzter Kongress. Mein Dank gilt im Weiteren den Ressortleitern des Vorstandes, den Tagungsleitern, den Organisatoren mit ihren Helfern und den Baustellen – und selbstverständlich den Referenten, ihnen gebührt unsere Wertschätzung für ihre Beiträge.

Ermöglicht wird der Swiss Tunnel Congress durch unsere Sponsoren, ohne deren grosszügige Unterstützung die Organisation eines solchen Grossanlasses in dieser Qualität nicht denkbar wäre.

Ich wünsche Ihnen einen interessanten Kongress, viele spannende Begegnungen, bleibende Eindrücke und eine unterhaltsame Lektüre.



Luzi R. Gruber, Präsident/President

And the reality: The Swiss people voted by a large majority on 28 February 2016 in favour of the construction of a second single-lane road tunnel for the Gotthard. So we can be sure, the Gotthard will continue to occupy us as tunnel engineers well into the future, and will enjoy due prominence at successive STCs.

The Swiss Tunnel Congress will again take place at the KKL cultural and congress centre in Lucerne, this year from Wednesday the 15<sup>th</sup> to Friday the 17<sup>th</sup> June 2016. The 15<sup>th</sup> Proceedings that you are holding is tangible proof that, even after the era of the Gotthard, ambitious tunnel projects continue to be planned and realised in Switzerland. The STC, able now to look back on a 15-year history, has become firmly established as Switzerland's top event for tunnel engineers and provides unparalleled opportunities for obtaining information, gaining even more professional expertise, and making new and developing existing contacts.

As usual, the programme begins on Wednesday afternoon with the Swiss Tunnel Colloquium, devoted this year to the topic of "Fire and Safety".

"The importance of the Gotthard Base Tunnel for Switzerland and Europe" is the subject of the introductory address by former Federal Councillor Moritz Leuenberger – we look forward to it with great anticipation.

The morning session on the main day of the congress will focus on international projects, ranging from our immediate region to as far away as Panama and Peru. In line with our tradition at the STC, these will be carefully selected gems of tunnel engineering, the majority, of course, incorporating Swiss know-how. In the afternoon, an interesting selection of projects currently ongoing in Switzerland will show that these activities continue unabated in our homeland if, indeed, at a slightly lower intensity, compared to the crowning glory of the NRLA.

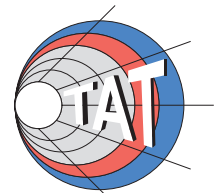
Innumerable people contribute to the success of the STC. I would like, here, to express my special thanks to Iris Otter for her many years of unfailing support. During all of this time, she has constantly, with tact and determination, taken care to ensure that absolutely everything went according to plan. Now we must take our leave of her, as this will be her last congress. My thanks, also, to the departmental heads of the committee, the conference session leaders, the organisers and their assistants, and to the sites – and, of course, to the speakers, whose contributions in their papers earn our high esteem.

The Swiss Tunnel Congress is made possible only by our sponsors, without whose generous support the organisation of such a large event of this quality would not be conceivable.

I wish you all an interesting congress, many stimulating encounters, lasting impressions and enjoyable reading.



## Hauptsponsoren • Main Sponsors



Consorzio TAT

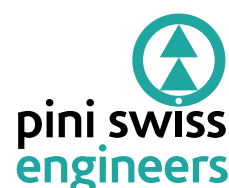


Brunnen Castione Chur Domdidier Fribourg Genève Lausanne Lugano Mesocco Pontresina Poschiavo Rivera Schwyz St. Moritz Winterthur Zuz Zürich





Marti Technik AG



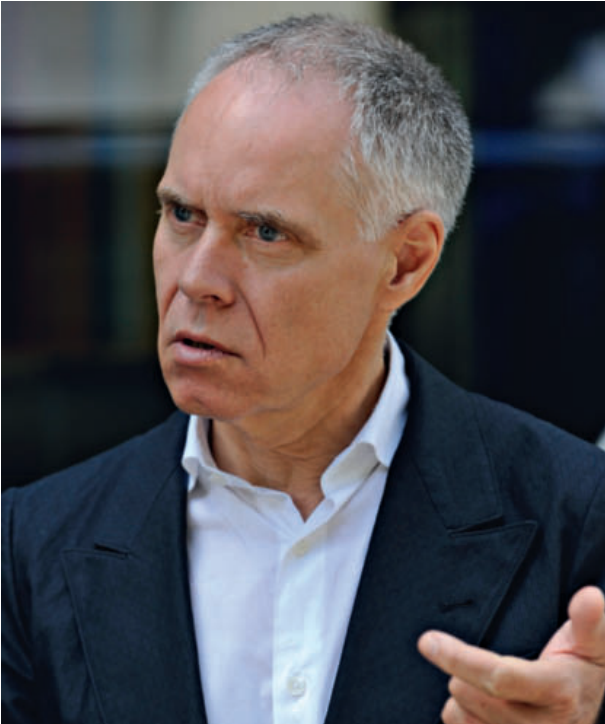
BUILDING TRUST



## Co-Sponsoren • Co-Sponsors

A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG, Basel  
 ACO Passavant AG, Netstal  
 Agir Aggregat AG, Affoltern am Albis  
 Allianz Suisse Versicherungen, Wallisellen  
 Atlas Copco (Schweiz) AG, Studen BE  
 Bekaert Maccaferri Underground Solutions, Aalst (BE)  
 Brugg Contec AG, St.Gallen  
 BSF Swissphoto AG/Grünenfelder und Partner AG  
 CSD Ingénieurs, Lausanne  
 Doka Schweiz AG, Niederhasli  
 Dörken AG, Arlesheim  
 Elkuch Bator AG, Herzogenbuchsee  
 Ernst Basler + Partner AG, Zürich  
 Fanger Kran AG / Fanger Kies+Beton AG, Sachseln  
 Ferroflex AG, Oberglatt  
 FiReP International AG, Rapperswil

Fischer Rista AG, Reinach AG  
 JAUSLIN STEBLER AG, Muttenz  
 Kessler & Co AG, Zürich  
 Kummler+Matter SA, Région Romandie, Martigny  
 Liebherr-Baumaschinen AG, Reiden  
 Locher Ingenieure AG, Zürich  
 MAPEI SUISSE SA, Sorens  
 MEVA Schalungs-Systeme AG, Seon  
 Promat AG, Rickenbach Sulz  
 Rascor International AG, Steinmaur  
 Rothpletz, Lienhard + Cie AG, Aarau  
 Saint-Gobain Weber AG, Baden-Dättwil  
 Solexperts AG, Mönchaltorf  
 Sterobit AG, Rudolfstetten  
 Toggenburger + Co AG



Moritz Leuenberger

Bundesrat von 1995 bis 2010

Während seiner Amtszeit erfolgten die Volksabstimmungen über die Streckenführung der NEAT, ihre Finanzierung und das bilaterale Verkehrsabkommen mit der EU.

## Im Jahr des Tunnels

Es sind nicht gerade viele Disziplinen, in denen die Schweiz eine führende Rolle in der Welt spielt. Schokolade, Käse und Bankgeheimnis zehren meist von vergangenem Ruhm. Tennis, Ski und Curling stützen ihre Erfolge auf einige wenige Damen und Herren. Doch in einer Disziplin sind wir Schweizerinnen und Schweizer alle aktiv beteiligt, und wir sind alle stolz darauf: auf unsere Tunnel und unsere Tunnelbauer.

## In the Year of the Tunnel

There are not many disciplines in which Switzerland plays a leading role in the world. Chocolate, cheese and bank secrecy are mostly living from their past fame. Tennis, skiing and curling support their success on a few women and men. However, there is one discipline in which all male and female Swiss are involved and which we are proud of: our tunnels and our tunnellers.

In diesem Jahr feiern wir den längsten Tunnel der Welt, und wir tun es mit grosser Freude. Der Tunnel ist ein Meisterwerk der Ingenieure, der Mineure, der Planer – aber er ist auch ein Werk der direkten Demokratie. In vielen eidgenössischen Volksabstimmungen haben die Stimmbürgerinnen und Stimmbürger über die NEAT abgestimmt, über ihre Streckenführung, über die Verkehrsverlagerung von der Strasse auf die Schiene, über den Alpenschutz, über die LSVA (Lastwagenmaut) und über die Verträge, die dazu mit der EU nötig waren. Über Jahrzehnte wurde mit steter Kohärenz die Vision eines Basistunnels unter dem Gotthard für die Eisenbahn verfolgt. Dabei drehte es sich nicht um einen

This year, we celebrate the longest tunnel in the world, and we do that with great joy. The tunnel is a masterpiece of the engineers, the miners, the consultants, but it is also a product of direct democracy. The voters have voted in many Swiss referenda about the New Railway Link through the Alps, about its alignment, about shifting traffic from road to rail, about protecting the Alps, about the LSVA (truck toll) and about the necessary contracts with the EU. The vision of a base tunnel under the Gotthard for rail traffic has been followed with steady coherence. The point was not to set a world record, but rather to achieve content objectives, specifically to improve national cohesion, to connect

### Les tronçons de tunnels en Suisse

Elles ne sont pas nombreuses, les disciplines dans lesquelles la Suisse est leader mondial. Il existe cependant une discipline à laquelle nous, citoyens suisses, avons tous activement part et dont nous sommes fiers: nos tunnels – et nos constructeurs de tunnels. Le Tunnel de base du Saint-Gothard est le chef-d'œuvre des ingénieurs, des mineurs, des planificateurs – mais également l'œuvre de la démocratie directe – et un record mondial. L'enjeu n'était pourtant pas de battre un record mondial. On poursuivait des objectifs intrinsèques: améliorer la cohésion nationale, mieux relier la Suisse italienne et la Suisse allemande et, grâce au tunnel du Lötschberg, rapprocher le Haut-Valais, la Suisse romande et le Mittelland les uns des autres. Il s'agissait également de mener une politique durable en matière de transports et, enfin, d'apporter une contribution à la politique des transports en Europe.

### Nell'anno delle gallerie

Non sono poi molte le discipline nelle quali la Svizzera ricopre una posizione leader nel mondo. Esiste tuttavia un settore al quale noi tutti, cittadine e cittadini svizzeri, partecipiamo attivamente e ne siamo orgogliosi: sono le nostre gallerie – e i nostri costruttori di gallerie. La galleria di base del San Gottardo è un capolavoro di ingegneri, minatori, architetti – ma anche un'opera di democrazia diretta – oltre a essere un primato mondiale. Non si è trattato di un record mondiale, ma di obiettivi intrinseci, e cioè di un miglioramento del legame nazionale: collegare in modo migliore la Svizzera italiana con la Svizzera tedesca e avvicinare l'una all'altra l'Oberwallis, la Romandia e l'Altopiano Svizzero mediante la galleria del Lötschberg. Si è trattato di una politica del trasporto sostenibile. Si è trattato, inoltre, di fornire un contributo alla politica dei trasporti stessa all'interno dell'Europa.

Weltrekord; es ging um inhaltliche Ziele, nämlich um eine Verbesserung des nationalen Zusammenhaltes, darum, die italienische Schweiz mit der deutschsprachigen Schweiz besser zu verbinden und mit dem Lötschbergtunnel das Oberwallis, die Romandie und das Mittelland einander näher zu bringen. Es ging um eine nachhaltige Verkehrspolitik. Und es ging auch darum, einen Beitrag zur Verkehrspolitik in Europa zu leisten. Die Stimmbürgerinnen und Stimmbürger haben die weltweiten Bedenken gegen eine direkte Demokratie, die angeblich nicht in der Lage sei, langfristig zu planen, weil das «Stimmvolk» komplizierte Zusammenhänge nicht begreifen könne, Lügen gestraft. Rechtzeitig und ohne Kostenskandale kann der Betrieb des Tunnels eröffnet werden.

Dieser Tunnel ist entstanden durch das Zusammenspiel von Demokratie und Fachwissen, von planerischem Innovationsgeist und dem Mut der Arbeiter und Mineure, welche jahrelang unter Tage bohrten. Die ungeteilte Freude, die unser Land in diesem Jahr des Tunnels erfüllt, zeigt auch: Wer mit seinem eigenen beruflichen und körperlichen Einsatz an einem derartigen Werk mitarbeitete, wer es durch sein eigenes politisches Bekenntnis an der Urne mitgestaltete und sich zur steuerlichen Mitfinanzierung bereit erklärte, der betrachtet eine solche Infrastruktur als seine eigene. Sie wurde uns nicht vor die Nase gesetzt, sondern wir selber wollten sie und wir haben sie deswegen auch gerne. Das ist das Gegenteil von Entfremdung und Verdrossenheit. Dieser Tunnel symbolisiert sowohl technische Meisterleistungen als auch demokratische Verantwortung aufgeklärter Staatsbürgerinnen und Staatsbürger.

Dieser Tunnel lohnt manches Fest, manche Eröffnungsfahrt, manche Rede und manchen Freudentanz. Er lohnt auch einen Kongress.

Ich wünsche Ihnen für den Swiss Tunnel Congress 2016 einen grossen Erfolg. Er hat ihn verdient.

Italian Switzerland better to German Switzerland, and with the Lötschberg Tunnel to bring the Upper Valais, French-speaking Switzerland and the centre closer together. It was about sustainable transport policy. And it was also to make a contribution to transport policy in Europe. The voters have given the lie to worldwide misgivings about direct democracy, which is not supposed to be able to plan in the long term because "the voters" cannot understand complex matters. The operation of the tunnel can start on time and without cost scandals.

This tunnel has been built through the interaction of democracy and expertise, from the spirit of innovation of the designers and the courage of the workers and miners who bored below ground for years. The undivided pleasure which fills our country in this year of the tunnel also demonstrates: whoever works with their professional or bodily effort on such a work, whoever contributes to it with their own political agreement at the ballot box and declares willingness to pay taxes to finance it, regards such a piece of infrastructure as their own. The tunnel was not put in front of our nose, rather we wanted it ourselves and we are thus pleased to see it. That is the opposite of alienation and querulousness. This tunnel symbolises both a technical masterwork and the democratic responsibility of enlightened citizens.

This tunnel is worth some ceremonies, some opening journeys, some speeches and some dancing for joy. It is also worth a congress.

I wish you great success for the Swiss Tunnel Congress 2016. It is worth it.

Philippe Yvin, Président du Directoire, Société du Grand Paris, Saint-Denis/FR

## Grand Paris Express

### 200 kilomètres de métro automatique pour une nouvelle mobilité en Île-de-France

Grand Paris Express: 200 kilomètres de lignes de métro automatique, quasiment entièrement souterraines à réaliser entre 2016 et 2030. 68 futures gares et deux millions de personnes attendues quotidiennement sur ce réseau qui façonne la métropole du Grand Paris. Les travaux de génie civil ont commencé en avril 2016.

## Grand Paris Express

### 200 km of Automatic Subway Line to Provide New Travel Options in Ile-de-France

Grand Paris Express: 200 km of automatic subway lines, almost entirely underground, to be completed between 2016 and 2030. With 68 future stations expected to handle two million passengers daily, this new system is going to transform Greater Paris. Civil engineering work began in April 2016.

#### 1 Les enjeux économiques de la métropole du Grand Paris et le développement des infrastructures de transport

L'Île-de-France, région capitale, rassemble un territoire de plus de 12 millions d'habitants. Au cœur de cette région, la métropole du Grand Paris donne à voir une agglomération de plus de sept millions de personnes, construite avec et autour de Paris. En tant que concentration urbaine, la métropole comporte bien des avantages économiques et sociaux, tant pour le niveau et la qualité de vie de ses habitants que pour l'implantation de sièges sociaux d'entreprises, d'activités économiques, d'offres culturelles. À l'instar des villes-mondes comme Londres, New York ou Tokyo, la métropole du Grand Paris bénéficie de talents et d'avantages économiques certains et ambitionne à ce titre d'être la capitale mondiale de la connaissance, de la création, de la qualité de vie, une métropole accueillante et solidaire.

C'est pourquoi la métropole du Grand Paris souhaite développer sa capacité d'attractivité économique dans l'économie entrepreneuriale et de la connaissance, basée sur l'innovation. Comme dans toute agglomération, le système de transport participe de cette attractivité en permettant de développer les mobilités, facteurs de croissance et de cohésion sociale.

Aujourd'hui, en Île-de-France, ce sont plus de six millions d'emplois, 150 000 chercheurs pour un PIB annuel proche de 600 milliards d'euros. Mais cette métropole internationale, toute aussi développée qu'elle soit, est également un lieu

#### 1 Economic Issues in Greater Paris and the Development of Its Transport Infrastructure

Ile-de-France, the capital region, covers an area with more than 12 million inhabitants. The centre of this region is Greater Paris, a built-up area with a population of 7 million, both in and around Paris. As an urban concentration, the metropolis provides many economic and social benefits, both for the standard and quality of living of its inhabitants and for the establishment of corporate headquarters, economic activities and cultural attractions. Like other world cities such as London, New York and Tokyo, Greater Paris offers a variety of economic and social advantages, and as such seeks to become the world capital of knowledge, invention, and quality of life: a welcoming, interdependent and united regional centre.

Accordingly, Greater Paris wishes to improve its ability to attract economic development in the entrepreneurial and knowledge fields, based on innovation. As in any urban area, the transport system forms a part of such attraction by facilitating mobility, a key to growth and social cohesion.

At present, Ile-de-France has six million regular jobs and 150,000 research posts, generating an annual GDP of nearly €600 billion. But this international metropolis, as strongly developed as it may be, is also a locus of traffic congestion, damage to the environment, and imbalances of both social and territorial nature. While each year its inhabitants make more than 4.3 billion trips on the existing public transport system, its capacity is already stretched

## Grand Paris Express

Ein 200 Kilometer langes Liniennetz für die automatische U-Bahn im Dienste einer neuen Mobilität in der Region «Île de France»

Das Grossprojekt Grand Paris Express ist die Baustelle des Jahrhunderts: Zwischen 2016 und 2030 sollen 200 Kilometer nahezu vollständig unterirdische Strecken für eine neue automatische U-Bahn gebaut werden. Hinzu kommt die Umgestaltung von über 140 km<sup>2</sup> rings um die 68 künftigen Bahnhöfe herum. Diese neue Infrastruktur sollen in absehbarer Zeit täglich mehr als zwei Millionen Personen nutzen. Das neue, mit dem bestehenden Nahverkehrsnetz des Grossraums Paris verbundene U-Bahn-Netz wird die Metropole «Grand Paris» und ihre Weiterentwicklung wesentlich prägen. Die ersten Tiefbauarbeiten haben im April 2016 begonnen.

## Grand Paris Express

Un metrò automatico di 200 chilometri per una nuova mobilità nell' Île-de-France

Il Grand Paris Express è il cantiere del secolo: tra il 2016 e il 2030 verranno realizzati 200 km di linee nuove quasi del tutto sotterranee, di una metropolitana automatica. Il programma comprende la ristrutturazione di oltre 140 km<sup>2</sup> attorno alle 68 stazioni previste. Oltre due milioni di persone potranno a breve usufruire giornalmente di queste nuove infrastrutture. La nuova rete metropolitana collegata alla rete di trasporto urbano già esistente nell'ampia zona di Parigi, permetterà in modo molto significativo alla metropoli «Grand Paris» di svilupparsi. Non si tratta nemmeno più di un progetto, visto che dall'aprile 2016 sono già iniziati i primi lavori di genio civile.

d'embouteillages, d'atteintes à l'environnement et de déséquilibres sociaux et territoriaux. Alors que chaque année, les Franciliens effectuent plus de 4,3 milliards de voyages sur le réseau de transport public actuel, la saturation des capacités du réseau se fait sentir et engendre de nombreux désagréments et un coût social conséquent.

C'est la raison pour laquelle après la relance du Grand Paris comme projet stratégique national par le président Sarkozy en 2008 et la vaste consultation internationale des architectes, l'État et la région Île-de-France ont engagé un grand plan de mobilisation pour rénover et développer le réseau: le Grand Paris des Transports.

Le Grand Paris des Transports constitue un vaste plan de financement des infrastructures publiques de transport en Île-de-France, décidé par le Premier ministre Jean-Marc Ayrault en mars 2013, en lien avec la région Île-de-France, et évalué à 32 milliards d'euros: sept milliards d'euros pour la rénovation et l'amélioration du réseau existant (RER, métro, tramway, lignes Transilien) et le prolongement de certaines lignes du métro actuel, et 25 milliards pour la réalisation du Grand Paris Express, nouveau métro entièrement automatique en rocade autour de Paris. Le Grand Paris des transports a été confirmé par Manuel Valls en juillet 2014 en demandant à ce que certaines opérations (desserte des aéroports) soient accélérées. La Société du Grand Paris (SGP) est le maître d'ouvrage du Grand Paris Express et participe également au financement du plan de mobilisation (RER E, schéma directeur des RER, prolongement des lignes 11 et 14 au nord).

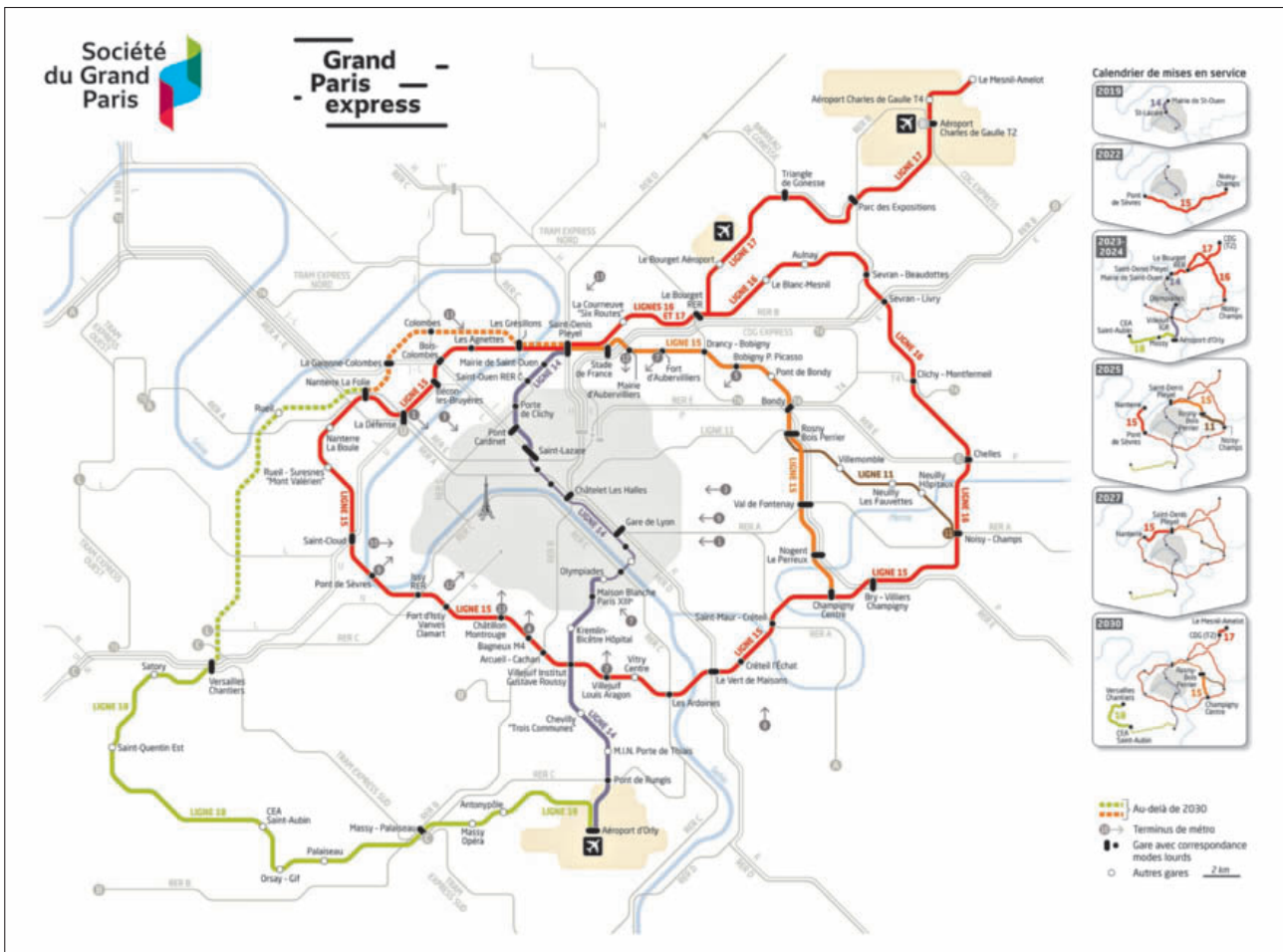
Le Grand Paris Express est le chantier du siècle: 200 kilomètres de lignes nouvelles, quasiment toutes entièrement souterraines, quatre nouvelles lignes de métro, deux prolongements de lignes existantes. Ce sont également plus de 140 km<sup>2</sup>,

to the limit, creating inconveniences for many as well as sizeable social costs.

For this reason, after the relaunch of Grand Paris as a national strategic project by President Sarkozy in 2008, and a huge international architectural tender, the state and the Ile-de-France Region have embarked on a large-scale plan to deploy the resources to overhaul and expand the system: the Greater Paris Transport Project.

The Greater Paris Transport Project is a vast plan for the financing of public transport infrastructure in Ile-de-France, authorised by Prime Minister Jean Marc Ayrault in March 2013 in association with Ile-de-France, at an estimated cost of €32 billion: €7 billion for the renovation and improvement of the existing network (RER, Metro, Streetcars, and Transilien lines) and the extension of some of the current Metro lines, and €25 billion for the execution of the Grand Paris Express, a new, entirely automatic subway to run completely around Paris. The Greater Paris Transport Project was confirmed by Manuel Valls in July 2014, with the requirement that some of its operations (connections to airports) be speeded up. The Société du Grand Paris (SGP) is the contracting authority for the Grand Paris Express and also one of the financing parties for the Mobilization Plan (RER E, RER Master Plan, northern extension of Line 11 and Line 14).

The Grand Paris Express is the biggest construction job of this century: 200 km of new lines, almost all of them entirely underground, four new Metro lines, and two extensions of existing lines. It will also require the development of a total area of 140 km<sup>2</sup> around the 68 future stations. More than three million people are expected to use the system daily. In 2030, when the Grand Paris Express is fully complete, 90% of the 12 million inhabitants of Ile-de-France will be living



Crédit/credit: Société du Grand Paris

**1** Le Grand Paris Express : 4 lignes supplémentaires, 68 gares interconnectées, un métro automatique à 100 %, 200 kilomètres de nouvelles lignes, 90 % en souterrain, 2 millions de voyageurs au quotidien, 2 à 3 min entre deux rames, 45 à 55 km/h vitesse de circulation

The Grand Paris Express: 4 additional lines, 68 interconnected stations, a 100 % automatic subway, 200 km of new lines, 90 % underground, 2 million passengers daily, 2 to 3 min between trains, 45 to 55 km/h travel speed

autour des 68 futures gares, qui seront à aménager. Plus de trois millions de personnes sont attendues quotidiennement sur ce réseau. En 2030, lorsque le Grand Paris Express sera entièrement réalisé, 90% des 12 millions de Franciliens habiteront à moins de deux kilomètres d'une gare ou d'une station de métro. Cette double vision, entre projet de transport et projet d'aménagement, trouve sa légitimité en tant que véritable projet politique de long terme. Il permettra, grâce à ses nombreuses interconnexions avec le réseau existant (28 gares interconnectées avec le réseau SNCF et 16 avec le réseau RATP), aux habitants d'Île-de-France, à ceux de la grande couronne comme aux salariés des départements voisins qui utilisent le réseau SNCF pour venir travailler dans l'agglomération, de disposer d'une connexion avec le nouveau réseau métropolitain. Au-delà, c'est tout le travail sur l'intermodalité, numérique et électrique, qui est repensé, en lien avec les collectivités, les opérateurs de transport et notre autorité organisatrice, le syndicat des transports d'Île de France (STIF). 68 nouveaux pôles intermodaux verront le jour afin que les mobilités entre bus, véhicules partagés, vélos, marche soient facilitées et améliorées. Le soin apporté à l'aménagement de ces espaces publics autour des gares est primordial pour qu'ils

less than two km away from a railway or subway station. This dual objective, combining a transport project with a development project, can only be realistically achieved as a truly long-term political project. Thanks to its numerous interconnections with the existing system (28 stations interconnected with the SNCF network and 16 with the RATP network), it will enable the inhabitants of Ile-de-France, those in the outlying suburbs and wage earners in neighbouring départements who use the SNCF to travel to work in the urban area, to enjoy a connection to the new metropolitan system. Beyond that, there is to be a complete rethinking of its digital and electric intermodality in association with the various local authorities, the transport operators and our own organising authority and the Ile-de-France Transport Union (STIF). 68 new intermodal poles will be established so that mobility between buses, shared vehicles, bicycles, and foot traffic is facilitated and improved. Paying attention to the development of these public spaces around the stations is crucial, so that each is accepted as just another public place in Paris. In this regard the lines of the Grand Paris Express will define the metropolitan landscape, acting as a major tool in the evolution of the metropolis.

deviennent autant de nouvelles places de Paris. Ici, les lignes du Grand Paris Express dessinent le territoire métropolitain comme instrument majeur du devenir de la métropole.

Les lignes du Grand Paris Express se décomposent comme suit:

- Les lignes de rocade qui desserviront les territoires de la métropole:

**La ligne 15 sud** entre Noisy-le-Grand/Champs-sur-Marne et Boulogne-Billancourt parcourra 33 kilomètres entièrement souterrains, comprendra 16 gares et 38 ouvrages annexes et sera mise en service en 2022. Deux sites de maintenance (Vitry et Champigny) seront raccordés à la ligne. Le coût de l'opération s'élève à 5,7 milliards d'euros.

**La ligne 15 ouest** entre Boulogne-Billancourt et Nanterre-La Défense desservira neuf gares sur 20 kilomètres. L'opération s'élève à trois milliards d'euros. La ligne sera mise en service en deux phases: en 2025 pour la partie Pont de Sèvres-Nanterre et 2030 pour la partie Nanterre-Saint-Denis Pleyel.

**La ligne 15 est** desservira Champigny à Saint-Denis Pleyel sur 26 kilomètres et dix gares. D'un montant de 3,5 milliards d'euros, elle sera mise en service en deux phases: 2025 pour la section Saint-Denis Pleyel-Rosny et 2030 pour la section Rosny-Champigny. Un site de maintenance sera installé à Rosny-sous-Bois.

**La ligne 16** (17 sud et 14 nord), entre Noisy-le-Grand/Champs-sur-Marne et Saint-Denis Pleyel, parcourra 29 kilomètres entièrement souterrains et comprendra neuf gares et un site de maintenance (Aulnay). Le montant de l'opération s'élève à 3,5 milliards d'euros. Elle sera mise en service fin 2023.

- Les lignes desservant les aéroports, les gares TGV et le cluster de Saclay:

**La ligne 14 sud** desservira l'aéroport d'Orly à partir de Paris. Sur 14 kilomètres elle comprend sept gares et un site de maintenance (Morangis). Le coût de l'opération est de 2,1 milliards d'euros. La ligne sera mise en service mi-2024.

**La ligne 18** entre Orly et Versailles desservira neuf gares pour 35 kilomètres de voies dont 14 en aérien. Un site de maintenance sera édifié à Palaiseau. Le coût de l'opération s'élève à 2,7 milliards d'euros. Outre Orly, cette ligne desservira la gare TGV de Massy-Palaiseau. Elle sera mise en service en deux phases: 2024 pour la partie Orly-cluster de Saclay et 2030 pour la partie CEA-Versailles.

**La ligne 17 nord**, qui desservira l'aéroport de Roissy (et sa gare TGV), reliera Saint-Denis Pleyel au Mesnil-Amelot. Longue de 20 kilomètres et comportant six gares, elle desservira également l'aéroport du Bourget. Un peu plus de cinq kilomètres seront en partie aériens. Elle sera mise en service mi-2024.

Pour réaliser cette infrastructure, dans un tissu urbain dense et très contraint, les équipes de la SGP ont mis en place un système de concertation très poussée avec l'ensemble des populations, des territoires et des communes desservies.

The lines of the Grand Paris Express include the following:

- Ring lines which will serve the areas around the metropolis:

**Line 15 South**, between Noisy-le-Grand/Champs sur Marne and Boulogne Billancourt, will travel 33 km entirely below ground, with 16 stations and 38 ancillary constructions, and will start operation in 2022. Two maintenance sites (Vitry and Champigny) will be linked to this line. The cost of construction is estimated at €5.7 billion.

**Line 15 West**, between Boulogne Billancourt and Nanterre-La Défense, will serve 9 stations over a length of 20 km. Construction will cost €3 billion. The line will open in two stages: in 2025 for the Pont de Sèvres-Nanterre section and 2030 for the Nanterre Saint Denis Pleyel section.

**Line 15 East** will serve Champigny to Saint Denis Pleyel with 26 km of line and 10 stations. With a cost of €3.5 billion, and will be put into service in two stages: in 2025 for the Saint Denis Pleyel-Rosny section and 2030 for the Rosny-Champigny section. A maintenance site will be established at Rosny-sous-Bois.

**Line 16** (17 South and 14 North) between Noisy-le-Grand/Champs sur Marne and Saint-Denis Pleyel, will extend for 29 km entirely below ground and will have 9 stations and one maintenance site (Aulnay). The cost of construction will be €3.5 billion. It will begin operating at the end of 2023.

- Lines serving the airports, the TGV stations and the Saclay cluster:

**Line 14 South** will serve Orly Airport from Paris, with a length of 14 km, 7 stations and one maintenance site (Morangis). The construction cost is €2.1 billion. The line will begin operating in mid 2024.

**Line 18**, between Orly and Versailles, will serve 9 stations over 35 km, including 14 km of elevated track. One maintenance site will be constructed at Palaiseau. The construction cost amounts to €2.7 billion. Beside Orly, this line will serve the Massy Palaiseau TGV station. It will be put into service in two stages: in 2024 for the Orly-Saclay cluster portion and 2030 for the CEA-Versailles portion.

**Line 17 North**, which will serve Roissy Airport (and its TGV station), will connect Saint-Denis Pleyel to Mesnil-Amelot. 20 km in length with 6 stations, it will also serve Le Bourget Airport. A little more than 5 km will run on elevated track. It will begin operating in mid 2024.

To successfully build this infrastructure within a dense and tightly constrained urban fabric, the SGP construction crews have established a highly advanced consultation system involving all the affected population, areas and communes.

In order to improve the acceptability of the project and its activities, both among the population and among elected officials, a large number of committees, public meetings and consultation stages were organised as a preliminary to the public inquiry. Between 2010 and 2015 more than 215 steering committees bringing together elected representatives and teams from the SGP held meetings, and more than 180 public meetings made every effort to prepare the way



Afin de travailler à la meilleure acceptabilité du projet et des travaux tant par les populations que les élus, de nombreux comités, réunions publiques, étapes de concertation préalable à l'enquête publique ont été organisés. Entre 2010 et 2015, plus de 215 comités de pilotage associant élus et équipes de la SGP ont eu lieu, plus de 180 réunions publiques ont permis de préparer au mieux l'arrivée des futures lignes et gares sur les différents territoires de la métropole du Grand Paris. Ce système de coproduction du Grand Paris Express est un peu l'ADN du projet, sa méthode, qui fait qu'aujourd'hui, le Grand Paris Express bénéficie d'un fort taux d'acceptation. La concertation va se poursuivre au sein de comités de suivi de chantiers.

Pour conduire cette opération sans égale, l'État a créé un outil spécifique dédié : la SGP. Créée par la loi du 3 juin 2010, la SGP est un établissement public à caractère industriel et commercial. Bénéficiant de ressources fiscales affectées, la SGP est maître d'ouvrage de l'infrastructure, des gares mais également de certains des aménagements au-dessus et autour des futures gares. La capacité de financement de la SGP est constituée de recettes prélevées sur les entreprises et ménages franciliens :

- La taxe locale sur les bureaux (TLB). Cette taxe, indexée sur l'indice du coût de la construction, a un produit dynamique. Le produit de la taxe est de 350 millions d'euros par an.
- La taxe spéciale d'équipement (TSE), taxe additionnelle aux taxes locales dont le montant perçu par la SGP est fixé à 117 millions d'euros.
- Enfin, une composante de l'Imposition Forfaitaire sur les Entreprises de Réseaux (IFER) assise sur le matériel roulant exploité par la RATP, pour 65 millions d'euros par an.

Ces financements seront complétés à mesure des mises en service par les redevances d'usages du réseau et les recettes commerciales (commerces dans les gares, publicité, fibre optique). Des recettes issues des opérations d'aménagement et de construction réalisées sur le foncier de la SGP abonderont également ces différentes sources de financement.

Ce modèle économique, avec financements dédiés et fléchés, permet de sécuriser très rapidement le projet afin qu'il dépende non pas de crédits budgétaires annuellement négociés mais bien de recettes directes et pérennes. La gouvernance articulée autour de trois organes consolide également le projet :

- un directoire qui assure le pilotage stratégique et opérationnel de la Société et du projet au quotidien;
- un conseil de surveillance qui comprend les principaux élus de la région et les représentants de l'État, et qui valide les grandes opérations stratégiques du projet;
- un comité stratégique qui rassemble l'ensemble des élus locaux concernés par le projet afin que ces derniers alimentent la SGP de leurs réflexions et propositions.

for the arrival of the future lines and stations in the various districts of the Greater Paris urban area. This "coproduction" system organised by the Grand Paris Express is in a sense the DNA of the project, its method, which ensures that the Grand Paris Express now enjoys a high level of acceptance. These consultations will continue with site monitoring committees.

In order to carry out this unique operation, the state has created a specific, dedicated instrument: the SGP. Established by the Law of 3 June 2010, the SGP is a public corporation, industrial and commercial in nature, The fiscal resources it enjoys have enabled the SGP to become the contracting authority for the infrastructure, the stations, and also for certain developments above and around the future stations. The SGP's financing capacity arises from the revenues levied on firms and households in Ile-de-France:

- The local tax on offices (TLB). This tax, calculated against the construction cost index, yields dynamic proceeds. The proceeds from this tax are €350 million per year.
- The special tax on equipment (TSE), a supplement to local taxes, whose amount collected by the SGP is fixed at €117 million.
- Lastly, a component of the Flat Tax on System Companies (IFER) based on the rolling stock employed by the RATP, for €65 million per year.

These sources of funding will be progressively supplemented, as the lines are put into service, by the fees paid for using the system and by commercial revenues (businesses in the stations, advertising and fibre optics). Revenues arising from development and construction operations carried out on SGP property will also swell these various sources of finance.

This economic model, with dedicated and earmarked funding, enables a very rapid securitisation of the project, so that it does not depend on annually negotiated budgetary credits but instead on direct and perennial revenues. Its governance, structured around three bodies, further strengthens the project:

- a Board of Directors that provides the strategic and operational management of the company and the project on a day-to-day basis;
- a Supervisory Board that includes the principal elected representatives from the region and representatives of the state, and which ratifies the major strategic initiatives for the project;
- a Strategic Committee that brings together all the locally elected representatives involved in the project so that they can pass on their thoughts and suggestions to the SGP.

This system is easy to operate, allowing a relatively broad field of action for the board of directors, while at the same time strongly involving the local elected representatives and the company's supervisory bodies.

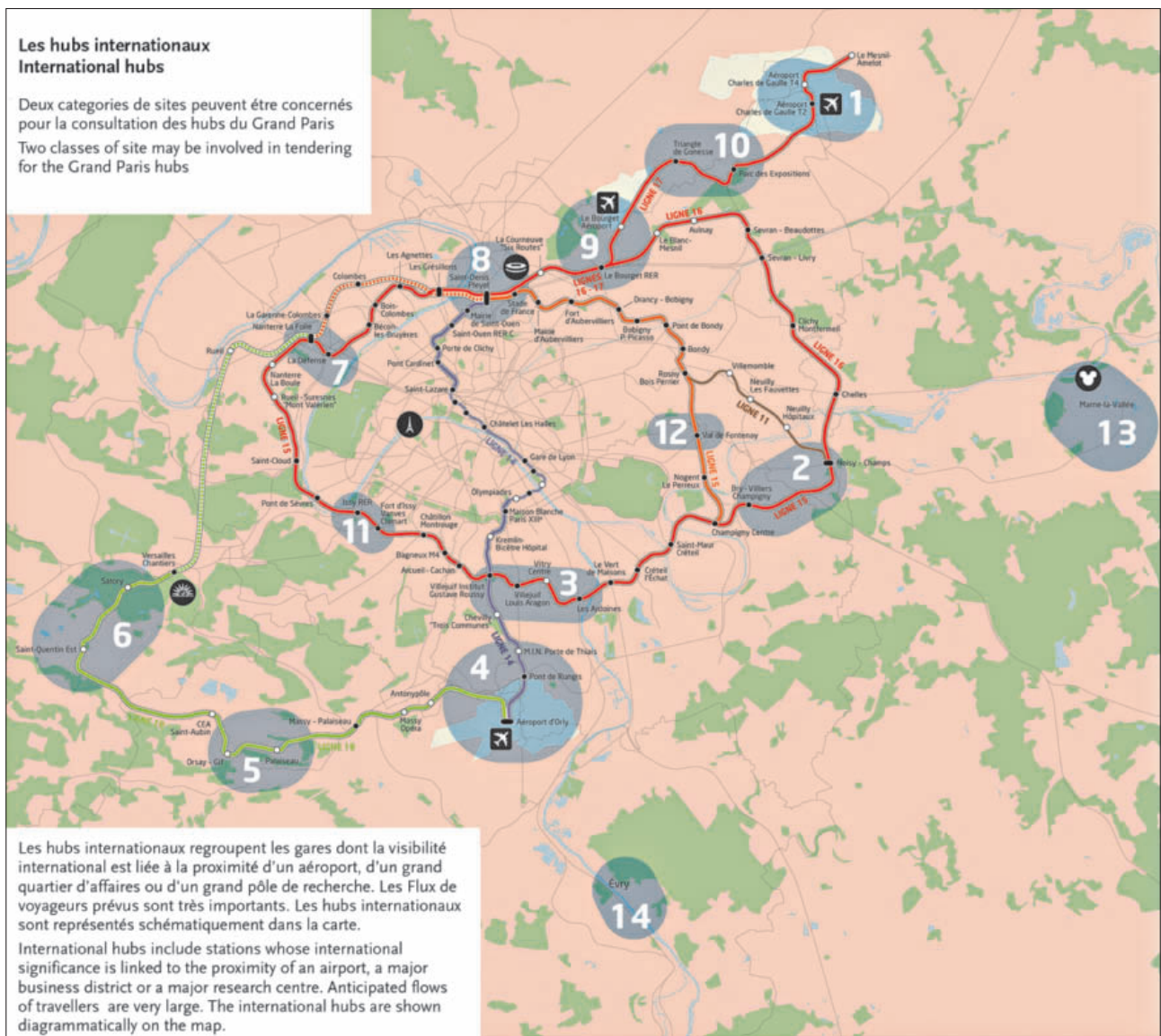
Ce système permet à la fois d'être aisément opérationnel, avec un champ d'action du directoire relativement large, tout en impliquant fortement les élus locaux et les tutelles de l'établissement.

## 2 Le Grand Paris Express : les défis à relever

En 2015, le Grand Paris Express est entré dans sa phase opérationnelle. Les travaux préparatoires ont débuté sur la ligne 15 sud et les premiers chantiers de génie civil vont débuter durant le printemps 2016. La ligne 15 sud sera ainsi la pre-

## 2 The Grand Paris Express: The Challenges It Faces

In 2015, the Grand Paris Express began its operational phase. Preparatory work started on Line 15 South and the first civil engineering sites will start work in the spring of 2016. Line 15 South will thus become the first line in the system to be put into service. To achieve this, more than €3 billion will be committed during 2016 to launch the eight civil engineering tenders. Moreover, preparatory works are already in progress on Lines 16 and 14 South. By the summer of 2016, all the public inquiries will have been completed. It should be noted that the decrees



2 Le Grand Paris Express va irriguer la totalité de la région Capitale et réunir des territoires d'activité (recherche, innovation, santé, biotechnologies, création, finance, tourisme d'affaires, ville durable). L'enjeu: soutenir le développement économique et l'habitat durable en créant des synergies vertueuses, tout en limitant l'étalement urbain.

The Grand Paris Express will serve the entire capital region and link areas of sustainable development. These centres already represent eco-systems of excellence in their fields of activity (research, innovation, health, biotechnologies, creation, finance, business tourism, sustainable city). The issue: to support economic development and a sustainable habitat by creating virtuous synergies, while limiting urban sprawl.

- 1 Grand Roissy, 2 Cité Descartes, 3 Seine Amont Vallée de la Bièvre, 4 Orly/Rungis, 5 Paris-Saclay, 6 Satory/St-Quentin Versailles, 7 La Défense-Seine-Arche, 8 St-Denis Pleyel, 9 Le Bourget Aéroport, 10 Triangle de Gonesse, 11 Val de Seine, 12 Val de Fontenay, 13 Marne-la-Vallée Est, 14 Grand Paris Sud

mière ligne du réseau mise en service. Pour ce faire, plus de trois milliards d'euros seront engagés courant 2016 pour lancer les huit lots du marché de génie civil. Par ailleurs, les travaux préparatoires sont d'ores et déjà en cours sur les lignes 16 et 14 sud. À l'été 2016, toutes les enquêtes publiques auront été réalisées. Il faut noter que les décrets déclarant d'utilité publique les lignes 15 sud et 16 ont déjà été publiés. Par ailleurs, la quasi-totalité des maîtrises d'œuvre a été attribuée. Celle de la « ligne 15 est » devrait être notifiée à l'automne 2016. Ces maîtrises d'œuvre sont façonnées par une association étroite entre architectes des gares et bureaux d'ingénierie d'infrastructures. C'est là aussi une spécificité de la SGP, avec un système intégré efficace et innovant. Dès lors, pour suivre et piloter de façon optimisée ce grand projet, la SGP s'est dotée d'outils de contrôle et de suivi performants et globaux. Ainsi, un plan directeur comprenant 650 actions décisives, suivi trimestriellement, a été élaboré pour permettre aux équipes de la SGP de conduire le projet de façon cohérente et intégrée. En parallèle, plusieurs démarches ont été mises en œuvre (démarche qualité, démarche RSE). Autant de processus qui ont pour objectif non seulement de veiller au bon déroulement du projet, mais également de s'assurer de répondre aux nombreux enjeux et défis auxquels la SGP est confrontée.

Et c'est ici que le projet du Grand Paris Express prend toute sa dimension. Autour de cet immense défi technique et technologique, les équipes de la SGP font face à une extraordinaire pression : réaliser en moins de 15 années la plus grande infrastructure de transport en commun de ces cinquante dernières années. C'est animé d'un esprit de pionniers que les ingénieurs de la SGP cherchent à innover dans tous les domaines pour répondre à ces enjeux.

L'innovation technique tout d'abord : qu'il s'agisse des sondages (plus de 3000 ont été réalisés à ce jour sur les 3500 nécessaires) généralement à plus de 45 mètres de profondeur ; qu'il s'agisse de l'usage de l'interférométrie par voie satellitaire pour mesurer les mouvements du sol, la pose de capteurs sur les tunnels comme outil de connaissance de la vie des sols, ou encore de l'utilisation du B.I.M. partout où cela est possible, la SGP cherche à innover pour garantir la construction d'un réseau sûr, performant et au meilleur coût. Innovation dans les méthodes également, où la SGP cherche actuellement à optimiser le diptyque génie civil/systèmes travaillant à des méthodes de réalisation couplée du tunnel et de la pose des systèmes dans les mêmes temps. Enfin, nos ingénieurs travaillent également à la recherche de nouveaux matériaux, plus performants, plus résistants ou plus souples, afin de réduire les délais habituels des travaux de génie civil tout en confortant la solidité de l'ouvrage, priorité numéro un de la Société.

Mais l'innovation ne réside pas uniquement dans les techniques et méthodes constructives. Avoir pour ambition de réaliser le métro le plus numérique du monde impose également d'anticiper les usages numériques de demain. L'intégralité du réseau bénéficiera de l'infrastructure en fibre

declaring that Lines 15 South and 16 are matters of public interest have already been published. In addition, nearly every one of the project management contracts has been awarded. The Line 15 East contract should be announced by autumn 2016. These project management contracts have been shaped by a close cooperation between station architects and infrastructure engineering consultants. This is another special feature of the SGP, with its efficient and innovative integrated systems. In the same way, in order to monitor and manage this vast project in an optimal manner, SGP has acquired effective, comprehensive tools for inspection and supervision. A master plan comprising 650 decisive actions, monitored quarterly, has been drawn up to enable the SGP teams to run the project in a cohesive and integrated manner. In parallel, a number of control measures have been implemented (quality control, CSR control). These are all processes aimed not only at ensuring the proper progress of the project but also at dealing with the many issues and challenges faced by the SGP.

And this is where the full scope of the Grand Paris Express Project becomes clear. By accepting this vast technical and technological challenge, the SGP teams will be under extraordinary pressure: in less than 15 years they have to complete the largest public transport infrastructure project of the last 50 years. The SGP engineers are driven by a pioneer spirit as they work to innovate in every field, responding to what is at stake here.

First, technical innovation: whether it concerns drilling (more than 3,000 holes have been completed so far, out of the 3,500 which will be necessary, usually more than 45 m deep); or the use of satellite interferometry to measure ground movements, the placing of sensors in the tunnels to investigate soil behaviour, or the use of B.I.M. wherever possible, SGP is working to innovate so as to ensure the construction of a reliable and successful system at the lowest possible cost. Innovation in methods as well, where the SGP is currently seeking to optimise the civil engineering/systems duality, working on ways to construct the tunnelling work and install systems at the same time. Lastly, our engineers are also looking for new materials that will be more effective, stronger, or more flexible, so as to reduce the usual completion times for civil engineering works while at the same time reinforcing the robustness of the structure, the number one priority for the company.

However, the innovation is not confined to techniques and construction methods. The intention to build the world's most digital subway also requires looking ahead to tomorrow's digital practices. The entire system will have an optic fibre infrastructure as well as WiFi and 5G. Data centres will be installed around some of the stations in order to connect up the communes and firms that desire to be linked to secure, high-quality infrastructure. We will be working with the manufacturers to equip the rolling stock with sensors, both

optique ainsi que du Wi-Fi et de la 5 G. Autour de certaines gares, des data centers seront réalisés, de façon à raccorder les communes et les entreprises qui le souhaitent à une infrastructure de qualité et sécurisée. Nous travaillerons avec les constructeurs pour équiper le matériel roulant de capteurs tant pour faciliter la maintenance que l'exploitation automatique du réseau.

Mais c'est peut être sur la dimension environnementale et énergétique du projet que les innovations tant en termes de méthode que de gestion seront les plus importantes. Rendons-nous compte: il faudra excaver plus de 43 millions de tonnes de déblais pour réaliser le Grand Paris Express. La SGP, au-delà de la mise en place d'une traçabilité systématique des modes de transport des déblais par plateformes ferroviaires ou fluviales, travaille avec les entreprises du secteur à la création de nouvelles filières de valorisation des déblais. Dotée d'un plan de management environnemental, la SGP a mis en place un système de bonus/malus lié à la valorisation des déchets (tri en amont, réemploi des déchets sur le site, filière d'économie circulaire) qui est inscrit dans chaque dossier de consultation des entreprises. Concernant la dimension énergétique, ce sont d'ores et déjà plusieurs gares du Grand Paris Express qui fourniront de la géothermie pour alimenter les ouvrages en chaleur. Mais ce sont également tous les procédés de récupération de chaleur (trains, bâtiments, etc.) qui seront mis en œuvre pour être réemployés dans le réseau ou vendus à des tiers locaux. On le voit, la SGP a mis en place une réelle démarche d'écoconception: maîtrise des nuisances, gestion de l'énergie, gestion des déchets.

### 3 L'héritage du Grand Paris Express

L'idée même du Grand Paris Express consiste à doter la métropole du Grand Paris d'une puissante infrastructure de transport en commun, permettant de désengorger le réseau actuel et de desservir des territoires jusqu'alors enclavés. Au-delà de sa seule fonction de transport, il faut mesurer les impacts de ce projet hors norme.

En matière d'emplois et d'économie tout d'abord: 10 000 à 15 000 emplois par an seront nécessaires pour réaliser l'infrastructure. Afin d'assurer de réels parcours de formation, la Société du Grand a décidé, en lien avec la Fédération Régionale des Travaux Publics et la région Île-de-France de créer une «Académie du Grand Paris» réunissant en son sein toutes les filières et corps de métiers nécessaires à l'édification d'un tel projet et au-delà préparer les compétences requises par les entreprises du grand Paris de demain. Aussi, ce sont plus de 100 000 emplois directs et indirects qui devraient être créés en 2030 grâce à l'arrivée du Grand Paris Express. Par ailleurs, l'ensemble des économistes s'accorde à dire que l'arrivée du Grand Paris Express générera plus de 100 milliards de PIB supplémentaire pour la région Île-de-France (600 milliards aujourd'hui). Enfin, c'est une infrastructure qui permettra de «rééquilibrer» la desserte des territoires de l'Île-de-France, avec des bénéfices sociaux et environnementaux très importants.

to facilitate maintenance and to automatically operate the network.

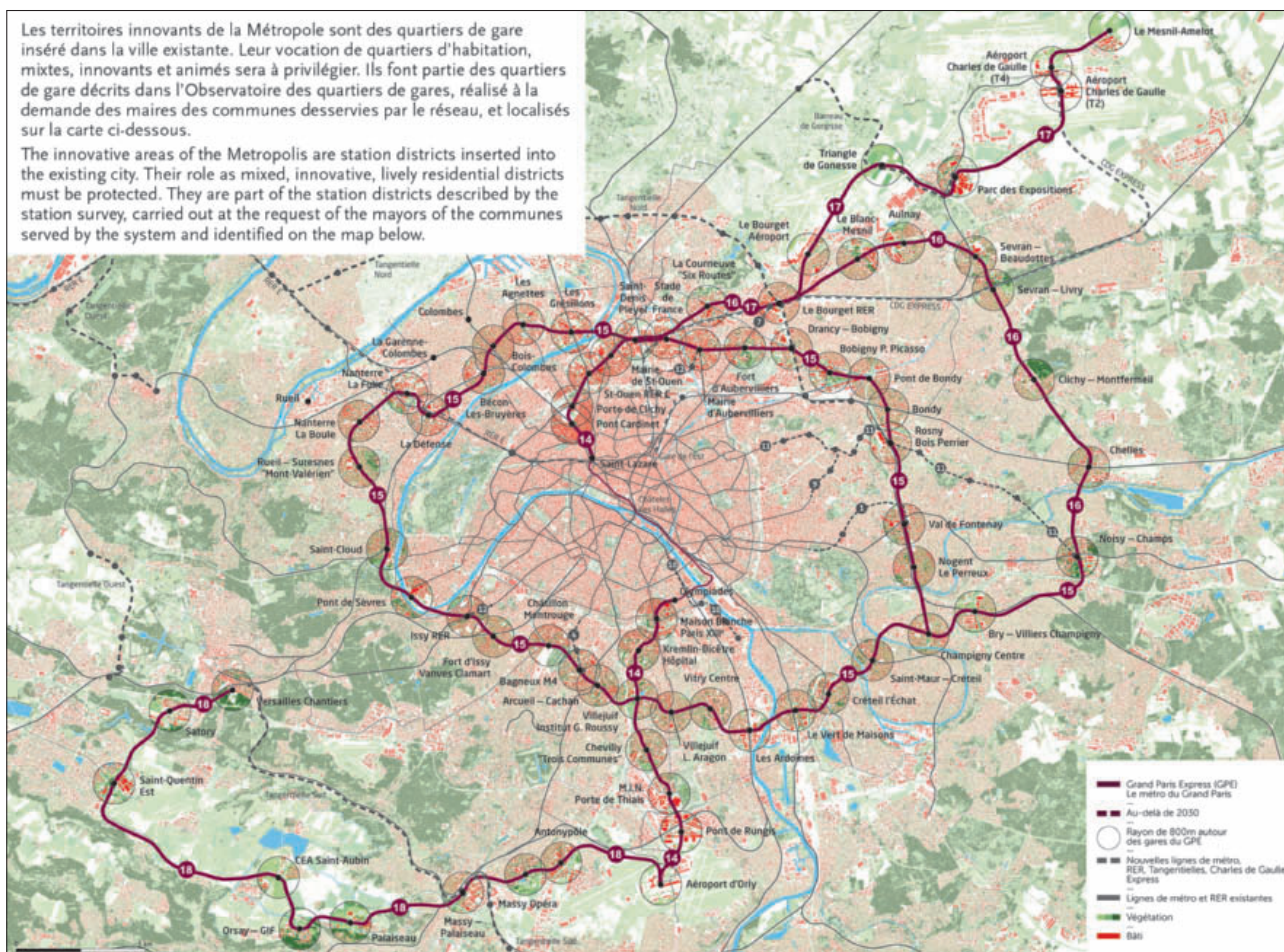
But it is perhaps in the project's environmental and energy areas that the innovations, both in methods and in management, will be most significant. After all, completing the Grand Paris Express will require the excavation of 43 million tonnes of spoil. The SGP, besides establishing systematic traceability for the modes of spoil transport – rail or river – is working with other companies in the sector to create new ways to make use of the spoil. Under its environmental management plan, the SGP has set up a bonus/penalty system linked to recycling of wastes (upstream sorting, reuse of waste on the site, a circular economy procedure), which is included in each company's tender file. As regards energy, there are already a number of Grand Paris Express stations that will supply geothermal power to heat their buildings. But there are also all the various processes for recovering heat (trains, buildings, etc.), which will be implemented for reuse in the system or sale to local third parties. The SGP has established a genuine eco-design approach: pollution control, energy management, and waste management.

### 3 The Legacy of the Grand Paris Express

The core purpose of the Grand Paris Express is to provide Greater Paris with a powerful public transport infrastructure, which will enable the capacity overloads on the existing system to be relieved and offer services in areas that have hitherto been isolated. Beyond its function of transport alone, we must also assess the impacts of this extraordinary project.

Firstly as regards employment and economics: 10,000 to 15,000 jobs per year will be required to create this infrastructure. In order to provide proper training courses, the company has decided, in association with the Regional Public Works Federation and the Ile-de-France Region, to establish a "Greater Paris Academy" combining all the courses and trade associations necessary for the construction of such a project and beyond that to develop the skills needed by the Greater Paris of tomorrow. In addition, more than 100,000 direct and indirect jobs are expected to be created by 2030 thanks to the coming of the Grand Paris Express. Moreover, all the economists agree that the arrival of the Grand Paris Express will generate more than 100 billion in additional GDP for the Ile-de-France Region (600 billion today). Lastly, it represents an infrastructure that will enable a "rebalancing" of service to the Ile-de-France's various areas, with very significant social and environmental benefits.

It is probably in its urban aspects that Greater Paris will best display its vitality and amenities. The system being almost entirely underground, the stations and the developments around the stations will be the surface markers of this vast network. More than 140 km<sup>2</sup>, or more than the current surface area of Paris, are to be developed over the next



Crédit/credit: Société du Grand Paris

3 Les territoires innovants de la métropole  
The innovative areas of the metropolis

C'est probablement dans sa forme urbaine que le Grand Paris donnera à voir sa vitalité et ses aménités. Le réseau étant quasiment entièrement souterrain, les gares et les aménagements autour des gares seront les marqueurs territoriaux de ce grand réseau. Plus de 140 km<sup>2</sup>, soit plus que la superficie actuelle de Paris, seront aménagés dans les 15 prochaines années. C'est la première fois qu'un projet de transport affiche son intention de générer de l'urbanisation à cette échelle, notamment en favorisant le renouvellement urbain des territoires traversés. Pour préparer ces projets, la SGP a mis en place un observatoire des quartiers de gare qui recueille pour chacune d'elles les données essentielles et en assure l'analyse comparative (destination des sols, habitat, tissu économique et caractérisation des emplois, équipements de santé, culturels et sportifs...). Ce sont autant de données à la disposition du renouvellement urbain, mais aussi demain de l'évaluation des impacts du projet. Cette approche microéconomique viendra compléter les évaluations d'ensemble à l'échelle du réseau déjà réalisées aujourd'hui (chacun des tronçons a fait l'objet d'une évaluation socio-économique ex ante et d'une contre-expertise) et programmées.

Ces territoires, ces portes du Grand Paris, doivent dès aujourd'hui intégrer l'innovation comme matrice de développe-

ment. This is the first time that a transport project has openly announced its intention to generate urbanisation of this scale, specifically by promoting urban renewal in the areas it crosses. In order to prepare these projects, the SGP has established a survey centre to collect essential data and provide comparative analyses for each of the station districts (land use, housing, economic structure and nature of jobs, medical, cultural and sport facilities, and so on); this information is available for urban renewal purposes and also later on to assess the impacts of the project. This microeconomic approach will supplement the overall evaluations on a system-wide scale that have already been carried out or scheduled (each of the segments has been or will be the subject of an advance socioeconomic assessment and a second opinion study).

These areas, the gates to Greater Paris, will immediately have to begin to incorporate innovations as their template for development and planning. For this reason, the French government, in association with the Greater Paris authorities, has decided to launch an international tendering process for the "Greater Paris Hubs". Laid out on a score of major sites around the Grand Paris Express, it will invite investors and promoters to suggest urban concepts

ment et de programmation. C'est la raison pour laquelle l'État, en lien avec la métropole du Grand Paris, a décidé de lancer une consultation internationale «Les hubs du Grand Paris». Articulés sur une vingtaine de sites majeurs autour du Grand Paris Express, il s'agira d'inviter les investisseurs et promoteurs à proposer des concepts et des développements urbains permettant de renforcer l'attractivité des territoires d'Île-de-France tout en assurant un développement urbain innovant.

L'innovation, la qualité et la création seront des marqueurs du projet. Nous entendons tracer le souffle d'une génération à travers l'architecture des 68 gares et des six sites industriels, le design des équipements et mobiliers, le déploiement d'un projet culturel et artistique qui accompagne les chantiers au-delà de la commande artistique elle-même, l'association de la jeunesse en développant un projet pédagogique en direction des collégiens et lycéens, futurs usagers, et en parrainant des startups, ou encore en mettant en œuvre un projet intégré de la ville en chantier du XXI<sup>ème</sup> siècle (information des riverains, gestion de la circulation, soutien aux commerçants, gestion des chantiers...).

Certes, de nombreux grands projets d'infrastructures de transport public sont en chantier dans les métropoles de la péninsule arabique ou en Asie. Mais, pour une ancienne agglomération comme Paris, le Grand Paris Express est le chantier du siècle. Des conceptions techniques aux prescriptions urbanistiques, tout dans ce projet donne à voir la transformation urbaine de la métropole du Grand Paris. Alors que les travaux de génie civil ont commencé en avril de cette année, le Grand Paris Express n'est plus un projet; le Grand Paris Express est en marche.

and developments that will intensify the appeal of areas in Ile-de-France while also ensuring innovative urban development.

Innovation, quality and creativity will be the hallmarks of the project. We intend to portray the spirit of a generation through the architecture of the 68 stations and six industrial sites, the design of the facilities and furniture, and in the unfurling of a cultural and artistic project which lends support to the work beyond the artistic commission itself. Also by the association of young people in developing an educational project for college and high school students, who are its future users, and by sponsoring start-ups, or by implementing an integrated project for the city in a 21<sup>st</sup> century workplace (informing residents, managing traffic, supporting storekeepers, managing construction sites, etc.).

Of course, there are many ongoing big public transport infrastructure projects in the major cities of the Arabian Peninsula and in Asia. But in an ancient urban area like Paris, the Grand Paris Express is the construction project of the century. From the technical designs to the town planning requirements, everything in this project expresses the urban transformation of Greater Paris. With the civil engineering works well underway since April, the Grand Paris Express is picking up speed.

*Christian Späth, Dipl.-Ing., Implenia Österreich GmbH, Salzburg/AT  
Peter Hoppe, Dipl.-Ing., Implenia Construction GmbH, Berlin/DE*

# Neubau der U-Bahnlinie U5 in Berlin

## «Lessons learnt»

Mit dem Bau der U5 wird das derzeit letzte in geschlossener Bauweise geplante U-Bahn-Los in Berlin gebaut. Der Bericht verdeutlicht die Herausforderungen bei der Herstellung von Tunnelprojekten in geschlossener Bauweise im Innenstadtbereich. Er zeigt auch, dass trotz fortgeschrittenem Stand der Technik und sorgfältiger Planung noch immer Weiterentwicklungen möglich sind.

## Construction of Berlin's New U5 "U-Bahn" Line "Lessons Learnt"

Berlin's last – for the time being – "U-Bahn" (underground rapid transit) underground tunnelling lot is currently under construction as line U5. This report illustrates the challenges encountered in underground tunnelling projects in inner-city areas, and also shows that further developments continue to be possible, despite the already advanced technological state-of-the-art and careful planning and design.

### 1 Einführung

Die U-Bahnlinie U5 verbindet im derzeit geplanten Endzustand den Hauptbahnhof mit dem Ortsteil Hönow im Osten der Stadt. Der erste Bauabschnitt dieser Linie wurde bereits 1930 eröffnet. Zum Zeitpunkt der deutschen Wiedervereinigung endete die Linie von Hönow kommend am Bahnhof Alexanderplatz. Im Zuge des Hauptstadtvertrages haben sich die Bundesrepublik Deutschland und das Land Berlin verpflichtet, die U5 vom Alexanderplatz bis zum Hauptbahnhof zu verlängern. Mit diesem neuen Streckenabschnitt erhalten die Stadtteile Hellersdorf, Kaulsdorf, Lichtenberg und Friedrichshain eine direkte Verbindung zur historischen Innenstadt, zum Regierungsviertel und zum Berliner Bahnhof. Auch können die touristisch bedeutsamen Wahrzeichen rund um die Museumsinsel, entlang der Strasse Unter den Linden und dem Regierungsviertel vom Berliner Hauptbahnhof und dem Alexanderplatz direkt mit der neuen U-Bahnlinie U5 erreicht werden (Bild 1).

In einem ersten Bauabschnitt wurde bis 2009 die Strecke vom Hauptbahnhof bis zum Bahnhof Brandenburger Tor fertiggestellt. Das verbleibende Zwischenstück beträgt ca. 2,2 km und umfasst unter anderem die Bahnhöfe Berliner Rathaus, Museumsinsel und Unter den Linden. Die Bauaufgabe wurde in zwei Lose aufgeteilt, wobei das Los 2 lediglich den Bahnhof Berliner Rathaus und den Anschluss an den Bahnhof Alexanderplatz beinhaltet.

Das Los 1 beinhaltet die Gleiswechselanlage westlich des Bahnhofs Berliner Rathaus, den Bahnhof Museumsinsel, den Kreuzungsbahnhof mit der bestehenden U-Bahnlinie

### 1 Introduction

The U5 U-Bahn line will in its final form, as currently planned, link Berlin Hauptbahnhof (main station) to the Hönow district in the east of the city. The first section of this line was completed and opened as long ago as 1930. At the time of the reunification of Germany, the line terminated, viewed from the Hönow direction, at Alexanderplatz. Under the "Hauptstadtvertrag" (the agreement on improvements to Berlin as German capital city), the Federal Republic of Germany and the State of Berlin have undertaken to extend U5 from Alexanderplatz to the main station. This new section of line will provide the districts of Hellersdorf, Kaulsdorf, Lichtenberg and Friedrichshain with a direct connection to the historic city centre, to the government district and to the main Berlin rail station. The historic attractions on and around the Museumsinsel, along Unter den Linden and in the government district, all of importance for tourism, will then also be directly accessible from the main station and Alexanderplatz on the new line U5 (Fig. 1).

The section of line from the main station to the station at Brandenburger Tor was completed during the first construction phase to 2009. The missing section has a length of approx. 2.2 km and includes stations at Berliner Rathaus, Museumsinsel and Unter den Linden. Construction work has been split into two lots, lot 2 encompassing only the Berliner Rathaus station and the connection to the station at Alexanderplatz.

Lot 1 includes the track crossover to the west of the Berliner Rathaus station, Museumsinsel station, the interchange sta-

## Nouvelle construction de la ligne de métro U5 à Berlin

« Les enseignements tirés »

Après la réunification allemande, la République fédérale d'Allemagne et le Land de Berlin se sont engagés, dans le cadre de l'accord dit « Contrat de capitale », à prolonger la ligne de métro U5 jusqu'à la gare centrale. Venant de l'est de la ville de Berlin, cette ligne eut longtemps son terminus dans le centre de l'ancien Berlin-Est. La ligne traverse la partie historique de Berlin et dessert d'importants sites touristiques célèbres, comme l'Île aux Musées, la Cathédrale de Berlin et l'avenue Unter den Linden. L'article décrit les particularités de la méthode du bouclier utilisée pour le creusement et donne un aperçu des travaux encore à réaliser pour rejoindre la station « Brandenburger Tor » déjà existante et construire la station « Museumsinsel », en la protégeant par une congélation des sols. L'achèvement du gros œuvre est prévu pour le milieu de l'année 2019, la mise en service de la ligne U5 pour janvier 2020.

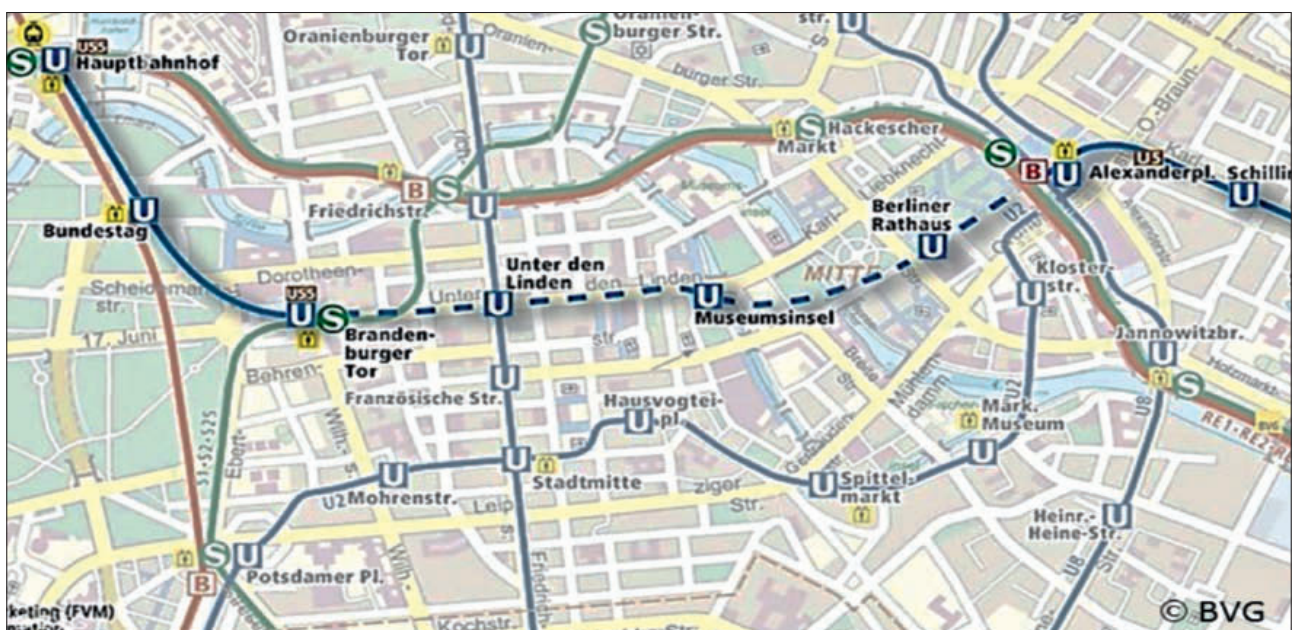
## Costruzione della nuova linea metropolitana U5 a Berlino

« l'esperienza insegna »

Dopo la riunificazione della Germania, il governo federale e il governo di Berlino si sono impegnati, come previsto dall'accordo di cooperazione, a prolungare fino alla stazione centrale la linea U5 proveniente dalla parte orientale di Berlino e che termina nel centro della vecchia Berlino est. La linea attraversa la parte storica di Berlino e rende accessibili importanti luoghi di interesse turistico come l'Isola dei Musei, il duomo di Berlino e la strada « Unter den Linden ». L'articolo descrive le particolarità dell'avanzamento con scudo e dà uno sguardo d'insieme ai lavori che devono ancora essere eseguiti per collegarsi alla stazione già esistente della Porta di Brandeburgo e la costruzione della stazione dell'Isola dei Musei con la tecnica del congelamento del terreno. Il completamento della costruzione grezza della U5 è previsto per la metà del 2019, mentre la sua messa in esercizio per l'anno 2020.

U6 Unter den Linden/Friedrichstrasse und den Anschluss an den bereits in Betrieb befindlichen Bahnhof Brandenburger Tor. Die Tunnelröhren werden maschinell im Schildvortrieb mit Tübbingausbau hergestellt. Sie beginnen im Schacht der Gleichwechselanlage, unterqueren die Spree, das Humboldtforum/Berliner Schloss, den Spreekanal und die Kommandantur, um anschliessend in die Strasse Unter den Linden einzubiegen. Die beiden Tunnelröhren durchfahren den Schacht des späteren Bahnhofs Unter den Linden und unterqueren dabei die in Betrieb befindliche Linie der U6,

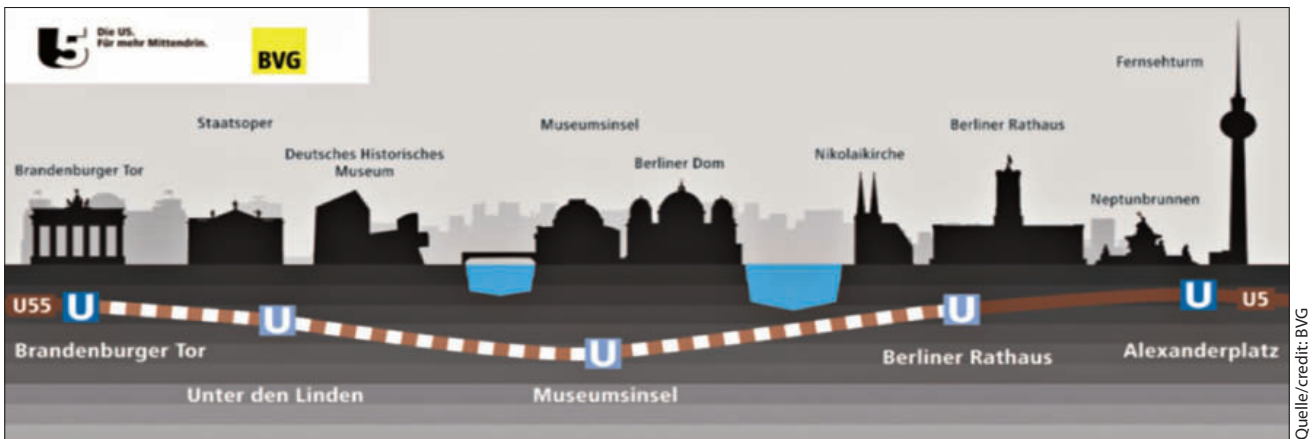
tion with the existing U6 line at Unter den Linden/Friedrichstrasse and the link to the already operational Brandenburger Tor station. The tunnels are being bored using mechanised shield tunnelling with a segment lining. They commence at the shaft at the track crossover, pass under the River Spree, the Humboldtforum/Berliner Schloss, the Spree Canal and the "Kommandantur", then curve into Unter den Linden. The two bores pass through the shaft for the future Unter den Linden station and under the operational U6 line, and then connect to the end to the Brandenburger Tor



Quelle/credit: BVG

1 Streckenverlauf der U5 in der Innenstadt von Berlin  
The route of the U5 line in the inner city of Berlin





2 Streckenverlauf der U5 in historischer Umgebung  
The route of line U5 in its historic environment

um am Ende an den Bahnhof Brandenburger Tor anzubinden. Die Arbeiten wurden im Januar 2012 von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) an die damalige Bilfinger Construction GmbH beauftragt. Bilfinger Construction GmbH wurde dann im Dezember 2014 einschliesslich aller am Projekt beteiligten Technologien und der zugehörigen Mitarbeitenden durch die Implenia AG übernommen. Die Arbeiten begannen im April 2012 und werden voraussichtlich im Sommer 2019 beendet sein (Bild 2).

## 2 Streckenverlauf der Tunneltrasse

Mithilfe modernster maschineller Vortriebstechnik wurden die zwei Tunnelröhren mit einem Durchmesser von 6,4 m und einer Länge von jeweils 1,6 km im Schildvortrieb aufgeföhren. Zum Einsatz kam eine Schildmaschine mit vollflächigem Abbau und flüssigkeitsgestützter Ortsbrüst. Die Baustelleneinrichtungsfläche sowie der Startschacht für die Tunnelvortriebsmaschine (TVM) liegen in der Denkmalanlage des Marx-Engels-Forums in unmittelbarer Nähe des Berliner (Roten) Rathauses. Um die Auswirkungen der innerstädtischen Baumassnahme auf die Anwohner zu minimieren, wurde im Westen der Baustelleneinrichtungsfläche eine temporäre Hafenanlage gebaut. Dadurch konnte der Aushub der Tunnelröhren von insgesamt ca. 220 000 t per Schiff entsorgt werden. Der innerstädtische Verkehr wurde so um ca. 60 LKW-Transporte pro Tag reduziert.

Entlang der Trasse und an den angrenzenden Bauwerken wurde ein umfassendes geotechnisches Messprogramm installiert, um frühzeitig über geringste Deformationen informiert zu werden und hieraus unmittelbar Gegenmassnahmen abzuleiten.

### 2.1 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse entlang der Tunneltrasse

Die Landschaft um Berlin wurde während des geologischen Zeitalters des Quartärs von mehreren Inlandeistransgressionen überzogen und somit entstanden im Projektgebiet mehrere Erosions- und Ablagerungszyklen. Diese überwie-

station. The former Bilfinger Construction GmbH was awarded this work by Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), the public transport operator, in January 2012. Bilfinger Construction GmbH was subsequently taken over, complete with all technologies involved in the project and the participating employees, by Implenia AG in December 2014. Work started in April 2012 and is scheduled for completion in summer 2019 (Fig. 2).

## 2 The Tunnel Route

The two bores, both with a diameter of 6.4 m and a length of 1.6 km, are being driven by shield tunnelling using ultra-modern mechanised tunnelling technology. A shield machine (SM) with full-face excavation and slurry support to the face was used. The site facilities yard and the starting shaft for the shield machine are located in the memorial park of the Marx-Engels-Forum in the immediate vicinity of the Berlin Rathaus (the "Red City Hall"). A temporary harbour was set up at the west of the site facilities yard in order to minimise the effects of inner-city construction activity for the residents. It was thus possible to dispose of the total of around 220,000 tonnes of material excavated from the tunnel bores by water, which also reduced inner-city traffic by around 60 truck journeys each day.

A comprehensive geotechnical measuring system was installed along the route and close to neighbouring structures in order to detect even the slightest deformations at an early stage and permit the derivation of immediate countermeasures.

### 2.1 Geological and Hydrogeological Conditions along the Tunnel Route

The landscape around Berlin was subjected to a number of inland ice transgressions during the Quaternary, with the consequent occurrence of several erosion and deposition cycles within the project area, where these predominantly sandy depositions reach a thickness of approx. 70 m. The upper portion of this deposition, called the valley sands, has

gend sandigen Ablagerungen erreichen im Projektgebiet eine Mächtigkeit von rund 70 m. Der obere Teil dieser Ablagerung, die sogenannten Talsande, erfuhren keine Vorbelastung, der untere Teil dieser Ablagerung, die sogenannten Schmelzwassersande, sind hingegen vorbelastet. Hieraus resultieren sehr unterschiedliche Lagerungsdichten.

An der Grenze zwischen Tal- und Schmelzwassersanden, die zwischen 10 m und 20 m unter Geländeoberkante (GOK) verläuft, finden sich Einschaltungen aus Geschiebemergel und Einlagerungen von Grobkies- und Geröll-Lagen, vereinzelt auch Findlinge (Bild 3). Diese Baugrundverhältnisse mit vorwiegend lockeren, eng gestuften und gut durchlässigen Sanden stellen in Verbindung mit einem sehr hohen Grundwasserspiegel eine technische Herausforderung an die Planung und Ausführung, speziell im innerstädtischen Bereich, dar. Die fließfähigen Sande können schon bei geringsten Undichtigkeiten zu einem unmittelbaren Wassereintritt und Einspülen von Boden und zu Auflockerungserscheinungen sowie Setzungen in der Umgebung führen. Entlang der Tunneltrasse erreichen die Geschiebemergel ihre maximale Mächtigkeit von bis zu 5,50 m im Bereich des Berliner Schlosses.

## 2.2 Besondere Herausforderungen an die Vortriebstechnik

Neben den bereits geschilderten geologischen und geotechnischen Besonderheiten stellen anthropogene Einflüsse und Hindernisse besondere Herausforderungen an das Vortriebssystem dar. So gibt es im Projektgebiet eine Vielzahl von Grundwassermessstellen und Brunnen, welche im Zuge der intensiven städtischen Bautätigkeit der letzten 100 Jahre hergestellt wurden. Da die Lage der Brunnen oftmals nicht bekannt ist, wurden Zusatzmassnahmen zur Risikominimierung beim Tunnelvortrieb erforderlich. So wurden ständig bis zu 200 m<sup>3</sup> Frischbentonitsuspension vorgehalten, um im Falle eines plötzlichen Suspensionsverlustes im Schildvortrieb entsprechende Mengen an Stützsuspension zur Verfügung zu haben. Zusätzlich wurden in einem Trockensilo 50 m<sup>3</sup> Kalksteinmehl vorgehalten, welches dann als sogenanntes Stopfkorn der Frischsuspension beigemischt werden konnte.

Auch stellen die zu unterfahrenden Bauwerke wie die massive Fundamentplatte des ehemaligen Palastes der Republik eine Herausforderung an die Vortriebsarbeiten dar. Das Fundament konnte nicht zurückgebaut werden, weshalb es in den

not been subjected to pre-loading, whereas the lower portion, called the meltwater sands, have been preloaded. The result is greatly differing levels of soil compaction.

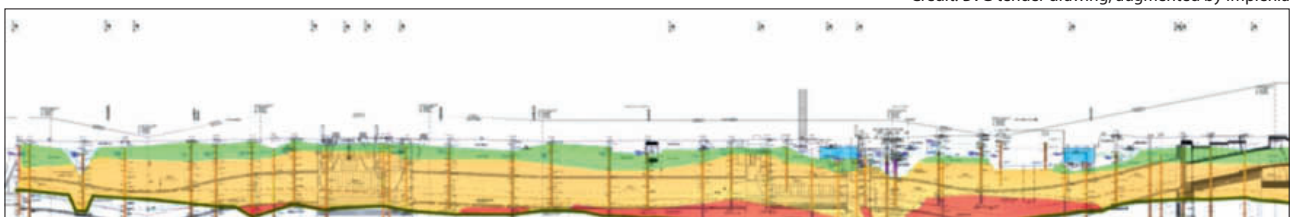
Interstratifications of boulder clay and inclusions of coarse gravel and layers of scree, and also isolated boulders (Fig. 3), can be found along the boundary between the valley sands and the meltwater sands, which runs between 10 m and 20 m below ground level. These ground conditions, featuring predominantly non-cohesive, tightly graduated and highly permeable sands in combination with an extremely high groundwater table, constitute a technical challenge for both design and construction, particularly in this inner-city region. The easily flowing sands can result, with even the slightest leak, in an immediate inflow of water and flushing of soil as fluidisation, leading to subsidence in the surrounding area. Along the route of the tunnel, the boulder clays reach their maximum thickness of up to 5.50 m in the vicinity of the Berliner Schloss.

## 2.2 Special Challenges for Tunnelling Technology

Not only the special geological and geotechnical features examined above, but also anthropogenic factors and obstructions present particular challenges to the tunnelling system. There are, for example, a large number of groundwater measuring stations and wells in the project area, which were created in the course of the intensive urban construction activity of the past 100 years. Additional provisions were necessary in order to minimise risk during tunnelling, since the location of these wells is often unknown. Up to 200 m<sup>3</sup> of fresh bentonite suspension was, for example, kept ready at all times in order to have corresponding quantities of support medium available in case of a sudden loss of suspension during shield tunnelling. In addition, 50 m<sup>3</sup> of ground limestone was stored in a dry silo, to be added to the fresh suspension as filler if required.

Structures to be tunnelled under, such as the massive foundation slab of the former Palast der Republik, also presented a challenge to tunnelling activities. It was not possible to remove this foundation, for which reason it has been incorporated into the new Berliner Schloss building. Construction work on the Schloss was underway at the same time as tunnelling work, resulting in interdependency between the two projects and necessitating close co-ordination. It was neces-

Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, durch Implenia ergänzt  
Credit: BVG tender drawing, augmented by Implenia



3 Streckenverlauf der U5 im geologischen Längsschnitt (Rot: Geschiebemergel; gelb: Talsande; weiss: Schmelzwassersande; grün: obere Sande)  
Longitudinal geological section of the route of line U5 (Red: boulder clay; yellow: valley sands; white: meltwater sands; green: top sands)

Neubau des Berliner Schlosses integriert wurde. Da die Bauarbeiten des Schlosses gleichzeitig mit den Tunnelvortriebsarbeiten ausgeführt werden, ergeben sich Abhängigkeiten beider Projekte, die eine enge Abstimmung und Koordination erfordern. So mussten die Berechnungen des erforderlichen Stützdrucks für die Vortriebsarbeiten an die Lasten aus dem Bau des Berliner Schlosses angepasst werden.

Aber auch die planmässig zu durchfahrenden Schlitzwände im Bereich der späteren Bahnhöfe Museumsinsel und Unter den Linden spielten bei der Konfiguration der Schildmaschine eine massgebende Rolle.

Wenn in vergleichbaren Baugrundverhältnissen Setzungen an der Geländeoberfläche auf ein Minimum reduziert werden müssen, wird in der Regel ein offenes Speicherschneidrad mit einem ausfahrbaren Überschneider (copy cutter) eingesetzt. Dies hat den verfahrenstechnischen Vorteil, dass das Speicherschneidrad aus einer vorderen Position zurück in die Schildschneide der TVM hydraulisch bewegt werden kann und sich dadurch der Bereich des Überschnittes reduziert und der Einfluss daraus auf Setzungen verringert wird.

Da aber entlang der Tunneltrasse in den Bahnhofsbereichen mehrere 1,5 m dicke und mit Glasfasern bewehrte Schlitzwände, Dichtwände und DSV-Dichtblöcke (Düsenstrahlverfahren) zu durchfahren waren, konnte im Vergleich zum offenen Speicherschneidrad nur ein überwiegend geschlossenes Felgenschneidrad zum Einsatz kommen, das massiv genug ist, um die für das Durchfahren notwendigen 22 Stück 17" Doppelschneidrollen und 34 Stück Schälmesser aufzunehmen (Bild 4).

Der Nachteil des Felgenschneidrads gegenüber dem Speicherschneidrad ist, dass das Felgenschneidrad ca. 800 mm vor der Schildschneide steht und nicht in die Schildschneide zurückgezogen werden kann. Dadurch ergibt sich ein planmässiger, permanent wirkender längerer Bereich mit einem Überschnitt zu der Schildschneide von ca. 15 mm. Diese technische Notwendigkeit führt in der Regel zu erhöhten Setzungen an der Geländeoberfläche. Dank einer intensiven Stützdrucküberwachung konnten die gemessenen Setzungen an der Geländeoberfläche bei maximal 10 mm gehalten werden.

### 2.3 Unterquerung der Spree und des Spreekanals

Eine Besonderheit am Projekt U5 ist die Unterquerung der Spree und des Spreekanals. Aufgrund der geologischen Verhältnisse und des geringen Abstandes zwischen der Firste der TVM und der Spreesohle von weniger als 5 m und damit kleiner als ein Bohrdurchmesser waren Zusatzmassnahmen erforderlich. Um die Sicherheit während der Unterquerung zu erhöhen und das Aufbrechen des Bodens über der TVM durch den aktiven Stützdruck in der Abbaukammer zu verhindern, war im bauherrenseitigen Entwurf vorgesehen, den Bereich der Spreesohle mittels 40 cm starker Stahlblöcke/Brammen zu ballastieren. Gewichte aus Beton konnten nicht



Quelle/credit: Antonio Reetz-Graudenz

4 Schneidrad der Schildmaschine «Bärinde» beim Einhub  
The cutting wheel of the machine "Bärinde" being lifted in

sary, for example, to adapt the support pressure calculations for tunnelling work to consider the loading from construction of the Berliner Schloss.

The slurry walls in the vicinity of the future Museumsinsel and Unter den Linden stations, through which tunnelling was planned, also played a definitive role in the configuration of the shield machine.

An open spoked cutting wheel with extendable copy cutters is generally used where it is necessary to reduce subsidence on the surface to a minimum. This has the engineering advantage that the spoke-type cutting wheel can be hydraulically retracted into the shield blade of the shield machine from an advanced position, with the result that the overcut zone is reduced and the influence of this on subsidence lessened.

Where it was necessary to tunnel through several 1.5 m thick glass-fibre-reinforced slurry walls, sealing walls and jet-grouted sealing slabs along the route of the tunnel in the vicinity of the stations, only a closed cutting wheel could be used, with a much smaller degree of opening compared to the spoked cutting wheel, and robust enough to carry the 22 pieces 17" double roller cutters and 34 carbide-tipped cutters needed for this passage (Fig. 4).

The drawback of the closed cutting wheel compared to a spoked cutting wheel is the fact that the closed cutting

in Erwägung gezogen werden, da aufgrund des geringeren Eigengewichts grössere Abmessungen der Gewichte erforderlich gewesen wären. Grössere Gewichte hätten jedoch wegen der grösseren Abmessungen die Schiffbarkeit der Spree eingeschränkt, was nicht genehmigungsfähig war. Von den Tunnelbauspezialisten der Implenia AG wurde in Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller Herrenknecht und der Ruhr-Universität Bochum eine alternative Lösung zu der vorgesehenen Ballastierung erarbeitet (Bild 5).

### 2.3.1 Problemstellung Unterquerung der Spree

Bereits 118 m nach dem Vortriebsstart aus der Startbaugrube Gleiswechselanlage erreicht die Schildmaschine das östliche Spreeufer. Die Gradienten fällt hier mit der maximal zulässigen Steigung von 4% nach Westen ab. Es ergibt sich am Ostufer der Spree im Bereich des temporären Hafens der Baumasnahme U5 eine Überlagerung von nur 4,6 m, die dann im weiteren Verlauf der Unterquerung aber zunimmt.

Da sich der erforderliche Druck der Stützsuspension in der Abbaukammer der TVM aus dem Erddruck und dem Wasserdruck zuzüglich der erforderlichen Sicherheiten errechnet und zusätzlich eine Regeltoleranz von 10 kN/m<sup>2</sup> für das Einstellen des Druckluftpolsters berücksichtigt werden muss, konnte unter diesen Randbedingungen ein Aufbrechen der Bodenschichten oberhalb der TVM ohne Ballastierung nicht nachgewiesen werden. Dieser Nachweis der Aufbruchsicherheit für übliche Suspensionswichten von 12 kN/m<sup>3</sup> im aufgeladenen Zustand der Stützsuspension konnte in Verbindung mit dem Verlegen von 40 cm dicken Stahlplatten auf der Spreesohle im Bauherrenentwurf gerade noch erbracht werden.

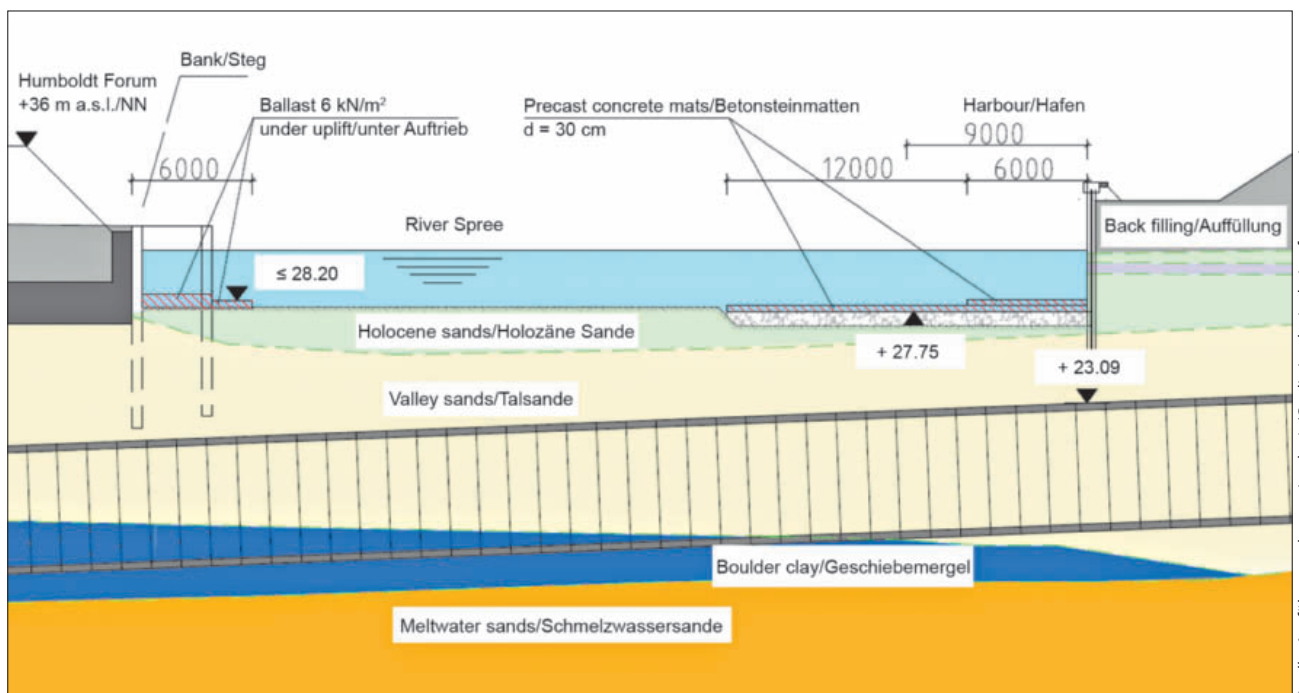
wheel is located around 800 mm in front of the shield blade and cannot be retracted into it. This results in a planned, permanently effective longer zone with an overcut related to the shield blade of approx. 15 mm. This technical necessity normally results in greater subsidence on the surface. Intensive support pressure monitoring made it possible here to keep measured subsidence on the surface to a maximum of 10 mm.

### 2.3 Tunneling under the Spree and the Spree Canal

The passage under the Spree and the Spree Canal is a special feature of the U5 project. Additional provisions were necessary in view of the geological conditions and the shallow cover between the top of the shield machine and the bed of the Spree, which was less than 5 m and therefore less than one tunnel diameter. The client draft provided for ballasting of the Spree bed zone using 40 cm thick steel plates in order to enhance safety for tunnelling and avoid blowouts above the shield machine as a result of the active support pressure in the excavation chamber. Concrete weights were rejected since they would have needed greater dimensions due to their lower density. The greater dimensions of larger weights would have impaired the navigability of the Spree and would not have received approval. The Implenia AG tunnelling specialists, in cooperation with TBM manufacturer Herrenknecht and the Ruhr University Bochum, evolved an alternative solution instead of the planned ballasting (Fig. 5).

#### 2.3.1 The Problems of Tunneling under the River Spree

The shield machine reached the eastern bank of the Spree only 118 m from the start of tunnelling from the starting excavation at the track crossover. Here, the route dips to the



5 Schnitt der Spree und Spreewand, Ballastierung  
Section through the Spree and Spree side wall, ballasting



Quelle: Baustellenphotographie Implemia  
Credit: Implemia site photograph

**6** Fangedamm im Spreekanal während der Herstellung  
*Coffer dam in the Spree Canal under construction*

Zusätzlich war im westlichen Bereich der Spree durch den Geländesprung von ca. 6 m zwischen der Spreekanalsole und der Ufermauer eine zusätzliche Auflast einzubringen, um den erforderlichen Stützdruck vor dem Erreichen der Ufermauer rechtzeitig erhöhen zu können.

### 2.3.2 Problemstellung Unterquerung des Spreekanals

Im Bereich des Spreekanals stellt sich die Situation etwas günstiger dar, da hier die Firste des Tunnels mit konstantem Abstand zur Spree sohle und tiefer verläuft. Der Abstand der Firste der TVM zur Sohle des Spreekanals beträgt hier ca. 6,5 m. Am Ostufer des Spreekanals wird der spätere Schacht Ost des Bahnhofs Museumsinsel im Schutze eines Fangedamms (Bild 6) errichtet.

Da der Fliessquerschnitt des Spreekanals durch den Fangedamm eingeengt wurde, musste zur Verhinderung von Auskolkungen die Sohle durch Wasserbausteine mit einer Schichtstärke von 60 cm gesichert werden. Darüber hinaus sah der Entwurf im Bereich der Schildfahrt eine Schicht aus 40 cm dicken Schwerbetonplatten als Ballastierung vor. Auch hier war eine zusätzliche Ballastierung mit Big-Packs erforderlich, um den Stützdruck rechtzeitig erhöhen zu können.

### 2.4 Suspension mit erhöhter Dichte als alternative Lösung für die Ballastierung

Die positiven Erfahrungen mit Stützsuspensionen mit einer Dichte von  $15 \text{ kN/m}^3$  am Klang-Valley-MRT-Projekt in Kuala Lumpur, Malaysia, wurden für das Projekt U5 herangezogen. Die Stützsuspension mit einer erhöhten Dichte, High Density Support Medium (HDSM), hat den Vorteil, dass der Stützdruck in der Abbaukammer von der Firste bis zur Sohle über die Höhe stärker anwächst als bei einer Standardstützsuspension mit geringerer Dichte, Low Density Support Medium (LDSM). Damit kann der Stützdruck in der Firste niedriger eingestellt werden, der Stützdruck in der Sohle erhöht sich bei gleichbleibender Gesamtstützkraft. Zudem ist die theoretisch resultierende Steighöhe der Suspension über der Firste beim HDSM geringer, was das Ausbläserrisiko weiter reduziert. Darüber hinaus setzen sich die Bodenporen durch die Zugabe von Kalksteinmehl beim HDSM schneller zu, mit der positiven Wirkung, dass sich auch ein dichter

west at the maximum permissible gradient of 4%. This results in cover of only 4.6 m in the vicinity of the temporary harbour for the U5 project on the eastern bank of the Spree, but this increases as the tunnel continues under the Spree.

Since the necessary support medium pressure in the excavation chamber of the TBM is calculated from ground pressure and water pressure plus the necessary safety factor and, in addition, a standard tolerance of  $10 \text{ kN/m}^2$  to take into account the creation of a compressed air cushion, it was not possible under these boundary conditions to verify blowout safety above the shield machine without ballasting. It was just possible to verify safety against blowout with normal suspension densities of  $12 \text{ kN/m}^3$  with the support medium loaded by 40 cm thick steel plates on the bed of the Spree as envisaged in the client's design.

In addition, it was necessary, due to the approx. 6 m difference of ground level between the bed of the Spree Canal and the canal side wall, to apply an additional surcharge load in order to permit increased support pressure in good time before the side wall was reached.

### 2.3.2 The Problems of Tunnelling under the Spree Canal

The situation is slightly less difficult in the vicinity of the Spree Canal, since the crown of the tunnel here runs deeper and at a constant distance from the canal bed. Here, the distance between the top of the shield machine and the bed of the Spree Canal is around 6.5 m. The later East Shaft for the Museumsinsel station is under construction on the eastern bank of the Spree Canal, with protection provided by a coffer dam (Fig. 6).

Since the cross-section of the Spree Canal was constricted by the coffer dam, it was necessary to secure the canal bed with a course of armouring stones 60 cm thick in order to prevent scouring. In addition, the draft design provided for a layer of 40 cm thick heavyweight concrete slabs as ballast in the shield passage zone. Additional ballasting was also necessary here using big bags, in order to be able to increase support pressure in good time.

### 2.4 Higher-density Suspension as an Alternative to Ballasting

The good experience gained with support media of a density of  $15 \text{ kN/m}^3$  on the Klang Valley MRT project in Kuala Lumpur, Malaysia, was also exploited for the U5 project. High-density support medium (HDSM) offers the benefit that the support pressure in the excavation chamber increases more steeply across the height from the crown to the invert than is the case with the usual low-density support medium (LDSM). The support pressure in the crown can thus be set lower, and the support pressure in the invert increases with a constant total support force. In addition, the theoretical resultant rise height of the medium above the crown is lower in the case of HDSM, thus further reducing the risk of blowout. Furthermore, the soil pores are more rapidly filled as a

Filterkuchen an der Ortsbrust schneller ausbildet. Bis zur bautechnischen Anwendung eines HDSM beim U-Bahn-Los U5 waren aber noch einige Hürden in Form von Nachweisen und Tests notwendig.

### 2.4.1 Anforderung an die Stützsuspension

Die Stützsuspension muss durch ihre rheologischen Eigenschaften in der Lage sein, dem Erd- und Wasserdruck dauerhaft entgegenzuwirken. Dazu wurden im Vorfeld durch die Ruhr-Universität Bochum unterschiedliche Eignungstest durchgeführt.

Eine weitere wesentliche Anforderung an die Qualität der Stützsuspension ist ihre Stabilität: So darf eine Stützsuspension im Laufe der Zeit nicht instabil werden bzw. sollte sich möglichst wenig entmischen. Zum Nachweis der Stabilität wurden Versuche mit Standardstützsuspensionen mit Anteilen von 40, 50 und 60 kg Bentonit pro 1000 Liter Wasser durchgeführt. In diese Basissuspension wurden nach Abschluss der Quellzeit ein Kalksteinmehl bis zu einer Suspensionsdichte von  $15 \text{ kN/m}^3$  zugegeben, die Stabilität dieser Stützsuspension über die Zeit von 72 Stunden beobachtet und abschliessend die rheologischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt.

Neben den rheologischen und physikalischen Eigenschaften ist für die Stütz Wirkung der Suspension aber auch das Eindringverhalten in den anstehenden Baugrund an der Ortsbrust von Bedeutung. Dazu wurden Injektionsversuche im Labor durchgeführt.

Zusammenfassend kann für das HDSM gesagt werden, dass die rheologischen Parameter der Fließgrenze und der Viskosität erhöht werden, wodurch ihre Eindringtiefe in den Baugrund erheblich reduziert wird. Zusätzlich tragen auch die homogen verteilten Kalksteinpartikel im HDSM dazu bei, dass der Porenraum im Baugrund verstopft wird. Dadurch ist der übertragbare Stützdruck deutlich höher als bei LDSM.

### 2.4.2 Anforderungen an das Vortriebssystem

Neben den Anforderungen an die Stützsuspension mussten auch Anpassungen an das Vortriebssystem und die Mischtechnik zur Herstellung des HDSM vorgenommen werden (Bild 7). Das HDSM wurde entsprechend den Vorgaben gemischt und in einem separaten Vorratstank zur Verfügung gestellt. Eine separate Speiseleitung DN 150 wurde im Tunnel bis zum letzten Nachläufer verlegt, um das HDSM über eine im Steuerstand der Schildmaschine regelbare Exzentrerschneckenpumpe mit einem Förderstrom von  $55 \text{ m}^3/\text{h}$  in die Abbaukammer zu pumpen. Die Dichte der Stützsuspension wurde mit einer zusätzlichen Dichtemesseinrichtung gemessen. Sämtliche maschinentechnische Änderungen wurden bereits im Werk eingebaut.

### 2.4.3 Teststrecke

Im Vorfeld der Spree- und Spreekanalquerung waren umfangreiche Tests und Inbetriebnahmen der Maschinentechnik

result of the addition of ground limestone to the HDSM, with the beneficial effect that a dense filter cake also forms more rapidly on the face. A number of obstacles still remained to be overcome, with demonstrations and tests before actual use of HDSM on the U5 U-Bahn tunnel lot.

### 2.4.1 Support Medium Requirements

The rheological properties of the support medium must enable it to durably counteract ground and water pressure. Various suitability tests were therefore performed in advance by the Ruhr University Bochum.

The stability of the support medium is another important quality criterion: a support medium cannot, for example, become unstable with time, and it should segregate as little as possible. Tests using standard support media containing 40, 50 and 60 kg bentonite per 1,000 l of water were performed to verify stability. After completion of the swelling time, ground limestone was added to this basic medium up to a medium density of  $15 \text{ kN/m}^3$ , the stability of this support medium then being monitored for a period of 72 hours and its rheological and physical properties determined in conclusion.

Not only the rheological and physical properties, but also the penetration behaviour into the soil at the face, are of importance for the support action of the medium, however. Corresponding injection tests were performed in the laboratory.

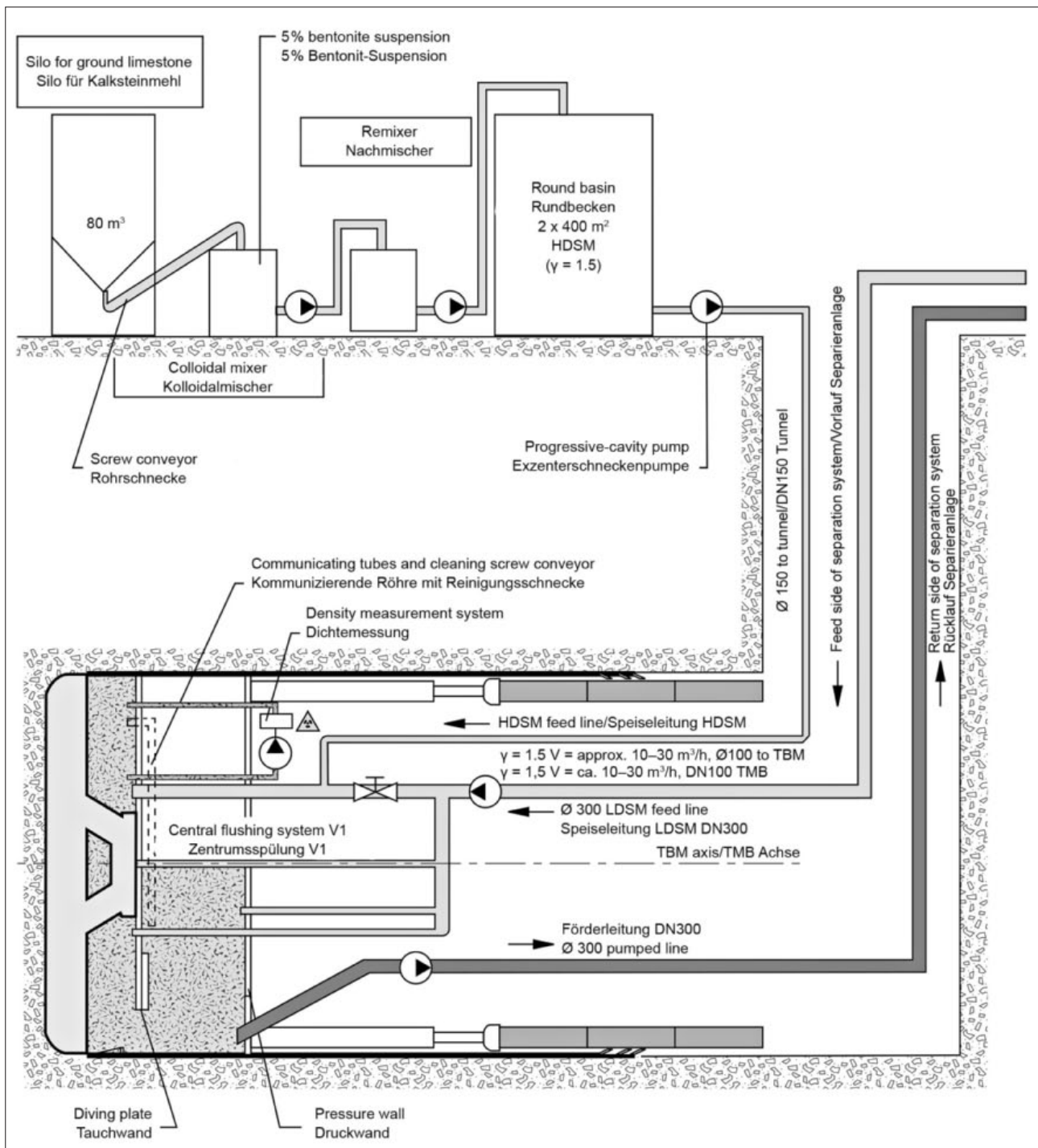
It can be stated in summary that the rheological parameters of flow point and viscosity of the HDSM were increased, significantly reducing its penetration depth into the ground. In addition, the homogeneously dispersed limestone particles in the HDSM help to fill the porosity of the soil. Transmissible support pressure is thus significantly greater than in the case of LDSM.

### 2.4.2 Tunnelling System Requirements

In addition to the support medium requirements, it was also necessary to modify the tunnelling machinery and the mixing equipment for production of the HDSM (Fig. 7). The HDSM was mixed as specified and supplied in a separate storage tank. A separate 150 Ø feed line was installed in the tunnel up to the rear backup car in order to pump the HDSM through a progressive-cavity pump controlled in the shield machine control position into the excavation chamber at a delivery rate of  $55 \text{ m}^3/\text{h}$ . The support medium density was measured with an additional density measurement system. All the mechanical modifications were installed at the works.

### 2.4.3 Test Length

Extensive testing and commissioning of the mechanical equipment was necessary before tunnelling under the Spree and the Spree Canal started. Tunnelling using the HDSM was therefore tested on a 30 m length of tunnel, equivalent to 20 segment rings, at a safe distance from the Spree. The



Quelle: Tunnelbau-Taschenbuch 2015, Vortrag U5 unter Beteiligung des TB Implenia/Credit: Tunnelbau-Taschenbuch 2015, Paper on U5, with participation by TB Implenia

**7 Verfahrenstechnik Stützsuspension mit erhöhter Dichte (HDSM)**  
 High-density support medium (HDSM) system

nik erforderlich. So wurde im sicheren Abstand zur Spree auf einer Länge von 30 m, entsprechend 20 Tübbingringen, der Vortrieb mit der High-Density-Stützsuspension getestet. Während dieser Testphase wurden die Suspensionseigenschaften, die in die TVM eingebauten Komponenten und die Auswirkungen des Einsatzes des HDSM auf den Stützdruck und den Förderkreislauf getestet und bewertet. Die Zugabe des HDSM erfolgte mit einer Pumpleistung von ca. 30 m³/h direkt in die Abbaukammer.

properties of the medium, the components installed in the shield machine, and the effects of the use of HDSM on support pressure and the delivery circuit were all tested and evaluated during this test phase. The HDSM was fed directly into the excavation chamber at a pump delivery rate of approx. 30 m³/h.

The installed density measurement system made it possible to continuously measure the densities of the HDSM

Die Dichten des HDSM in der Firste der Abbaukammer konnten mit dem installierten Dichtemesssystem kontinuierlich gemessen werden. Dabei wurden Dichten von bis zu  $1,43 \text{ t/m}^3$  erreicht. Aufgrund der Erfahrungen aus der Teststrecke wurde eine Suspensionsdichte des HDSM zur Unterquerung der Spree und des Spreekanals von im Minimum  $1,3 \text{ t/m}^3$  festgelegt. Zusätzlich zu der kontinuierlichen installierten Dichtemessung wurden im Zuge der Qualitätsüberwachung auf der TVM Proben der Stützsuspension aus der Abbaukammer entnommen und die Dichte vom Schichtingenieur überprüft.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vortriebsarbeiten im Bereich der Spree und des Spreekanals trotz der geringen Überlagerung und dem Risiko eines Bodenaufbruchs mittels einer Stützsuspension mit erhöhter Dichte von Minimum  $1,3 \text{ t/m}^3$  erfolgreich und sicher durchgeführt werden konnten. Die Ballastierung konnte dadurch reduziert und auf herkömmliche Betonballastelemente zurückgeführt werden.

### 3 Status des Projektes

Die Schildvortriebe in Gleis 1 und Gleis 2 sind abgeschlossen. Die ursprünglich in Gleis 1 und später in Gleis 2 eingesetzte Schildmaschine ist zurückgebaut. Planungsbedingt verbleibt der Schildmantel im Erdreich. Die Schneidräder in Gleis 1 und Gleis 2 befinden sich noch in Endpositionen und werden später verschrottet. Derzeit erfolgt der Einbau der Havarieschotts. Diese sind jeweils in den Tunnelröhren am Ende der Bahnhöfe positioniert. Damit wird ein etwaiges Havarievolumen bei der Herstellung der Bahnhöfe auf den jeweiligen Bahnhofsbereich beschränkt. Nach der Fertigstellung der Schotts kann in den Bahnhofsbereichen dann mit dem Aushub oberhalb der Tübbingröhren und dem Abbruch der Röhren in den Schächten begonnen werden. Anschliessend erfolgt der weitere Aushub bis auf Endtiefe. Das während des Schildvortriebs als Startschacht dienende Schachtbauwerk, bestehend aus Schlitzwänden und einer rückverankerten Unterwasserbetonsohle, wird von den Einbauten

in the crown of the excavation chamber. Densities of up to  $1.43 \text{ t/m}^3$  were reached. A minimum HDSM density of  $1.3 \text{ t/m}^3$  was specified for tunnelling under the Spree and the Spree Canal on the basis of experience gained in the test length of tunnel. In addition to the continuously operating density measurement system, samples of the support medium were taken for quality monitoring on the TBM and their density checked by the shift engineer.

In conclusion, it is possible to state that the tunnelling work under the Spree and the Spree Canal was accomplished successfully and safely, despite the shallow cover and the risk of soil collapse, thanks to the use of a support medium with an increased density of not less than  $1.3 \text{ t/m}^3$ . This made it possible to reduce ballasting and use conventional concrete ballast elements.

### 3 Project Status

Track 1 and Track 2 tunnelling operations have been completed. The shield machine originally used for Track 1 and subsequently for Track 2 has been dismantled. The shield skin remains, as planned, in the ground. The cutting wheels for Track 1 and Track 2 remain in their terminal positions and will later be scrapped. The incident bulkheads are currently being installed. These are positioned in each case in the tunnel bores at the ends of the stations. The volume affected by an incident during the creation of the stations will thus be restricted to the respective station zone. It will be possible after completion of the bulkheads to begin excavation in the station zones above the segment-lined tunnels and demolish the tubes in the shafts. Further excavation will then follow down to the ultimate depth. The shaft structure, which served as a starting shaft during shield tunnelling and consists of slurry walls and a back-anchored underwater concrete base, will then be freed of shield tunnelling equipment, such as shield cradle, launching rings and tieback structure. The track crossover will then be constructed as a cut-and-cover tunnel.

Unter den Linden station will be the interchange station with the U6 line (Fig. 8). At the start of the overall U5 project, line



8 Neubau Kreuzungsbahnhof U5 mit der U6  
New U5/U6 interchange station

Quelle/credit: Bünck+Fense



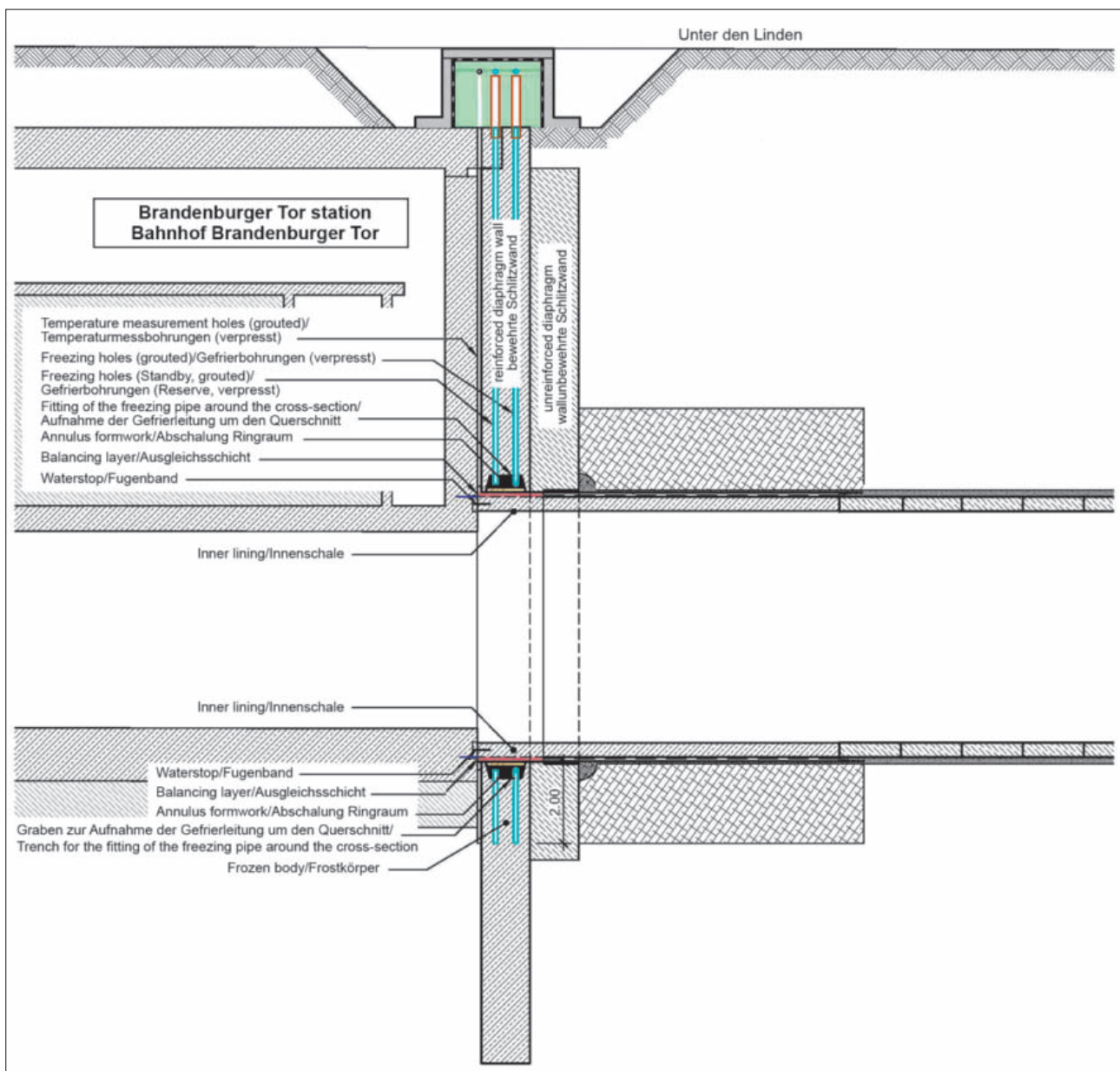
des Schildvortriebs wie Schildwiege, Anfahrriegen und Rückstiefkonstruktion befreit. Anschliessend erfolgt die Herstellung der Gleiswechselanlage als Tunnel in offener Bauweise.

Der Bahnhof Unter den Linden wird als Kreuzungsbahnhof mit der Linie U6 ausgebildet (Bild 8). Zu Beginn der Gesamtbaumassnahme U5 wurde unter Vollsperrung der U6 die Bestandsröhre abgebrochen und auf den späteren Bahnhofsquerschnitt aufgeweitet. Die Neubauarbeiten der U6 erfolgten in Deckelbauweise. Die neue Linie U5 unterfährt die Gleise der U6. Auch dieser Bahnhof wird mittels einer Deckelbauweise hergestellt. Für die Zukunft verbleiben noch zwei bauliche Besonderheiten, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird.

U6 was closed to traffic and the existing bore demolished and widened to the subsequent cross-section of the station. The new work for U6 was conducted using top-down construction. The new U5 line passes under the U6 tracks. This station is also being constructed top-down. Two specialised civil engineering works, described in more detail below, remain for the future.

### 3.1 Breakthrough of the Shield Tunnelling Bores to the Existing Brandenburger Tor Station Structure

The eastern side of the currently operational Brandenburger Tor station is to be closed off by with a slurry wall. The closing wall of the station itself takes the form of an eye-wall, closed by a temporary reinforced concrete wall in the vicinity of the later breakthrough locations of the running-tunnels (Fig. 9).



Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, Überarbeitung Implenia/Credit: BVG tender drawing, revised by Implenia

9 Anschluss Schildvortrieb an Bestandsbauwerk Bahnhof Brandenburger Tor  
Shield tunnelling connection to the existing Brandenburger Tor station

### 3.1 Durchschlag der Schildvortriebsröhren zum Bestandsbauwerk Bahnhof Brandenburger Tor

Der in Betrieb befindliche Bahnhof Brandenburger Tor wird auf der Ostseite mit einer Schlitzwand umschlossen. Die Abschlusswand des Bahnhofs selbst ist eine Brillenwand, die im Bereich der späteren Gleisröhrendurchbrüche mit einer temporären Stahlbetonwand verschlossen ist (Bild 9).

Aus technischer Sicht wäre ein in Richtung des Los 1 angeordnetes Schachtbauwerk, in das die TVM einfahren und anschliessend geborgen werden könnte, sicherlich die sinnvollste Lösung gewesen. Aufgrund von Auflagen in der Planfeststellung war dies jedoch nicht umsetzbar. Die technische Lösung sah daher eine zusätzliche unbewehrte Schlitzwand direkt anschliessend an die Aussenkante der Baugrubenschlitzwand vor. Diese Schlitzwand wurde bereits im Rahmen der Ausführung des Bahnhofs Brandenburger Tor als Einfahrschlitzwand für den Schildvortrieb mit hergestellt. Die Ausschreibung sah nun vor, einen zusätzlichen Dichtblock mittels Hochdruck-Injektions-Verfahren (HDI) vor der unbewehrten Schlitzwand anzuordnen. Die Schildmaschine hätte somit den DSV-Körper und die unbewehrte Schlitzwand bis vor die äussere Bewehrungslage der Baugrubenschlitzwand des Bahnhofs Brandenburger Tor durchfahren. Planerisch musste davon ausgegangen werden, dass die Fugen zwischen der unbewehrten und bewehrten Schlitzwand einerseits und die Fuge zwischen der bewehrten Schlitzwand der Baugrubeninnenwand wasserführend sind. Um diese potenziellen Wasserwege mit einer Vereisungsmassnahme zu verschliessen, wurden innerhalb der bewehrten Schlitzwand zwei Reihen Vereisungsrohre fächerförmig angeordnet (Bild 10). Diese wurden von der GOK als Kernbohrungen in die bewehrte Schlitzwand abgeteuft.

Gemäss Bauablauf kam die TVM mit dem Schildmantel in der unbewehrten Schlitzwand zum Stehen. Anschliessend wurde der Ringraum des Schildmantels zur Arbeitskammer hin abgedichtet sowie kraftschlüssig und wasserdicht verpresst. Nach einem detailliert vorgegebenen Ablauf wurde nach der Reinigung der Arbeitskammer die Druckluft in mehreren Teilschritten unter Beobachtung des Wasserzutritts abgelassen. Nachdem die Wasserdichtigkeit nachgewiesen werden konnte, sollte die TVM demontiert werden.

Während dieser Demontearbeiten ist es zu einer Havarie gekommen. Dabei traten ca. 12 m<sup>3</sup> Erdreich in die Arbeitskammer der Schildmaschine ein. Wie sich später herausstellte, lag die Ursache in einer schadhafte Lamellenfuge der unbewehrten Schlitzwand, die innerhalb des Durchbruchquerschnitts verlief. Aufgrund der Bauteildicke dieser Schlitzwand von 1,50 m war diese Fuge zu Beginn der Demontearbeiten noch vereist, jedoch bildete sich durch den Wärmeeintrag die Vereisung zurück, was letztlich zur Havarie führte.

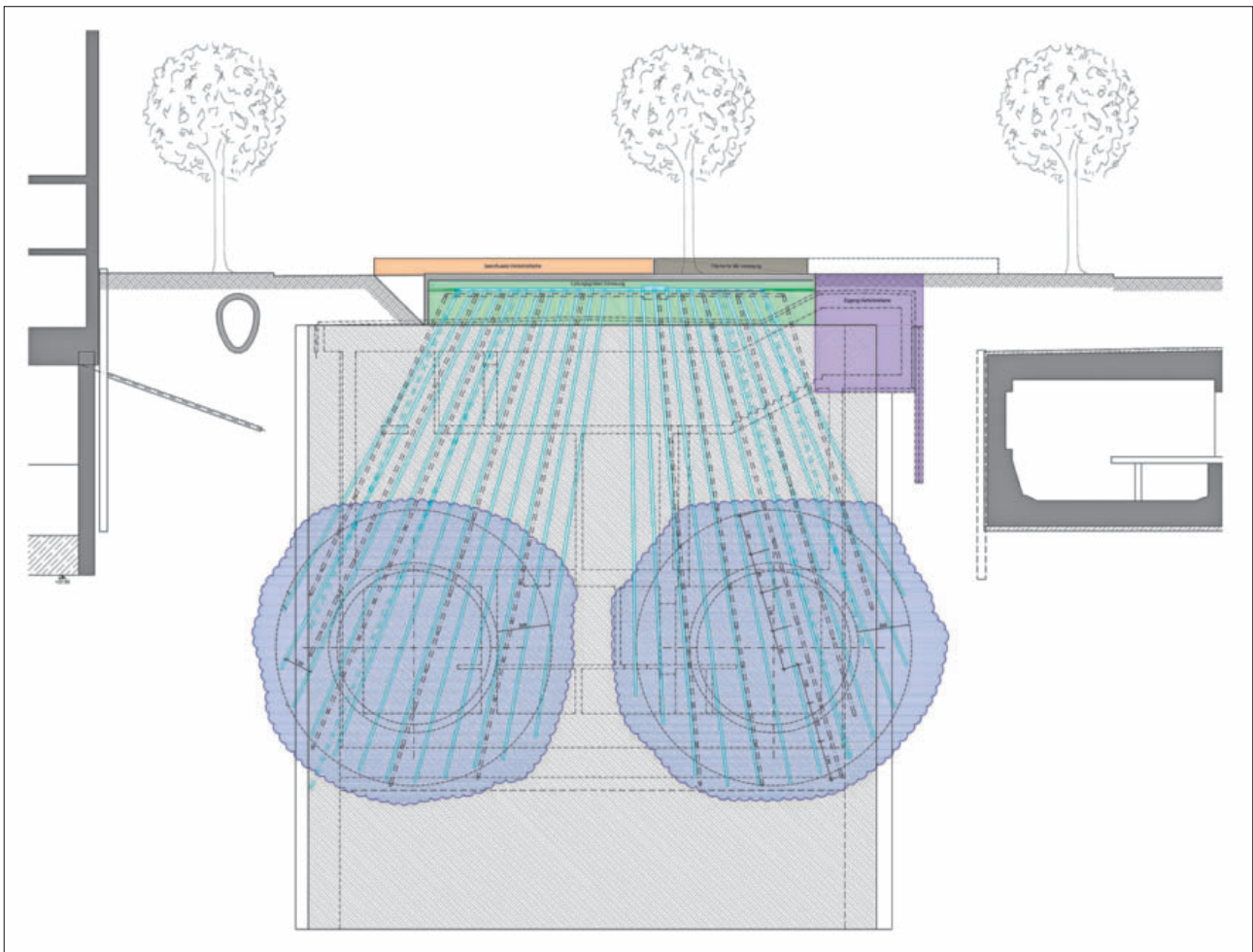
Die schadhafte Lamellenfuge wurde anschliessend über Zusatzvereisungen aus der Arbeitskammer heraus gesichert.

A shaft structure located toward lot 1, into which the shield machine could be driven and then recovered, would certainly have been the most rational solution from a technical point of view. It was however impracticable due to conditions imposed in the planning approval. The technical solution therefore took the form of an additional unreinforced slurry wall continuing directly from the outer edge of the construction trench slurry wall. This slurry wall had already been constructed as an entry slurry wall for shield tunnelling in the context of construction of the Brandenburger Tor station. The tender documentation now included the installation of an additional sealing block by means of jet grouting in front of the unreinforced slurry wall. The TBM would thus have passed through the jet grouted element and the unreinforced slurry wall up to a point in the excavation for Brandenburger Tor station. It was necessary for design purposes to assume that the joints between the unreinforced and the reinforced slurry wall on the one hand, and the joint between the reinforced slurry wall of the inner wall of the construction excavation would conduct water. Two rows of freezing pipes were therefore installed in a fan configuration in the reinforced slurry wall in order to seal off these potential water routes by freezing (Fig. 10). These were drilled as cores from the surface into the reinforced slurry wall.

As planned, the shield machine stopped with the shield skin in the unreinforced slurry wall. The annulus of the shield skin was then sealed off from the working chamber, with a watertight and structurally effective connection. After a procedure specified in detail and after cleaning of the working chamber, the compressed air was discharged in a number of increments while monitoring the inflow of water. The shield machine was to be dismantled once water-tightness had been verified.

An unexpected incident occurred during this dismantling work: approx. 12 m<sup>3</sup> of soil entered the working chamber of the shield machine. The cause was later found to be a defective construction joint in the unreinforced slurry wall, which was located in the breakthrough cross-section. This joint had remained frozen at the start of the dismantling operation due to the thickness of this slurry wall (1.50 m), but warming partially melted the ice and ultimately resulted in this incident.

The defective construction joint was then secured by means of additional freezing from the working chamber. In order not to further delay progress on the project as a whole, the client and the contractor then decided to postpone installation of the in-situ concrete inner lining in the vicinity of the shield skin between the existing structure and the final segment lining ring. It had originally been planned to perform this work immediately after the completion of shield tunnelling. This would have further delayed continued construction of the stations by the time needed for creation of the transition blocks, since access



Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, Überarbeitung Implenia/Credit: BVG tender drawing, revised by Implenia

**10** Vereisung des Anschlusses Brandenburger Tor  
Ground freezing for the Brandenburger Tor connection

Um den Bauablauf der gesamten Massnahme nicht weiter zu verzögern, entschieden sich Auftraggeber und Auftragnehmer, den Einbau der Ortbetoninnenschale im Bereich des Schildmantels zwischen Bestandsbauwerk und dem letzten Tübbingring zeitlich zu verschieben. Ursprünglich war vorgesehen, diese Leistung direkt nach Ende der Schildfahrt durchzuführen. Da eine Andienung nur über die Tunnelröhren möglich ist, wäre der Weiterbau der Bahnhöfe um die Herstellungsdauer der Übergangsböcke weiter verzögert worden. Die Beteiligten entschlossen sich daher, die Andienung über den späteren Bahnhof Unter den Linden durchzuführen. Damit verzögert sich die Herstellung der Innenschale im Übergangsbereich um ungefähr ein halbes Jahr. Um diesen Bereich möglichst havariesicher zu halten, wurde gemeinsam festgelegt, sowohl das Schneidrad als auch die Tauchwand der TVM noch temporär im Erdreich zu belassen. Zur Ausbildung der Tauchwand als zusätzliches Havarieschott wurden alle Öffnungen in der Tauchwand temporär verschlossen.

Der finale bauliche Zustand wird voraussichtlich gegen Ende 2016 erreicht werden. Nach Ausbau von Tauchwand und Schneidrad wird die bewehrte Schlitzwand des Bahnhofs

is only possible through the tunnel bores. The project participants therefore decided to implement access through the future Unter den Linden station. Completion of the inner lining in the transitional zone has thus been put back by around six months. It was also jointly decided to leave both the cutting wheel and the diving plate of the TBM temporarily in the ground, in order to keep this zone as free from incidents as possible. All openings in the diving plate were temporarily sealed in order to convert the diving plate into an additional incident bulkhead.

The civil engineering works will probably be completed toward the end of 2016. After the removal of the diving plate and the cutting wheel, the reinforced slurry wall at Brandenburger Tor station will be manually demolished, thus exposing the first layer of freezing pipes. In addition, a trench of approx. 30 cm depth will be excavated in the outer radius of the TBM within the existing Brandenburger Tor slurry wall. A ring main will be installed in this trench and connected to the ground freezing system. The freezing lances, arranged in a harp configuration, will then be taken out of operation individually, capped, connected to the ring main and then restored to operation. The remaining breakthrough, up to

Brandenburger Tor händisch abgebrochen und dabei die erste Lage der Vereisungsrohre freigelegt. Zusätzlich wird im Aussenradius der TVM ein Graben von ca. 30 cm Tiefe innerhalb der Bestandsschlitzwand zum Brandenburger Tor gestemmt. In diesem Graben wird eine Ringleitung verlegt, die an die Vereisungsanlage angeschlossen wird. Anschliessend werden die harfenförmig angeordneten Vereisungsanlagen einzeln ausser Betrieb genommen, gekappt, an der Ringleitung angeschlossen und wieder in Betrieb genommen. Nach Umverlegung und Wiederinbetriebnahme der ersten Lage der Vereisungsrohre wird der Restdurchbruch bis gegen die Bestandswand des Bahnhofs Brandenburger Tor durchgeführt. Sollte der Vereisungskörper mit lediglich der ersten Lage Vereisungsrohre über eine ausreichende Stärke verfügen, kann auf die als Redundanz vorgesehene zweite Lage der Vereisungsanlagen verzichtet werden.

Die Anschlusswand des Bahnhofs Brandenburger Tor verfügt über ein verwahrtes Fugenband, welches anschliessend noch freigelegt werden muss. Im Anschluss erfolgt die Betonage der Innenschale mithilfe eines Fullround-Schalwagens. Dabei wird die Betonage im Übergangsbereich gegen Eis ausgeführt. Nach Erhärten des Innenschalenbetons kann die Vereisungsanlage abgeschaltet und demontiert werden. Zuletzt erfolgt der Durchbruch zum Bahnhof Brandenburger Tor durch den Abbruch der temporären Bauwerkswand.

### 3.2 Herstellung des Bahnhofs Museumsinsel

Der spätere Bahnhof Museumsinsel (Bild 11) liegt in unmittelbarer Nähe der historischen Schlossbrücke und in wesentlichen Teilen unterhalb des Spreekanals und unterhalb der Kommandantur.

Vor Ausführung der Schildvortriebe wurden sowohl der Ost- als auch der Westkopf des späteren Bahnhofs als Schlitzwandbaugruben ausgeführt. Die Schlitzwände sind dabei bis zu 45 m lang und werden am Kopf durch den endgültigen Bahnhofsdeckel sowie direkt unterhalb der Bauwerkssohle durch einen HDI-Rost ausgesteift. Die Schächte werden mit einer tief liegenden HDI-Sohle in einer Tiefe von bis zu 44 m ausgeführt. Im Bereich der Schilddurchfahrten erhielten die Schlitzwände Körbe aus Glasfaser-verstärktem Kunststoff (GFK). Nach der Durchfahrt der Schildmaschinen und dem Einbau der angrenzenden Schotte kann mit dem eigentlichen Bau des Bahnhofs Museumsinsel begonnen werden. Da der Bahnhof im Wesentlichen unter dem Spreekanal und unter der Kommandantur angeordnet ist, kann der Bahnhof nicht im Schutz eines Schlitzwandkastens in Deckelbauweise her-

the existing wall of Brandenburger Tor station, will then be accomplished after the relocation and restarting of the first layer of freezing pipes. It will be possible to work without the redundantly installed second layer of freezing probes if the frozen body proves to have sufficient strength using only the first layer of freeze pipes.

The connecting wall of the Brandenburger Tor station has a reinforced waterstop, which must be exposed. The inner lining will then be concreted using a full-perimeter mobile formwork unit. In the transitional zone, concreting will take place onto ice. Once the concrete of the inner lining has cured, it will be possible to deactivate and dismantle the ground freezing system. Finally, the breakthrough to Brandenburger Tor station will be accomplished by demolishing the temporary wall.

### 3.2 Construction of Museumsinsel Station

The future Museumsinsel station (Fig. 11) is located in the immediate vicinity of the historic "Schlossbrücke" bridge and with significant elements underneath the Spree Canal and the "Kommandantur".

Both the east and west head ends of the future station were created in slurry trenches prior to shield tunnelling operations. These slurry walls are up to 45 m in length and are reinforced at their head end by the final station roof slab and by a jet grouted grid located directly beneath the base slab. The shafts are being constructed with a low-level jet grout invert to a depth of as much as 44 m. Glass fibre-reinforced plastic (GRP) cages were fitted to the slurry walls in the vicinity of the shield passage routes. Actual construction of the Museumsinsel station can be started once the shield machines have passed through and the adjacent bulkheads have been installed. The station is essentially located below the Spree Canal and the "Kommandantur", and therefore can not be constructed by the top-down method with support from a diaphragm wall box. Instead, the area between the shafts will be tunnelled using shotcrete support with pre-support by ground freezing (Fig. 12).



11 Lageplan Bahnhof Museumsinsel  
Plan of Museumsinsel station

Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, Überarbeitung Implenia  
Credit: BVG tender drawing, revised by Implenia

gestellt werden. Der Bereich zwischen den Schächten wird vielmehr bergmännisch in Spritzbetonbauweise im Schutze einer Vereisung aufgeföhren (Bild 12).

Der Bauablauf sieht vor, unterhalb des aussteifenden Deckels mit dem Aushub der Schächte zu beginnen und dabei sukzessive die Vereisungsbohrungen parallel zu den Schildröhren einzubringen. Die Länge der Vereisungsbohrungen beträgt ca. 105 m bei einem Aussendurchmesser von 152,4 mm. Die Bohrungen werden als gesteuerte Pressbohrungen ausgeführt. Dabei sind maximale Abweichungen von 0,5 % der Bohrlänge zulässig. Die hohe Genauigkeitsanforderung resultiert aus der Tatsache, dass die Abweichung der Bohrröhre untereinander ein definiertes Mass nicht überschreiten darf, um den ziel-sicheren Verschluss des Eiskörpers zu gewährleisten. Die Anordnung der Vereisungsbohrungen finden sich in Bild 13.

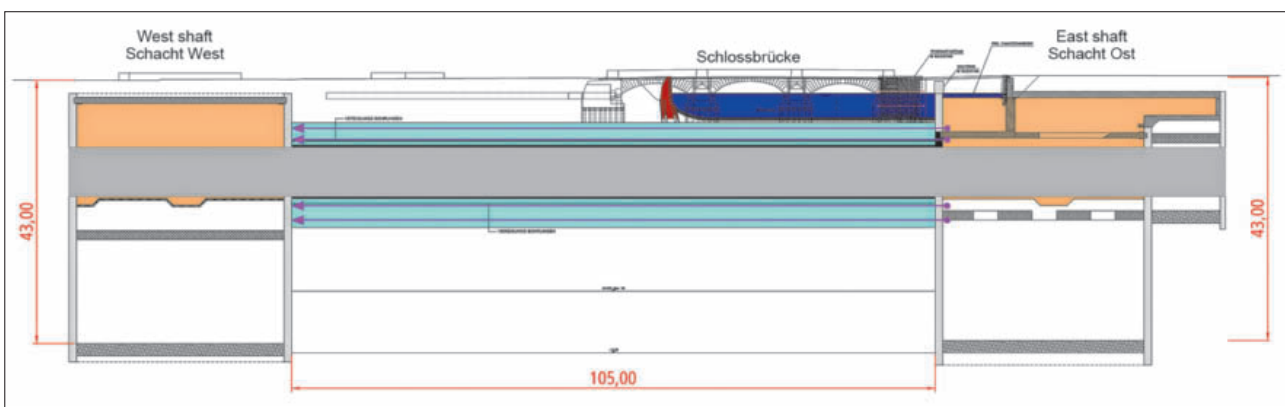
Erschwerend kommt hinzu, dass die Pressbohrungen als Sacklochbohrungen ausgeführt werden müssen. Da aus geometrischen Gründen in Teilbereichen des Westschachtes keine Gegenbohrungen ausgeführt werden können, beträgt die Bohrlänge maximal 105 m. Das Bohrverfahren wurde so ausgelegt, dass neben einer optischen Vermessung auch eine Vermessung des Bohrkopfes über einen Kreiselkompass möglich ist. Es ist damit zu rechnen, dass im Erdreich Hindernisse wie zum Beispiel Holzpfähle aus der Gründung der Schlossbrücke oder auch Findlinge angetroffen werden. Im Vorfeld wurde mittels Probebohrungen nachgewiesen, dass die Holzpfähle mit dem System problemlos durchfahren und Hindernisse gegebenenfalls auch umfahren werden können.

Nach Herstellung der vollständigen Vereisungsbohrungen wird der Eiskörper mit einem Mal gefroren. Es wird heute von einer Gefrierzeit von rund drei Monaten ausgegangen. Im Schutze dieser Vereisung wird dann im ersten Schritt ein Mittelstollen in Spritzbetonbauweise ausgeführt. Dieser Mittelstollen dient im Endzustand als Bahnsteighalle. Dafür wird dieser mit einem Sohl- und Deckengewölbe sowie Bahnsteigstützen ausgerüstet. Nach Fertigstellung dieser Stahlbetonbauarbeiten werden die Seitenstollen nacheinander aufgeföhren. Dabei wird jeweils die bestehende Schildröhre

The project schedule specifies the start of excavation of the shafts below the reinforced cover slab, and successive installation of the ground freezing boreholes parallel to the shield tunnel. These holes have a length of approx. 105 m and an outer diameter of 152.4 mm. The boreholes are being produced by directional pipe jacking, with a maximum permissible deviation of 0.5 % of borehole length. This high accuracy requirement is the result of the fact that the deviation between the casings must not exceed a defined amount, in order to assure accurate closure of the frozen body. The arrangement of the ground freezing boreholes can be seen in Fig. 13.

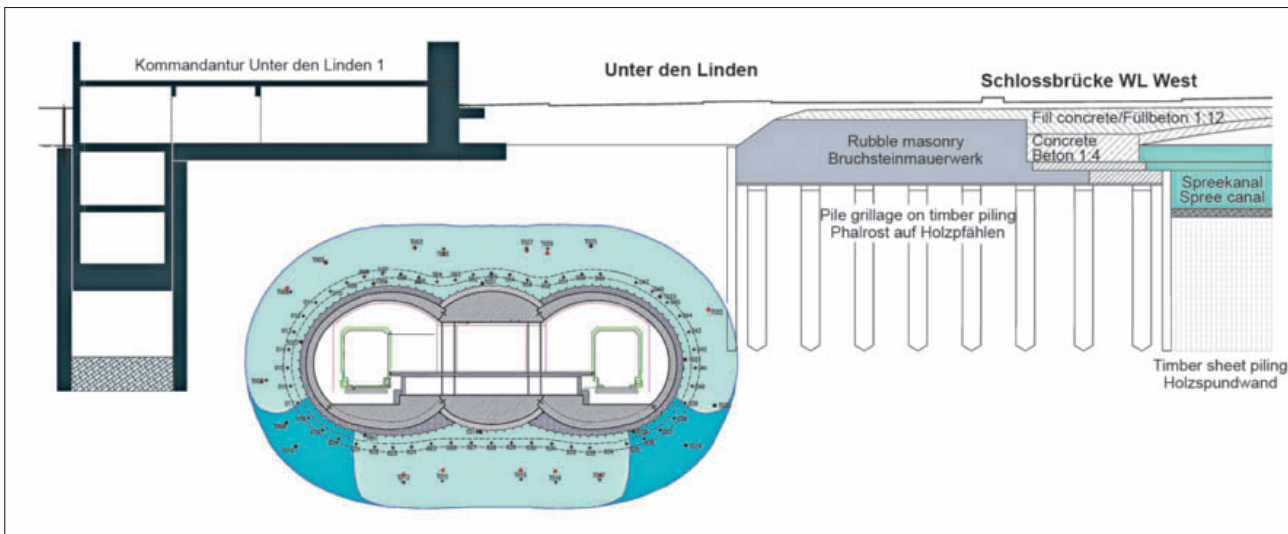
Another complication is the fact that the pipe jacking operations have to be carried out as blind holes. The maximum borehole length is 105 m for geometrical reasons, since counter-drilling is not possible in certain areas of the west shaft. The drilling system was designed in such a way that not only optical surveying is possible, but also measurement of the position of the cutterhead with a gyroscopic compass. It must be anticipated that obstructions, such as wooden piles from the foundations of the "Schlossbrücke" and also boulders, will be encountered in this soil. Test boreholes were drilled in advance in order to verify that it is possible to tunnel through the wooden piles using the system, and that obstructions can be bypassed if necessary.

The frozen shield will be frozen in a single operation after completion of the entire ground freezing borehole system. A freezing time of around three months is currently assumed. A shotcrete central tunnel will then be created as an initial step under the protection of the ground freezing. This central tunnel will be the train hall in the completed state. It will therefore be equipped with an invert slab and ceiling, and also platform supports. The side tunnels will be driven in sequence after the completion of this reinforced concrete work. Each existing shield tunnel will be demolished, the cross-section widened under the protection of shotcrete, and the inner lining then installed.



12 Längsschnitt Bahnhof Museumsinsel  
Longitudinal section of Museumsinsel station

Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, Überarbeitung Implenia  
Credit: BVG tender drawing, revised by Implenia



Quelle: BVG-Ausschreibungsplan, Überarbeitung Implenia  
Credit: BVG tender drawing, revised by Implenia

**13** Querschnitt des Vereisungskörpers unter Kommandantur und Spreekanal  
Cross-section of ground freezing under the "Kommandantur" and the Spree Canal

abgebrochen, der Querschnitt im Schutz von Spritzbeton aufgeweitet und anschliessend die Innenschale eingebaut.

Da die einzelnen Gewerke nur nacheinander ausgeführt werden können, liegt dieser Bahnhof auf dem kritischen Weg der Gesamtmassnahme. Mit einer Fertigstellung wird Mitte 2019 gerechnet.

#### 4 Schlussbemerkung

«Lessons learnt»: Die Unterquerung des Spreekanals hat gezeigt, dass die Vortriebsarbeiten trotz der geringen Überlagerung und dem Risiko eines Bodenaufbruchs durch den Einsatz von HDSM erfolgreich durchgeführt werden können. Der Schildvortrieb wurde zur Zufriedenheit des Bauherrn mit einer hohen Qualität der Tübbingtunnel und bei geringsten Setzungen abgewickelt. Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass die Entwurfsplanung der schildvorgetriebenen Tunnel von dem Schweizer Ingenieurbüro Amberg Engineering AG und die Ausführung von dem Schweizer Bauunternehmen Implenia AG verantwortet und durchgeführt wurden.

Die Baustelle weist in der Zukunft noch zahlreiche bautechnische Herausforderungen auf, über die es sich noch zu berichten lohnt, vielleicht im Rahmen des nächsten Swiss Tunnel Congress. Glück auf!

This station is on the critical path for the project as a whole, since the individual works can only be performed one after the other. Completion is expected in mid-2019.

#### 4 Conclusions

"Lessons learnt": Tunnelling under the Spree Canal has demonstrated that tunnelling work can be successful, despite the shallow cover and the risk of soil collapse, thanks to the use of a HDSM. Shield tunnelling was completed to the client's satisfaction with a high segment-lined tunnel quality and with very little settlement. We should not forget to mention here that the Swiss consultant Amberg Engineering AG was responsible for the draft design of the shield tunnels and the Swiss Implenia AG civil engineering company for construction.

This project will continue to present numerous engineering challenges, the reporting of which will most definitely be worthwhile, perhaps as part of the next Swiss Tunnel Congress. Good luck!

Selim M. Sayah, Dr. ès sciences, Project Manager, Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH

Manfred Thüring, Dr. phil. nat., Geologist, Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH

Marco Braghini, Engineer, Head of Hydraulic Section, Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH

Roger Bremen, Dr. ès sciences techniques, CEO, Lombardi Engineering Ltd., Minusio/CH

# Cerro del Águila Hydro Power Plant in Peru

## Design and Construction of 12 km Waterways and Utility Tunnels in Complex Geology

The Cerro del Águila project in Peru is a major hydropower scheme presently being commissioned and scheduled to be opened in July 2016. This new 520 MW scheme includes a 90 m high roller-compacted concrete (RCC) gravity dam, around 12 km of hydraulic and utility tunnels and two underground caverns for turbines/generators and transformers/GIS, all excavated by drill and blast. This article deals with the design and construction of the tunnels, highlighting several construction issues.

### 1 Background

#### 1.1 Project History

The Cerro del Águila project in Peru [1] is the third hydro project cascade scheme to be constructed on the Mantaro River. It is situated downstream from the existing SAM/Restitución hydro plants. Originally, another project was planned to develop the second curve practically down to its confluence with the Apurimac River. This project would have included a long low pressure tunnel and a 250 m high dam situated downstream of the Colcabamba River confluence in order to include the discharge provided by the additional catchment area and the additional head between the SAM HPP tailwater level and the Mantaro River.

After a large scale landslide occurred in the Mayunmarca area in 1974 [2, 3], which demonstrated the apparent vulnerability of the valley side stability, the idea of implementing a very high dam was abandoned and partially substituted by the following scheme:

- the Restitución Project to develop the remaining 250 m head between the SAM HPP tailrace and the Mantaro River;

- the Guitarra Project, a short distance downstream from the eponymous Guitarra curve. After almost 25 years of consideration, this Guitarra Project (1983) was redefined and renamed Cerro del Águila Project.

After its acquisition by Kallpa Generación S.A., the elaboration of the pre-feasibility study of the project and preliminary geological investigations and analyses were commissioned in about 2008 from the Peruvian Consultancy firm JByA (Julio Bustamante y Asociados EIRL) with a view to inviting tenders for an Engineering, Procurement and Construction (EPC) contract. In November 2011, Astaldi S.p.A. from Italy and their joint venture partner Graña y Montero SAA from Peru won the EPC contract to build the scheme. Lombardi SA was chosen later as the main designer for the project.

#### 1.2 Location

The project area is situated around 270 km from the capital Lima, at the second curve of the Mantaro River in a stretch, where the river flanks are relatively steep, between 1,600 and 1,200 m above sea level. It lies in the jurisdiction of the



Credit: Selim M. Sayah



Credit: Selim M. Sayah

1 (a) Dam axis in the Mantaro River, headrace tunnel located on the right-hand side; (b) Valley formation downstream, location of the underground powerhouse and tailrace tunnel on the right-hand side

## Wasserkraftwerk Cerro del Águila in Peru

### Planung und Bau von 12 km Wasserstrassen und Versorgungstunnel in komplexer Geologie

Das Wasserkraftwerk Cerro del Águila mit einer Leistung von 520 MW wird derzeit in den peruanischen Anden in Betrieb genommen und soll im Juli 2016 ans Netz gehen. Das Projekt umfasst den Bau einer 90 m hohen Schwergewichtsstaumauer aus Walzbeton, eines 7,6 km langen Systems aus Zu- und Ablauf-tunneln mit etwas mehr als 90 m<sup>2</sup> Hufeisen-Querschnitt, eines 242 m hohen Druckschachtes, eines Komplexes mit zwei unterirdischen Kavernen sowie mehrerer Wasserschlösser, Zugangs- und Bautunnel. Alle unterirdischen Bauten wurden im Sprengvortrieb ausgeführt. Besondere Herausforderungen traten auf durch Gebirgsschlag, Abplatzungen, extreme Konvergenzen im Druckstollen durch mehr als 1600 m Überdeckung sowie weitere bautechnische Einschränkungen.

## Centrale hydroélectrique de Cerro del Águila au Pérou

### Étude et construction de 12 km de voies d'eau et d'un tunnel de service en milieu géologique complexe

D'une capacité de 520 MW, la centrale hydroélectrique Cerro del Águila, dans les Andes péruviennes, est actuellement en phase de mise en route et doit être raccordée au réseau en juillet 2016. Le projet comprend la construction d'un barrage-poids en béton compacté au rouleau (BCR), d'un système de 7,6 km de longueur comprenant une galerie d'amenée et une galerie de restitution, dont la section en forme de fer à cheval est d'un peu plus de 90 m<sup>2</sup>, d'un puits vertical de 242 m de haut, d'un complexe composé de deux cavernes souterraines ainsi que de plusieurs châteaux d'eau, tunnel d'accès et tunnel de chantier. Tous les ouvrages souterrains ont été exécutés en excavation à l'explosif. La réalisation a été confrontée à des défis particuliers, générés par des éboulements de masses rocheuses, fissures, convergences extrêmes dans la galerie d'amenée du fait d'une couverture de plus de 1600 m et autres conditions limitatives en termes de construction.

## Centrale idroelettrica Cerro del Águila in Perù

### Progettazione e costruzione di 12 km di vie navigabili e gallerie di rifornimento con una geologia complessa

La centrale idroelettrica di Cerro del Águila con un rendimento di 520 MW che viene attualmente messa in servizio nelle Ande peruviane, sarà collegata alla rete elettrica nel luglio 2016. Il progetto include la costruzione di una diga a gravità mediante calcestruzzo rullato e compattato (RCC) alta 90 m, di un sistema gallerie di affluenza e di scolo con sezione a ferro di cavallo da più di 90 m<sup>2</sup>, una condotta forzata alta 242 m e un complesso formato da due caverne sotterranee come anche da vari torrini piezometrici, gallerie di accesso e gallerie artificiali. Tutte le costruzioni sotterranee sono state eseguite con avanzamento per mezzo di esplosioni. Particolari difficoltà sono insorte a causa di improvvise fratturazioni, carbonatazione di calcestruzzi, estreme convergenze in condotte di pressione con una copertura di più di 1600 m, come anche altre tipologie costruttive.

Pampas, Colcabamba and Salcabamba districts belonging to Tayacaja Province in the Huancavelica region.

With regard to the morpho-structural aspects that characterize Peruvian territory, the area is located on the western slopes of the Oriental Cordillera de los Andes in central Peru on the Amazonian watershed (Figs. 1a and 1b). The area can be reached from Lima along the Central Highway to the town of Pampas. From this location, an unpaved road passing through the Colcabamba District and the localities of Andaymarca and Durasnuyoc reaches the site area. The powerhouse area is accessible on the unpaved road of the Salcabamba District.

## 2 Site Geology

The tunnels are located in the pre-mesozoic basement of metamorphic, pelitic to calcareous rocks, intruded by gran-

ites/granodiorites (Figs. 2a and 2b) [4]. The high grade metamorphic rocks belong to the Ambo-Copacabana group of probably Paleozoic age and are composed of hornfelses, skarns and marbles. The granites/granodiorites belong to the Villa Azul Batholith group, intrusives dated around Cretaceous to Tertiary.

The intrusive contact between the two bedrock lithologies is likely to be crossed by the headrace tunnel under an overburden of 900 m. The dam and the major part of the headrace tunnel are thus in granites/granodiorites, whereas the remaining project structures (smaller part of headrace tunnel, pressure shaft, power house, and tailrace tunnel) are in metamorphic rocks.

The granites/granodiorites are white to rose coloured with good intact rock properties, but generally of lower quality





Credit: Selim M. Sayah



Credit: Selim M. Sayah

2 The two bedrock lithologies: (a) granites/granodiorites and (b) metamorphic rocks



Credit: Selim M. Sayah

3 Up to 100 m high remnants of colluvial material, left over from erosion

than the metamorphic rocks. The rock mass can show a considerable degree of fracturing and alteration at depth, deteriorating the rock mass quality.

The metamorphic rocks are aluminosilicate-rich to carbonate-rich rocks (paragneisses, hornfelses, skarns) with less frequent interlayers of amphibolites. These high strength rocks of very good intact rock quality generally show good rock mass quality, which in some cases is deteriorated by the local structural conditions.

The Quaternary deposits are predominantly of colluvial or alluvial nature. Alluvial deposits are organized as fans

or terraces. Particular colluvial deposits, most likely of remobilized slope debris and glacial deposits, of impressive thickness (up to 150 m) can be found in the power house/tailrace area (Fig. 3). These deposits are organized in a series of terraces and composed of a mixture of boulders, cobbles and gravel in a silty-sandy matrix showing high (short-term) slope stability. The deposits are interlayered by rockslides at the frontal part of the terraces located at the right bank of Mantaro River, in the area of the initial part of the tailrace tunnel.

Fig. 4 shows the geological situation at the project site. The dam site and 75% of the headrace tunnel are in granites/

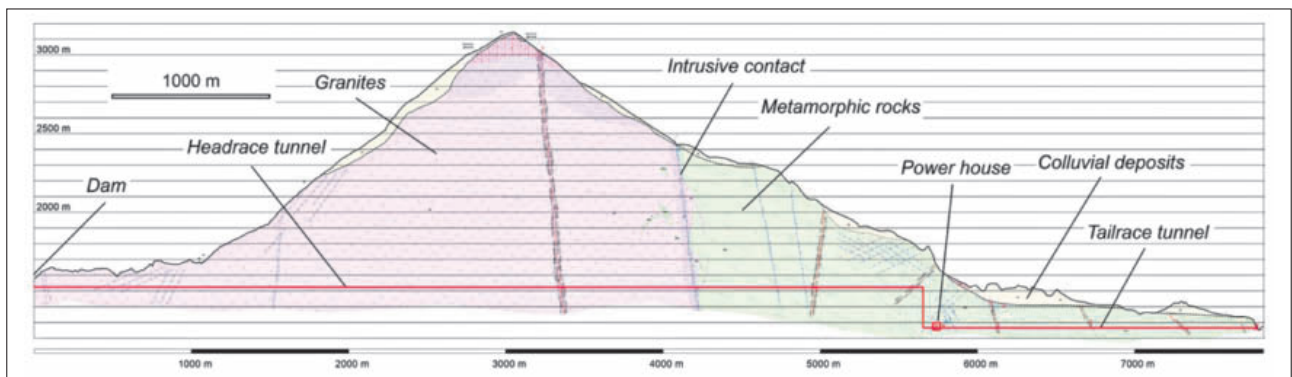
granodiorites. The headrace tunnel crosses the original intrusive contact of the granites to the surrounding metamorphic rocks at roughly 4.25 km. The remaining part (25%) of the headrace tunnel, the power house, and tailrace tunnel are all in metamorphic rocks.

### 3 Waterway System and Access Tunnels

#### 3.1 Main Characteristics and Rock Support

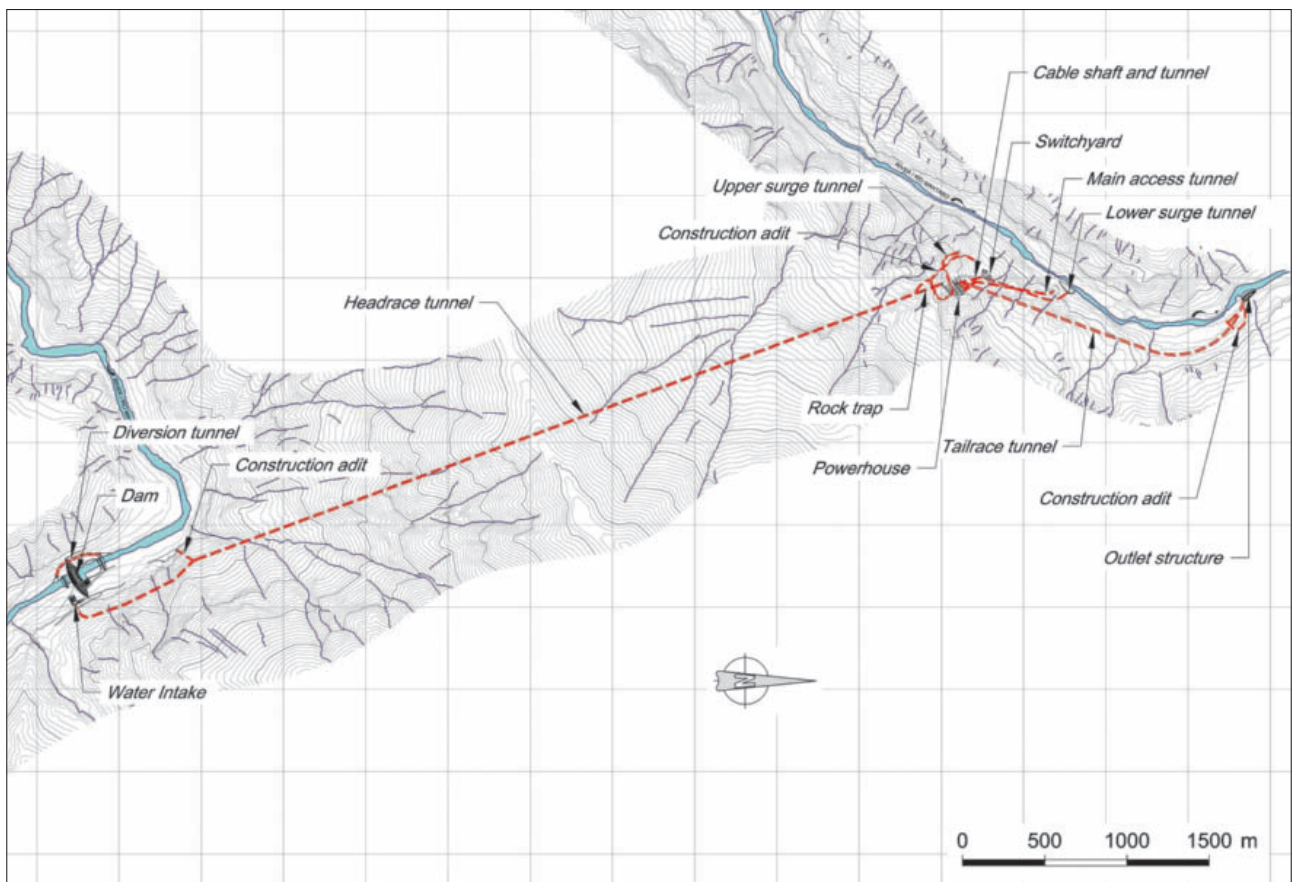
The main tunnels and schemes of the project are illustrated in Fig. 5. This corresponds to around 12 km of tunnels excavated using the conventional drill and blast method. The project is presently being commissioned and all the

underground works and excavation have been completed. Two adits were built for the headrace tunnel and two adits for the tailrace tunnel. Table 1 shows the main characteristics of each scheme. This table also illustrates the excavation advance rates for each tunnel. An average rate of 6.8 m/day was achieved in the main headrace tunnel. Although the tailrace tunnel has the same section, it was excavated at a faster rate of around 8.1 m/day. This difference is mainly explained by the fact that the headrace tunnel has sections with more than 1,600 m rock overburden and is thus prone to rockburst. This slowed the excavation rate due to all the support measures that were taken during excavation.



Credit: Selim M. Sayah

4 Geological profile along the main waterway system



Credit: Selim M. Sayah

5 Waterway system and utility tunnels/shaft of Cerro del Águila HPP

Waterway	Length [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Rock type	Excavation rate [m/day]
Headrace tunnel	5,738	91.5	Granite/Granodiorite/Gneiss	6.8
Upper surge tunnel	483	60	Gneiss	1.8
Pressure shaft (raise bored, D=4 m)	242	12.56	Gneiss	12.7
Pressure shaft (D&B, D=10 m)	242	78.5	Gneiss	1.3
High pressure penstock	140	57.3	Gneiss	3.5
Draft tubes (3 tunnels)	280	32	Gneiss	–
Lower surge tunnel	647	35.2–91.5	Gneiss	–
Tailrace tunnel	1,891	91.5	Gneiss	8.1
Derivation tunnel	326	104	Granite	2.7
<b>Access tunnels/cable ways</b>				
Adit 1 headrace	95	46.7	Granite	0.8
Adit 2 headrace	452	46.7	Gneiss	1.7
Powerhouse access tunnel	606	46.7	Gneiss	1.7
Cable shaft (raise bored, D=4 m)	191	12.56	Gneiss	3.8
Cable tunnel	166	35	Gneiss	1.8
Adit 1 tailrace	264	35	Gneiss	1.8

Credit: Selim M. Sayah

**Table 1** Tunnels and shafts characteristics of Cerro del Águila project, lithology and excavation rate

The pressurized headrace tunnel conveys the water discharge of 210.5 m<sup>3</sup>/s from the power intake to the pressure shaft. It is almost 5.7 km long, with a slope of 0.34%. The cross section of the headrace tunnel is illustrated in Fig. 6. It is a simplified horseshoe shape with a horizontal invert. Fig. 6 also shows the support system of rock type B.

The excavation of the unlined headrace tunnel was carried out simultaneously from two adits. The first one is situated at the first Mantaro River curve downstream of the dam axis while the second adit is close to the downstream end of the tunnel at the connection with the pressure shaft. This adit was also used to access the upper surge tunnel and the vertical shaft. Only permanent support measures were applied, depending on rock quality. This included grouted anchors, shotcrete and steel ribs. Special protection provisions were applied in case of rockburst due to the high overburden (around 1,600 m and the centre of the tunnel). All the rock support classification followed the Q System of Barton. This rock classification system was specified in the contract by the owner. Since the tunnel arch is more than 10 m high, a protective shotcrete layer with a thickness of at least 5 cm was always applied to the arch, even in rock of very good quality.

The aim of the upper surge tunnel (Fig. 7) is to allow free water oscillation in the tunnel during emergency shut-down or start-up of the turbines. During mass oscillation, the maximum and minimum surge levels are 1,570.00 m asl and 1,537.00 m asl, respectively. The tunnel is equipped with an orifice consisting of a 7 m long and 3.3 x 3.3 m steel-lined cross section, which enables a reduction of the maximum surge level by around 10 m. The typical section of the surge

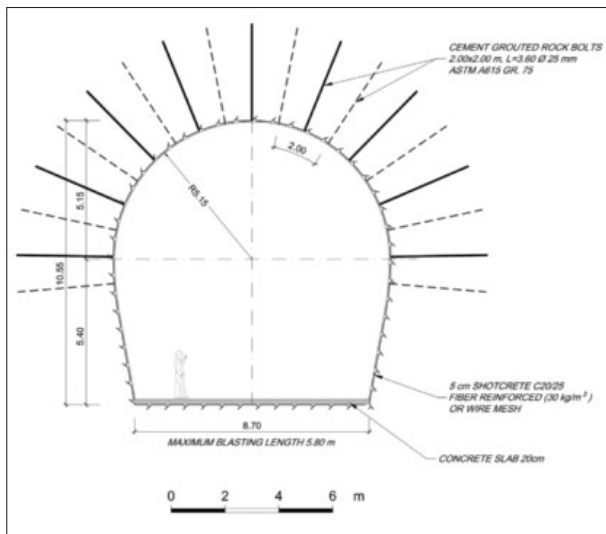
tunnel is similar to that of the headrace tunnel though with a smaller area (Table 1). It has a 13% slope and it is 483 m long.

The pressure shaft is the vertical connecting element between the low pressure headrace tunnel and the high pressure manifold section. It is 242 m high with an 8 m internal diameter and a 10 m excavation diameter. Based on several concluding hydrojacking tests carried out along the entire height of the shaft, the steel lining of this shaft was omitted. The final lining consists of 1 m thick watertight reinforced concrete.

The manifold is the set of steel-lined high pressure tunnels between the vertical shaft and the three-turbine system. The internal tunnel diameter decreases from 6.00 m to 3.385 m. The total length of the manifold is around 140 m.

The tailrace tunnel is about 1.9 km long, sloping down at 0.21% (Figs. 5 and 7). The typical section of this tunnel is a replica of the headrace tunnel section. This tunnel is designed to be a pressurized scheme with a submerged outlet structure. This solution provides better protection of the entire tailrace system during the passage of floods and allows an increase of net head.

In order to avoid depressurized sections in the upstream part of the tailrace tunnel close to the draft tube outlet during simultaneous emergency shut-down of the turbine system, a lower surge tunnel was built. The aim of this tunnel is to ensure sufficient head during emergency shut-down of the turbine in such a way that the piezometric level in the draft tube outlet section connecting to the tailrace tunnel remains within an acceptable range. The required surface for mass oscillation is around 3,000 m<sup>2</sup>.



Credit: Selim M. Sayah

6 Typical section of the headrace/tailrace system

In the following section, a few highlights of the pressure shaft design are described. This scheme is of special importance since it allows vertical water transfer from the low-pressure to the high-pressure system where turbines are installed.

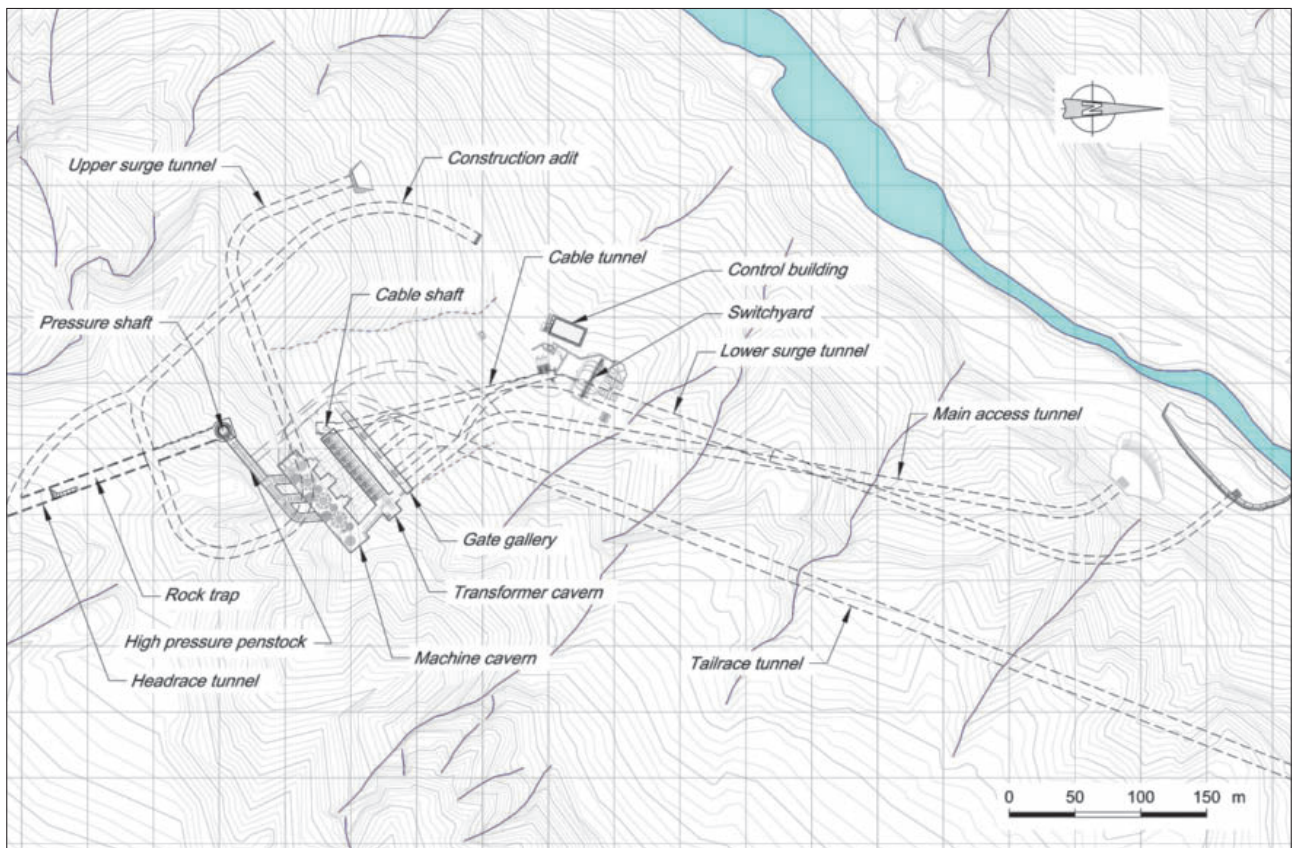
### 3.2 Pressure Shaft

The water tightness of the 242 m high pressure shaft was tested by hydrojacking tests in nearby boreholes, which crossed the pressure shaft down to its bottom.

In this test, water is injected into borehole sections delimited by packers. The water pressure is increased until existing joints are opened. To ensure proper functioning, these pressures must stay below the operating pressures, otherwise the pressure shaft would have to be waterproofed with a lining.

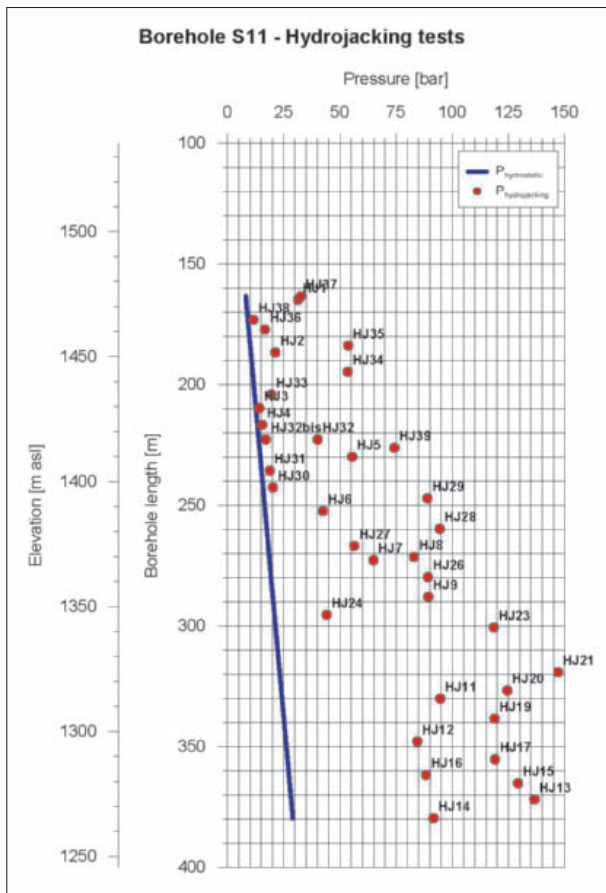
Fig. 8 shows the measured hydrojacking pressures together with the static pressures imposed by the water conveyance system. As can be seen, the rock mass is subject to opening of existing joints at pressures in the range of the operational pressures down to a certain depth. This indicates the presence of a superficial zone of reduced rock mass quality where fractures may open and water may circulate freely, resulting in water loss. Waterproofing of the pressure shaft is thus necessary down to a certain depth, especially at the fault crossings and also close to the powerhouse.

Fig. 9 depicts the grouting scheme that was applied along the pressure shaft. In the lower high pressure section, around 76 m of grouting was applied at a high pressure of 40 bar. The grouting of this section was independent of rock quality. The main purpose was to limit water infiltration during operation from the shaft to the powerhouse cavern situated at around 50 m. Moreover, in the middle of the shaft, where a crossing fault was observed during the primary investigation, another section was grouted at a slightly lower pressure of 35 bar. The grouting of this section was intended to increase the rock quality. It should also be mentioned that



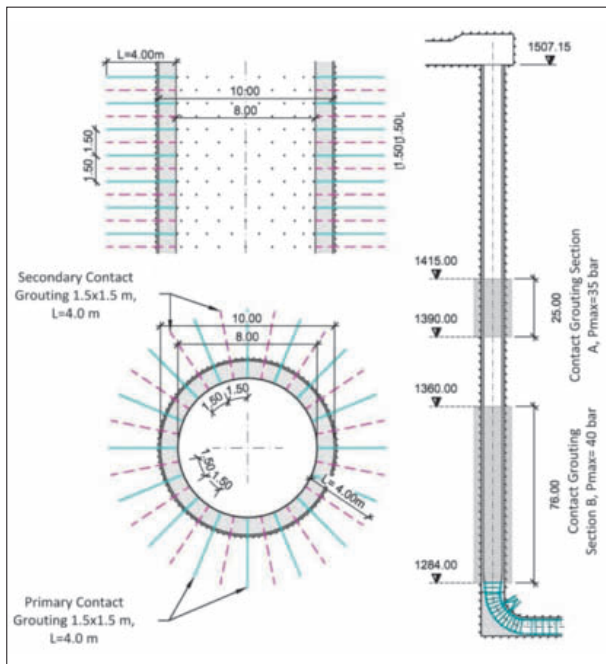
Credit: Selim M. Sayah

7 Close-up of the downstream complex underground schemes



Credit: Selim M. Sayah

8 Results of the hydrojacking tests made along the entire height of the pressure shaft



Credit: Selim M. Sayah

9 Grouting and concrete lining scheme of the pressure shaft

the reinforced concrete lining and the water infiltration rate estimation were carried out using the theory developed by Schless (1997) [5].

## 4 Rockburst

### 4.1 Rockburst Analysis and Proposed Rock Support

A major concern for the excavation of the headrace tunnel was the risk of spalling and rockburst. The tunnel passes under a maximum overburden of more than 1,600 m. The rockburst risk had been evaluated using the classical approaches, which relate the compressive strength of the intact rock to the overburden stress, accounting for the excavation geometry and the expected in-situ stress condition [6, 7].

Fig. 10 shows the first estimate based only on the ratio of the intact compressive strength and overburden stress for both lithologies, granites/granodiorites and metamorphic rocks. According to this and a more detailed evaluation, there was a considerable risk of rockburst in intact sections, particularly in the granites/granodiorites. For this bedrock lithology, damage initiation may occur under an overburden of 500 m, and will then develop to spalling. Rockburst may be present with an overburden in excess of 1,150 m.

The section of the headrace tunnel in metamorphic rocks is less vulnerable. Due to the higher compressive strength and lower overburden, damage initiation may occur under 600 m overburden, and the condition for rockburst may not be reached. Consequently, excavations needed to be accompanied by a monitoring concept and protective measures in case of elevated rockburst risk.

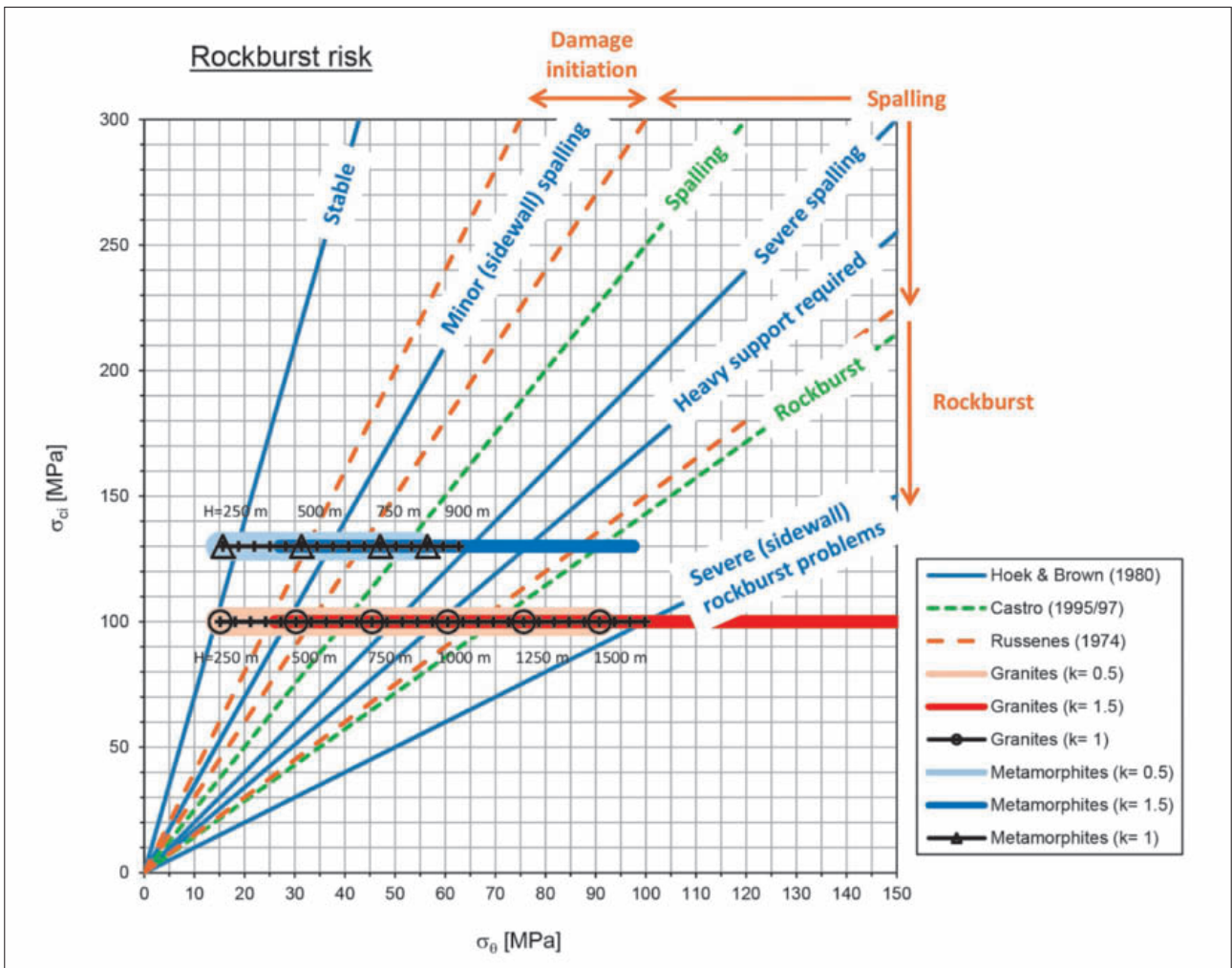
Fig. 11 shows the support system (C2) suggested for the sections of the headrace tunnel susceptible to rockburst. This support system includes systematic cement grouted rock bolting in the arch as well as in the tunnel walls, reinforcement of the roof with cone bolts and wire mesh, 15 cm of shotcrete in the entire section and 5 cm of shotcrete to the tunnel face. This protection was applied systematically when the rock overburden was above 900 to 1,000 m and rock UCS higher than 100 MPa. This reduced rockburst and thus avoided total collapse of the roof and tunnel walls.

### 4.2 Rockburst Events and Protection

Several events of mild to strong rockburst (three to four) were encountered during the excavation of the headrace tunnel. One of the strongest events occurred during the evening of 14 November 2014. A strong explosion-like noise was heard at around 9 pm. The damage report indicated a 10 m extent of limited collapse of the tunnel arch. Rock and protective shotcrete were projected and the installed rock bolts were destroyed (Fig. 12). This event occurred at a shallow overburden of around 830 m. After this event, the application of rock support C2 as mentioned before was adopted.

Concerning the protection and support measures that were adopted, some of the main actions applied during the excavation are listed below:

- rock de-tension blasting: before carrying out the main blasting, low charged blasting carried out deep behind the main blasting hole;



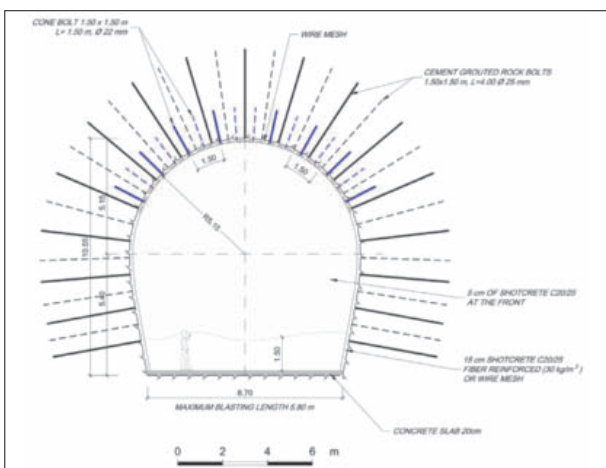
Credit: Diederichs, M. S.; Kaiser, P.K.; Eberhardt, E.

10 Rockburst risk applied to the headrace tunnel conditions

- rock bolts are only grouted after several days. A mechanical head was used to grip the bolt;
- steel cages for workers working close to the tunnel (shotcrete nozzle man, topography, etc.);
- areas with limited access (Fig. 13): no access allowed several metres from the newly blasted face or to the walls, etc.;

- curved face excavation (convex);
- it was noticed that the next eight hours after the blasting are the most dangerous and when rockburst has mostly occurred.

Table 2 lists a detailed description for rockburst identification and the measures adopted.



Credit: Selim M. Sayah

11 Proposed rock support of tunnel sections prone to rockburst



Credit: Selim M. Sayah

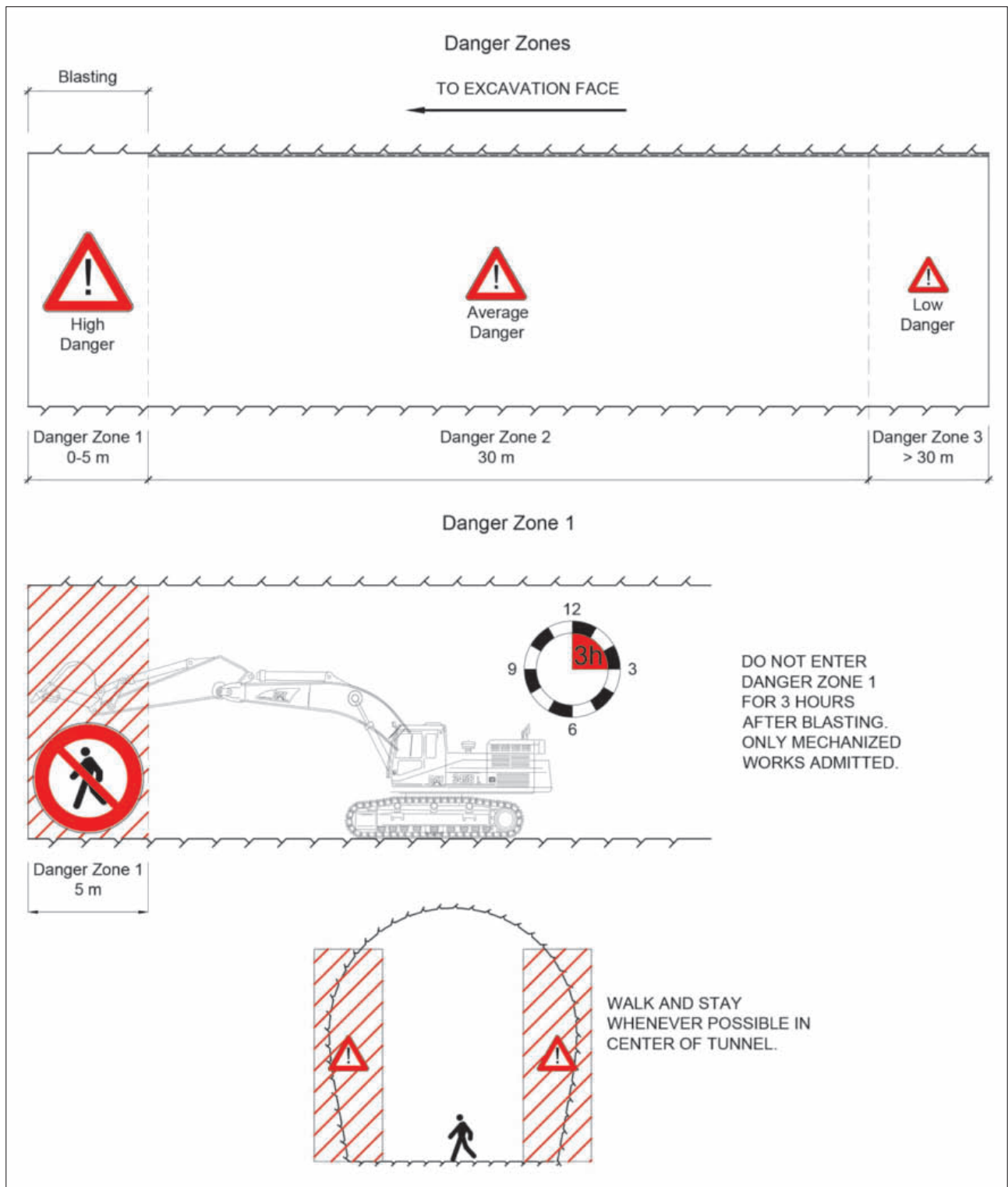
12 Rockburst event in the headrace tunnel

### 5 Conclusions and Acknowledgments

In this article a description of all the waterway system and utility tunnels has been provided with some highlights of construction procedures and excavation. An analysis has been given of the pressure shaft, which is considered a key scheme. Also highlighted were the rockburst theory and events that occurred during the excavation of the headrace

tunnel, and all the support and protection measures that were introduced.

The authors acknowledge the assistance of the contractor Consorcio Rio Mantaro (Astaldi S.p.A. and Graña y Montero SAA) and the owner of the scheme Cerro del Águila S.A. (Kallpa S.A.) for their fruitful collaboration.



13 Protection measures adopted against rockburst during tunnel excavation

Behavior	Q	Phenomena	Measures	Support
<b>RB0</b> <i>Strain relief</i>	0.5 to 40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cracking noise</li> <li>• Rumbling noise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decrease use of danger zones</li> <li>• Shotcrete to excavation face</li> <li>• Poss. curved excavation face, leave excavated material at face</li> <li>• Poss. anchors to excavation face</li> </ul>	–
<b>RB1</b> <i>Spalling</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Popping noise</li> <li>• Dust formation</li> <li>• Platy detachments &lt; 5 m<sup>3</sup> at face with depth &lt; 1 m during cleaning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anchors to excavation face</li> <li>• Poss. curved excavation face</li> <li>• Leave excavated material at face</li> <li>• Use cone bolts according to structural condition</li> <li>• Apply protection mesh locally</li> </ul>	C1
<b>RB2</b> <i>Minor rockburst</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strong popping noise</li> <li>• Popping noises 3–6 hours after blasting</li> <li>• Dust clouds from crown</li> <li>• Detachments from face before cleaning (&lt; 5m<sup>3</sup>)</li> <li>• Previously set anchor plates deform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systematically use cone bolts</li> <li>• Systematic application of protection mesh</li> <li>• Anchors to excavation face</li> <li>• Curved excavation face</li> <li>• Leave excavation material at face</li> </ul>	C2
<b>RB3</b> <i>Heavy rockburst</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very strong, explosion-like noise with several following noises</li> <li>• Popping noises after &gt; 3 hours</li> <li>• Detachment of formerly applied shotcrete</li> <li>• Detachment of shotcrete at face</li> <li>• Detachments at face &gt; 5 m<sup>3</sup> before cleaning</li> <li>• Overprofile</li> <li>• Torn out anchor heads in side walls</li> </ul>	Additionally to previous measures: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poss. apply steel cable lacing</li> <li>• Depending on damage situation: densify systematic anchors, reinforce anchors to face</li> <li>• Apply relief blasts</li> <li>• Document event</li> </ul>	

Credit: Selim M. Sayah

**Table 2** Different levels of rock spalling and rockburst and the support measures adopted

## References

- [1] S. M. Sayah et al., 2013. Cerro del Águila 510 MW hydro plant: The new Peruvian challenge, Hydropower and Dams, Innsbruck, Austria
- [2] Hutchinson, J.N. and Kojan, E., 1975. The Mayunmarca Landslide of 25 April 1974, UNESCO report
- [3] S. M. Sayah et al., 2013. Cerro del Águila Gravity Dam in Peru: Between Feasibility and Challenges, ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy
- [4] M. Thüring et al., 2014. Overcoming the geological and design related challenges of the 510 MW hydro-power project of Cerro del Águila (Peru), World Tunnel Congress 2014, Iguassu Falls, Brasil
- [5] Schleiss, A.J., 1997. Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts
- [6] Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., Eberhardt, E., 2004. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. Int. J. of R. Mech & Min. Sci., 41, 785–812
- [7] Hoek, E. and Brown, T.H., 1980. Underground excavations in rock. Inst. of Min. and Metall., London, 527 pp



Ettore Pagani, Director General, Consorzio COCIV, Genova/IT  
 Giovanna Cassani, Technical Director, Rocksoil S.p.A., Milano/IT

# Terzo Valico dei Giovi

## Alta velocità/alta capacità Milano–Genova

Il Terzo Valico dei Giovi, sulla linea AV/AC Milano–Genova è inserito tra i 30 progetti prioritari europei e collega il porto di Genova con Milano e Torino in Italia, fino a Rotterdam/Aversa attraverso la Svizzera. L'Opera, iniziata nell'aprile del 2012, prevede in particolare la realizzazione di 34 km di due gallerie a semplice binario affiancate e collegate da by-pass ogni 500 m.

# Terzo Valico dei Giovi

## Milan–Genoa High Speed/High Capacity Line

The Terzo Valico dei Giovi, on the High Speed/High Capacity (HS/HC) Milan–Genoa line is one of 30 European priority projects and links the port of Genoa to Milan and Turin in Italy, continuing on to Rotterdam/Antwerp through Switzerland. The works, which began in April 2012, primarily involve the construction of two single-track, parallel tunnels with a total length of 34 km, connected by cross-passages every 500 m.

### 1 Descrizione del progetto

La linea ferroviaria Milano–Genova è inserita tra i 30 progetti prioritari europei approvati dall'Unione Europea il 29 aprile 2004 (n° 24 «Asse ferroviario Lione/Genova–Basilea–Duisburg–Rotterdam/Aversa») come nuovo pro-



1 Il Sistema AV/AC in Italia

Second High Speed/High Capacity system in Italy

### 1 Description of the Project

The Milan–Genoa railway line is included as one of the 30 European priority projects approved by the European Union on 29 April, 2004 (project No. 24, Lyon/Genoa–Basle–Duisburg–Rotterdam/Antwerp rail link), known as the “Bridge between two Seas” Genoa–Rotterdam (Fig. 1). The new mountain pass line will generally improve the connections between the port of Genoa and the inland Po Valley area as well as to northern Europe with a significant increase in transport capacity, particularly for freight, to meet the growing traffic demand.

The third pass spans a distance of approximately 53 km and presents particular challenges in terms of construction because of the presence of long tunnels traversing approximately 34 km of the complex Apennine range located between the Piedmont and Liguria. The line crosses the provinces of Genoa and Alessandria, affecting the territories of twelve municipalities. It then extends to Tortona along the Genoa–Milan line and to Novi Ligure along the Genoa–Alessandria–Turin line (Fig. 2). In compliance with the latest safety standards, the underground line consists of two single-track, side-by-side tunnels with cross-passages every 500 m which allow each tunnel to serve as a safe area for the other (Fig. 3).

The new line will be linked to the south at Voltri and Bivio Fegino through interconnections with the railway facilities at Genoa Junction (for which upgrading and expansion work are underway) and with the harbours at Voltri as well as the

Credit: COCIV

## «Terzo Valico dei Giovi»

### Hochgeschwindigkeitsstrecke Mailand–Genua

Die Verbindung «Terzo Valico dei Giovi» auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Mailand–Genua ist eines der 30 vorrangigen europäischen Verkehrsprojekte. Sie verbindet den Hafen Genuas mit Mailand und Turin in Italien und reicht über die Schweiz bis nach Rotterdam/Antwerpen. Der im April 2012 begonnene Streckenneubau sieht für die Querung des ligurischen Apennins über insgesamt 34 Kilometer zwei getrennte Tunnelröhren vor, die alle 500 Meter eine Querverbindung aufweisen. Vorgesehen für die Tunnelbauweise ist sowohl das traditionelle Verfahren, nach der Methode ADECO-RS im Vollquerschnitt, als auch der mechanische Vortrieb mittels EPB-Schild. Für die Realisierung sind 115 Monate, sieben Basisstationen und 26 Baustellenflächen erforderlich. Die Gesamtkosten betragen 4,5 Milliarden Euro.

## «Terzo Valico dei Giovi»

### Le tronçon à grande vitesse Milan–Gênes

La liaison «Terzo Valico dei Giovi» sur le tronçon à grande vitesse Milan–Gênes est l'un des 30 projets de transport européens prioritaires. La ligne reliera le port de Gênes à Milan et à Turin en Italie, poursuivant jusqu'à Rotterdam et Anvers, en passant par la Suisse. La construction de cette nouvelle ligne, commencée en avril 2012, prévoit deux tubes de tunnels séparés sur un total de 34 kilomètres pour la traversée des Apennins ligures. Ils auront une liaison transversale tous les 500 mètres. Pour le mode de construction des tunnels, on utilise aussi bien le procédé traditionnel d'excavation en pleine section selon la méthode ADECO-RS (Lunardi) que le creusement mécanique au tunnelier EPB. Pour la réalisation, 115 mois seront nécessaires, avec sept stations de base et 26 zones de chantier. Le montant total des coûts s'élèvera à 4,5 milliards d'euros.

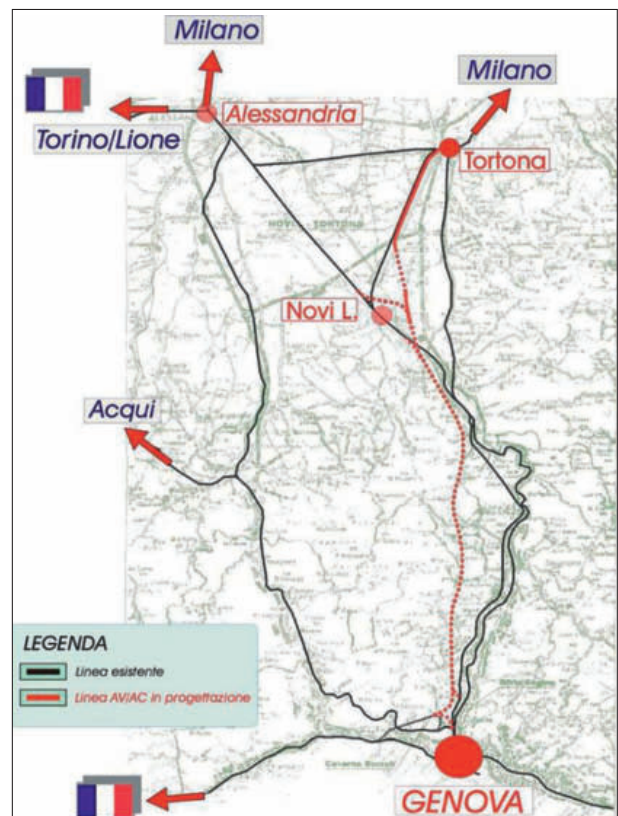
getto europeo, il cosiddetto «Ponte tra i due Mari» Genova–Rotterdam (fig. 1). La nuova linea di valico migliorerà in generale i collegamenti dal porto di Genova con l'entroterra della pianura Padana ed il Nord Europa con aumento significativo di capacità di trasporto, in particolare merci, per soddisfare la crescente richiesta di traffico.

Il Terzo Valico si sviluppa su un tracciato di circa 53 km e costituisce un'opera particolarmente impegnativa per la presenza di lunghe gallerie che si sviluppano per circa 34 km nella complessa catena appenninica situata tra Piemonte e Liguria. Il tracciato attraversa le province di Genova e Alessandria, interessando il territorio di 12 Comuni. Si sviluppa quindi lungo la direttrice Genova–Milano, fino a Tortona, e lungo la direttrice Genova–Alessandria–Torino, fino a Novi Ligure (fig. 2). In linea con i più recenti standard di sicurezza il tracciato in sotterraneo è costituito da due gallerie a semplice binario affiancate con collegamenti trasversali ogni 500 m che consentono a ciascuna galleria di essere luogo sicuro rispetto all'altra (fig. 3).

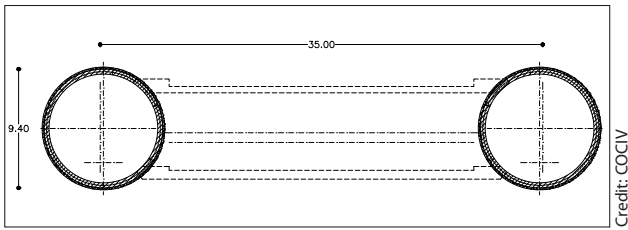
La nuova linea sarà collegata, a Sud mediante l'interconnessione di Voltri ed il Bivio Fegino con gli impianti ferroviari del Nodo di Genova (per i quali sono in corso i lavori di adeguamento funzionale e di potenziamento), e con i bacini portuali di Voltri e del Porto Storico. A Nord, nella piana di Novi Ligure, il tracciato si collega alle linee ferroviarie esistenti Genova – Torino (per i flussi di traffico in direzione Torino e Novara – Sempione) ed alla linea Tortona–Piacenza–Milano (per il traffico in direzione Milano–San Gottardo).

Il tracciato attraversa l'Appennino Ligure con la Galleria di Valico, della lunghezza di galleria di 27 km, e fuoriesce all'aperto nel comune di Arquata Scrivia proseguendo verso

historic port area. To the north, on the Novi Ligure plain, the line connects to the existing Genoa–Turin railway lines (for traffic flows in the direction of Turin and Novara–Sempione) and to the Tortona–Piacenza–Milano line (for traffic going toward Milan–San Gottardo).



2 Il Terzo Valico dei Giovi e la rete esistente  
Il Terzo Valico dei Giovi and the existing network



Credit: COCIV

3 Sezione trasversale gallerie ferroviarie  
Cross-section of railway tunnels

la piana di Novi Ligure sottopassando con la Galleria di Serravalle di 7 km il territorio di Serravalle Scrivia (fig. 4).

La parte in sotterraneo comprende poi la Galleria Campasso, lunga circa 600 m e le due Gallerie di interconnessione di Voltri, della lunghezza di circa 2 km ciascuna. La Galleria di Valico prevede quattro finestre di accesso intermedio, sia per motivi costruttivi sia di sicurezza (Finestre Polcevera, Cravasco, Castagnola e Vallemme). Dall'uscita della galleria di Serravalle la Linea principale si sviluppa prevalentemente all'aperto o in galleria artificiale, fino all'innesco sulla linea esistente a Tortona (itinerario per Milano); mentre un ramo in deviateda a 160 km/h realizza il collegamento in sotterraneo da e per Torino sull'attuale linea Genova–Torino (fig. 4).

Da un punto di vista costruttivo le opere più significative del Terzo Valico sono rappresentate dalle seguenti gallerie naturali:

- Galleria Campasso 716 m (canna singola a due binari);
- Galleria Interconnessione Voltri pari 2000 m (canna singola a singolo binario);
- Galleria Interconnessione Voltri dispari 2250 m (canna singola a singolo binario);
- Galleria di Valico 27 110 m (due canne a singolo binario);
- Galleria Serravalle 7094 m (due canne a singolo binario);
- Finestre di accesso alla linea 7200 m;
- Gallerie artificiali 8000 m.

Opere Works	Sviluppo binario pari (ml) Length of Track (m)
<b>Linea Principale Main Line</b>	<b>53 087</b>
• in galleria/in tunnels	36910
• all'aperto/above ground	16177
• Finestre/adits	7200
<b>Interconnessioni Interconnections</b>	<b>25 308</b>
• all'aperto/above ground	8808
• in galleria/in tunnels	16500

Credit: Ari te labo

Tabella 1 Opere e sviluppi

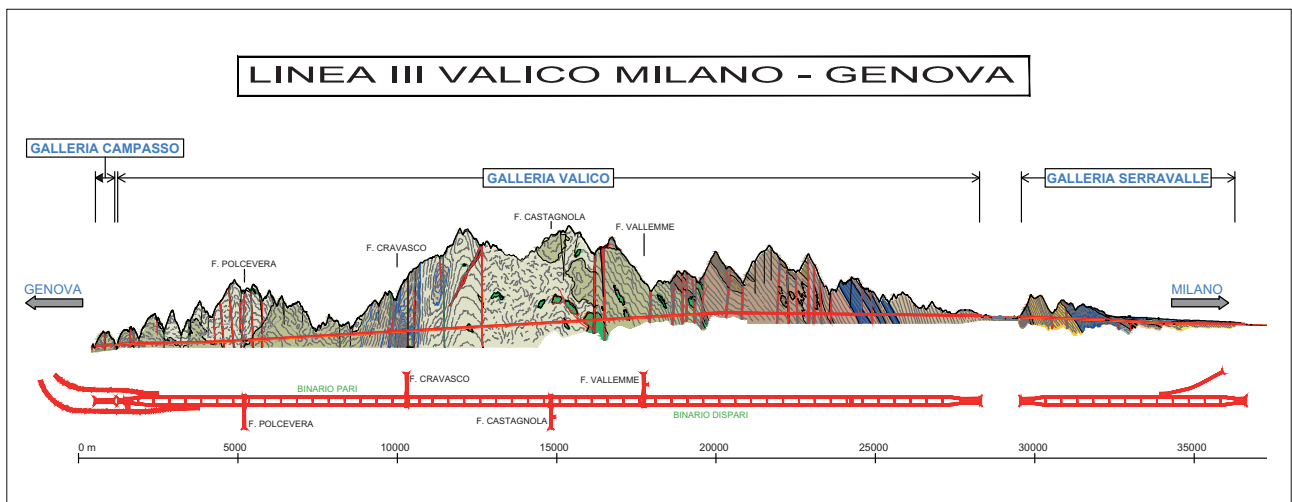
Table 1 Works and lengths

The route crosses the Ligurian Apennines through the 27 km long Valico Tunnel, exiting in the municipality of Arquata Scrivia and continues towards the Novi Ligure plain, passing under it through the 7 km Serravalle Tunnel in the Serravalle Scrivia region (Fig. 4).

The underground portion includes the approximately 600 m long Campasso Tunnel and the two interconnecting tunnels at Voltri, each with a length of approximately 2 km.

Four intermediate access adits are anticipated for the Valico Tunnel, both for structural and safety purposes (Polcevera, Cravasco, Castagnola and Vallemme adits). From the Serravalle Tunnel exit, the main line is predominantly above ground or in an artificial tunnel, until it joins the existing line in Tortona (en route to Milan), while a diverging branch line with a turnout speed limit of 160 km/h establishes the underground connection to and from Turin on the existing Genoa–Turin line (Fig. 4).

In terms of construction, the following tunnels are the most significant works of the Terzo Valico:



Credit: COCIV

4 Profilo geologico del tratto in galleria  
Geological longitudinal section of the tunnelled route section

Gli standard di progetto prevedono una velocità massima di tracciato della linea principale di 250 km/h, 100–160 km/h per le interconnessioni, una pendenza massima 12,5‰, l'alimentazione a 3 kV in corrente continua, ma con predisposizione delle infrastrutture per 2 x 25 kV in corrente alternata, e il sistema di segnalamento ERTMS tipo 2.

### 1.1 Opere per la sicurezza della Linea

All'interno della Galleria di Valico, in corrispondenza della Finestra Val Lemme, è stata prevista una fermata di sicurezza attrezzata per l'esodo dei passeggeri di un treno nel caso di un incidente o di un avaria significativa.

Il sistema prevede di affiancare le due gallerie di linea ferroviarie con altre due gallerie pedonali per l'evacuazione dei passeggeri della lunghezza di 750 m, collegate tra loro da un «transetto» che sovrappassando entrambi i binari, raggiunge la finestra Val Lemme che costituisce l'uscita di sicurezza e l'accesso dei mezzi di soccorso.

Questo sovrappasso, insieme ad un sistema di 15 + 15 bypass che collegano le due banchine con le due gallerie di sfollamento, consente di trasferire in condizioni di sicurezza i passeggeri di un treno in avaria alla banchina opposta per imbarcarli su un altro treno, oppure, in casi estremi, avviarli all'uscita di sicurezza costituita dalla finestra Val Lemme.

È inoltre prevista la realizzazione di un sistema di gallerie carabili che mette in comunicazione la finestra con la galleria di sfollamento Binario Dispari. L'attraversamento della linea ferroviaria è realizzato mediante un passaggio a raso.

Una seconda area sicura è prevista a Libarna nel tratto di linea che esce all'aperto, compreso fra le gallerie di Valico e Serravalle, dotato di binario di precedenza e ricovero, avrà la doppia funzione di Posto di Comunicazione e di area di sicurezza.

### 1.2 Il Committente, il contratto e il Piano finanziario dell'opera in Lotti Costruttivi

Il Committente è R.F.I. S.p.A. (Rete Ferroviaria Italiana), mentre ITALFERR S.p.A. svolge il ruolo di Alta Sorveglianza per conto del Committente. Il Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) ha approvato il Progetto Definitivo dell'opera nell'aprile del 2006 e nel novembre 2010 (Delibera n. 84/2010) ha autorizzato l'avvio della realizzazione della tratta in sei lotti costruttivi non funzionali. Nel novembre 2011 è stato firmato il contratto (Atto Integrativo) tra il General Contractor COCIV (Salini Impregilo 64%, Condotte 31 %, Civ 5 %) e R.F.I., che prevede la Progettazione Esecutiva, la Direzione Lavori e la realizzazione dell'Opera, iniziata nell'aprile del 2012.

L'importo complessivo del contratto è di circa 4,5 miliardi €, la durata del contratto è di 115 mesi e la fine dei lavori è prevista per il 2021 (tab. 2). Il contratto prevede che il 60% dell'importo delle opere civili e dell'armamento sia obbliga-

- Campasso Tunnel: 716 m (single-tube, dual-track);
- Voltri Interconnecting Tunnel, even: 2,000 m (single-tube, single-track);
- Voltri Interconnecting Tunnel, odd: 2,250 m (single-tube, single-track);
- Valico Tunnel: 27,110 m (dual-tube, single-track);
- Serravalle Tunnel: 7,094 m (dual-tube, single-track);
- access adits for the line 7,200 m;
- artificial tunnels: 8,000 m.

Design standards provide for a maximum speed of 250 km/h on the main line, 100–160 km/h for interconnections, a maximum gradient of 12.5‰, a DC power supply of 3 kV but with infrastructure that provides for 2 x 25 kV AC, and a Type 2 ERTMS signalling system.

### 1.1 Safety Provisions for the Line

A safety stop equipped for the evacuation of train passengers in the event of an accident or a significant failure is planned for inside the Valico Tunnel at the Lemme Valley adit.

The system involves the juxtaposition of the two railway tunnels with two other pedestrian tunnels for the evacuation of passengers; the tunnels are 750 m long and are linked together via a “transect” that passes over both tracks, reaching the Lemme Valley adit, which serves both as the emergency exit and as the emergency vehicle access point.

This overpass, along with a 15 + 15 bypass, connects the two platforms with the two evacuation tunnels and affords the passengers of a damaged train safe passage to the opposite platform to board another train or, in extreme cases, route them to the safety exit at the Lemme Valley adit. The construction of a vehicular tunnel system that connects the adit with the Binario Dispari evacuation tunnel is also planned. The railway line is crossed by means of a level passage.

There are plans for a second safety area at Libarna, in the above-ground section of the line between the Valico and Serravalle Tunnels; it will be equipped with a priority shelter track and will have the dual function of communications area and safety area.

### 1.2 The Client, the Contract and Financial Planning for the Project in Constructive Batches

The Client is R.F.I. S.p.A. (Italian Railway Network), while ITALFERR S.p.A. performs the role of project supervision on behalf of the Client. The Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) approved the final design for the work in April 2006 and authorised the initiation of construction of the six non-functional construction batches in November 2010 (Resolution No. 84/2010). In November 2011, the General Contractor COCIV (Salini Impregilo 64%, Condotte 31 %, Civ 5 %) and R.F.I. signed the contract (Amendment) which provides for the detailed engineering design, the construction management and the construction work which commenced in April of 2012.

FINANZIAMENTO LOTTI/FINANCING OF BATCHES				
LOTTO/ BATCH	Inizio/ Start	Fine/ Finish	Durata/ Duration (months)	Mil €
LOTTO 1/Batch 1	02/04/2012	03/05/2015	37	442 988 124
LOTTO 2/Batch 2	03/04/2013	01/10/2018	66	687 455 301
LOTTO 3/Batch 3	02/07/2015	02/07/2019	48	537 148 222
LOTTO 4/Batch 4	02/07/2016	02/07/2020	48	1 124 625 647
LOTTO 5/Batch 5	02/07/2017	02/09/2020	38	1 072 518 724
LOTTO 6/Batch 6	02/07/2018	02/12/2021	41	534 004 261
Preesercizio (RFI)/ Pre-exercise (RFI)			3	
TOTALE/TOTALS	02/04/2012	02/03/2022	118	4 398 740 279
assicurazioni/fidejussioni/ insurances/sureties				117 000 000
TOTALE COMMESSA/ CONTRACT TOTAL				4 515 740 279

**Tabella 2** Finanziamento dei lotti e scadenze

**Table 2** Financing of batches and times for completion

toriamente eseguito da imprese terze, individuate attraverso bandi di gara internazionali.

## 2 Inquadramento geologico generale

Gli studi eseguiti, hanno evidenziato in particolare che la lunga galleria di Valico si sviluppa per circa il 30% all'interno di una zona particolarmente complessa dal punto di vista geologico, denominata ZONA SESTRI VOLTAGGIO, con coperture fino a circa 600 m, costituita da un'ampia superficie di faglia subverticale, orientata indicativamente nord-sud, osservabile per una lunghezza di circa 24 km. Secondo le interpretazioni più recenti, questa zona costituisce «un canale di concentrazione preferenziale della deformazione tettonica» e presenta, dal punto di vista geologico-strutturale, un grado di complessità molto elevato e rappresenta l'elemento di criticità più significativo per la realizzazione delle gallerie del III Valico.

A partire da Sud la Linea attraversa le seguenti formazioni (fig. 4):

### Galleria di Valico

Da km 1 + 215 a km 8 + 870:

- Scisti micaceo – carbonatici del Passo della Bocchetta (Meta argilliti a Palombini). Scisti talora con livelli di calcari microcristallini e interstrati filladici. La roccia si presenta normalmente molto deformata.

Da km 8 + 870 a km 12 + 450:

- Fascia milonitica di Isoverde e Calcari di Gallaneto (Unità Monte Gazzo–Isoverde);
- Scisti micaceo – carbonatici milonitici con vene intrafoliari di quarzo e albite. Sarà possibile incontrare lenti di serpentinoscisti, anidriti e gessi, carnirole, calcari. Roccia normalmente molto deformata. Per quanto riguarda le

The total volume of the contract is approximately 4.5 billion EUR, and the duration of the contract is 115 months with the completion date for the work scheduled for 2021 (Table 2). The contract stipulates that 60% of the civil and permanent way works must be performed by third party companies selected by means of international tenders.

## 2 General geological Framework

Studies have revealed that approximately 30% of the long Valico Tunnel in particular traverses an area of exceptional geological complexity; this area, called the Sestri Voltaggio Zone, has an overburden of up to 600 m and consists of the broad surface of a sub-vertical, indicatively north-south oriented fault which is observable for a length of approximately 24 km. According to the most recent interpretations, this zone constitutes “a channel of preferential concentration of the tectonic deformation”. It exhibits a very high degree of complexity with regard to geological structures and is the most significant critical element for the construction of the Terzo Valico tunnels.

Starting from the south, the line traverses the following formations (Fig. 4):

### Valico Tunnel

From km 1 + 215 to km 8 + 870:

- Micaceous schists – carbonates of the Bocchetta Pass (meta-argillites to palombino marbles). Schists sometimes with layers of microcrystalline limestones and phyllitic interbedding. The rock is generally highly deformed.

From km 8 + 870 to km 12 + 450:

- Isoverde Mylonitic Band and Gallaneto limestones (Monte Gazzo–Isoverde Unit);
- Micaceous schists – mylonitic carbonates with intrafoliated veins of quartz and albite. Some occurrences of ser-

criticità di tipo idrogeologico, il problema principale potrebbe essere costituito dall'attraversamento (comunque poco probabile) dei Calcari di Gallaneto che fanno parte di un importante acquifero carsico sotteso dall'alto bacino idrografico del Rio Verde. Per questa ragione su richiesta del CIPE è stato parzialmente modificato il tracciato della Finestra Cravasco.

Da km 12 + 450 a km 20 + 100:

- Scisti micaceo-carbonatici del Passo della Bocchetta (meta-argilliti a Palombini) con presenza di basalti dispersi all'interno degli scisti. Si tratta di scisti micaceo-carbonatici con vene di quarzo e albite. Localmente vi è presenza di calcari microcristallini, con strati filladici e corpi lenticolari basaltici associati a diaspri. La roccia è normalmente molto deformata e con grado di fratturazione molto elevato.

Da km 20 + 100 a km 23 + 450:

- Conglomerati della Formazione di Molare, costituiti da conglomerati poligenici in banchi e strati, a matrice arenacea. All'interno della Formazione di Molare sono presenti dei sistemi di flusso idrico-sotterraneo, per cui la circolazione idrica sotterranea è localmente importante. La Formazione di Molare, infatti, nella sua porzione più superficiale e più cementata, è sede di un sistema acquifero diffusamente sfruttato per scopi idropotabili. Problematiche di scavo sono legate, per quanto riguarda le caratteristiche litostratigrafiche, alla forte eterogeneità granulometrica dei conglomerati, in particolare alla presenza di grossi blocchi lapidei immersi in una matrice fine poco cementata e con scarsa coesione.

Da km 23 + 450 a km 28 + 464:

- Marne di Rigoroso e Formazione di Costa Areaa. Marne siltoso-argillose con intercalazione di arenaria fine (Marne di Rigoroso); marne e arenarie cementate (Flysch di Rigoroso); marne arenacee ed arenarie medio-grossolane (Membro di Costa Montada); formazione flyschoid costituita da marne siltose poco cementate, marne carbonatiche cementate, sabbie poco cementate e arenarie fini (Formazione di Costa Areaa). Il grado di fratturazione della roccia si presenta da medio a elevato.

#### Galleria Serravalle

Da km 29 + 491 a km 36 + 585:

- Formazioni attraversate: Marne di Cessole, Arenarie di Serravalle, Marne di Sant'Agata Fossili, Formazione gessoso-solfifera, conglomerati di Cassano Spinola, Argilla di Lugagnano. Si tratta di marne siltose omogenee e siltiti, con intercalazioni di arenarie fini e marne calcaree (Marne di Cessole); arenarie fini e siltiti, marne argillose omogenee; da km 32 + 020 a km 33 + 120: formazione gessoso-solfifera, costituita da prevalenti peliti, siltiti ed areniti fini con intercalazioni caotiche di blocchi di gesso selenitico, livelli di gessoareniti e blocchi di calcari vacuolari per dissoluzione dei cristalli di gesso (Formazione gessoso-solfifera);

pentine schists, anhydrites and gypsums, calcareous and limestones. Rocks are generally highly deformed. Regarding the critical hydrogeological issues, the main problem might be the crossing (however unlikely) of the Gallaneto limestones, which form part of an important karst aquifer underlying the upper catchment area of Rio Verde. For this reason, the layout of the Cravasco adit was partially modified at the request of CIPE.

From km 12 + 450 to km 20 + 100:

- Micaceous schists – carbonates of the Bocchetta Pass (meta-argillites to palombino marbles) with occurrence of basalts dispersed within the schists. These are micaceous schists – carbonates with veins of quartz and albite. Local occurrence of microcrystalline limestones with phyllitic strata and lenticular basaltic bodies associated with jaspers. The rock is generally highly deformed and exhibits a very high degree of fracturing.

From km 20 + 100 to km 23 + 450:

- Conglomerates of the Molare Formation, consisting of polygenic conglomerates in benches and strata in an arenaceous matrix. The Molare Formation contains groundwater flow systems, making groundwater locally significant. In fact, the uppermost part of the Molare Formation is more highly cemented and contains an aquifer system which is widely used as a source of potable water. With regard to lithostratigraphic properties, excavation challenges are linked to the strong granulometric heterogeneity of the conglomerates, specifically to the occurrence of large stone blocks embedded in a poorly cemented fine matrix with poor cohesion.

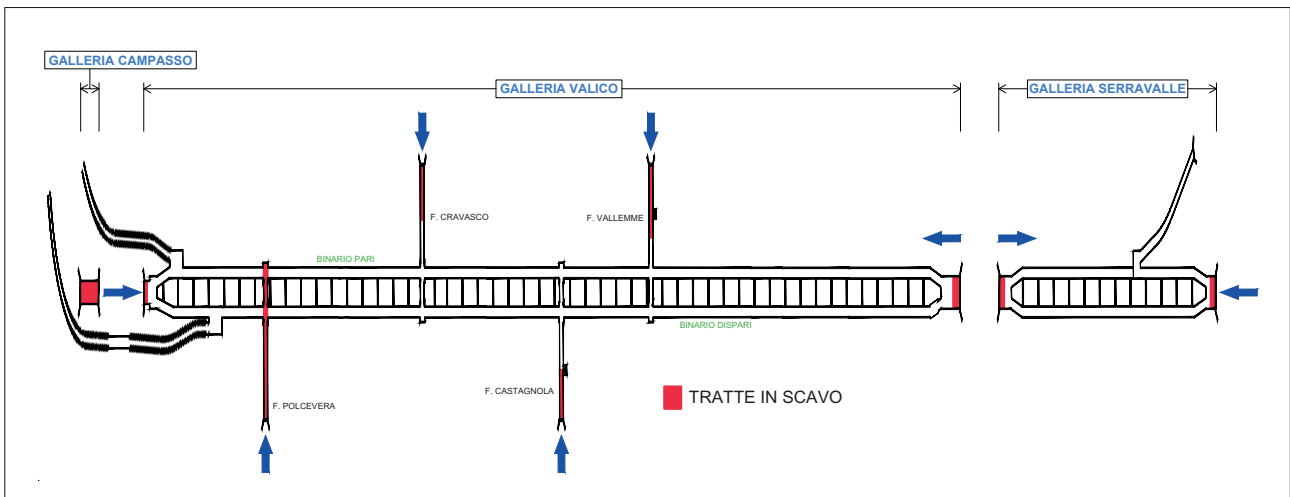
From km 23 + 450 to km 28 + 464:

- Marls of the Rigoroso Formation and the Costa Areaa Formation. Silty, clayey marl with intercalations of fine sandstone (Rigoroso Marls); cemented marls and sandstones (Rigoroso Flysch); arenaceous marls and medium to coarse sandstones (member of the Costa Montada Formation); flyschoid formation consisting of poorly cemented silty marl, cemented marl carbonates, poorly cemented sands and fine sandstones (Costa Areaa Formation). The degree of fracturing occurring in the rock is medium to high.

#### Serravalle Tunnel

From km 29 + 36 to km 36 + 585:

- Formations crossed: Cessole marls, Serravalle sandstones, Sant'Agata Fossili marls, Gypsiferous-Sulphuriferous Formation, Cassano Spinola conglomerates, Lugagnano clay. These are homogeneous silty marls and siltstones with intercalations of fine sandstones and calcareous marls (Cessole marls); fine sandstones and siltstones, homogeneous clayey marls. From km 32 + 020 to km 33 + 120: Gypsiferous-Sulphuriferous Formation consisting of prevalent pelites, siltstones and fine sandstones with chaotic intercalations of selenitic gypsum blocks, layers of gypsiferous



5 *Tratte in corso di scavo*  
Sections under excavation (February 2016)

conglomerati poligenici a matrice arenacea con clasti a granulometria grossolana, di natura calcarea ed arenacea, eterogeneamente cementati. Intercalati agli strati conglomeratici sono presenti livelli centimetrici siltoso-sabbiosi poco cementati (conglomerati di Cassano Spinola); da km 33 + 770 a km 36 + 585: silt argillosi con intercalazioni sabbiose e arenitiche (Argille di Lugagnano).

- Tutte le formazioni sono considerate porose ad eccezione della formazione gessoso-solfifera. Problematiche di scavo: lungo la galleria di Serravalle, nell’ambito delle Arenarie di Serravalle non sono evidenziabili particolari problematiche in fase di scavo. I livelli piezometrici sono modesti vista la vicinanza dell’alveo dello Scrivia. Le venute idriche principali sono localizzate nelle zone di sottoattraversamento dei solchi vallivi con basse coperture e localmente in corri-

ous sandstones and blocks of limestones with vacuoles formed by the dissolution of gypsum crystals (Gypsiferous-Sulphuriferous Formation); polygenic conglomerates in a sandy matrix with coarse-grained, calcareous and arenaceous, heterogeneously cemented clasts. Intercalated with the conglomerate strata are silty-sandy, poorly cemented layers with thicknesses on the order of centimetres (Cassano Spinola conglomerates). From km 33 + 770 to km 36 + 585: clayey silt with sandy and arenitic intercalations (Lugagnano clays).

- All the formations are considered porous except for the Gypsiferous-Sulphuriferous Formation.
- Excavation challenges: No particular challenges for the excavation phase have been detected within the Serravalle sandstones along the Serravalle Tunnel. The piezometric levels are low given the proximity of the Scrivia riverbed. The principal hydraulic influxes are located in the areas crossing under the valley floors where the overburden is thin and locally, in the most permeable layers, within the Serravalle Sandstones. In the section next to the northern entrance, lengthy advancement in the section with the diminished overburden presents a challenge. For more than approximately 1,000 m from the entrance, the thickness of the overburden is less than the diameter of the tunnel, and this critical section is to be excavated entirely within the Lugagnano clays, which exhibit poor mechanical strength properties.

Cantieri Construction Sites	No No.
Campi Base Liguria Liguria Base Camps	2
Campi Base Piemonte Piedmont Base Camps	5
Cantieri Operativi Liguria Liguria Operational Sites	5
Cantieri Operativi Piemonte Piedmont Operational Sites	12
Cantieri Armamento Permanent Way Sites	2
Cantieri Operativi Viabilità Road Network Operational Sites	7
Totale Totals	33

Tabella 3 Cantieri

Table 3 Construction sites

**Artificial tunnel and above-ground track**

From the northern entrance of the Serravalle Tunnel, most of the line runs above ground and in an artificial tunnel affecting the alluvial plain formations of the plain of the Scrivia River and its tributaries.

**3 Logistics and Site Preparation**

The location of the construction sites is closely linked to both the availability of space and the location of the tunnel

spondenza dei livelli più permeabili all'interno delle Arenarie di Serravalle. Nella tratta prossima all'imbocco nord un problema è costituito dal lungo sviluppo del settore con ridotte coperture. Dall'imbocco per oltre 1000 metri circa la copertura risulta inferiore al diametro della galleria e tale tratto critico è da scavarsi interamente all'interno delle Argille di Lugagnano, con scadenti caratteristiche di resistenza meccanica.

#### Galleria Artificiali e Tratte all'aperto

A partire dall'imbocco nord della Galleria Serravalle il tracciato si sviluppa prevalentemente all'aperto ed in galleria artificiale interessando le formazioni alluvionali della Piana del Torrente Scrivia e dei suoi affluenti.

### 3 Logistica e cantierizzazione

L'ubicazione delle aree di cantiere è strettamente legata sia alla disponibilità di spazi, sia all'ubicazione degli imbocchi delle finestre e delle gallerie. Ove possibile si è scelto di localizzare i cantieri, in particolare quelli operativi e di servizio, in aree dismesse, ove si manifestavano necessità di recupero urbanistico e comunque in aree tali da limitare il più possibile l'impatto con l'ambiente antropico e naturale circostante.

La cantierizzazione dell'intera opera prevede:

- la realizzazione dei campi base e villaggi per ospitare il personale impegnato nei lavori;
- la realizzazione dei cantieri operativi;
- gli impianti di betonaggio;
- gli impianti per lo scavo e la realizzazione delle gallerie;
- le installazioni per realizzare la sovrastruttura ferroviaria (massicciata e binari);
- le installazioni per la realizzazione degli impianti tecnologici ferroviari (elettrificazione, segnalamento, telecomunicazione, illuminazione, forza elettromotrice, ecc.);
- gli impianti per la frantumazione e produzione degli inerti necessari per i calcestruzzi;
- altre aree di cantiere lungo linea a servizio delle opere o di lavorazioni puntuali;
- i siti estrattivi per ricavare gli inerti necessari alla realizzazione delle opere in terra o in calcestruzzo;
- la viabilità ed il supporto logistico per l'alimentazione dei cantieri e relative unità operative;
- le opere di mitigazione degli impatti ambientali che si vengono inevitabilmente a creare con una cantieristica estesa e complessa come quella indispensabile per realizzare le opere, i ripristini dei siti interessati dai cantieri al termine della loro attività.

I cantieri base (o campi base), costituiscono veri e propri villaggi, concepiti in modo tale da essere pressoché indipendenti dalle strutture socio-economiche locali e in grado di ospitare 300–500 persone ciascuno. Per la loro installazione sono state individuate aree, per quanto possibile, accessibili dalla viabilità esistente (tab. 3).

Materiali Materials	Quantità Quantities	
Scavi Excavation	16,0 milioni 16.0 million	mc m <sup>3</sup>
Calcestruzzi Concrete	3,8 milioni 3.8 million	mc m <sup>3</sup>
Calcestruzzo spruzzato Shotcrete	1,2 milioni 1.2 million	mc m <sup>3</sup>
Inerti per calcestruzzi Aggregates for concrete	9,6 milioni 9.6 million	ton tonnes
Acciaio per c.a. Steel for reinforced concrete	200 000	ton tonnes
Acciaio per centine Steel for ribs	153 000	ton tonnes
Conci prefabbricati Precast segments	330 000	mc m <sup>3</sup>
Asfalti Asphalt	220 000	mc m <sup>3</sup>
Tubi in vetroresina Fibreglass tubes	6000	km

**Tabella 4** Materiali e quantità principali

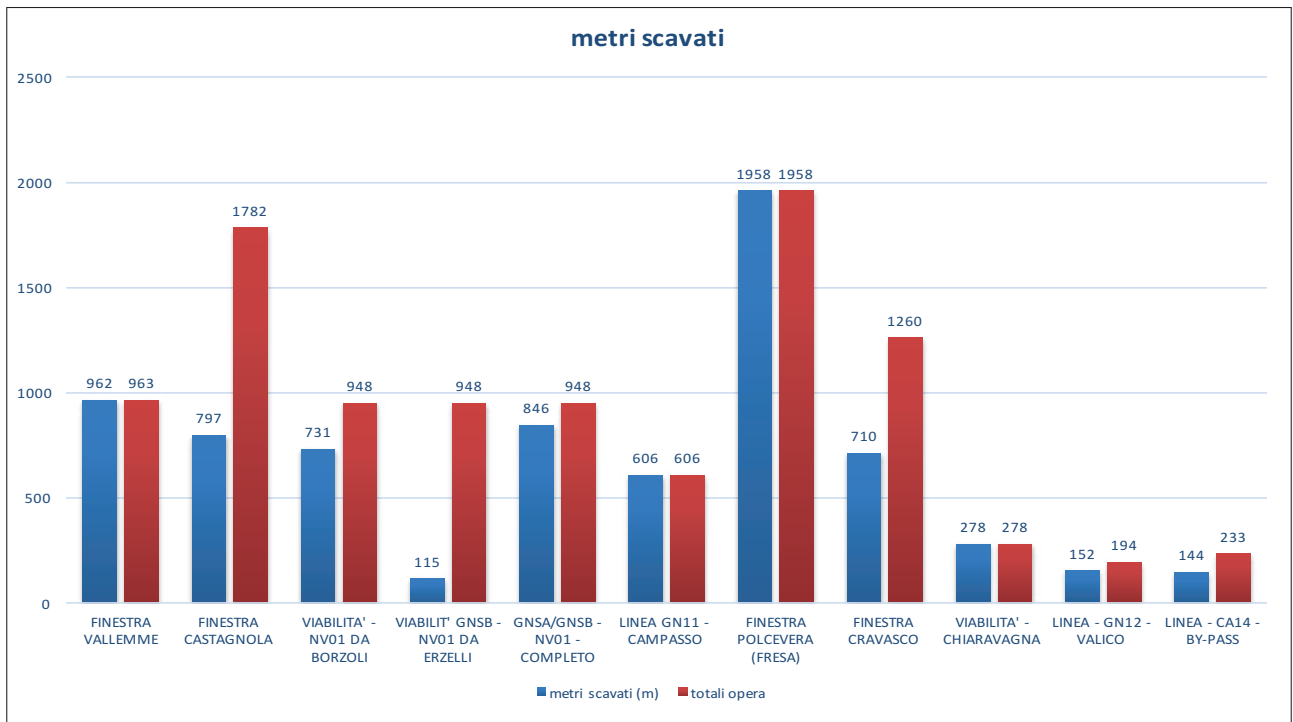
**Table 4** Main materials and quantities

entrances and adits. Where possible, the locations chosen for the construction sites, particularly those for operational and service purposes, were brownfield areas in need of urban renewal, or in any case, areas where the impact on the anthropogenic environment and natural surroundings would be as limited as possible.

Site preparation for the entire project includes:

- the construction of base camps and villages to accommodate the personnel engaged in the work;
- the construction of operational sites;
- concrete mixing facilities;
- equipment for the excavation and construction of the tunnels;
- installations for constructing the railway superstructure (ballast and tracks);
- installations for the construction of railway technological installations (electrification, signalling, telecommunications, lighting, electromotive force, etc.);
- installations for the crushing and production of the aggregates needed for the concrete;
- other construction site areas along the service line for the project or for intermittent work;
- extraction sites for quarrying the aggregates needed for carrying out the earthworks or for concrete;
- the road network and logistical support for the supply of construction sites and related operational units;
- mitigation of environmental impacts that are inevitably created with construction sites as extensive and complex as those necessary to complete this project and restoration





Credit: COCIV

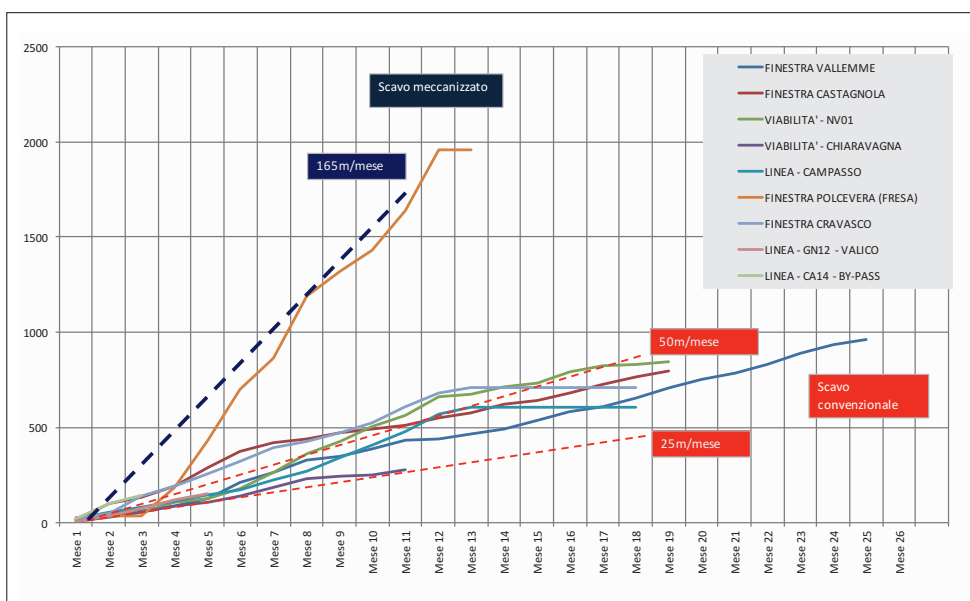
### 6 Metri lineari scavati

Linear metres excavated (February 2016)

Un'opera di questo genere comporta la movimentazione e l'approvvigionamento di una notevole quantità di materiali (tab. 4). Il problema principale è legato al deposito delle terre e delle rocce estratte durante gli scavi: trattandosi di materiale sostanzialmente non reimpiegabile, è stato scelto di utilizzarlo per il recupero ambientale di cave dismesse, particolarmente numerose nella zona pianeggiante del Piemonte, nella provincia di Alessandria. Ciò ha comportato, di conseguenza, ad un certo frazionamento dei siti di

of the sites affected by the construction upon completion of the work.

The basic construction sites (or base camps) are proper villages, designed so as to be virtually independent of the local socio-economic structures and can accommodate 300 to 500 people each. To the extent possible, the areas which have been identified for their installation are accessible from existing roads (Table 3).

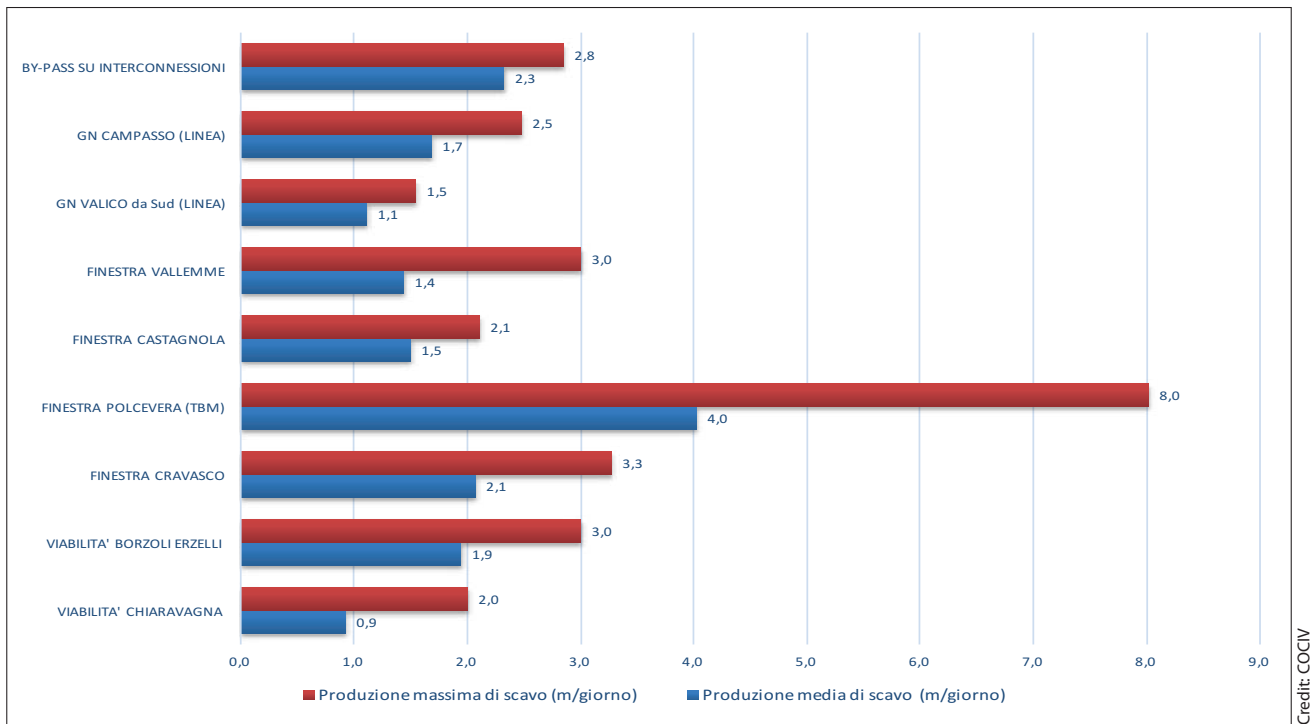


Credit: COCIV

### 7 Velocità di avanzamento

Rates of advance (February 2016)

A project such as this entails the movement and supply of a considerable amount of material (Table 4). The major challenge is related to the deposition of the soil and rock extracted during excavations. As these are essentially non-reusable materials, it was decided to use them for the environmental restoration of abandoned quarries which are particularly numerous in the flat area of the Piedmont in the province of Alessandria. This has resulted in a certain fragmentation of deposition sites; to date, about twelve



Credit: COCIV

#### 8 Velocità di avanzamento medie e massime

Maximum and average rates of advance (February 2016)

deposito: ad oggi sono stati individuati circa dodici cave dismesse, atte a contenere il materiale proveniente dagli scavi, a distanze comprese tra i cinque e i 70 km dai luoghi di produzione.

#### 4 Gli aspetti tecnologici e di produzione

Le gallerie dei III Valico saranno realizzate sia in scavo in tradizionale che in scavo meccanizzato. In particolare la Galleria Serravalle di 6000 m sarà realizzata interamente con scavo meccanizzato, utilizzando due TBM EPBs del diametro di 9,73 m. La galleria di Valico sarà invece realizzata utilizzando entrambe le tecnologie: in scavo in tradizionale a partire dagli imbocchi sud e dalle quattro finestre di accesso, ed in meccanizzato, utilizzando due TBM EPBs del diametro di 9,77 m, dagli imbocchi nord.

I diametri di scavo delle gallerie di linea e delle finestre di accesso realizzate in tradizionale sono di circa 9 m. Lo scavo è realizzato a piena sezione, secondo l'approccio ADECO-RS, utilizzando consolidamenti del fronte di scavo laddove necessario.

Ad oggi sono stati scavati circa 8000 m di gallerie e finestre di accesso (fig. 5 e 6). Le velocità medie di avanzamento sono state dell'ordine di 25–50 m/mese per lo scavo in tradizionale a piena sezione, in funzione dell'entità dei consolidamenti necessari, mentre per lo scavo meccanizzato le velocità medie sono state dell'ordine di 165 m/mese, con punte massime fino a 300 m/mese (fig. 7 e 8).

abandoned quarries, at distances of between five and 70 km from the production sites, have been identified to take material from excavation.

#### 4 Technological and Production Aspects

Both conventional and mechanized excavation will be used for the Terzo Valico tunnels. The 6,000 m Serravalle Tunnel in particular will be completed entirely with mechanized excavation, using two 9.73 m diameter EPB TBMs. In contrast, the excavation of the Valico Tunnel will be carried out using both technologies: conventional excavation from the southern entrances and from the four access adits, and mechanized excavation, using two 9.77 m diameter EPB TBMs, from the northern entrances.

The excavated diameters of the line tunnels and the access adits, completed using conventional excavation, are approximately 9 m. The excavation was performed in full-section according to the ADECO-RS (Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils) approach, using stabilisations at the excavation face where necessary.

To date (February 2016), approximately 8,000 m of tunnel entrances and adits have been excavated (Figs. 5 + 6). The average rates of advancement have been on the order of 25–50 m/month for conventional excavation in full-section, as a function of the degree of stabilisation necessary, whereas the average excavation velocities for the mechanized excavation are of the order of 165 m/month, with peaks of up to 300 m/month (Figs. 7 + 8).

Hanns Wagner, Dipl.-Ing., ÖBB-Infrastruktur AG, Graz/AT

Roman Heissenberger, Dipl.-Ing., ÖBB-Infrastruktur AG, Wien/AT

Josef Koinig, ÖBB-Infrastruktur AG, Wien/AT

## Tunnelkette St. Kanzian

### Planungs- und Ausführungsstrategien für Stützmassnahmen im «Seeton»

Im Zuge des Ausbaus der Baltisch-Adriatischen Achse ist entlang der Koralmbahn eine Vielzahl an Ingenieurbauwerken zu errichten. Im Abschnitt Mittlern–Althofen (Kärnten) sind dabei – zusammengefasst als Tunnelkette St. Kanzian – sechs Tunnel herzustellen. Die Herausforderungen liegen in der durchwegs geringen Überlagerung und den geologischen Verhältnissen, insbesondere den anstehenden Seetonen.

## The St. Kanzian Tunnel Chain

### Design and Construction Strategies for Support Measures in “Lacustrine Clay”

Extensive engineering works are required along the Koralmbahn Line, in the course of the extension of the Baltic-Adriatic Corridor. Six tunnels, known collectively as the St. Kanzian Tunnel Chain, have to be built in the Mittlern–Althofen (Carinthia) sector. The main challenges are the generally shallow cover and the prevailing geological conditions, particularly the presence of lacustrine clays.

#### 1 Projektübersicht

##### 1.1 Allgemeines

Entlang der Koralmbahn, der sich im Bau befindlichen Hochleistungsstrecke zwischen Graz und Klagenfurt, ist eine Vielzahl an Ingenieurbauwerken zu errichten. Mehrere dieser Bauwerke (Bild 1) werden im Kärntner Abschnitt Mittlern–Althofen als Tunnelkette St. Kanzian zusammengefasst.

In der Übersicht (Tabelle 1) sind die Bauwerke der Tunnelkette St. Kanzian mit den vorgesehenen Bauweisen und dem derzeitigen Planungs- und Ausführungsstand dargestellt. Sämtliche Tunnelbauwerke dieses Abschnitts werden einröhrig zweigleisig, mit einem Gleisabstand von 4,70 m und Wasserdruck-haltend ausgeführt. Es kommen sowohl Rechteck- als auch Gewölbequerschnitte zur Ausführung. Die lichte Querschnittsfläche beträgt zwischen 76,6 und 84,8 m<sup>2</sup>.

##### 1.2 Geologie

Die Tunnelkette St. Kanzian liegt im östlichen Klagenfurter Becken [1]. Der Untergrund baut sich aus dem paläozoischen Grundgebirge der Magdalensbergserie (Quarzphyllite) und darüber liegenden, teils umgelagerten Grund- und Endmoränen auf. Diese werden von Wechselfolgen aus Schottern und in Gletscherseen abgelagerten, mächtigen Stillwassersedimenten («Seeton») überlagert. Das Grundgebirge (Phyllite) steht nördlich der Drau im Bereich Lind sowie am südlichen Drau-Ufer oberflächennah an und taucht nach Süden hin unter miozäne und quartäre Schichtabfolgen ab. Oberflächennah sind grobkörnige, postglaziale Schotterterrassen anzutreffen.

#### 1 Project Overview

##### 1.1 General

Extensive engineering works are required along the new Koralmbahn Line, the high-speed rail link currently under construction to connect Graz and Klagenfurt in Austria. Several of these works (Fig. 1) in the Mittlern–Althofen section in Carinthia are grouped together and termed the St. Kanzian Tunnel Chain.

Table 1 shows the engineering works for the St. Kanzian Tunnel Chain, with the planned construction methods and the current status of design and construction. All the tunnels in this section will be water-pressure-tight single-bore double-track structures with a track spacing of 4.70 m. Both rectangular and vaulted cross-sections are to be used. Clear cross-sectional areas will be between 76.6 and 84.8 m<sup>2</sup>.

##### 1.2 Geology

The St. Kanzian Tunnel Chain is situated in the east of the Klagenfurt Basin [1]. The ground here consists of the Palaeozoic basement rock of the Magdalensberg Series (quartz-phyllites) and above them, partially redeposited ground and terminal moraines. Superimposed on these are alternating sequences of gravels and thick still water sediments (“lacustrine clay”) deposited in glacial lakes. The bedrock (phyllites) is encountered close to the surface to the north of the River Drau in the vicinity of Lind and on the southern banks of the Drau, and dips under Miocene and Quaternary sequences of strata to the south. Coarse-grained, post-glacial gravel terraces are found close to the surface.

## La chaîne de tunnels St-Kanzian

Stratégies de planification et d'exécution pour mesures de soutènement dans un dépôt lacustre argileux

Dans le cadre du développement de l'axe Baltique-Adriatique, un grand nombre d'ouvrages d'ingénierie doivent être construits le long de la ligne ferroviaire de Koralm. Sur la section Mittlern-Althofen (Carinthie), six tunnels sont à construire – regroupés sous le nom de « chaîne de tunnels St-Kanzian ». Les défis à relever reposent dans la couverture partout de faible épaisseur et les conditions géologiques, notamment la présence de dépôts lacustres argileux. Ces conditions exigent de vastes mesures spécifiques en matière de génie civil souterrain, par exemple l'utilisation de pieux forés et du procédé de jet grouting (injection à jet dirigé) pour améliorer le terrain de fondation. Les travaux ont commencé en milieu d'année 2015.

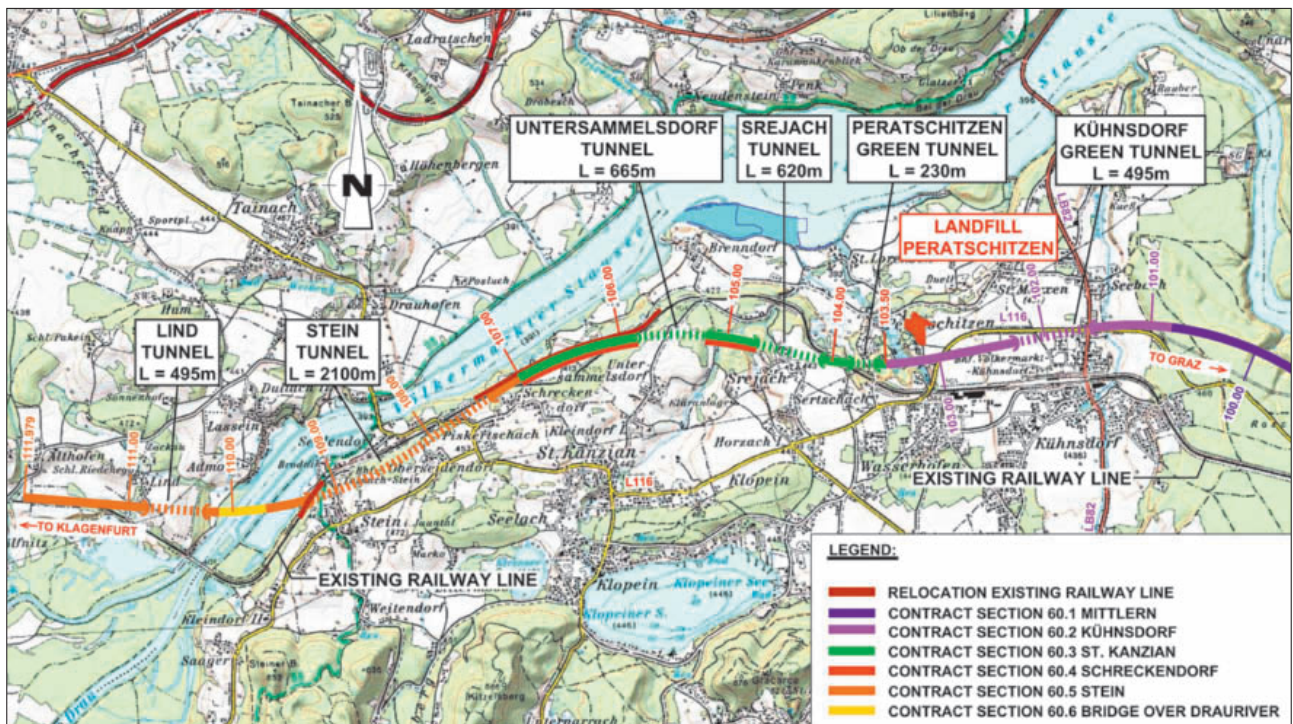
## Catena di gallerie di St. Kanzian

Strategie di pianificazione e di attuazione dei «provvedimenti di sostegno» nel «Seeton» (argilla lacustre)

L'ampliamento dell'asse baltico-adriatico, lungo la Koralmbahn (ferrovia del Koralm) comporta la costruzione di numerose opere ingegneristiche. Nel tratto Mittlern-Althofen (Carnia) vengono realizzate sei gallerie – chiamate complessivamente «catena di gallerie di St. Kanzian». Le difficoltà sono dovute soprattutto al minimo spessore di sovrapposizione e alla situazione geologica, particolarmente alla presenza di depositi di argille lacustri. Queste condizioni rendono necessari molti provvedimenti con lavori geotecnici speciali come per esempio pali trivellati e l'uso del metodo jet grouting per migliorare l'area fabbricabile. I lavori principali sono cominciati a metà 2015.

Aus bautechnischer Sicht besonders herausfordernd sind die Stillwassersedimente (Bild 2), die im Hinblick auf das geotechnische Verhalten in Sand-dominierte und Schluffton-dominierte Zonen unterteilt werden. Die Sand-dominierten Stillwassersedimente setzen sich aus schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden zusammen. Die Lagerungsdichte ist hoch bzw. sehr hoch. Bei den

Particularly challenging from an engineering viewpoint are the lacustrine sediments (Fig. 2), which subdivide in terms of geotechnical behaviour into sand-dominated and silty-clay-dominated zones. The sand-dominated lacustrine sediments are composed of silty to very silty fine sands. Density is high or very high. Silt/silt-clays (“lacustrine clay”) with predominantly low fine-sand content and moderate



1 Übersichtslageplan  
Overview layout plan

Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

Tunnel	Baulos Lot	Gesamtlänge Total length	Offene Bauweise Cut-and-cover	Deckelbauweise Top-down cut-and-cover	Bergmännische Bauweise Underground tunnelling	Stand Mitte 2016 Status, mid-2016
Grüntunnel Kühnsdorf Kühnsdorf Green Tunnel	BL 60.2	495 m	495 m			Fertiggestellt Completed
Grüntunnel Peratschitzen Peratschitzen Green Tunnel	BL 60.3	230 m	230 m			Fertiggestellt Completed
Tunnel Srejach Srejach Tunnel	BL 60.3	620 m		620 m		In Ausführung Under construction
Tunnel Untersammelsdorf Untersammelsdorf Tunnel	BL 60.3	665 m		48 m	617 m	In Ausführung Beginn Vortrieb Sommer 2016 Under construction Tunnelling to start in summer 2016
Tunnel Stein Stein Tunnel	BL 60.5	2100 m	565 m		1535 m	In Ausführung Beginn Vortrieb Sommer 2016 Under construction Tunnelling to start in summer 2016
Tunnel Lind Lind Tunnel	BL 60.5	495 m	44 m		451 m	In Ausführung Beginn Vortrieb Sommer 2016 Under construction Tunnelling to start in summer 2016

Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

**Table 1** Übersicht Bauwerke Tunnelkette St. Kanzian

**Table 1** Overview of engineering works in the St. Kanzian Tunnel Chain

Schluffton-dominierten Stillwassersedimenten handelt es sich überwiegend um mittelplastische bis ausgeprägt plastische Schluffe bzw. Schlufftone («Seeton») mit zumeist geringem Feinsandanteil. Die Konsistenz dieser Böden variiert zwischen weich und weich bis steif, aber auch breiig oder breiig bis weich. Die Stillwassersedimente können in Wechselfolgen mit teilweise intensiven Verzahnungen auftreten. Zum Teil sind innerhalb der Schlufftone dünne Feinsandlagen eingeschaltet.

Im Bereich des Tunnels Stein werden feinklastische Sedimente aus dem Miozän aufgeschlossen. Diese sogenannten Rosenbacher Schichten führen Kohlenflöze, die früher vielfach kleinräumig abgebaut wurden. Das Hangende bilden die mächtigen Sattnitzkonglomerat-Schichten. Die Grenze von den Rosenbacher Schichten zu den Sattnitzkonglomerat-Schichten ist meist nicht eindeutig, sondern liegt als fließender Sedimentationsübergang vor. Die Sattnitzkonglomerat-Schichten sind als dichtgelagertes Lockermaterial oder bereichsweise als gut verfestigtes Konglomerat anzutreffen

to pronounced plasticity make up the silt-clay-dominated still water sediments. The consistency of these soils varies between soft and soft to stiff, and also very soft or very soft to soft. The lancustrine sediments can occur in alternating strata, with intensive interstratification in some cases. Thin layers of fine sand are sometimes included within the silt clays.

Fine-grained clastic sediments from the Miocene are exposed in the vicinity of the Stein Tunnel. These so-called Rosenbach strata bear coal seams, which were mined on a small scale at many locations in earlier times. The thick Sattnitz conglomerate strata form the roof. The transition from the Rosenbach strata to the Sattnitz conglomerate strata is generally not clearly defined, and instead takes the form of a smooth sedimentation transition. The Sattnitz conglomerate strata are encountered as densely packed non-cohesive material, or as well compacted conglomerate in certain zones, and thus exhibit correspondingly better geological and geotechnical properties.

und weisen entsprechend günstigere geologisch-geotechnische Eigenschaften auf.

### 1.3 Bauwerke

Die nachfolgende Kurzbeschreibung folgt der Kilometrierung vom Beginn des Abschnitts in Blickrichtung Klagenfurt.

#### 1.3.1 Grüntunnel Kühnsdorf

Der Grüntunnel Kühnsdorf (L = 495 m) wird in offener Bauweise als Gewölbequerschnitt mit einem Gewölberadius von R = 5,80 m als «Weisse Wanne» ausgeführt (Bild 3). Aufgrund der im westlichen Tunnelabschnitt unterhalb der Sohlplatte anstehenden, bis zu 10 m dicken, schluffig-tonigen Stillwassersedimente sind umfangreiche Gründungsarbeiten erforderlich. Diese werden mittels 8,0 bis 14,5 m langen Schneckenbohrpfählen DN 50 cm, welche mindestens 4,0 m in die erkundete Moräne einbinden, in einem abgestuften Raster ausgeführt. Zur Vermeidung von Setzungsdifferenzen wird der gesamte Tunnel tieffundiert. Unterhalb der Sohlplatte dient eine bis zu 1,0 m dicke Bodenauswechslung mit grobkörnigem Material als weitere Homogenisierung der Aufstandsfläche. Der Grüntunnel wurde vorab mit dem Baulos 60.2 bereits Ende 2013 fertiggestellt.

#### 1.3.2 Grüntunnel Peratschitzen

Der Grüntunnel Peratschitzen (L = 230 m) wird in offener Bauweise als wasserundurchlässiger Rechteckquerschnitt aus Stahlbeton (lichte Breite x lichte Höhe über Schienenerkante (SOK) = 11,50 m x 7,10 m) mit einer 1,45 m dicken Sohlplatte hergestellt. Die lichte Höhe berücksichtigt ein Vorhaltemass von 10 cm für eventuelle Langzeitsetzungen.

### 1.3 Engineering Works

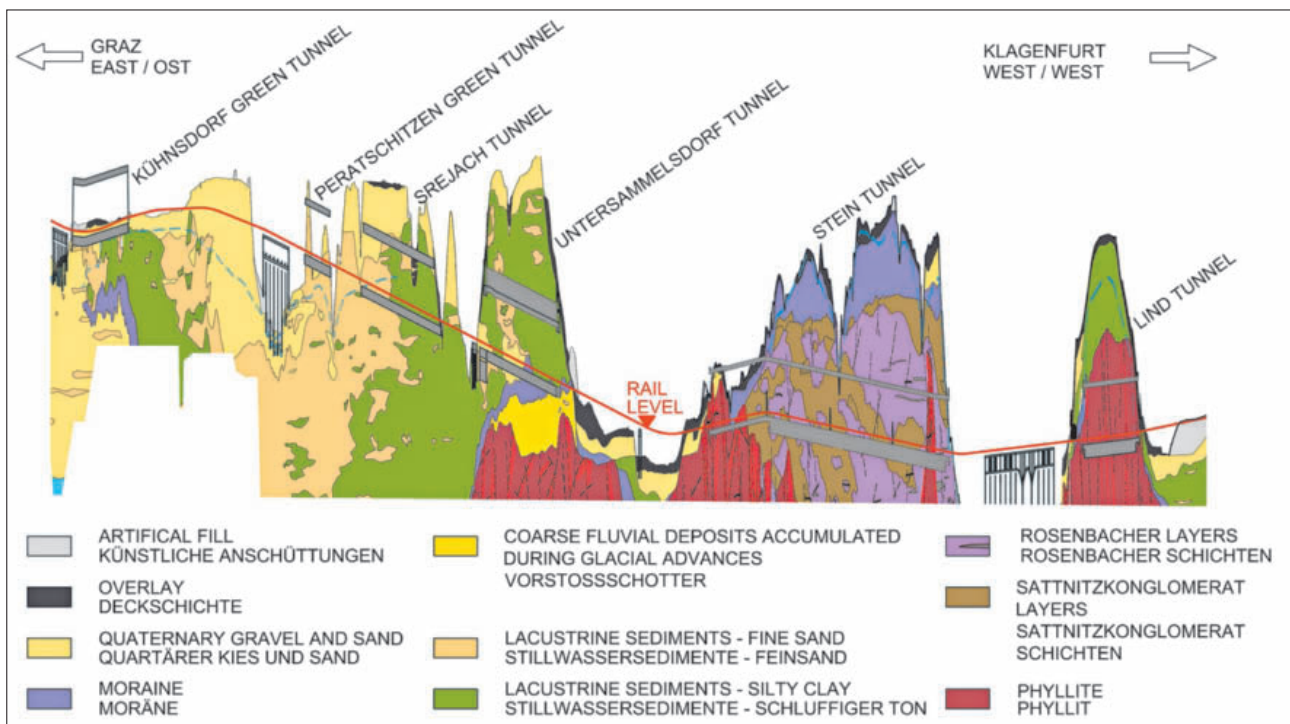
The following summary follows the kilometre chainage from the start of the section, proceeding towards Klagenfurt.

#### 1.3.1 The Kühnsdorf Green Tunnel

The Kühnsdorf Green Tunnel (L = 495 m) is being constructed as a watertight concrete structure using cut-and-cover methods in the form of a vaulted cross-section with a vault radius of R = 5.80 m (Fig. 3). Extensive ground improvement and foundation work is necessary due to the silty-clayey lacustrine sediments up to 10 m thick, which are present below the floor slab in the western sector of the tunnel. This improvement is achieved by of 8.0 to 14.5 m long 50 cm dia. auger piles, which embed not less than 4.0 m into the prospected moraine, arranged in a graduated pattern. Deep foundations are being provided for the entire tunnel in order to prevent differential settlement. Soil replacement with layers of coarse-grained material of up to 1.0 m in thickness serves to further homogenise the subgrade below the floor slab. The Green Tunnel was completed in advance as long ago as late 2013, as part of lot 60.2.

#### 1.3.2 The Peratschitzen Green Tunnel

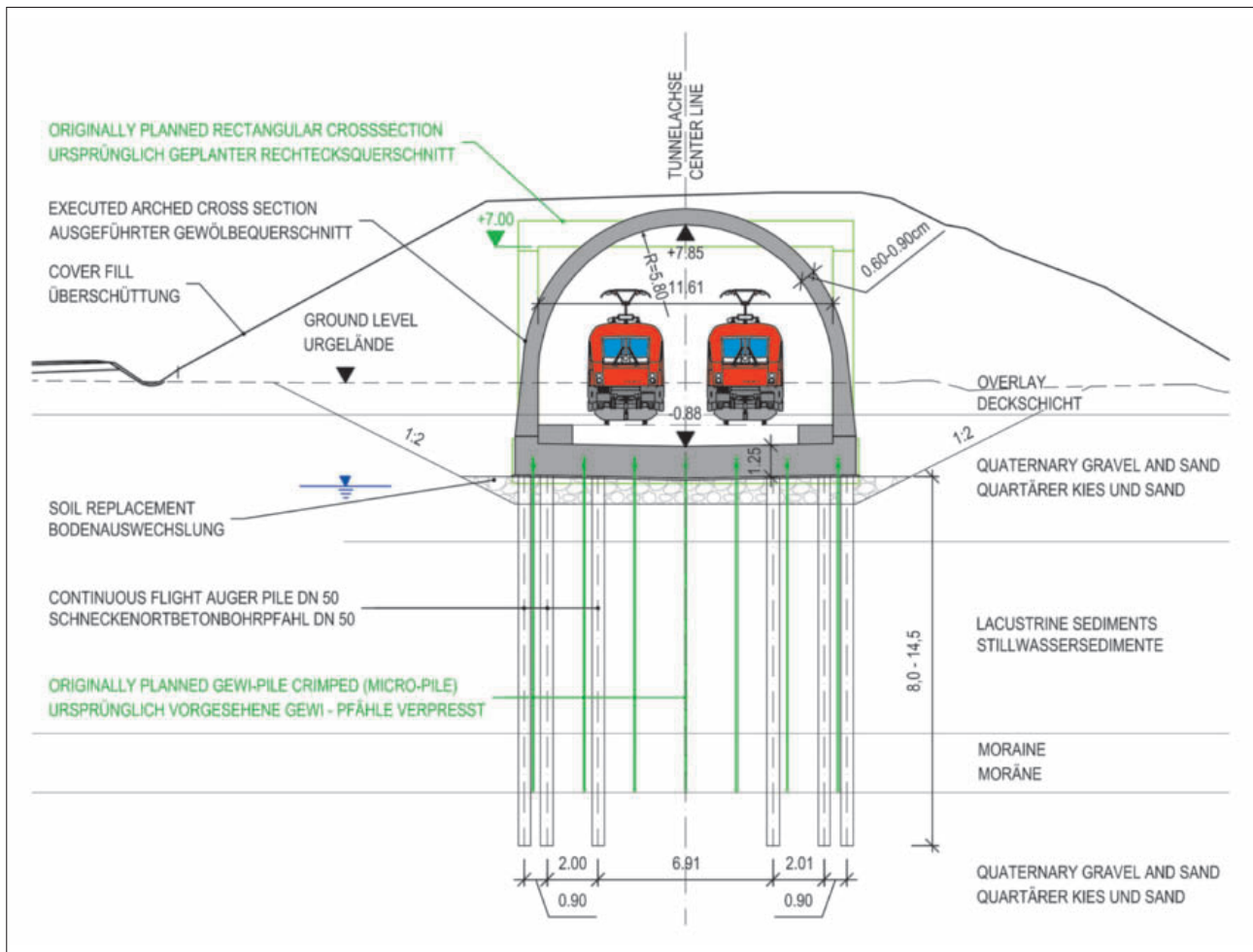
The Peratschitzen Green Tunnel (L = 230 m) is being constructed using cut-and-cover methods in the form of a rectangular watertight concrete cross-section (clear width x clear height above top of rail level (TOR) = 11.50 m x 7.10 m) with a 1.45 m thick base slab. The clear height includes a safety allowance of 10 cm to take account of possible long-term settlement.



Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

## 2 Geologischer Längenschnitt

Longitudinal geological section



Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

3 Regelquerschnitt Kühnsdorf  
Design cross-section, Kühnsdorf

Der Gründungsbereich befindet sich überwiegend in sandigen Stillwassersedimenten. Um die unterschiedlichen Vorbelastungsverhältnisse der Gründungssohle infolge eines vormaligen Schotterabbaus auszugleichen und eine Vorwegnahme eines Grossteils der Untergrundsetzungen zu erzielen, wurde vorab eine Überlastschüttung mit einer Höhe von 6,0 m über SOK und einer Liegedauer von drei Monaten durchgeführt. Weiterhin wird zur Verbesserung der Tragfähigkeit der Stillwassersedimente sowie zur Vereinheitlichung der Gründungsverhältnisse eine 1,0 m dicke, grobkörnige Bodenauswechslungsschicht ausgeführt.

### 1.3.3 Tunnel Srejach

Der Tunnel Srejach (L = 620 m) kommt im östlichen Teil in den Sand-dominierten Stillwassersedimenten und im westlichen Bereich in den Schluffton-dominierten Stillwassersedimenten zu liegen. Diese stehen hier in grosser Mächtigkeit an (> 40 m, die Unterkante konnte teilweise nicht erkundet werden), sodass das Tunnelbauwerk quasi schwimmend in dieser geologischen Formation zu gründen ist. Im Firstbereich des Tunnels und darüber finden sich quartäre Sande und Kiese in unterschiedlicher Mächtigkeit.

The foundation zone is located predominantly in sandy lacustrine sediments. Surcharging to a depth of 6.0 m above TOR was filled in advance and left in place for three months in order to balance out the differing degrees of compaction of the subsoil resulting from previous gravel quarrying and to compensate in advance for a major portion of subsoil settlement. A 1.0 m thick coarse-grained soil-replacement layer was also installed in order to improve the load-bearing capacity of the lake sediments and homogenise ground conditions.

### 1.3.3 The Srejach Tunnel

The eastern part of the Srejach Tunnel (L = 620 m) will be located in sand-dominated lacustrine sediments, the western part in the silt-clay-dominated lacustrine sediments. These features are present here in great thicknesses (> 40 m; it was not possible to determine the lower boundary in some cases), with the result that this tunnel structure effectively has to be founded "floating" in this geological formation. Quaternary sands and gravels of various thicknesses are found in the roof zone of the tunnel and above.

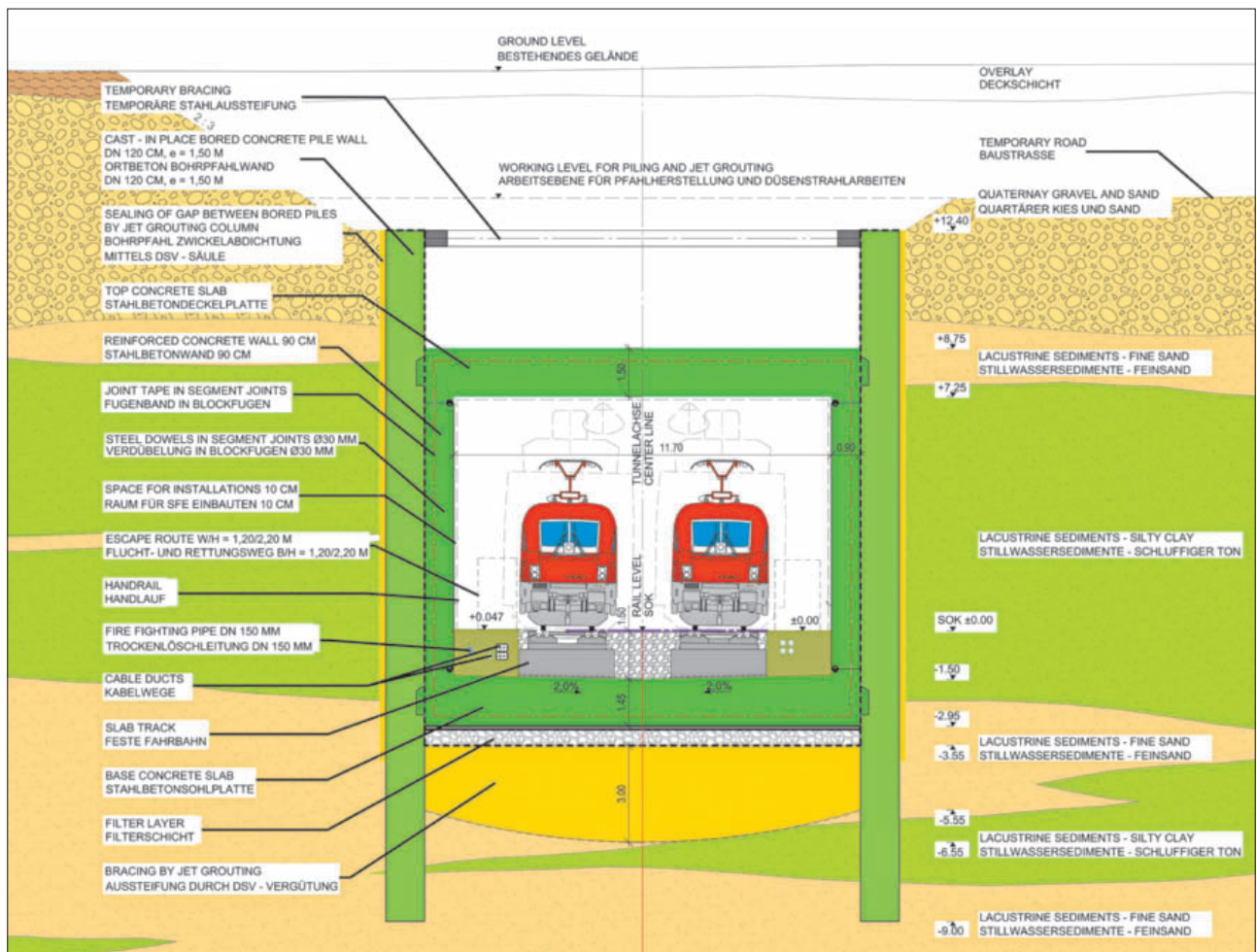
Top-down construction with a contiguous bored-pile wall (1.20 m dia.) is planned for the Srejach Tunnel (Fig. 4). The

Für den Tunnel Srejach ist eine Deckelbauweise mit einer aufgelösten Bohrpfehlwand (DN 1,20 m) vorgesehen (Bild 4). Die rund 1,5 m dicken Sohl- und Deckelplatten sind Teil des endgültigen Ausbaus. Die lichte Höhe zwischen SOK und Unterkante Tunneldecke von 7,25 m berücksichtigt aufgrund der schwer prognostizierbaren Langzeitverformungen ein Vorhaltmass von 25 cm. Im Anschluss an beide Portale wird je ein 17 m bzw. 61 m langes Wannenbauwerk mit aufgelösten Bohrpfehlwänden hergestellt.

Um eine hinreichende Aussteifung der Bohrpfähle während der Herstellung der Sohlplatte zu erzielen, ist unterhalb dieser eine vorausseilende, von der Geländeoberfläche aus vorgenommene Bodenvergütung mittels Düsenstrahlverfahren (DSV) erforderlich (DSV-Sohlaussteifung). Eine Abdichtung der Bohrpfehlzwickel mittels DSV-Säulen verhindert das Ausrinnen sandiger, unter Wasserdruck stehender Schichten. Das Arbeitsplanum für DSV-Arbeiten und die Herstellung der Bohrpfähle kommt in den quartären Sanden und Kiesen zu liegen. Im östlichen Tunnelabschnitt im Bereich der sandigen Stillwassersedimente ist eine Grundwasserabsenkung mittels Bohrbrunnen vorgesehen. Die Bohrpfehl- und Düsenstrahlarbeiten werden bis Mitte 2016 durchgeführt. Im

around 1.5 m thick floor and roof slabs form part of the ultimate support system. The unobstructed height of 7.25 m between TOR and the soffit of the tunnel ceiling includes a safety allowance of 25 cm to take account of the severe forecast long-term deformations. Both portals are followed by trough structures of 17 m and 61 m in length, respectively, consisting of contiguous bored-pile walls.

Ground improvement undertaken from the surface using the jet grouting (JG) method is necessary (JG floor stiffening) in advance of the creation of the floor slab, in order to assure adequate stiffening of the bored piles during creation of the floor slabs. Sealing of the spacing between bored piles with JG columns will prevent trickling out of sandy strata exposed to water pressure. The working level for JG work and installation of the bored piles will be established in the Quaternary sands and gravels. Lowering of the groundwater table with artificial wells is planned in the zone of sandy lacustrine sediments in the eastern part of the tunnel. The bored pile and jet grouting work is to be completed by mid-2016. Excavation work for construction of the roof slab is to be started from the east portal in spring 2016.



4 Regelquerschnitt Tunnel Srejach  
Design cross-section, Srejach Tunnel

Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG



Frühjahr 2016 wird vom Ostportal aus mit den Aushubarbeiten für die Herstellung des Deckels begonnen.

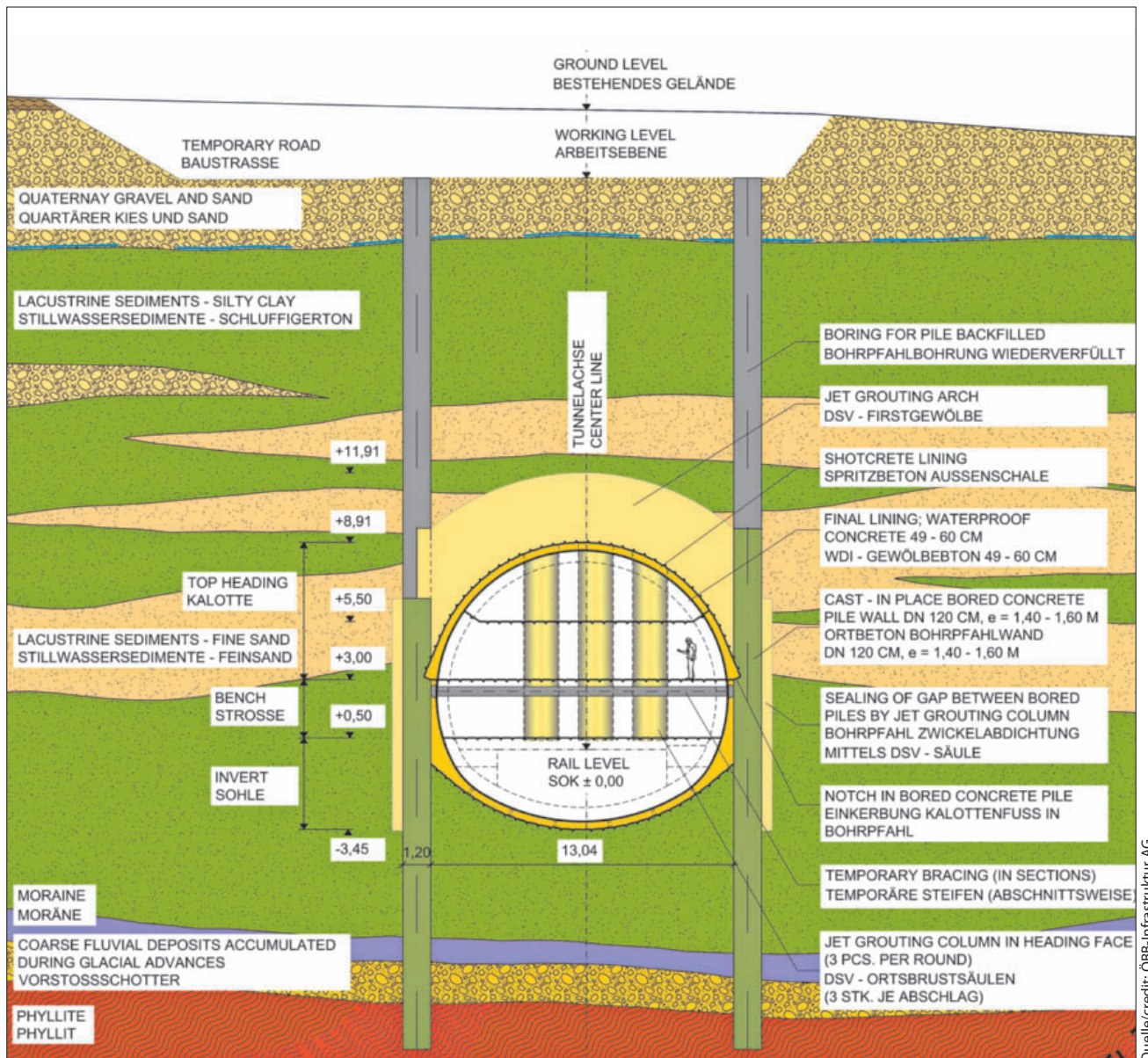
### 1.3.4 Tunnel Untersammelsdorf

Der Tunnel Untersammelsdorf (L = 665 m) weist eine maximale Überlagerung von 33 m über SOK auf und wird in bergmännischer Bauweise mit einem Gewölbequerschnitt und in den Portalbereichen in Deckelbauweise mit einem Rechteckquerschnitt hergestellt. Als Übergang zur Freilandstrecke wird im Osten eine 38 m lange Wanne mit aufgelösten Bohrpfehlwänden errichtet. Der anzutreffende Baugrund im Tunnelquerschnitt und oberhalb besteht zum überwiegenden Teil aus Stillwassersedimenten. Im Strossen- und Sohlbereich sowie unter der Tunnelsohle stehen im westlichen Tunnelabschnitt auch quartäre Kiese und Sande, Vorstössschotter sowie Moränensedimente an.

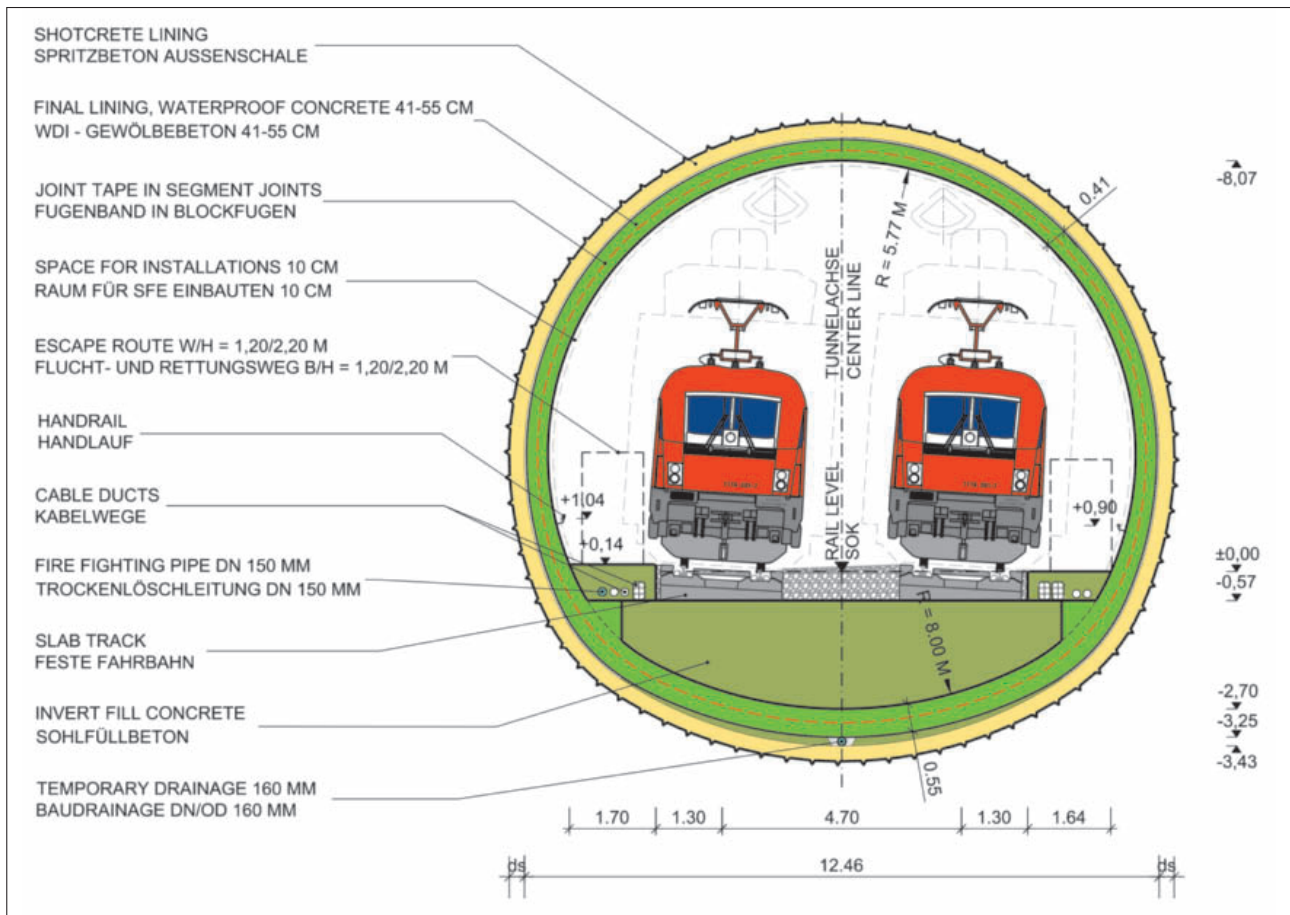
### 1.3.4 The Untersammelsdorf Tunnel

The Untersammelsdorf Tunnel (L = 665 m) has a maximum cover of 33 m above TOR and is to be tunnelled using underground mining methods with a vaulted cross-section, with a rectangular cross-section top-down construction in the portal zones. A trough structure of 38 m in length is to be constructed using contiguous bored-pile walls at the east end, as a transition zone to the surface section of line. The ground encountered in the tunnel cross-section and above it predominantly consists of lacustrine sediments. In the western section of the tunnel, Quaternary gravels and sands, glacial advance gravels and moraine sediments are also present in the bench and floor zones, and also below the tunnel floor.

Ground improvement in the form of a JG roof vault (Fig. 5), which is to be undertaken from the surface (vertical JG



5 Regelquerschnitt Tunnel Untersammelsdorf  
Design cross-section, Untersammelsdorf Tunnel



6 Regelquerschnitt Tunnel Stein  
Design cross-section, Stein Tunnel

Zur Gewährleistung eines Schutzgewölbes über der Firste und zur Vermeidung des Ausfließens aus der Firste im Ausbruchsbereich ist eine Bodenverbesserung in Form eines DSV-Firstgewölbes erforderlich (Bild 5), welche von der Oberfläche aus hergestellt wird (vertikale DSV-Säulen). Zusätzlich sind zur Verspannung und Auflagerung dieses DSV-Firstgewölbes und zur Vermeidung des Ausfließens im Ulmbereich beidseitig aufgelöste Bohrpfähle (DN = 1,20 m) vorgesehen, welche in den tragfähigen Untergrund einbinden.

Zur Absicherung des Bauzustands in der Kalotte (vor dem Ringschluss) ist eine Spritzbetonschale mit Einbindung (Konsole) in die Bohrpfähle vorgesehen. Zur Gewährleistung der Ortsbruststabilität während des Ausbruchs von Kalotte und Strosse/Sohle werden einzelne DSV-Säulen des DSV-Firstgewölbes bis auf Höhe SOK ausgeführt. Beim nacheilenden Vortrieb Strosse/Sohle ist, je nach Überlagerungsverhältnissen und Steifigkeit des unterhalb des Spritzbetonsohlgewölbes anstehenden Bodens, der Einsatz von temporären Steifen zur Überbrückung der Ringschlussdistanz vorgesehen.

Die Arbeiten für den Tunnel Untersammelsdorf beginnen im Frühjahr 2016 mit der Herstellung des Arbeitsplanums, den Bohrpfahl- und Düsenstrahlarbeiten. Der Vortriebsbeginn ist mit Sommer 2017 geplant.

columns) is necessary to assure a safety vault above the roof and in order to avoid outflow from the roof. In addition, bored piles (dia. = 1.20 m) offset on both sides, which embed in the competent subgrade, are planned for the bracing and support of this JG roof vault and to avoid outflow in the side-wall zone.

A shotcrete shell with locking (bracketing) into the bored piles is provided to support the works in the tunnel crown (prior to closure of the segmental lining). Individual JG columns of the JG roof vault are completed up to TOR to assure face stability during excavation of the tunnel crown and bench/invert. The use of temporary bracing to bridge the segmental-lining gap is planned for the follow-up heading of the bench/invert, depending on cover conditions and the stiffness of the soil encountered below the shotcrete invert.

Work on the Untersammelsdorf Tunnel is to start in the spring of 2016 with the creation of the working level, and the bored pile and jet grouting work. The start of tunnelling is scheduled for the summer of 2017.

### 1.3.5 The Stein Tunnel

The Stein Tunnel is the longest tunnel structure in the entire series of tunnels, at 2,100 m. Of this, 1,535 m are to be excavated underground (Fig. 6) and 565 m by cut-and-cover

### 1.3.5 Tunnel Stein

Der Tunnel Stein ist mit 2100 m das längste Tunnelbauwerk der Tunnelkette. Davon werden 1535 m in bergmännischer Bauweise (Bild 6) und 565 m in offener Bauweise errichtet. Der Tunnel mit einer maximalen Überlagerung von 39 m über SOK liegt in Lockergesteinen, welche bereichsweise leicht verfestigt sind. Der Vortrieb erfolgt von beiden Tunnelportalen aus mit vorseilenden Kalotten. Zur Gewährleistung eines raschen Ringschlusses sind ein Kalottensohlgewölbe und nachfolgend ein gekoppelter Strossen-/Sohlvortrieb vorgesehen. Die Vortriebsarbeiten beginnen im Sommer 2016.

In Abständen von rund 500 m sind drei begehbare Sicherheitsausgänge mit Stollenlängen zwischen 38 und 134 m auszuführen. Der östlichste Sicherheitsausgang SA1 wird in offener Bauweise errichtet. Die beiden weiteren Sicherheitsausgänge (SA2 und SA3) werden in bergmännischer Bauweise vom Haupttunnel aus aufgeföhren.

### 1.3.6 Tunnel Lind

Der nördlich der Drau gelegene Tunnel Lind (L = 495 m) weist eine maximale Überlagerungshöhe von rund 32 m ab SOK auf. Die Tunnelbaustelle ist über die bereits fertiggestellte Eisenbahnbrücke Drauquerung (Bild 7) mit dem südlich der Drau befindlichen Projektgebiet verbunden. Der geplante Vortrieb vom Westportal her erfolgt grossteils in Phylliten, welche jedoch durch bis zu 15 m mächtige Stillwassersedimente überlagert sind. Die Überdeckung mit Phylliten, gemessen ab Tunnelfirste, beträgt maximal 8 m und nimmt zum Ostportal hin auf null ab. Abschlagslänge,

methods. The tunnel has a maximum cover of 39 m above TOR, and is located in non-cohesive rock formations, which are slightly compacted in some zones. The tunnel will be driven from both tunnel portals, with advancing top heading. In order to ensure a rapid ring closure, a top heading invert arch followed by coupled bench/invert excavation are planned. Tunnelling is to start in the summer of 2016.

Three pedestrian safety exits with tunnel lengths of between 38 and 134 m are to be provided at intervals of around 500 m. SA1, the easternmost safety exit, is to be constructed by cut-and-cover. The two other safety exits (SA2 and SA3) are to be tunnelled, starting from the main tunnel.

### 1.3.6 The Lind Tunnel

The Lind Tunnel (L = 495 m), located to the north of the Drau, has a maximum cover of approx. 32 m above TOR. The tunnel site is connected to the project zone to the south of the Drau over the already completed Drau Crossing rail bridge (Fig. 7). The planned tunnel drive from the west portal will be largely in phyllites, on which however lancustrine sediments of up to 15 m in thickness are superimposed. The phyllite cover is a maximum of 8 m measured from the tunnel crown, and decreases to zero toward the east portal. Round length, pre-support, anchoring and the thickness of the shotcrete outer support layer are being adapted to match the load-bearing capacity of the solid rock, which decreases toward the east, and the increasing dead weight of the lancustrine sediments.

Moraines in the top heading and lancustrine sediments intruding into the crown are encountered around the east portal.



Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

7 Luftbild Drauquerung  
Aerial photo, Drau crossing

Voraussetzung, Ankerung und Dicke der Spritzbetonaussenschale werden an die sich gegen Osten reduzierende Gewölbetragswirkung des Festgesteins und erhöhende schlaffe Auflast der Stillwassersedimente angepasst.

Im Bereich des Ostportals stehen im Kalottenbereich Moränen und in den Firstbereich hereinragende Stillwassersedimente an. Zur Sicherung des Vortriebs ist über eine Länge von rund 25 m eine Vergütung um die Tunnelkalotte mittels DSV vorgesehen. Die vorab von der Oberfläche auszuführende DSV-Vergütung wird auch zur Sicherung der stirnseitigen Anschlagböschung des Ostportals herangezogen. Mit dem Vortrieb wird im Sommer 2016 begonnen.

### 2 Planungs- und Ausführungsstrategien

Tunnelbauprojekte sind in der Regel durch ein komplexes Umfeld mit vielen Einflussfaktoren, welche in gegenseitiger Wechselwirkung stehen, gekennzeichnet. Das übergeordnete Ziel einer aufeinander abgestimmten Optimierung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erfordert entsprechende Strategien im Zuge der Planung und Bauausführung [2].

Planungsstrategie: Die Planungsstrategie erfordert eine nachvollziehbare und in mehreren Schritten aufgebaute geotechnische bzw. statisch-konstruktive Planung. Das zu erwartende Soll-Verhalten ist zu definieren. Die zulässigen Bandbreiten für Abweichungen, das zugehörige Beobachtungsprogramm und die Vorgangsweise bei wesentlicher Überschreitung einschliesslich Warn- und Alarmkriterien sind anzugeben, wobei das massgebliche Projektumfeld (in diesem Fall oberflächennaher Tunnelbau, Baugruben, offene Bauweisen etc.) inklusive zugehöriger Reaktionszeiten möglichst umfassend zu berücksichtigen ist. Zusätzlich spielen Fragen aus dem späteren Betrieb bzw. der Instandhaltung in der Planung eine wesentliche Rolle.

Ausführungsstrategie: In der Ausführung ist nach Erfassen des Ist-Verhaltens ein Vergleich mit dem Soll-Verhalten und, bei Einhaltung der definierten Bandbreiten, die Festlegung der Massnahmen vor Ort erforderlich. Bei günstigerem Ist-Verhalten können die Mindestmassnahmen einvernehmlich angepasst werden. Bei ungünstigerem Ist-Verhalten sind zusätzliche Massnahmen zu setzen. Dazu sind ein laufendes Beobachten, Analysieren, Interpretieren, Prognostizieren und Informieren erforderlich. Dies ist insbesondere für die geotechnisch komplexen Seetone (Bild 8) von Bedeutung.

### 3 Beispiele aus der Planungsphase

#### 3.1 Versuchsfeld Untersammelsdorf

Aufgrund der herausfordernden Baugrundsituation sind im Zuge des Planungsprozesses des Tunnels Untersammelsdorf Fragestellungen zu Einflussfaktoren und Wechselwirkungen aufgetreten [3]. Mit den zur Verfügung stehenden Analysemethoden und mit vergleichenden Untersuchungen



Quelle/Credit: ÖBB-Infrastruktur AG

8 Seeton

Lacustrine clay

Ground improvement around the top heading by means of JG is planned for a length of approx. 25 m for protection. The JG ground improvement to be performed in advance from the surface will also be used to support the front approach slope for the east portal. Tunnelling is to start in the summer of 2016.

### 2 Design and Construction Strategies

Tunnel construction projects are generally characterised by a complex environment featuring numerous mutually interacting influential factors. The overriding objective of harmonised optimisation of safety and cost-effectiveness necessitate the development of appropriate strategies during the design and construction phases [2].

Design strategy: The design strategy requires substantiated geotechnical and structural design in several steps. The anticipated target performance must be defined. The permissible bandwidths for deviations, the associated observation programme and the procedure in case of significant overshooting, including warning and alarm criteria, have to be specified taking account as comprehensively as possible of the definitive project environment (in this case: shallow tunnel construction, construction excavations, cut-and-cover methods, etc.), including the associated reaction times. Questions concerning subsequent tunnel operation and maintenance also play a significant role in design.

Construction strategy: Recording of actual performance and subsequent comparison against target performance and definition of on-the-spot provisions, with adherence to the defined bandwidths, is necessary during construction. If actual performance is better than expected, the minimum provisions can be modified by mutual agreement. If the actual performance is worse, additional measures will have to be taken. Continuous observation, analysis, interpretation, forecasting and forwarding of information are necessary for this purpose. This is of particular significance in the case of the geotechnically complex lacustrine clays (Fig. 8).

konnten offene Punkte nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Insbesondere die geringe Erfahrung von zyklischem Tunnelvortrieb mit ca. 137 m<sup>2</sup> Ausbruchsfläche im Seeton musste dabei als hohes Risiko eingestuft werden. Als Konsequenz wurde im Massstab 1:1 das Versuchsfeld Untersammelsdorf (Bild 9) errichtet, um die wesentlichen Elemente aus Ausbruch und Stützung zu erstellen und auf Herstellbarkeit bzw. Wirksamkeit zu untersuchen. Es konnten folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen und in der Ausschreibung berücksichtigt werden:

### Düsenstrahlverfahren (DSV)

- Durchmesser DSV-Säule von 1,5 m herstellbar;
- Festigkeit DSV-Säule von 4 MN/m<sup>2</sup> erzielbar;
- Herstellreihenfolge frisch-fest;
- Konditionierung (Entwässerung) des DSV-Rücklaufs vor Deponierung erforderlich.

### Bohrpfahlherstellung

- Aushub mittels Greifer ohne Zusatzmassnahmen möglich;
- kein Einschnüren und Verdicken festgestellt (Ummantelung des Bewehrungskorbs nicht erforderlich; Vliesummantelung kontraproduktiv);
- bei überschrittenen Bohrpfählen markante Abweichungen bis zu 3% von der Soll-Lage mit Pfahlzwischenraum von ca. 4 cm festgestellt.

### Tunnelvortrieb

- Lösen der Stillwassersedimente mittels Bagger ohne Zusatzmassnahmen möglich;
- Verspannung DSV-Firstgewölbe-Bohrpfahlwände ausreichend;
- keine wesentlichen Verschiebungen des DSV-Firstgewölbes messbar;
- Profilieren des DSV-Firstgewölbes mittels Anbaufräse möglich;
- Stabilität Ortsbrust mit DSV-Ortsbrustsäulen gegeben;
- wesentliche Wärmeentwicklungen im Vortriebsbereich aus dem Abfliessen der Hydratationswärme messbar.

### 3.2 Druckwasser-haltende Ausführung Tunnel Stein und Tunnel Lind

Im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtung von Investitionskosten sowie Wartungskosten und Betriebserschwernissen in der nachfolgenden Betriebsphase wurde im Zuge der Ausschreibungsplanung für die ursprünglich im Genehmigungsprojekt als drainierte Röhren konzipierten Tunnel Stein und Tunnel Lind eine Druckwasser-haltende Ausbildung festgelegt.

Mehrere Gründe waren dafür ausschlaggebend. Die geringe Überlagerung und die dadurch begrenzten Bemessungswasserdrücke (maximal rund 4 bar) ermöglichen die Ausführung eines druckdichten Tunnels (Stand der Technik). Die für die Bauphase erforderliche Baudrainage in der Sohle wird nach Herstellung der Innenschale über Brunnentöpfe verpresst. Während der Vortriebsphase und bis zum Einbau

## 3 Examples from the Design Phase

### 3.1 Untersammelsdorf Test Site

Questions concerning the influential factors and interactions arose during the design of the Untersammelsdorf Tunnel as a result of the challenging ground situation [3]. It proved not to be possible to answer all questions with the analytical methods available and comparative investigations. The slight experience available with cyclical tunnelling in lacustrine clay with an approx. 137 m<sup>2</sup> excavated cross-sectional area in particular had to be categorised as a high risk factor. The Untersammelsdorf test site (Fig. 9) was therefore established on a scale of 1:1 in order to determine the essential elements of excavation and support and investigate their feasibility and/or effectiveness. The following essential new insights were gained, and taken into account in the tender documents:

#### Jet grouting (JG)

- JG column diameter of 1.5 m feasible;
- strength of 4 MN/m<sup>2</sup> attainable for the JG column;
- production sequence: fresh-hardened;
- conditioning (dewatering) of the JG return flow necessary prior to landfill disposal.

#### Installation of bored piles

- excavation possible using grabs without additional provisions;
- no necking and bulging ascertained (wrapping of the reinforcement cage not necessary; fleece wrapping counterproductive);
- notable deviations of up to 3% from the target situation with pile spacing of approx. 4 cm ascertained in case of secant bored piles.

#### Tunnelling

- excavation of the lacustrine sediments using excavator possible without additional provisions;
- bracing of the JG crown canopy/bored-pile walls adequate;
- no significant displacements of the JG crown canopy measurable;
- profiling of the JG crown canopy possible using milling attachment;
- face stability achievable using JG face columns;
- significant heat generation measurable in the tunnelling zone from outflow of heat of hydration.



9 Versuchsfeld Untersammelsdorf  
The Untersammelsdorf test site

Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

der Innenschale sind je nach tatsächlich auftretender Bergwasserbeeinflussung eine künstliche Bewässerung der ökologisch sensiblen Zonen sowie gezielte Abdichtungsinjektionen sehr durchlässiger Bereiche vorgesehen.

Für eine ausreichende und dauerhafte Abdichtung ausschliesslich durch Injektionen besteht infolge nicht klar definierbarer Injektionsziele (erforderliche zu erzielende Dichtigkeitswerte bzw. Zuflussraten je nach Tunnelabschnitt) und infolge von Unsicherheiten in der geologisch/hydrogeologischen Prognose (Durchlässigkeitsverhältnisse um Tunnelröhre, Injizierbarkeit, Art und Menge erforderlicher Injektionsmittel) ein grosses Ausführungs- und Kostenrisiko. Dieses kann durch die Druckwasser-haltende Ausbildung deutlich reduziert werden.

Die Reinigung der Tunneldrainagen aufgrund von auftretenden Versinterungen führt zu erheblichen Kosten und Betriebserschwernissen. Mit den erforderlichen Injektionen ist zusätzlich ein erhöhtes Versinterungspotenzial zu erwarten.

Gemäss geologischer Prognose ist ein Methangaszutritt zu den Tunneldrainagen in der Betriebsphase nicht vollkommen auszuschliessen. Bei einer druckdichten Ausbildung ist diese Problematik nicht relevant. Diese Entscheidung wurde auch durch das Argument unterstützt, dass dadurch für alle Tunnel der Tunnelkette St. Kanzian eine Druckwasserhaltende Ausbildung vorliegt und keine Drainagespülungen im Tunnel in der Betriebsphase erforderlich sein werden.

### 3.3 Entfall Dauer-Verpressanker Tunnel Lind

Im selben Bestreben zur Minimierung der späteren Instandhaltungskosten wurden auch für die beim Ostportal des Tunnels Lind erforderliche Bohrpfahlwand Lind Ost (L = 98 m) Variantenuntersuchungen durchgeführt. Für die Bohrpfahlwand mit Bohrpfählen DN 120 im Abstand von 1,40 m war im Eisenbahn-rechtlichen Einreichprojekt eine Rückverankerung mittels Dauer-Verpressankern vorgesehen. Da diese beträchtliche Wartungskosten verursachen, wurde eine Alternativlösung ohne Daueranker entwickelt.

Die gewählte Lösung sieht 6 m lange Palisadenpfahlscheiben vor, welche senkrecht zur Bohrpfahlwand in einem Rasterabstand von 7 m angeordnet sind. Die rückhaltenden Kräfte der Palisadenpfahlscheiben werden über einen massiven, auf die Scheiben aufgesetzten Kopfbalken in den entsprechenden Balken der Bohrpfahlwand übertragen. Weiterhin wird die Bohrpfahlwand durch eine Einspannung der Pfähle in den anstehenden Phyllit gesichert. Diese Lösung bietet zudem den Vorteil, dass im Zuge der Bauausführung auf ungünstigere Baugrundverhältnisse (zum Beispiel das Auftreten von Kataklasiten im Phyllit) durch Verlängerung der Palisadenpfahlscheiben oder Reduktion des Abstandes derselben reagiert werden kann.

### 3.4 Vorgezogene Arbeiten

Die zeitlich gestaffelte Ausführung von vorgezogenen Bau-massnahmen ermöglicht eine frühzeitige Durchgängigkeit

### 3.2 Water-pressure-tight Construction of the Stein Tunnel and Lind Tunnel

A water-pressure-tight design was specified in the tender design for the Stein Tunnel and Lind Tunnel, which had originally been conceived as drained tubes in the approved project design, with a view to a holistic observation of investment/maintenance costs and potential difficulties during the subsequent operating phase.

There were several reasons for this. The low cover and thus restricted design water pressures (maximum: around 4 bar) permit the construction of a pressure-tight tunnel (state-of-the-art). The temporary drainage in the invert necessary for the construction phase will be grouted through drainage wells after completion of the inner tunnel shell. During the tunnelling phase, and up to installation of the inner lining, artificial watering of the ecologically sensitive zones and systematic sealing injections for extremely permeable zones are planned, depending on the underground water conditions actually encountered.

Adequate and permanent sealing solely by means of injection grouting involves a great implementation and cost risk as a result of injection targets which are not clearly definable (necessary tightness data/influx rates to be attained, depending on tunnel sector) and as a consequence of uncertainties in the geological/hydrogeological forecast (permeability conditions around the tunnel bore, injectability, type and quantity of the necessary grouts). This risk can be significantly reduced with a water-pressure-tight design.

Due to the occurrence of sintering, cleaning of the tunnel drainage systems will cause significant costs and operational difficulties. Increased sintering potential can also be expected due to the necessary grouting.

The geological forecast indicates that the ingress of methane gas into the tunnel drainage systems during the operational phase cannot be entirely excluded. A pressure-tight design makes these problems irrelevant. This decision was also supported by the argument that a water-pressure-tight design would thus be available for all tunnels in the St. Kanzian Tunnel Chain and that no gas-drainage arrangements would then be necessary in the tunnel during the operating phase.

### 3.3 Omission of Permanent Grouted Anchors in the Lind Tunnel

With the same aim of minimising subsequent maintenance costs, variant studies were also performed for the Lind East bored-pile wall (L = 98 m) necessary for the east portal of the Lind Tunnel. Reinforcement anchoring by means of permanent tiebacks was planned for the bored-pile wall in the design submitted for approval under Railway Law, with 120 dia. bored piles at intervals of 1.40 m. An alternative solution not employing permanent tiebacks has been developed, since

von Transportwegen entlang der Neubaustrecke und eine zeitliche Entzerrung und Aufgliederung in kompakte Baulose. Aufgrund der Nähe des Projektgebietes zur Tourismusregion Klopeiner See ist die Entwicklung eines Bauablaufkonzepts erforderlich, welches Baustellenverkehr und insbesondere Massentransporte auf den öffentlichen Strassen vermeidet. Weiterhin sind mehrere, den Bauablauf erschwerende Kreuzungen der Neubaustrecke mit der unter Betrieb stehenden Regionalbahn sowie Sondermassnahmen infolge sehr ungünstiger geologischer Verhältnisse zu berücksichtigen. Folgende Baumassnahmen wurden daher vor Beginn der beiden Hauptbaulose 60.3 (Tunnel Srejach und Untersammelsdorf) und 60.5 (Tunnel Stein und Lind) ausgeführt:

- drei Eisenbahnbrücken (Seebach, Peratschitzen, Drauerquerung);
- zahlreiche Strassenbauarbeiten einschliesslich Strassenbrücken (Landesstrassen, Wirtschaftswege, Baustellenzufahrten und Baustrassen);
- Verlegungen der Regionalbahn einschliesslich Hilfsbrücken (Schreckendorf, Stein West);
- diverse Vorlastschüttungen mit Vertikaldrains.

#### 4 Beispiel aus der Ausführungsphase: Tunnel Srejach Probefeld Düsenstrahlverfahren

Die im Bauauftrag geforderten Probefelder zur Verifizierung der ausgeschriebenen Düsenparameter wurden seitens der ausführenden ARGE und deren hinzugezogenen Experten im Sommer 2015 zuerst im Bereich der Sand-dominierten Stillwassersedimente hergestellt. Insgesamt 14 Säulen wur-

den durch permanent anchoring systems cause considerable maintenance costs.

The solution selected utilises 6 m long palisade pile panels located perpendicular to the bored pile wall at a grid spacing of 7 m. The retaining forces of the palisade pile panels will be transmitted into the corresponding beam of the bored pile wall through a solid capping beam positioned on the piles. The bored pile wall will be additionally secured by means of bracket anchoring of the piles into the native phyllite. This solution also offers the advantage that poorer ground conditions encountered during further construction work (the occurrence of cataclasite in the phyllite, for example) can be counteracted by extending the palisade pile panels, or by reducing their spacing.

#### 3.4 Preparatory Works

The chronologically staggered performance of preparatory works makes possible early clearance of transportation routes along the new line and clarified scheduling and subdivision into compact construction lots. The proximity of the project territory to the Lake Klopein tourism region necessitates the drafting of a construction schedule, which will avoid construction site traffic and, in particular mass transport of materials on public roads. Several intersections between the route of the new line and the operational regional railway line, which complicate the construction phase sequence, and also special provisions resulting from extremely unfavourable geological conditions, also have to be taken into account. The following works were therefore complet-



10 Freigelegte Probesäulen Tunnel Srejach  
Exposed test columns, Srejach Tunnel

Quelle/credit: ÖBB-Infrastruktur AG

den gedüst. Aufgrund der Erkenntnisse vor Ort ist die Herstellung der DSV-Sohle «frisch-an-frisch» ohne Vorschneiden möglich. Der geforderte Säulendurchmesser wurde durch Freilegen (Bild 10) überprüft, und die Druckfestigkeiten wurden anhand von gezogenen Kernen bestimmt.

Folgende Vorteile können durch die vorgenommenen Anpassungen im Bereich der Sand-dominierten Stillwassersedimente erzielt werden:

- Verminderung der Gefahr von DÜSSchatten;
- Entlastung über Primärbohrungen;
- Verbesserung der Homogenität;
- zusätzlicher Zementeintrag bei Sekundärsäule.

Die Forderung aus der Ausschreibung, dass eine «Frisch-an-fest»-Herstellreihenfolge der DSV-Säulen (als «fest» ist eine Säule einen Tag nach der Herstellung zu bewerten) einzuhalten ist, konnte somit für den Bereich Ost des Tunnels Srejach fortgeschrieben werden. Die Untersuchungen der Düsparameter für den Seeton sind im Laufen.

### 5 Resümee

Im Bereich der neuen Südstrecke stellt die Tunnelkette St. Kanzian neben den grossen Tunnelprojekten Semmering-Basistunnel und Koralmtunnel aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Tunnelbauwerke, der teils schwierigen Baugrundverhältnisse und der Komplexität der Bauabwicklung eine anspruchsvolle Herausforderung an die Planung und die Bauausführung dar. Durch den Einsatz aller am Bau Beteiligten ist mit Zuversicht davon auszugehen, dass im Jahr 2023 der Verkehr auf diesem Abschnitt der Koralmbahn geführt werden wird.

### Literatur/References

- [1] Benedikt, J., Berger, K., Koinig, J.: Current state of design and construction for the St. Kanzian tunnel chain. *Geomechanics and Tunneling*, Jahrgang 8 (2015), Heft 6, 535–546
- [2] Heissenberger, R., Benedikt, J., Mauerhofer, G.: Tunnel Untersammelsdorf – erweiterte Planungsstrategie für Stützmassnahmen im «Seeton». Beiträge zum 29. Christian Veder Kolloquium, Stützmassnahmen in der Geotechnik – Bemessung/Ausführung/Langzeitverhalten (2014), 233–248
- [3] Schachinger, T., Gaube, H., Krainer, G.: Erkenntnisse aus dem Versuchsfeld Untersammelsdorf für die Gestaltung der Vortriebsmassnahmen. *Geomechanics and Tunneling*, Jahrgang 3 (2010), Heft 2, 201–214

ed prior to the start of work on the two main lots, 60.3 (the Srejach and Untersammelsdorf tunnels) and 60.5 (the Stein and Lind tunnels):

- three rail bridges (Seebach, Peratschitzen, Drau Crossing);
- numerous road works including bridges (regional roads, farm roads, site access routes and construction roads);
- rerouting of the regional railway at several points, including temporary bridges (Schreckendorf, Stein West);
- various surcharging operations, with vertical drains.

### 4 Example from the Construction Phase: The Srejach Tunnel Jet Grouting Test Site

In the summer of 2015, the test sites required in the contract for verification of the jet grouting parameters stated in the tender documents were set up in the sand-dominated zone of the lake sediments by the contracting consortium and its appointed experts. A total of fourteen columns were jet grouted. The experience gained here indicates that the JG invert can be created “fresh-on-fresh” without water pre-cutting. The specified column diameter was verified by means of exposure (Fig. 10), and strengths in compression were determined by the taking of cores.

The following benefits result from the modifications implemented in the sand-dominated lake sediments:

- reduced risk of grouting shadows;
- relief via primary boreholes;
- improvement of homogeneity;
- additional cement input with secondary column.

It was thus possible to maintain the requirement from the tender documents that a “fresh-on-hardened” production sequence for the JG columns (a column is considered “hardened” one day after its creation) will have to be adhered to for the east sector of the Srejach Tunnel. Investigations of the jet grouting parameters for the lacustrine clay are ongoing.

### 5 Summary

As part of the new southern rail line in Austria, the St. Kanzian Tunnel Chain, in addition to the major Semmering Base Tunnel and Koralm Tunnel projects, presents a demanding challenge of design and civil engineering construction due to the differing characteristics of the tunnel structures, some difficult ground conditions and the complexity of construction. Thanks to the commitment of all those involved in this project, it can be assumed with confidence that this section of the Koralm Line will be open for traffic by 2023.



Diego García Aldaya, Mining Engineer/Head of Plants and Procedures Department, Plant & Equipment Directorate, FCC Construcción, Madrid/ES

Marcos Calleja Martín, Industrial Engineer/Underground equipment, Plants and Procedures Department, Plant & Equipment Directorate, FCC Construcción, Madrid/ES

# Metro de Panamá, Line 1

## The First Line of the Panama City Transit System

In response to the need for a new public transit system in Panama City, the Government of Panama in collaboration with the Secretariat of the Panama Metro has awarded the construction of Line 1 to a consortium FCC Construcción, Odebrecht and Alstom, known as Line One Consortium, in a 1.88 billion dollars contract to build 13.7 km of underground and overhead rail lines.

### 1 The Panama City Metro Project

Panama City, capital of the Panama Republic, houses within its metropolitan area 1.6 million people, 48 % of the country's population. In 2010 there were 500,000 employed in the Panama City Metropolitan area, of which approximately 380,000 jobs located in the City Center. This workplace location generates an important number of daily trips to and from work, with a maximum of close to 60,000 people travelling at rush hours. In the city, the preferred means of transport is by road, 80% combining buses, taxis and private vehicles. Traffic jams are usually the main problem for the mobility of the citizens. Studies confirm that the average time for a 16 km trip is around 60 minutes.

Other aspects of the development of urban transportation which demand control measures are improvement of the route distribution and establishment of stable routes for the existing collective transport systems, environmental and pollution control, reduction of the widespread growth of public transport systems and improvement of the quality of

the transport perceived by the users. All these, together with the 2% annual increase in transport demand, require alternatives to currently available transport systems.

Due to the state of public transport and the increasing demand for transportation inside the city, the Panama National Government sponsored the creation of the Secretary's Office of the Panama Metro, responsible for the development of a new transport system based on regular bus lines, operated under specific regulations, and of a new Metro grid to reduce the density of road traffic.

The master plan of the Metro Project consists of four lines, with underground and elevated stretches. Phase 1 includes the construction of Line 1 between Albrook and Los Andes stations. The total length of the project is 13.7 km, of which 7.2 km is underground, 5 km elevated and 1.5 km in troughs. The project also includes twelve stations, seven underground and five elevated. The investment estimate for the construction of the projects was 1.88 billion dollars.



1 Metro Line 1 layout

## Metro de Panamá, Linie 1

### Die erste Linie im Nahverkehrssystem von Panama-Stadt

Der Bau der Linie 1 der U-Bahn von Panama-Stadt wurde im November 2010 in Auftrag gegeben, begann im März 2011 und wurde planmässig im Februar 2014 abgeschlossen. Im April 2014 wurde die Linie offiziell eröffnet. Linie 1 verläuft von Albrook zum Bahnhof Los Andes und besteht aus 13,7 km Schienenstrecke, 7,2 km Tunnelstrecke, 5 km Überführungen und 1,5 km Trogstrecke und verfügt über zwölf Bahnhöfe. Die Linie 1 von Panama-Stadt ist das erste U-Bahn-System in Mittelamerika und gleichzeitig die erste Phase des U-Bahn-Masterplans, der vier Linien vorsieht. Die Linie 1 hat eine Kapazität von bis zu 15 000 Passagieren pro Stunde je Richtung, und an Werktagen beträgt die Auslastung über 200 000 Passagiere.

## Métro de Panamá, Ligne 1

### La première ligne de transports publics pour la ville de Panama

La commande de construction de la ligne 1 du métro de Panama City a été passée en novembre 2010. Commencée en mars 2011, elle s'est achevée à la date prévue, en février 2014. La ligne a été officiellement inaugurée en avril 2014. Elle va d'Albrook à la gare de Los Andes et comprend 13,7 km de voie ferrée, 7,2 km de tunnel, 5 km de métro aérien et 1,5 km de métro semi-enterré. Elle comporte douze stations. Cette Ligne 1 de Panama City est à la fois le premier système de métro d'Amérique centrale et la première phase du plan directeur du métro, qui prévoit quatre lignes. Cette Ligne peut accueillir jusqu'à 15 000 passagers à l'heure dans chaque sens. Pendant les jours ouvrables, le taux d'utilisation a dépassé les 200 000 passagers.

## Metro de Panamá, Linea 1

### La prima linea di trasporto urbano della città di Panama

La costruzione della linea 1 della metropolitana della città di Panama è stata data in appalto nel 2010, è cominciata nel marzo 2011 e completata come prestabilito nel febbraio 2014. Nell'aprile 2014 è stata ufficialmente inaugurata. La linea 1 collega Albrook alla stazione di Los Andes ed è costituita da 13,7 km di ferrovia, 7,2 km di galleria, 5 km di sovrappassaggi e 1,5 km di avvallamento. La linea ha dodici stazioni. La linea 1 della città di Panama è il primo sistema metropolitano in America centrale e contemporaneamente la prima fase di un progetto generale che prevede quattro linee. La linea ha una capacità di fino a 15 000 passeggeri all'ora e per direzione. Nei giorni lavorativi la quantità delle persone trasportate ha superato le 200 000 unità.

## 2 Panama Metro Line 1: Underground Stretch

### 2.1 Tunnel Design

The Line 1 cross section was designed for the transit of two passenger trains, one in each direction, including elements for power supply and air circulation, and two walkways for emergency exit or staff transit during operational maintenance (Fig. 1). The underground stretch has a length of 7,182 m and five stations. The tunnel depth varies between 10 to 15 m from the tunnel crown. The alignment has a maximum slope of 3.5% and a minimum radius of 290 m on a 515 m long curve.

As specified in the tender design, the tunnel was excavated by a tunnel boring machine. The finished tunnel has a clear diameter of 8.70 m, with a precast concrete support thickness of 350 mm. Figs. 2 + 3 show the designed cross section and final result of construction.

The precast concrete ring was of universal type, tapered on both side surfaces. Six normal segments plus the key segment delivered 19 assembly positions, allowing accurate alignment of the tunnel. 1.6 m length was selected due to the presence of curves with reduced radius.

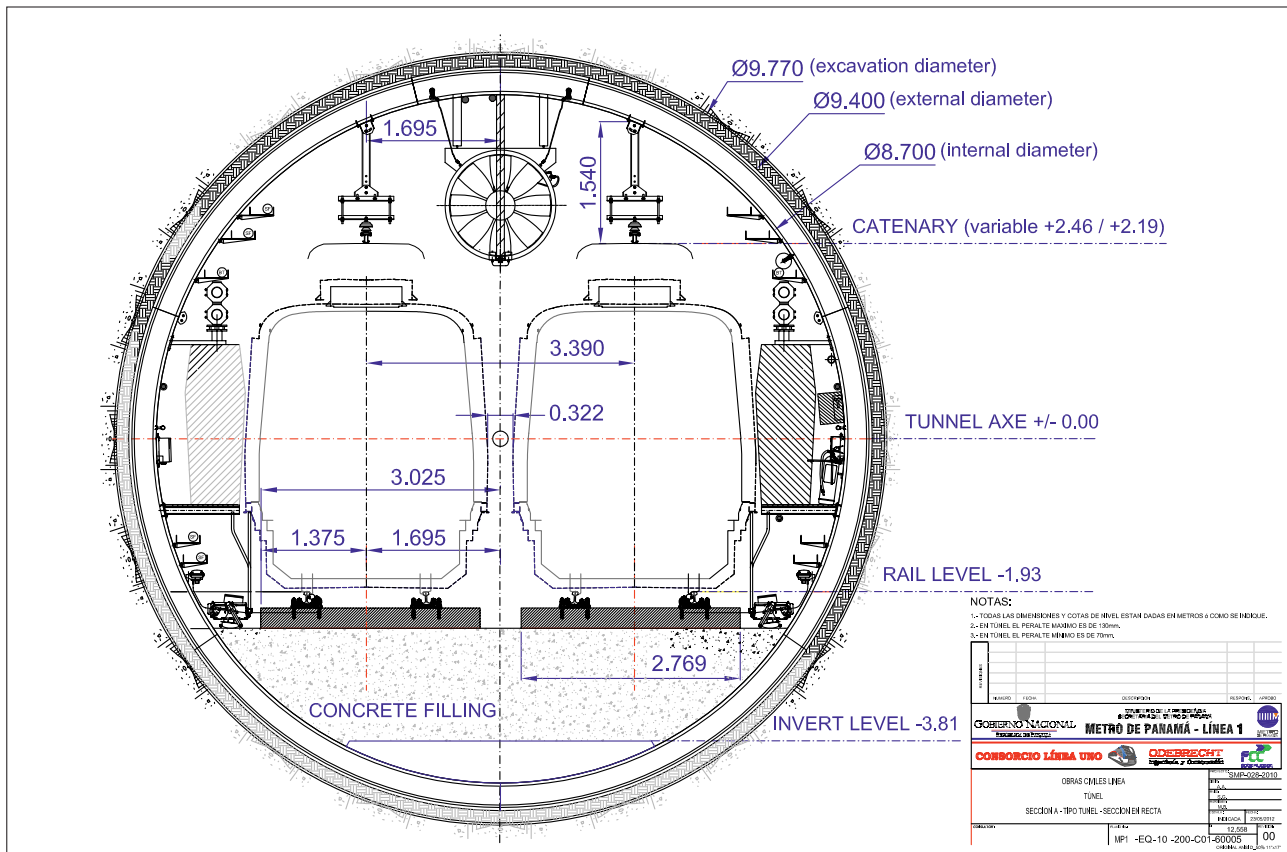
The design of the ring shape and selection of accessories were decided in order to achieve the maximum level of wa-

terproofing. Three centering dowels per normal segment and guidance rods on both sides of all the segments including the key segment ensure correct positioning between gaskets as a key point of watertightness. In the joints between segments and between rings, steel bolts were used as temporary fixings; the bolts were removed before commissioning. Grouting ports with one-way valves were also installed in the center of each segment, to allow grout reinjection.

The annular space between the ground and the lining was filled with two-component mortar. The backfilling grout injection was carried out continuously through six ports located in the TBM tail shield. The gelling and hardening time was set depending on the geological conditions along the tunnel stretches.

### 2.2 Geology of Underground Stretch

The execution of underground works with a tunnel boring machine requires a detailed geological survey along the complete length of the tunnel in order to select the most suitable TBM type. In order to understand the project geology, it is necessary to remember how the Isthmus of Panama was formed, clarifying the kind and origin of the material to be excavated. 20 million years ago, the ocean covered the area where Panama is today. There was a gap



2 Tunnel cross section drawing

between the continents of North and South America filled up with water. Beneath the surface, two plates of the Earth's crust were colliding, forcing the Pacific Plate to slide slowly under the Caribbean Plate. The pressure and heat caused by this collision led to the formation of underwater volcanoes, several of which grew tall enough to break the surface of the ocean and form islands as early as 15 million years ago. Meanwhile, the movement of the two tectonic plates was also pushing up the sea floor, eventually forcing some areas above sea level. Over time, massive amounts of sediment (sand, soil, and mud) were peeled away from North and South America by strong ocean currents and

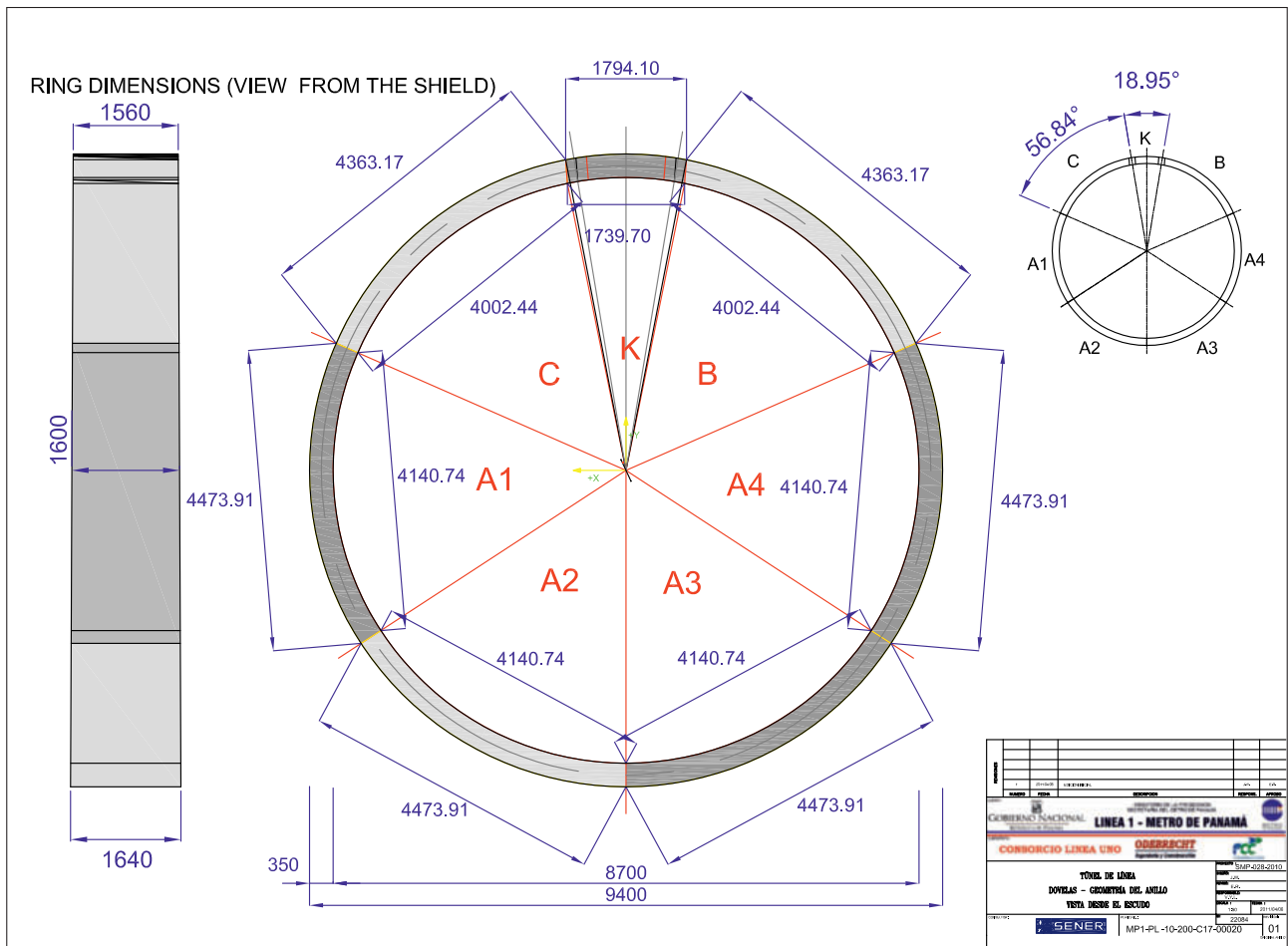


3 View of tunnel after works

fed through the gaps between the newly forming islands. Over millions of years, the sedimentary deposits added to the islands until the gaps were completely filled. By about three million years ago, an isthmus had formed between North and South America.

The Panama Metro Project is located in the sedimentary basins of Cenozoic Era. Panama City geology is made up of three formations created during the Oligocene and Miocene: La Boca formation, Las Cascadas formation and Panama formation. On top of these formations lies a group of soils with a thickness from 10 to 15 m, constituted by anthropogenic soils, residual soils and compacted residual soils. Finally, some intrusive rocks (mainly basalt and Andesite batholiths) are expected in the Panama formation. In the top of the three formations, there is a layer of weathered rock ending in residual soil. The thickness of the upper weathered rock is variable depending on the formation. In the La Boca formation thickness is between 2 to 7 m, in the Panama and the Las Cascadas formations the average is 10 m with maximum values of 25 m.

Following the tunnel alignment and depth, the excavated drive keeps below the soil layers and goes through all three rock formations, crossing different grades of fractured and weathered rock. In the Panama formation, two basaltic batholiths are passed. These are the main geomechanical features of the rock formations (Table 1):



4 Ring geometry

- La Boca formation. The drive length excavated in this formation is 1,220 m which represents the 17.50% of the tunnel. It is a sedimentary formation consisting of cineritic tuff and Lapilli tuff. The degree of fracturing is medium-high and some areas in the crown of the tunnel are rather weathered. At the end of the drive, the contact between La Boca and Las Cascadas formations is highly damaged and broken down, the RMR value 0 and the maximum unconfined compressive strength is close to 1 MPa.
- Las Cascadas formation. The length is approximately 1,660 m, 23.35% of the tunnel. It is a sedimentary basin mainly composed of ignimbrite and volcanic agglomerates. The tunnel goes through non weathered rock with medium-low degree of fracturing.

Lithology		Condition	RMR	UCS (MPa)	Density (kN/m <sup>3</sup> )
La Boca formation	Lapilli tuff Cineritic tuff	weathered	36.0	5.0	21.0
		Intact-fractured	47.0	10.0	23.0
		Intact	54.0	10	23.0
Las Cascadas formation	Ignimbrite	weathered	35	1	18.0
		Intact-fractured	46	1.5	20.0
		Intact	62	2.5	21.0
	Volcanic agglomerates	weathered	*	*	*
		Intact-fractured	47	20	23.0
		Intact	59	20	23.0
Panama formation	Lapilli tuff Agglomerates	weathered	20	6.4	21.0
		Intact-fractured	49	20	23.0
		Intact	73	20	23.0
Basaltic batholithic Intact		Intact-fractured	48	24	26.0
		Intact	63	80	26.0

Table 1 Geomechanical characteristics of rock formations

- Panama formation. With 59.50% of the tunnel distance, meaning 4,230 m. Mainly formed by Lapilli tuff, quite cemented with some intercalations of agglomerate.

Inside the Panama formation, two basaltic batholiths with a length of 50 and 290 m respectively were encountered. This is a very hard rock with a low degree of fracturing and very high unconfined compressive strength: some intact rock samples reach a UCS of 230 MPa.

Concerning the rock abrasiveness, all the formations are classified with low abrasiveness. The hydrogeology of the project shows a water table located from 2 to 8 m beneath the surface, and the tunnel is submerged all along the alignment. The water table variation during the year does not change the excavation conditions for the tunnel. Four different units can be defined from a hydrogeological point of view, the soils and weathered rock, plus the three rock formations. The average permeability range is medium; the following chart shows the permeability of each formation along the tunnel alignment (Fig. 5).

In the La Boca formation, the permeability decreases with depth where intact rock is found, but in the other formations no significant variation is related to the depth.

### 2.3 TBM Selection

According to the available geological data, the main risks to be considered for the excavation and TBM selection are:

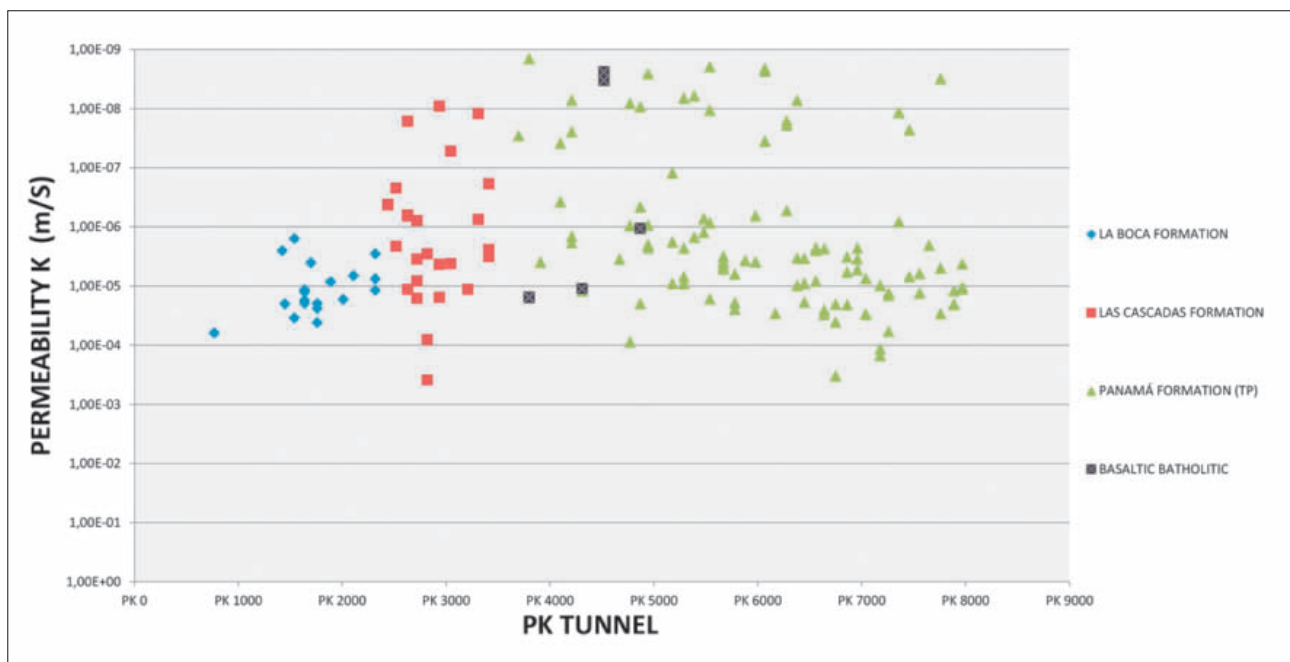
- mixed face excavation, with risk of collapse and presence of the worst rock and soil at the tunnel crown, a usual origin of chimneys;
- excavation below groundwater table, in a medium range permeability rock, known to be prone to surface settlement due to local depression of water level;

- high variation of mechanical properties of rocks. Highly weathered rocks with very low strengths are found close to almost intact rocks with average strengths of 20 MPa and especially batholithic intrusions with average strengths of 80 MPa and maximum strengths of 230 MPa.

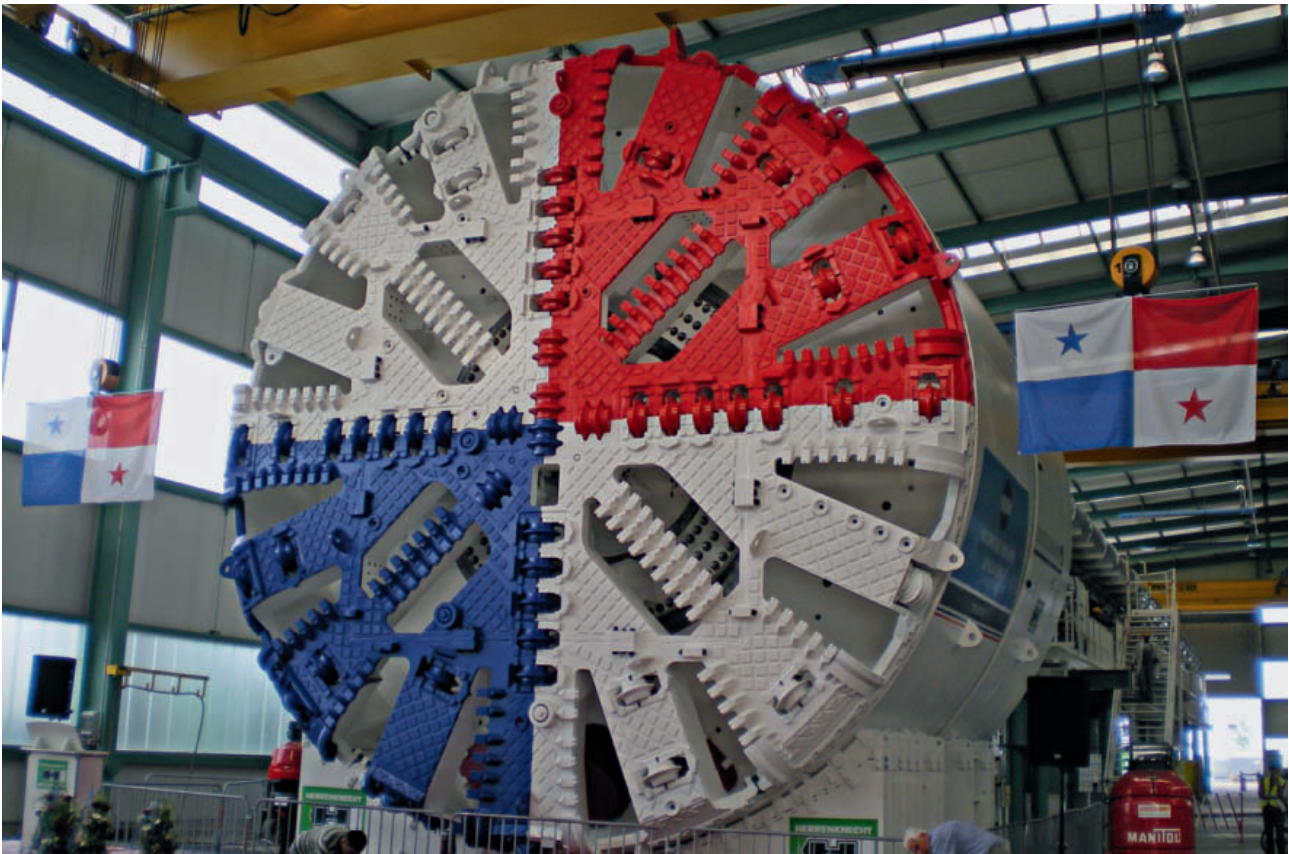
The analysis of the geological conditions, specifically face instability, shows the requirement for a TBM able to apply active pressures for ground support during excavation, in order to avoid face collapse or uncontrolled inflow of the ground. Another key factor, based on experience with these types of formation, is the required control of water flow and level. The TBM must be equipped with suitable systems to prevent the entry of free flowing water. This agrees with the selection of a machine suitable for work under pressurized conditions.

Additionally to the geological analysis, excavation in urban areas requires the use of an excavation system that allows control of the surface settlements. Experience of this issue recommends the use of an active face pressure TBM working in closed mode.

Considering the requirements described above, and own criteria for equipment selection, the selected TBM type was an Earth Pressure Balance (EPB) shield (Fig. 6). This type of TBM fulfills the active ground support requirement, and the ground water pressure range, from 2 to 2.5 bar, is within the typical working range for the operation of a screw-conveyor to remove the excavated material. Finally, the long experience of the consortium partners with this type of machine ensures the highest quality of the works in terms of surface movement, lining waterproofing and finishing, as well as in terms of performance and the achievement of project milestones.



5 Permeability values along the tunnel



6 Metro Panama TBM (EPB machine)

During the design stage, special attention was paid to the ground treatment equipment which conditions the excavated material to be suitable for the chamber and the screw conveyor. Since some stretches of the project alignment are bored in rock, massive treatment could be required to achieve the ground hydraulic properties needed for an EPB. The cutterhead was designed for soil and rock, optimized to drill through very different ground conditions. Maintenance, revision and replacement of cutting tools were made with improved equipment for hyperbaric working, designed to minimize risks of this type of intervention and optimize operation times.

### 3 Tunnel Construction

Three factors influenced the tunnel excavation: the geology of the bored ground, the construction of a transit system infrastructure in a developing and dynamic city without previous experience of such works, and the demanding deadlines imposed on the project.

#### 3.1 Equipment and Excavation Method

Following the project schedule, the tunnel was excavated by two TBMs. The first TBM started at Albrook station, 720 m from the southern end of the alignment, and drove 4,106 m, passing through three already excavated stations. The second TBM was launched in the "Trasmisica" trench and mined 2,961 m of tunnel, crossing two empty stations along its path. Both TBM drives ended at the El Carmen

station, designed for the disassembly of both machines simultaneously. The launching cut had a length of 150 m, allowing for a complete assembly of the machines, easing the beginning of the boring works and improving the ready-to-work time.

Different behavior of the ground during excavation imposed two boring methods.

1. Stretches where the face was partially or totally formed of soils, weathered or very fractured rock and where the face was of good quality rock but the ground on top of the tunnel consisted of soils or very low quality rock. Excavation was made in pressurized mode and the excavation chamber was kept full of muck. Ground was treated with foams to ensure the behavior of the excavated material in the chamber and the screw-conveyor. This boring method was similar to a standard EPB system.
2. In tunnel sections ranging through intact or good quality rock, both at face and on top of the tunnel, with a thickness over one diameter and low permeability, excavation was performed under pressure with a material level in the chamber close to 1/2–2/3 of the total. This methodology was developed due to the huge wear and high breakdown level in the cutter head that happened when working with a full chamber in rock and small boulders, which required a significant number of interventions under hyperbaric conditions to control or repair, and increased the settlement risk at the surface. When in self-supporting

rock, the goal was underground water control avoiding any free ingress, which was ensured by an appropriate ground treatment that ensured the water blockage at the screw conveyor. At the same time, chamber pressure was maintained by direct air injection, supplied from an air compressor group installed outside the tunnel. This group was also used for the hyperbaric interventions.

This excavation method allowed safe operation and achieving performance in compliance with the site schedule. For the ground treatment, foam and polymers were used. There was no need to add fine aggregates since the rock crushed and milled by the cutting head and in the chamber created enough sizes to form the plug in the screw conveyor.

This system was also used for the excavating batholiths, which notwithstanding their stability and hardness, were easily fractured with the resulting risk of ground water loss during excavation.

### 3.2 Logistics and Site Strategy

Construction of such important infrastructure demands an extra effort from the existing industrial network and labor market. In addition, the specialized civil works demanded an analysis of site installation sizing and in-house sourcing. Site installations were sized in order to compensate the lack of capacity of the local market during overload periods, reducing the in-

fluence of external companies on the construction schedule. Site facilities include equipment and tool repair workshops, welding and steel fabrication. Spare parts for equipment were stocked in own warehouses. Precast rings for tunnel lining, concrete and steel reinforcement were made in-house.

Staff team formation was also an important matter. Task forces mixing local and contractor's staff were critical for the achievement of project milestones. Tunnel drives were short and the available learning time was short to accomplish the stringent milestones of the project plan.

In summary, the requirement to accomplish demanding milestones on the project schedule involved a major effort in terms of facilities and workforce to minimize dependency on third parties.

### 3.3 Excavation Project Schedule

In November 2010, The Secretariat of the Panama Metro (SMP) confirmed the contract award for Linea 1. The official start of the works was dated to March 2011, and eleven months later in February 2012, manufacturing, transport, assembly and commissioning on site of the first TBM had been completed. The second TBM cut the face of its tunnel in May 2012, three months after the first TBM.

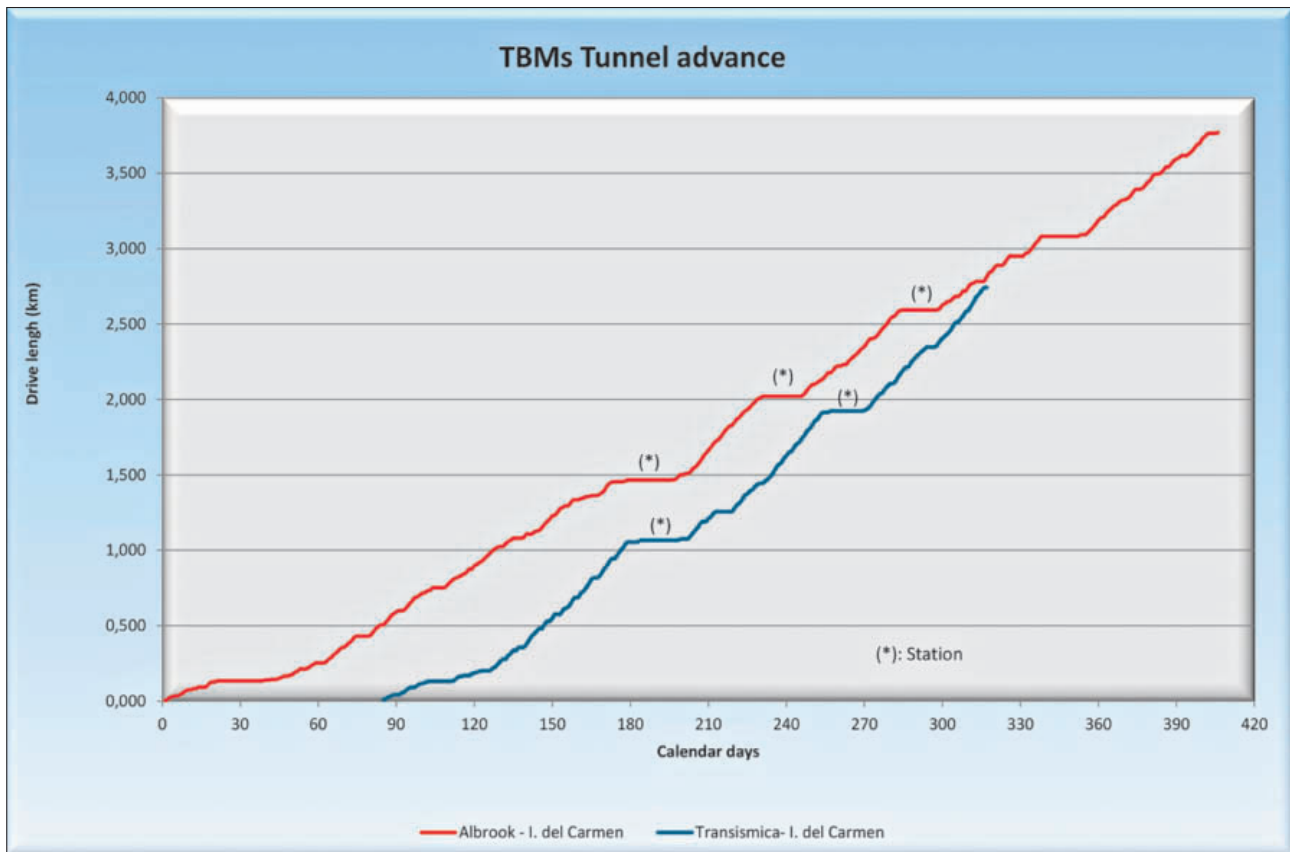
The first TBM completed excavation of its drive, 4,100 m long and passing through three stations, in March 2013, 13 months after the starting date (Fig. 7). The second TBM, with the shortest drive to excavate almost 3,000 m including the length of the station crossed, finished in December 2012 after about seven months with an average advance rate of 410 m per month. Both TBMs worked without any long unscheduled stops, and the performance according to the Project Plan forecast points out some factors with high influence in the TBM advance rate (Fig. 8), such as the short length of the drives and external factors as precast segment production and delivery or disposal of excavated material, and its transport from the temporary pits to the tipping site. Metro Panama Line1 was officially inaugurated in April 2014.

## 4 Conclusions

The Panamá Metro Line 1 is the first step of a new public transport network that has already proven its service to the city, and which within its first year of operation has seen its service demand increase from 160,000 to 215,000 daily passengers. The construction of the underground works with tunnel boring machines enabled optimisation of the tunnel working times, observing the highest standards of quality and surface settlement control during excavation. As result of the success of the rapid transit system, high quality of the service provided and public acceptance of Metro Line 1, Line 1 has now been extended, adding 2.1 km of overhead rail lines, one elevated station plus another at grade, and Line 2 is under construction, comprising 21 km of viaduct and 16 stations.



7 TBM breaking through into station



8 TBM advance rates

References

- [1] Secretaría del Metro de Panama, Informe de la Secretaría del metro de Panamá 2009-2011
- [2] Secretaría del Metro de Panama, "Infografiometro" and miscellaneous documents.
- [3] www.elmetrodepanama.com, Metro de Panamareferences
- [4] Project document, Informe geotécnico de base (GBR). MP1-IT-10-200-C02-00002
- [5] Project document, Estudio de abrasividad y perforabilidad de los terrenos. MP1-IT-10-200-C02-00003
- [6] Project document, Tunnel cross section, MP1-EQ-10-200-C01-60005
- [7] Project document, Concrete ring geometry, MP1-PL-10-200-C17-00020
- [8] Herrenknecht, TBM S-680/S-681 documentation
- [9] Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu, Geodata S.p.A., Mechanized Tunneling in Urban Areas, ed. Taylor and Francis
- [10] Asociación Latino Americana de metros y subterráneos (ALAMYS). Metro de Panama references



Heinz Ehrbar, Dipl. Ing. ETH, DB Netz AG, Frankfurt am Main/DE  
Thomas Grundhoff, Dipl.-Ing., DB Netz AG, Karlsruhe/DE  
Sascha Björn Klar, Dipl.-Ing., DB Netz AG, Karlsruhe/DE

## Tunnel Rastatt

### Ein Schlüsselprojekt in vielerlei Hinsicht

Der Tunnel Rastatt ist ein Schlüsselprojekt des europäischen Güterverkehrskorridors A und unterfährt die Stadt Rastatt auf insgesamt 4,270 m. Seit 2013 laufen die Vorarbeiten, im Mai 2016 wird der maschinelle Vortrieb aufgenommen. Für drei Bauabschnitte sind Vereisungen geplant, um einen sicheren Vortrieb zu ermöglichen. Zudem ist der Tunnel Rastatt ein offizielles Building-Information-Modeling-Pilotprojekt (BIM) des deutschen Verkehrsministeriums.

## The Rastatt Tunnel

### A Key Project in Many Respects

The Rastatt Tunnel is a key project in the European rail freight corridor A and passes under the town of Rastatt with a total length of 4,270 m. Preparatory works have been underway since 2013, and the mechanised tunnel drive will start in May 2016. Ground freezing is planned for the three construction sections in order to enable safe tunnelling. The Rastatt Tunnel is also an official Building Information Modelling (BIM) pilot project of the German Transport Ministry.

#### 1 Geplante Ausbauten auf dem Korridor A (Rotterdam–Genua)

Die Europäische Kommission will mit dem Ausbau von definierten Verkehrsachsen (Korridoren) die Leistungsfähigkeit des Schienengüterverkehrsnetzes erheblich steigern. Dazu wurden die sechs Schienekorridore A bis F definiert, welche sich an bestehenden und künftigen Verkehrsströmen orientieren. Die Ausrüstung dieser Korridore mit dem europäischen Zugsicherungssystem, dem European Rail Traffic Management System (ERTMS), sorgt hierbei für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb. Auf dem Korridor A (Rotterdam–Genua) soll damit das Güterverkehrsvolumen bis 2020 durch ein wesentlich verbessertes Angebot mit höherer Pünktlichkeit und kürzeren Fahrzeiten gegenüber dem Zustand von 2005 auf 56 Mrd. Tonnenkilometer verdoppelt werden.

Die Schweiz ist mit den NEAT-Achsen Lötschberg-Simplon und Gotthard in den Korridor A direkt eingebunden. Nach der Eröffnung des Gotthard-Strassentunnels im Jahr 1980 und der darauffolgenden starken Zunahme des alpenquerenden Güterverkehrs auf der Strasse wurde der Ausbau der Schienen-Alpentransversalen in der Schweiz gegen Ende der 1980er-Jahre politisch mehrheitsfähig, vom Schweizer Stimmvolk schliesslich in mehreren Abstimmungen beschlossen (1992) und mit einer stabilen Finanzierung versehen (1998). Seit 1977 steht auch in Deutschland der vierspurige Ausbau der Rheintalbahn von Karlsruhe nach Basel und damit der Ausbau des Korridors A auf der Agenda der Deutschen Bahn.

#### 1 Planned Improvement on Corridor A (Rotterdam–Genoa)

The European Commission intends with the improvement of defined transport corridors to considerably improve the capacity of rail freight transport. For this purpose, six corridors A to F have been defined, which are oriented on present and future traffic flows. The equipment of these corridors with the European Rail Traffic Management System (ERTMS) should ensure the most economic possible operation. On corridor A (Rotterdam–Genoa), the rail freight volume should be doubled compared to 2005 to 56 billion tonne km by 2020 due to much better service, with improved punctuality and shorter journey times.

Switzerland is directly integrated into corridor A with the new railway link through the Alps (NRLA) Lötschberg-Simplon and Gotthard axes. After the opening of the Gotthard Road Tunnel in 1980 and the subsequent heavy increase of transalpine road freight traffic, the improvement of rail routes across the Alps gained a political majority in Switzerland towards the end of the 1980s, as was confirmed by Swiss voters in several referenda (1992) and provided with stable financing (1998). Since 1977, the four-track widening of the Rheintalbahn line from Karlsruhe to Basel and thus the improvement of corridor A has also been on the agenda of German Railway DB.

With regard to the implementation of the NEAT, Switzerland and Germany made an agreement in 1996, which included

## Tunnel de Rastatt

### Un projet clé à bien des égards

En 1996, la Suisse et la République fédérale d'Allemagne signaient un accord pour garantir la capacité de l'accès à la nouvelle ligne ferroviaire suisse à travers les Alpes (NLFA). Les deux grands tunnels de base en Suisse ont été construits entre-temps et l'aménagement des tronçons d'accès en Suisse progresse. En Allemagne aussi, l'aménagement du corridor de fret ferroviaire européen A est en travaux depuis des années. Malgré cela, pour parvenir à l'objectif convenu, à savoir l'aménagement d'une ligne ferroviaire continue à quatre voies entre Karlsruhe et Bâle, il y a encore beaucoup à faire en Allemagne. Les travaux du tunnel de Rastatt marquent le début d'un autre ouvrage clé. En dehors des tâches techniques pointues qui sont à maîtriser, le tunnel Rastatt constitue également l'un des plus grands projets pilotes de la société allemande DB Netz AG pour le passage à la méthode numérique de processus des grands projets du bâtiment (BIM ou Building Information Modeling).

## Galleria Rastatt

### Da molti punti di vista un progetto chiave

Nel 1996 la Svizzera e la Repubblica Federale di Germania hanno firmato un accordo sulla garanzia della capacità delle linee d'accesso alla nuova ferrovia transalpina (NFTA) in Svizzera. I due grandi tunnel di base in Svizzera sono stati nel frattempo costruiti e la costruzione delle linee d'accesso in Svizzera procede bene. Anche in Germania da anni si lavora all'ampliamento del corridoio merci europeo A. Nonostante ciò, per raggiungere l'obiettivo prefissato e cioè un ampliamento a quattro corsie della linea ferroviaria fra Karlsruhe e Basilea, dalla parte tedesca deve ancora venire costruito molto. Con l'inizio dei lavori di costruzione della galleria di Rastatt è stato affrontato un altro oggetto chiave. Oltre a impegnative misure tecniche di costruzione, che devono essere superate, la galleria di Rastatt della DB Netz AG serve anche a uno dei primi importanti progetti pilota per la conversione di grandi progetti nel metodo di gestione BIM – Building Information Modeling.

Im Hinblick auf die Realisierung der NEAT wurde 1996 zwischen der Schweiz und Deutschland unter anderem vereinbart, die folgenden Massnahmen auf den NEAT-Zulaufstrecken zwecks Sicherstellung der Leistungsfähigkeit gegenseitig abzustimmen [1]:

a) auf deutscher Seite:

- durchgehender viergleisiger Ausbau zwischen Karlsruhe und Basel im Hinblick auf die Vollausslastung der NEAT;

b) auf schweizerischer Seite:

- Bau einer neuen Linie zwischen den Räumen Olten und Bern (Konzept BAHN 2000);
- Bau einer neuen Linie aus dem Raum Basel durch den Jura;
- Bau einer weiteren zweigleisigen Rheinbrücke im Zuge der Verbindungsbahn zwischen Basel Badischer Bahnhof und Bahnhof Basel SBB.

Bekanntermassen erfolgte die Umsetzung der geplanten Massnahmen aus verschiedenen Gründen mit unterschiedlichen Realisierungsgeschwindigkeiten. In der Schweiz wurde die Neubaustrecke zwischen den Räumen Olten und Bern 2004 in Betrieb genommen, der Lötschberg-Basistunnel folgte 2007, und der Gotthard-Basistunnel wird Ende 2016 in kommerziellen Betrieb gehen. Die volle Leistungsfähigkeit der Gotthard-Achse soll 2020 mit der Inbetriebnahme des Ceneri-Basistunnels und dem Ausbau der Tunnelbauten auf den Zulaufstrecken auf 4,0 m Eckhöhe für den Güterverkehr erreicht werden. Der Bau einer neuen Linie durch den Jura erfolgte jedoch nicht.

Auch in Holland wurde auf dem Korridor A gebaut. Seit 2007 ist die als reine Güterzugstrecke ausgelegte 158,5 km lange Betouweroute zwischen Rotterdam und der deutschen Grenze

the following measure on the NEAT approach lines to ensure the capacity on both sides [1]:

a) on the German side:

- continuous four-track line between Karlsruhe and Basel to serve the full utilisation of the NEAT;



1 Der europäische Korridor A mit der Ausbaustrecke Karlsruhe–Basel

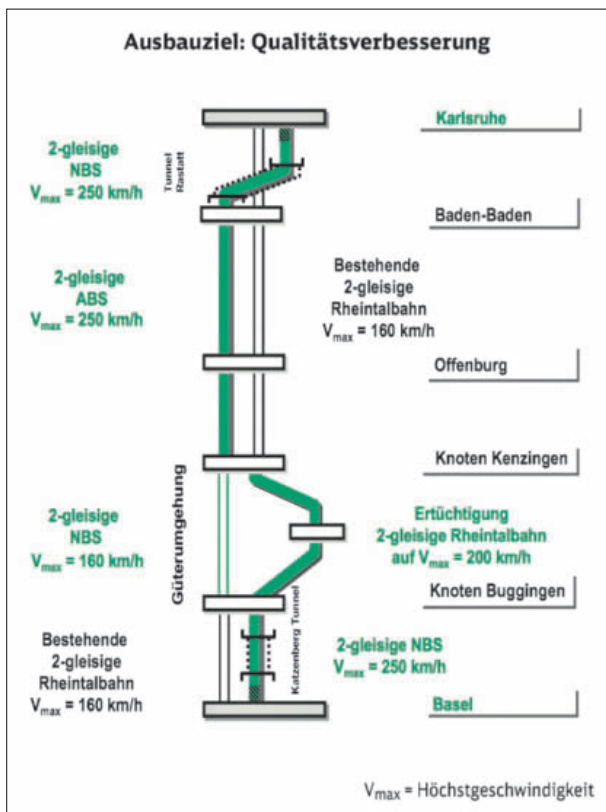
The European corridor A with the new and upgraded line Karlsruhe–Basel

bei Zevenaar in Betrieb. Ab der holländischen Grenze plant die Deutsche Bahn den dreigleisigen Ausbau der rund 70 km langen Strecke zwischen Emmerich und Oberhausen mit Gesamtinvestitionen von rund 2 Mrd. EUR. Die grössten baulichen Massnahmen für den Korridor A in Deutschland betreffen jedoch den Aus- und Neubau der Strecke Karlsruhe–Basel (Bild 1).

## 2 Projekt Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel

Mit dem Neubau und dem teilweisen Ausbau der Rheintalbahn zwischen Karlsruhe und Basel verfolgt die Deutsche Bahn drei zentrale Ziele:

1. Erhöhung der Streckenkapazität:  
Der prognostizierte Mehrverkehr auf der Rheintalbahn soll so dauerhaft aufgenommen werden können.
2. Entmischung der Verkehre:  
Die Trennung der schnellen Züge des Fernverkehrs von den langsameren Zügen des Nah- und Güterverkehrs verhindert gegenseitige Beeinträchtigungen im Betrieb.
3. Qualitative Verbesserung für die Reisenden:  
Die Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit für den Reisefernverkehr auf 250 km/h verkürzt die Reisezeiten deutlich.



Quelle/credit: DB Netz AG

2 Ursprünglich geplanter Streckenaus- und -neubau zwischen Karlsruhe und Basel (noch ohne die Auswirkungen des Bundestagsbeschlusses vom 28. Januar 2016 zur geänderten Trassierung in den Streckenabschnitten 7 und 8)

Originally planned upgrading and new line between Karlsruhe and Basel (still without the effects of the Bundestag decision of 28 January 2016 with a changed route in line sections 7 and 8)

b) on the Swiss side:

- construction of a new line between the Olten und Bern areas (Concept Rail 2000);
- construction of a new line from the Basel area through the Jura;
- construction of a second two-track bridge over the Rhine as part of the link between Basel German Station and Basel Swiss Station.

As is well known, the implementation of the planned measures is proceeding at various paces for various reasons. In Switzerland, the new line between the Olten und Bern areas went into service in 2004, the Lötschberg Base Tunnel followed in 2007, and the Gotthard Base Tunnel will start commercial operation at the end of 2016. The full capacity of the Gotthard axis should be achieved in 2020 with the opening of the Ceneri Base Tunnel and the improvement of the tunnels on the approach lines to 4.0 m corner height for freight traffic. The construction of a new line through the Jura Mountains has however not yet happened.

Work is also underway on corridor A in the Netherlands. Since 2007, the 158.5 km long Betouweroute between Rotterdam and the German border at Zevenaar has been in operation as a pure freight line. From the Dutch border, German Railways DB plans the three-lane widening of the line about 70 m long between Emmerich and Oberhausen with a total investment of €2 billion. The largest construction measure on corridor A in Germany, however, concerns the new construction and improvement of the line from Karlsruhe to Basel (Fig. 1).

## 2 Improvement and Newbuild Line Karlsruhe–Basel

With the new construction and partial upgrading of the Rheintalbahn line between Karlsruhe and Basel, DB has three central aims:

1. Increase of line capacity:  
the forecast extra traffic on the Rheintalbahn line should be permanently absorbed.
2. Segregation of traffic:  
the segregation of long-distance high-speed trains from slower local and long-distance freight trains will prevent reciprocal hindrances in operation.
3. Quality improvements for passengers:  
the increasing of the maximum speed for express trains to 250 km/h will considerably shorten journey times.

After the completion of the construction measures, slower freight and commuter trains should predominantly use the two existing tracks; from Offenburg to north of the Katzenberg Tunnel completed in 2012, freight traffic will run on separate new tracks. New tracks will be laid for a maximum speed of 250 km/h for long-distance express trains. With this segregation of traffic, the transport concept also offers extensive possibilities for the development of commuter services in the state of Baden-Württemberg (Fig. 2).

## The Rastatt Tunnel • A Key Project in Many Respects

Nach Vollendung der Baumassnahmen werden die langsameren Güter- und Nahverkehrszüge überwiegend die beiden vorhandenen Gleise nutzen; von Offenburg bis nördlich des 2012 fertiggestellten Katzenbergtunnels soll der Güterverkehr auf separaten neuen Streckengleisen geführt werden. Für den Fernverkehr werden die neuen Gleise für eine Geschwindigkeit von 250 km/h ausgelegt. Durch die Entflechtung der Verkehre bietet das Verkehrskonzept auch weitreichende Möglichkeiten für die Nahverkehrsentwicklung des Landes Baden-Württemberg (Bild 2).

Die Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel ist in insgesamt neun Streckenabschnitte gegliedert, welche ihrerseits wiederum in einzelne Planfeststellungsabschnitte (PFA) aufgeteilt sind (Bild 3).

Mehrere Streckenabschnitte (StA) sind mittlerweile in Betrieb, so die 43,7 km lange Strecke Rastatt–Offenburg, StA 2–6 (Bild 4), seit 2004 und seit Dezember 2012 der Abschnitt 9.1 mit dem 9835 m langen Katzenbergtunnel. Dieser ist nach den aktuell gültigen Richtlinien für den Bau und den Betrieb langer Eisenbahntunnel ausgelegt und weist nebst Querschlägen alle 500 m auch eine mit Strassenfahrzeugen befahrbare Sohle auf (Bild 5) [2].

Die 16 km lange Neubaustrecke von Karlsruhe bis nach Rastatt Süd (StA 1) befindet sich derzeit im Bau (siehe 3, «Der Tunnel Rastatt») und soll 2022 in Betrieb genommen werden (Bild 6). Auch im StA 9 zwischen Freiburg und Basel wird derzeit die Umsetzung verschiedener Baumassnahmen vorbereitet, während im Streckenabschnitt 9.2 kurz vor Basel verschiedene Ausbauten getätigt werden.

Die Projektentwicklung in den StA 7 und 8, mit einer Gesamtlänge von 82,5 km oder 45% der Streckenlänge Karlsruhe–Basel, gestaltet sich innerhalb des Gesamtprojekts am schwierigsten. Im Verlauf des langwierigen Planfeststellungsverfahrens kam es in diesen Streckenabschnitten in wesentlichen Fragen zur Trassierung der Aus- und Neubaustrecke auf politischer Ebene zu einem Meinungsumschwung. We-



3 Realisierungsstand Karlsruhe–Basel per Ende 2015  
State of implementation Karlsruhe–Basel at the end of 2015

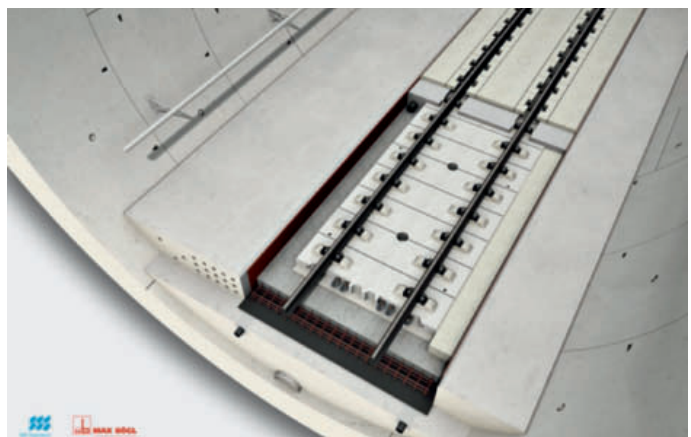


4 Vierspurig ausgebaute Rheintalbahn bei Baden-Baden  
(Strecke Rastatt–Offenburg)  
Four-track widened Rheintalbahn at Baden-Baden  
(line Rastatt–Offenburg)

The improvement and newbuild line Karlsruhe–Basel is divided into altogether nine new line sections, which are then sub-divided into individual planning sections (PFA) (Fig. 3).



Quelle/credit: DB Netz AG



Quelle/credit: Max Bögl AG

5 Der Katzenbergtunnel, seit 2012 in Betrieb (links), mit einer für Strassenfahrzeuge befahrbaren Sohle, «System Bögl» (rechts)  
The Katzenberg Tunnel, in operation since 2012 (left), with an invert suitable for wheeled vehicles "System Bögl" (right)



### 3 Der Tunnel Rastatt

#### 3.1 Planung und Ausführung

Der Tunnel Rastatt ist analog dem Katzenbergtunnel als Zweiröhrensystem konzipiert, entsprechend den aktuellen Anforderungen der EU und des deutschen Eisenbahn Bundesamtes (EBA) an den Brand- und Katastrophenschutz für den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln [2, 10]. Diesen Anforderungen liegt das Konzept einer schienenunabhängigen Fremdrettung zu Grunde, was den Einbau einer für Strassenfahrzeuge nutzbaren Fahrbahn und alle 500 m den Bau von Querschlägen mit Rettungsschleusen bedingt. Ein Löschwassersystem, Handläufe, Notrufsäulen, Rettungsschleusen in den Querschlägen, eine Tunnelbeleuchtung und ein Fluchtwege-Leitsystem ergänzen die baulichen Einrichtungen des Tunnelrettungskonzepts (Bild 7).

Nach seiner Inbetriebnahme wird der Tunnel Rastatt während der Hauptverkehrszeit am Tag den schnellen Personenfernverkehr und – soweit möglich – den Güterverkehr aufnehmen. In der schwächer ausgelasteten Nachtzeit sowie in freien Fahrplantrassen wird der Güterverkehr durch den Tunnel geführt, um das Stadtgebiet von Rastatt so deutlich vom Schienenverkehrslärm zu entlasten.

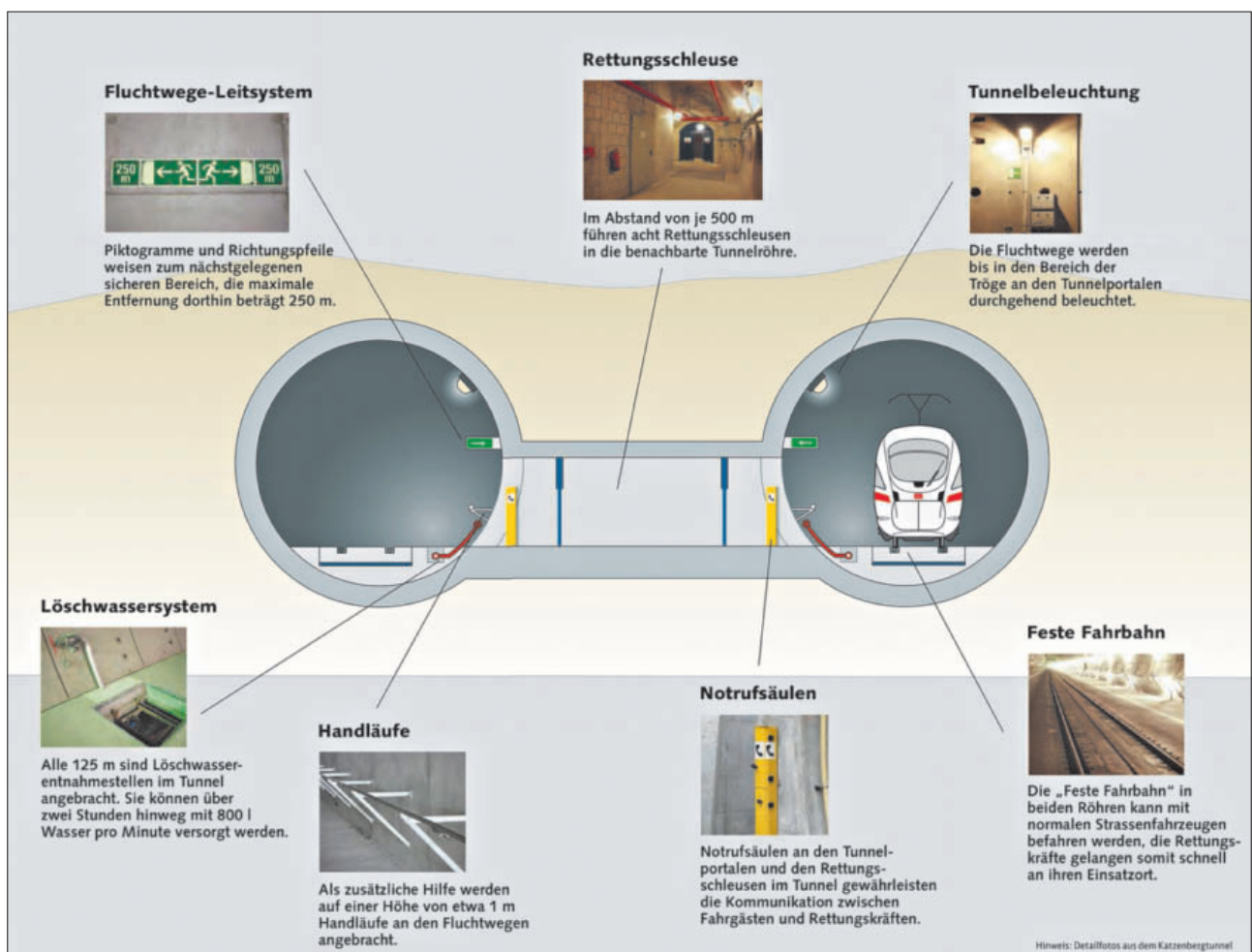
By the end of 2022, that is two years after the complete opening of the Gotthard axis of the NRLA, about 55 % of the total 182 km distance of the new and upgraded line between Karlsruhe and Basel will thus be in operation. These measures should ensure that there are no further capacity bottlenecks on the NRLA approach route until the opening of the further sections.

The construction cost of the entire Karlsruhe–Basel project is currently (still without the Offenburg Tunnel and the stretch parallel to the autobahn as decided by the project support committee) is currently estimated at €7.1 billion, of which about €2.2 billion had been invested by the end of 2013. Most of the finance comes from federal funds from the Federal Republic of Germany, with contributions from the European Union (EU) and DB.

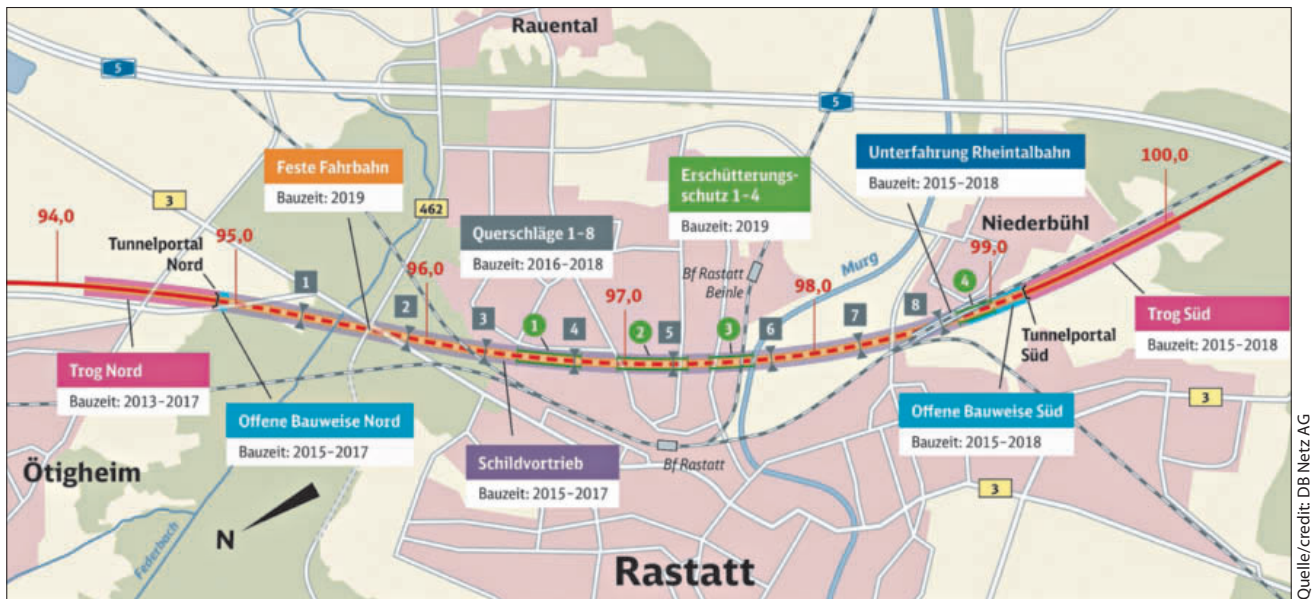
### 3 The Rastatt Tunnel

#### 3.1 Design and Construction

The Rastatt Tunnel is of similar design to the Katzenberg Tunnel, with a twin-bore system according to the current requirements of the EU and the Federal Railway Authority



7 Bauliche Elemente zur Tunnelrettung gemäss gültigen Richtlinien für Neubauten von zweiröhri gen Eisenbahntunneln in Deutschland  
 Constructional elements for tunnel escape according to the valid Guidelines for new construction of two-track rail tunnels in Germany



Quelle/credit: DB Netz AG

8 Geplante bauliche Massnahmen und generelles Bauprogramm des Tunnels Rastatt  
Planned constructional measures and general construction schedule for the Rastatt Tunnel

Das Bauwerk des Tunnels Rastatt beginnt im Norden (Bild 8) mit der 800 m langen Grundwasserwanne (Trog) Nord südlich von Ötigheim. Das Stadtgebiet von Rastatt wird anschliessend mit einem 4270 m langen zweiröhriigen Tunnel unterquert und endet im Süden mit dem 895 m langen Trog Süd im Bereich Niederbühl. An die Grundwasserwannen anschliessend folgen in Richtung Tunnel die jeweiligen Portalbereiche mit Tunnelrahmen in offener Bauweise mit einer Länge von 45 m im Norden bzw. im Süden 182 m (Oströhre) und 336 m (Weströhre). In alle Portalbauwerke werden die sogenannten Sonic-Boom-Bauwerke zur Minderung des Mikrodruckwelleneffektes (Tunnelknall) integriert (Bild 17). Die Herstellung der Trog- und Rahmenbauwerke erfolgt im Schutz wasserundurchlässiger Baugrubenumschliessungen, bestehend aus Spundwänden und nach unten verankerten Unterwasserbetonsohlen.

Acht Querschläge im Abstand von je 500 m dienen als Fluchtwege zwischen den beiden Röhren. Zur Abführung der Abwässer aus dem Tunnel mittels Pumpanlagen sowie zur Zuführung diverser Medien (zum Beispiel Löschwasser) in den Tunnel wird am Tiefpunkt des Tunnels ein Versorgungsschacht errichtet, der über einen weiteren Querschlag an die Tunnelröhren angeschlossen wird. Sämtliche Querschläge werden nach vorgängiger Vereisung zur Abdichtung und Stabilisierung des umliegenden Baugrunds im konventionellen Vortrieb (Spritzbetonbauweise) aufgeföhren.

Die Streckengradienten werden zur Unterquerung des städtischen Bereichs am Beginn des nördlichen und des südlichen Trops abgesenkt. Mit einem maximalen Gefälle von 12,3‰ entspricht die Trassierung den Anforderungen einer Flachbahn. Aufgrund der flachen Topographie haben die Tunnelröhren eine maximale Überdeckung von nur ca. 20 m. Im städtischen Bereich wird in der Sohle zum Schutz der da-

(EBA) for fire and catastrophe protection for the construction and operation of rail tunnels [2, 10]. These requirements are based on escape independent of rail transport, which requires the provision of paving suitable for road vehicles and cross passages with escape locks every 500 m. Tunnel lighting and an escape route guidance system complete the equipment of the tunnel escape concept (Fig. 7).

When open, the Rastatt Tunnel will be used in the main travel times for high-speed passenger traffic and as far as possible for freight traffic. In the less busy night time and in gaps in the timetable, freight traffic will run through the tunnel in order to relieve the urban area of Rastatt from rail noise as far as possible.

The structures of the Rastatt Tunnel start in the north (Fig. 8) with the 800 m long north groundwater trough situated south of Ötigheim. The tunnel then passes below the urban area of Rastatt as a 4,270 m long twin-bore tunnel and ends in the south with the 895 m south trough near Niederbühl. The groundwater troughs are followed into the tunnel by the portal areas with a framed tunnel in cut and cover with a length of 45 m at the north end and 182 m (east bore) and 336 m (west bore) at the south end. Sonic boom structures are integrated into all portal structures to reduce the micro-pressure wave effect (tunnel boom) (Fig. 17). The trough and framed structure will be constructed inside waterproof support walls consisting of sheet pile walls with underwater concrete inverts that are anchored down.

Eight cross passages at a spacing of 500 m serves as escape routes between the two bores. In order to clear waste water out of the tunnel with a pumping plant and for the pipework for various media (for example extinguishing water), a disposal shaft will be constructed at the deepest point of the

rüber liegenden bewohnten Gebiete vor Lärm und Erschütterungen streckenweise ein Masse-Feder-System eingebaut. Mit dem Tunnelvortrieb wird im Mai 2016 begonnen, die Gesamtbauzeit für Roh- und Ausbau beträgt voraussichtlich fünf Jahre (Bild 12).

Der Baugrund im Bereich der Tunnelbaumassnahme ist dem Quartär und Tertiär zuzuordnen. Unter den bindigen Deckschichten folgen überwiegend mitteldicht bis dicht, örtlich locker gelagerte Wechsellagen von quartären Gemischen aus Kiesen und Sanden mit unterschiedlichen steinigen Anteilen. Darunter stehen tertiäre, aus Feinsanden mit verschiedenen bindigen Beimengungen bzw. aus Schluffen und Tonen bestehende Schichten an. Der quartäre Grundwasserleiter besteht im Wesentlichen aus Kiesen und Sanden mit einer Mächtigkeit von ca. 15 m im Süden und bis zu ca. 40 m im Norden. Es handelt sich um einen einheitlichen, zusammenhängenden Porengrundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche. Unter Zugrundelegung des höchsten bislang gemessenen Grundwasserstands ist mit einem maximalen Wasserdruck in der Tunnelsohle von bis zu etwa 2,8 bar zu rechnen. Bei Ansatz des höchsten bekannten Grundwasserstands kommt das Bauwerk im gesamten Wannen- und Tunnelbereich im Grundwasser zu liegen (Bild 9).

Aufgrund der anstehenden Baugrundverhältnisse entschied sich der Bauherr deshalb, den bergmännisch vorzutreibenden Abschnitt des Tunnels in geschlossener Bauweise mit Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) auszuführen. Vortriebsbeginn ist für beide Tunnelröhren beim nördlichen Tunnelportal. Zwei TVM werden als Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in Form von Mixschilden ausgeführt und fahren in der Weströhre 3674 m bzw. 3826 m Tunnel in der Oströhre mit einem kreisrunden Querschnitt auf. Der Ausbruchdurchmesser beträgt 10,97 m; beim einschaligen Ausbau werden Tübbinge mit einer Dicke von 50 cm verwendet.

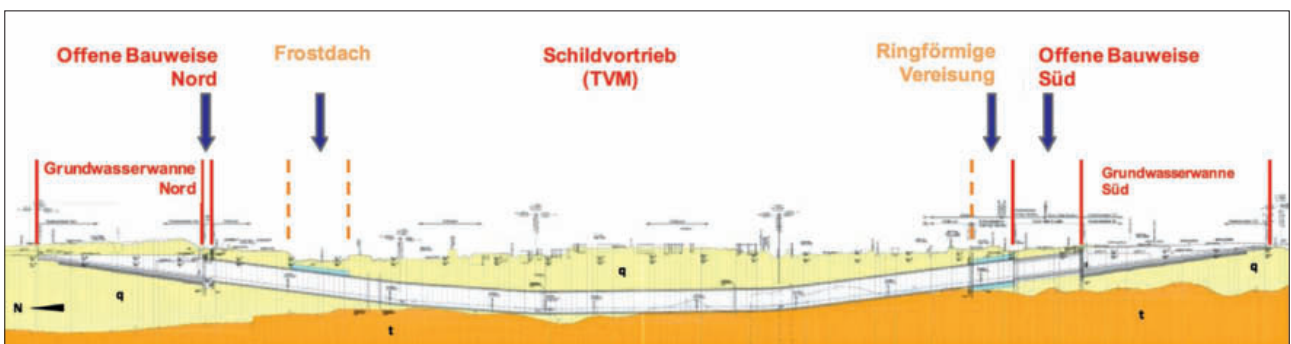
Im Dezember 2014 bestellte das beauftragte Konsortium (Ed. Züblin AG, technische Federführung/Hochtief AG, kaufmännische Federführung) die beiden TVM mit einem Schneidrad von 10,97 m Aussendurchmesser beim Lieferanten Herrenknecht AG. Das Gesamtinvestitionsvolumen für die beiden

tunnel, which will be connected to the tunnel bores by a further cross passage. All cross passages will be conventionally excavated (shotcrete method) under pre-support in the form of ground freezing to waterproof and stabilise the surrounding ground.

The vertical alignments will be lowered at the start of the north and south troughs in order to pass below the urban area. With a maximum gradient of 12.3 ‰, the alignment corresponds to the requirements of a level line. Due to the flat topography, the tunnel bores only have a maximum cover of about 20 m. In the urban area, a mass-spring system will be installed in some stretches to protect the residential areas above from noise and vibration. Tunnel driving will start in May 2016 and the total construction time for the tunnel structure is a forecast five years (Fig. 12).

The tunnel passes through Quaternary and Tertiary geology. Under the cohesive cover layer follow predominantly medium-dense to dense, locally loosely consolidated intercalations of Quaternary mixtures of gravels and sands with varying stone contents. Under these are Tertiary strata consisting of fine sands with various cohesive components or silts and clays. The Quaternary groundwater aquifer essentially consists of gravels and sands with a thickness of about 15 m in the south and up to about 40 m in the north. This is a uniform continuous pore groundwater aquifer with a free groundwater table. Assuming the highest groundwater table measured so far, a maximum water pressure in the tunnel invert of about 2.8 bar has to be expected. If the highest known groundwater table is assumed, then the entire trough and tunnel will lie in the groundwater (Fig. 9).

Due to the prevailing ground conditions, the client thus decided to excavate the mined part of the tunnel in closed mode with a tunnel boring machine (TBM). Both bores will be started from the north tunnel portal. The two TBMs will be shielded machines with slurry support to the face as Mixshields and will drive a circular section 3,674 m long in the west bore and 3,826 m long in the east bore. The excavated diameter is 10.97 m and the single-pass lining will consist of segments 50 cm thick.



Quelle/credit: Bung AG/DB Netz AG

9 Längensprofil Tunnel Rastatt mit vorgesehenen Baumethoden  
Longitudinal profile of the Rastatt Tunnel with intended construction methods





Quelle/credit: Herrenknecht AG

**10** Im Werk montierter Mixschild S-953 der Firma Herrenknecht AG am Tag der Abnahme im Werk Schwanau (8. Dezember 2015)  
Mixshield TBM S-953 from the company Herrenknecht AG on the day of acceptance at the works in Schwanau (8 December 2015)

TVM beträgt rund 36 Mio EUR. Die erste der beiden jeweils 93 m langen und 1750 t schweren Maschinen wurde zwischenzeitlich im Werk in Schwanau montiert (Bild 10). Am 8. Dezember 2015 fand die Abnahme der Maschine im Werk des TVM-Herstellers statt. Die zweite Maschine befand sich im Februar 2016 noch in der Montage.

Nach dem Transport der ersten TVM auf die Baustelle erfolgt deren Montage in der Startgrube im Bereich der nördlichen Grundwasserwanne mit einem geplanten Vortriebsbeginn im Mai 2016. Die zweite Maschine wird die Vortriebsarbeiten anschliessend mit einem zeitlichen Versatz von rund drei Monaten aufnehmen.

Die einschalige Tunnelschale mit einem Innendurchmesser von 9,6 m besteht aus sieben teiligen Tübbingringen mit einer Dicke von 50 cm und einer Breite von 2 m (Bild 11). Jeder eingebaute Ring wiegt rund 80 t. Die Tübbinge werden in einem Betonfertigteilwerk hergestellt, per Zug nach Rastatt und von dort per LKW zur Baustelle geliefert. Während des Tunnelvortriebs fallen Ausbruchsmassen von rund 700 000 m<sup>3</sup> an. Diese Massen werden über Förderleitungen von den Maschinen zu einer Separieranlage im Bereich der Baustelleneinrichtungsfläche auf der Nordseite transportiert und dort für die Weiterverwendung bzw. Deponierung aufbereitet. Der Abtransport von der Baustelle erfolgt anschliessend per LKW.

### 3.2 Vorgesehenes Bauprogramm

Im August 2012 wurde die Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) und der DB AG für den Streckenabschnitt von Karlsruhe nach Rastatt Süd in der Höhe von 693 Mio. EUR abgeschlossen, womit eine wichtige Voraussetzung für die zügige Realisierung des Streckenabschnitts 1 der Rheintalbahn geschaffen wurde.

Mit vom Bauherrn als Vorabmassnahmen identifizierten kleineren Bauweisen wurde noch im Jahr 2013 ein kurzfristiger

In December 2014, the contracting consortium (Ed. Züblin AG, technical lead/Hochtief AG, commercial lead) ordered the two machines with cutting wheel diameters of 10.97 m from the supplier Herrenknecht AG. The total investment cost for the two TBMs is about €36 million. The first of the machines, each with a length of 93 m and a weight of 1,750 t, has meanwhile been assembled at the works (Fig. 10). On 8 December 2015, the machine was accepted at the works of the TBM manufacturer. The second machine was still being assembled in February 2016.

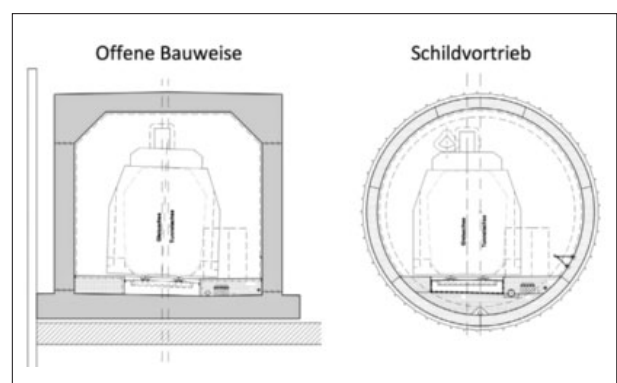
After transport of the first TBM to the site, it was assembled in the construction excavation in the northern groundwater trough, with the start of tunnelling planned for May 2016. The second machine will then start work with a delay of about three months.

The single-pass tunnel lining with an internal diameter of 9.6 m consists of seven-part segment rings with a thickness of 50 cm and a length of 2 m (Fig. 11). Each installed ring weighs about 80 t. The segments are being produced in a precast concrete works, transported to Rastatt by train and from there by truck to the site. The driving of the tunnels will produce about 700,000 m<sup>3</sup> of excavated material. The material will be transported through the slurry circuit from the machine to a separation plant on the site facilities area and there processed for reuse or tipping. The material is then transported from the site by truck.

### 3.2 Intended Construction Programmes

In August 2012, the financing agreement was concluded between the Federal Ministry of Transport and Infrastructure (BMVI) and the DB AG for the line section from Karlsruhe to Rastatt Süd in the sum of €693 million, which fulfilled an important precondition for the implementation of line section 1 of the Rheintalbahn line.

Construction started quite promptly in 2013 with smaller contracts identified by the client as preliminary works. The performance of the earthworks and the excavation for the



Quelle/credit: DB Netz AG

**11** Regelquerschnitte für Portalstrecke in offener Bauweise (links) und die Schildvortriebstrecke (rechts)  
Standard cross-section for portal sections in cut and cover (left) and the mechanically bored section (right)

Baubeginn Vorabmassnahmen/Construction start, preliminary works	Q3 2013
Fertigstellung Vorabmassnahmen/Completion of preliminary works	Q1 2016
Start Tunnelvortrieb/Start of tunnel driving	Q2 2016
Fertigstellung Tunnelrohbau inklusive Trogbauwerken/Completion of tunnel structure including troughs	Q2 2018
Fertigstellung freie Strecke/Completion of open-air line	Q4 2018
Fertigstellung Strecken- und Tunnelausrüstung/Completion of line and tunnel equipment	Q2 2020
Abschluss Abnahmen und Prüffahrten/Completion of acceptances and trial runs	Q2 2022
Inbetriebnahme/Opening for service	Q4 2022

**Table 1** Meilensteine des Bauprojekts Tunnel Rastatt

**Table 1** Milestones on the Rastatt Tunnel construction project

Baubeginn realisiert. Die Ausführung von Erdarbeiten und die Herstellung der Baugrube für den Trog Nord sowie der Bau einer Grundwasserwanne zur Unterquerung der Bundesautobahn (BAB) 5 südlich des Rastatter Tunnels wurden im Sommer 2013 begonnen und sind mittlerweile beendet.

Die Ausschreibung der Tunnelrohbauarbeiten wurde im August 2014 mit der Vergabe des Hauptloses an die ARGE Tunnel Rastatt erfolgreich abgeschlossen. Weitere Ausschreibungspakete für die freie Strecke sowie für die Tunnel- und Streckenausrüstung sind in Vorbereitung. Die vorgesehenen Meilensteine bis zur geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2022, mit der ein bedeutender Engpass südlich von Karlsruhe beseitigt wird, sind in **Table 1** aufgelistet; **Bild 12** zeigt den detaillierten Rahmenterminplan für den Tunnel Rastatt.

### 3.3 Dreimaliger Einsatz von Gefrierkörpern für den Tunnelvortrieb

Für die Erstellung des Tunnels Rastatt kommt bei drei Bauvorgängen das Gefrierverfahren (Soleverfahren) als Bauhilfsmassnahme zum Einsatz, nämlich:

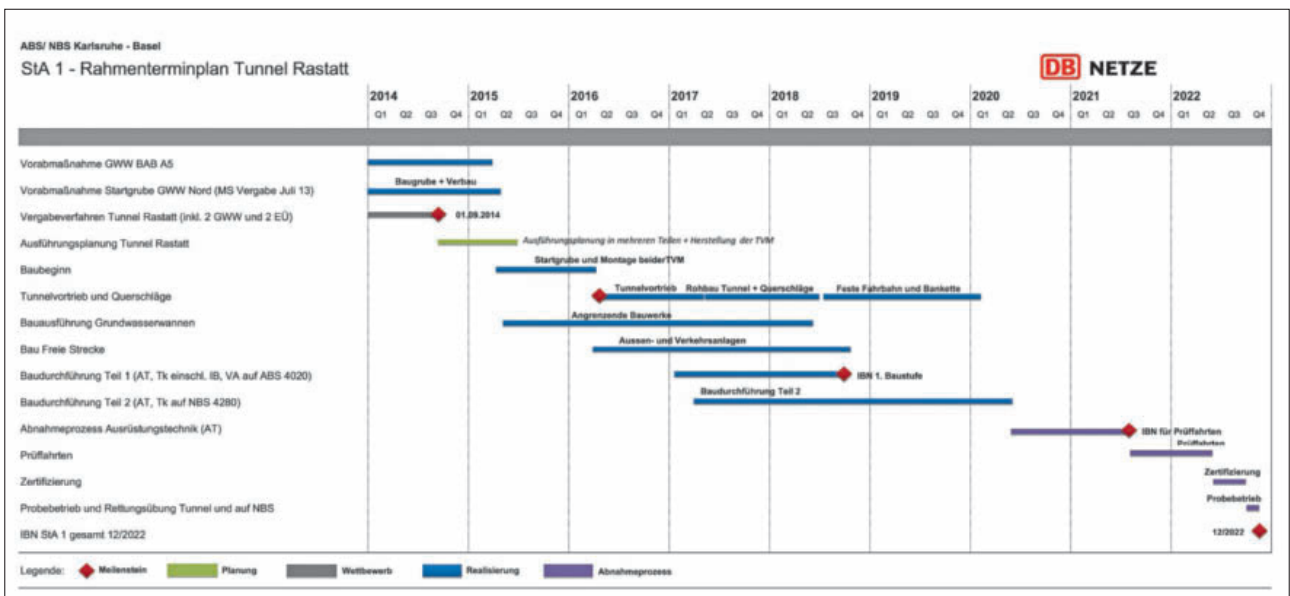
groundwater trough to pass under the federal highway A5 south of the Rastatt Tunnel was started in summer 2013 and has now been completed.

Tendering of the tunnel construction works was successfully completed in August 2014 with the award of the main contract to the consortium JV Tunnel Rastatt. Further tender packets for the open-air line and the tunnel and line equipment are in preparation. The intended milestones until the planned start of services in 2022, with which a significant bottleneck will be removed south of Karlsruhe, are listed in **Table 1**; **Fig. 12** shows the detailed framework schedule for the Rastatt Tunnel.

### 3.3 Three Uses of Ground Freezing for the Tunnel Drive

Ground freezing (brine process) will be used as an auxiliary construction method for three locations during the construction of the Rastatt Tunnel, specifically:

- a) to pass beneath the low point under the Federbach stream near the north portal due to the shallow cover;



**12** Genereller Bauablauf für den Tunnel Rastatt  
General construction programme for the Rastatt Tunnel

Quelle/credit: DB Netz AG

- a) zur Unterquerung der Federbachniederung im Bereich des Nordportals, aufgrund zu geringer Überdeckung;
- b) zur Herstellung von neun Querschlägen im wassergesättigten Lockermaterial, zwecks Abdichtung und temporärer Sicherung während des Vortriebs;
- c) zur Unterföhrung der bestehenden Rheintalbahn im Bereich des Südportals, als abdichtende und tragende Sicherung für eventuelle Interventionen.

Die nördlich der Stadt Rastatt liegende Federbachniederung wurde erst nach dem Erhalt des Planrechtes (1998) als Flora-Fauna-Habitat (FFH)-Naturschutzgebiet eingestuft. Diese Entscheidung erforderte trotz des gültigen Planrechtes eine neue Bewertung der Situation. Gespräche mit den Naturschutzbehörden im Rahmen der Fortführung der Entwurfsplanung (entspricht in der Schweiz der Stufe «Bauprojekt») zeigten, dass naturschutzrechtliche Bedenken gegen eine Aufschüttung bestehen, die zum Ausgleich der geringen Überlagerungshöhen das nötige Gegengewicht für den maschinellen Vortrieb erzeugt hätte.

Unter Berücksichtigung der erhöhten Naturschutzanforderungen wurden alternative Sicherungsmassnahmen untersucht. Offene Bauweisen wurden aufgrund des erheblichen Eingriffs in das Ökosystem der Federbachniederung ausgeschlossen. Bodenverfestigungen mittels Injektionen wurden ebenfalls von vornherein verworfen, da diese aufgrund der geringen Überdeckung das oberflächennahe Bodengefüge dauerhaft beeinflusst hätten. Als Ergebnis der Abwägung wurde schliesslich ein dachförmiger Gefrierschirm oberhalb des maschinellen Tunnelvortriebs als Variante mit den geringsten Eingriffen in das FFH-Gebiet identifiziert.

Dieser dachförmige Gefrierschirm («Frostdach») hat die Aufgabe, mit einer geschlossenen Abdeckung oberhalb der Tunnelfirste (Bild 13) Geländeaufbrüche und/oder Ausbläser während des TVM-Vortriebs zu verhindern. Mit dem gewählten Konzept werden die während des Vortriebs unter dem Frostdach entstehenden Auftriebskräfte über die Reibungskräfte in den Dachflächen nach unten in den umgebenden Baugrund eingeleitet.

Das Frostdach erstreckt sich über die komplette Unterföhrung der Federbachniederung mit Längen von ca. 185 m im Bereich der Oströhre und ca. 295 m im Bereich der Weströhre und wird durch Schrägbohrungen von der Geländeoberfläche aus hergestellt. Der Frostkörper soll gemäss den statischen Erfordernissen bis etwa auf die Tiefe der künftigen Schienenoberkante reichen, also eine Tiefe von ca. 12 bis 15 m aufweisen. Dazu werden ab der Geländeoberfläche von einem oberhalb der Tunnelachse angeordneten ca. 5 m breiten Streifen in einem Abstand von maximal 1,40 m Schrägbohrungen für die Gefrierlanzen unter einem Winkel von ca. 30 bis 50° aus der Vertikalen eingebracht. Die Bohrungen und die Gefriererohrungen können mittels Kleingeräten von der Geländeoberfläche aus erstellt werden, womit die Eingriffe in das FFH-Gebiet minimiert werden. Die Gefrier-

- b) to construct the nine cross passages in water-saturated soft ground, as a waterproofing and temporary support measure during the tunnel drive;
- c) to tunnel beneath the existing Rheintalbahn line near the south portal, as a waterproofing and load-bearing support for any interventions.

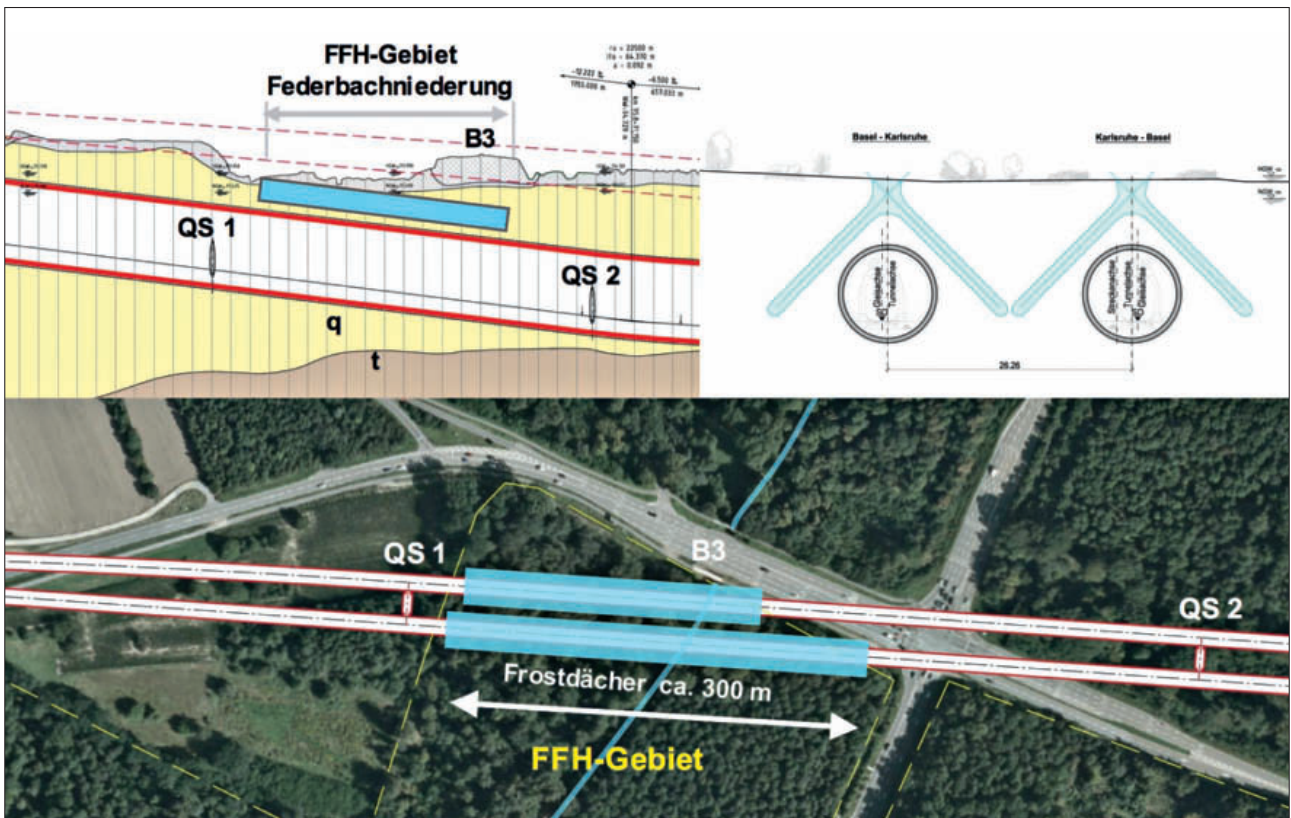
The lowland of the Federbach river north of Rastatt was first categorised as a Flora-Fauna-Habitat (FFH) nature conservation area after the receipt of the planning approval. Despite the valid approval, this decision demanded a re-evaluation of the situation. Discussions with the nature protection authorities in the course of continued work on the preliminary design showed that there are reservations from the point of view of nature conservation against filling of the area, which could have given the necessary opposing load for the mechanised tunnel drive.

Considering the increased requirements of nature conservation, alternative support measures were investigated. Cut and cover construction would represent a considerable encroachment in the ecosystem of the Federbach lowland. Ground freezing by injection was also rejected in advance, since this would permanently affect the soil structure near the surface due to the shallow cover. The final result of the considerations was a frozen canopy above the tunnel drive as the variant with the least impact on the FFH area.

This roof-shaped frozen canopy ("frozen roof") is intended to prevent heave failure of the ground and/or blowouts during the TBM drive with a closed cover above the tunnel crown (Fig. 13). With the chosen concept, heave forces created under the frozen canopy during the tunnel drive will be transferred downward into the surrounding ground through the friction forces in the roof surfaces.

The frozen roof extends along the entire passage beneath the Federbach lowland with a length of about 185 m in the east bore and about 295 m in the west bore, and will be created from ground level through inclined boreholes. The frozen body should according to the structural requirements extend down to about top of rail level, a depth of about 12 to 15 m. For this purpose, inclined boreholes will be drilled from the surface at a maximum spacing of about 1.40 m for the freezing lances at an angle of 30 to 50° to the vertical from a strip 5 m wide above the tunnel centreline. The drilling and installation of freezing pipes can be undertaken from the surface using only small machines, which should minimise impact on the FFH area. The freezing plant and the site facilities area will be situated outside the FFH area. The energy consumption for the freezing plant and the maintenance of the frozen body is about 3.82 million kWh.

Due to its necessary size and duration of use, the frozen body will be produced by brine freezing. The thermal calculations for the frozen roof take into account (to be on the safe side) a groundwater flow speed of up to 0.5 m/d. Under



Quelle/credit: DB Netz AG/Bung AG

13 Schemaskizze zur dachförmigen Bodenvereisung im Bereich der Federbachsenke  
Schematic sketch of the roof-shaped ground freezing in the Federbach lowland

anlage und die Baustelleneinrichtungsflächen werden ausserhalb des FFH-Gebiets angeordnet. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der Frostkörper beträgt rund 3,82 Mio. kWh.

Aufgrund der erforderlichen Grösse des Frostkörpers sowie der erforderlichen Nutzungsdauer wird der Frostkörper mittels Solevereisung hergestellt. Die thermischen Berechnungen für das Frostdach berücksichtigen (auf der sicheren Seite liegend) eine Grundwasserfliessgeschwindigkeit bis zu 0,5 m/d. Unter den angesetzten Randbedingungen wurden Aufgefrierzeiten von ca. 25 Tagen prognostiziert.

Der Aufbau des Frostkörpers bis zur statisch erforderlichen Stärke von ca. 1,00 bis 2,00 m sowie der Erhaltungsbetrieb des Frostkörpers werden durch Temperaturmessungen kontrolliert. Beim Aufgefrieren und späteren Abtauen sind Frosthebungen und Tausetzungen zu erwarten. Im Bereich der Federbachniederung befinden sich allerdings keine setzungsempfindlichen Bauwerke.

Der dauerhafte Eingriff in das Bodengefüge entsteht bei der Vereisungslösung im Wesentlichen durch das Verbleiben von Gefrierlanzen und Verdämmung aus zementgebundenen Mörteln im Boden. Der Eiskörper selbst ist vollkommen reversibel. Nach dessen Abtauen verbleiben ausser den Lanzen und der Verdämmung keine Bauteile im Boden. Die Gefrierlanzen aus Stahl werden nach dem Abschluss der Arbeiten

the assumed constraints, freezing times of about 25 days are forecast.

The formation of the frozen body to its structurally required thickness of 1.00 to 2.00 m and the maintenance of the frozen body will be controlled by temperature measurements. As the ground is frozen and later thawed, associated heaving and settlement are to be expected. In the Federbach lowland, however, there are no structures that are susceptible to settlement.

The permanent impact on the soil structure from ground freezing essentially derives from the freezing lances and stemming of cement-bound mortar remaining in the ground. The frozen body itself is completely reversible. After it has thawed, no construction elements remain in the ground apart from the lances and the stemming. The steel freezing lances are cut off and removed after the completion of freezing work at a depth of about 1.00 m below ground level. The chosen construction process results in less total impact on the ecosystem of the Federbach lowland than temporary filling, although at higher cost. This however has to be invested to ensure acceptance for the project and to preserve the environment.

In the course of the new construction of the Rastatt Tunnel, the tunnel alignment passes beneath the Rheintalbahn line at a glancing angle along a total length of about 350 m and

bis auf eine Tiefe von ca. 1,00 m unter Geländeoberkante (GOK) gekappt und entfernt. Mit dem gewählten Bauverfahren ergeben sich in der Summe geringere Eingriffe in das Ökosystem der Federbachniederung als bei einer temporären Überschüttung, jedoch zum Preis höherer Kosten. Diese mussten aber zur Sicherung der Akzeptanz des Projekts und zur Schonung der Umwelt investiert werden.

Im Zuge des Neubaus des Tunnels Rastatt unterquert die Tunnelstrecke auf einer Gesamtlänge von rund 350 m die Rheintalbahn im schleifenden Schnitt, mit relativ geringer Überdeckung von teilweise weniger als 5,0 m. Die Rheintalbahn kann aufgrund ihrer betrieblichen Bedeutung nicht gesperrt werden, und Eingriffe in den Bahnbetrieb sind möglichst zu vermeiden.

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Sicherheit und Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs der bestehenden Rheintalbahn sah der der Amtsentwurf für diesen Tunnelabschnitt als Vortriebsverfahren einen Spritzbetonvortrieb im Schutz einer ringförmigen Vereisung vor. Die Vortriebsmaschinen sollten ursprünglich in Zwischenschächten unmittelbar nördlich der Rheintalbahn vor der Unterquerung geborgen werden. Mit Blick auf ein beiderseitiges wirtschaftliches Optimierungspotenzial wurde der Vortrieb unter der Rheintalbahn vom Unternehmer Bau in einem Sondervorschlag mittels TVM angeboten und nach Feststellung der grundsätzlichen technischen Gleichwertigkeit und Machbarkeit beauftragt (Bild 14). Dabei stellt der TVM-Vortrieb in einem nahezu vollständig aufgefrorenen Bodenkörper ein Novum im maschinellen Tunnelbau dar.

Die grundlegenden Anforderungen an den ringförmigen Eiskörper sind die durchgehende Wasserdichtigkeit der Schale und der Anschlüsse an die begrenzenden Verbauwände der Vereisungsschächte sowie die statische Tragfähigkeit des Eisrings. Hierdurch sollen mögliche Einwirkungen auf die Bestandstrecke (beispielsweise Verformungen, Verwindungen etc.) – insbesondere bei erforderlichen Interventionen an der Ortsbrust, zum Beispiel für Hindernisbeseitigungen – auf das geringstmögliche Mass reduziert werden.

Der Vereisungsbereich weist je Röhre eine Länge von ca. 220 m auf. Aufgrund des schleifenden Schnitts mit der Rheintalbahn sind die Vortriebsstrecken der einzelnen Röhren in Längsrichtung gegeneinander versetzt. Die Lage wird durch die vorhandene Rheintalbahn bestimmt. Zunächst werden für beide Röhren nördlich und südlich der Rheintalbahn Vereisungsschächte aus Kombinationen von überschrittenen Bohrpfehlen und Schlitzwänden hergestellt. Von diesen Schächten aus werden Gefrierlanzen ringförmig, im Abstand von rund 1,00 m untereinander und von rund 2,00 m zur Aussenkante der Tunnelinnenschale eingebracht, um den späteren Ausbruchquerschnitt sowie Messbohrungen zur Kontrolle des Aufbaus des Eiskörpers vorzutreiben. Die jeweils rund 110 m langen Horizontalbohrungen werden als gesteuerte Bohrungen

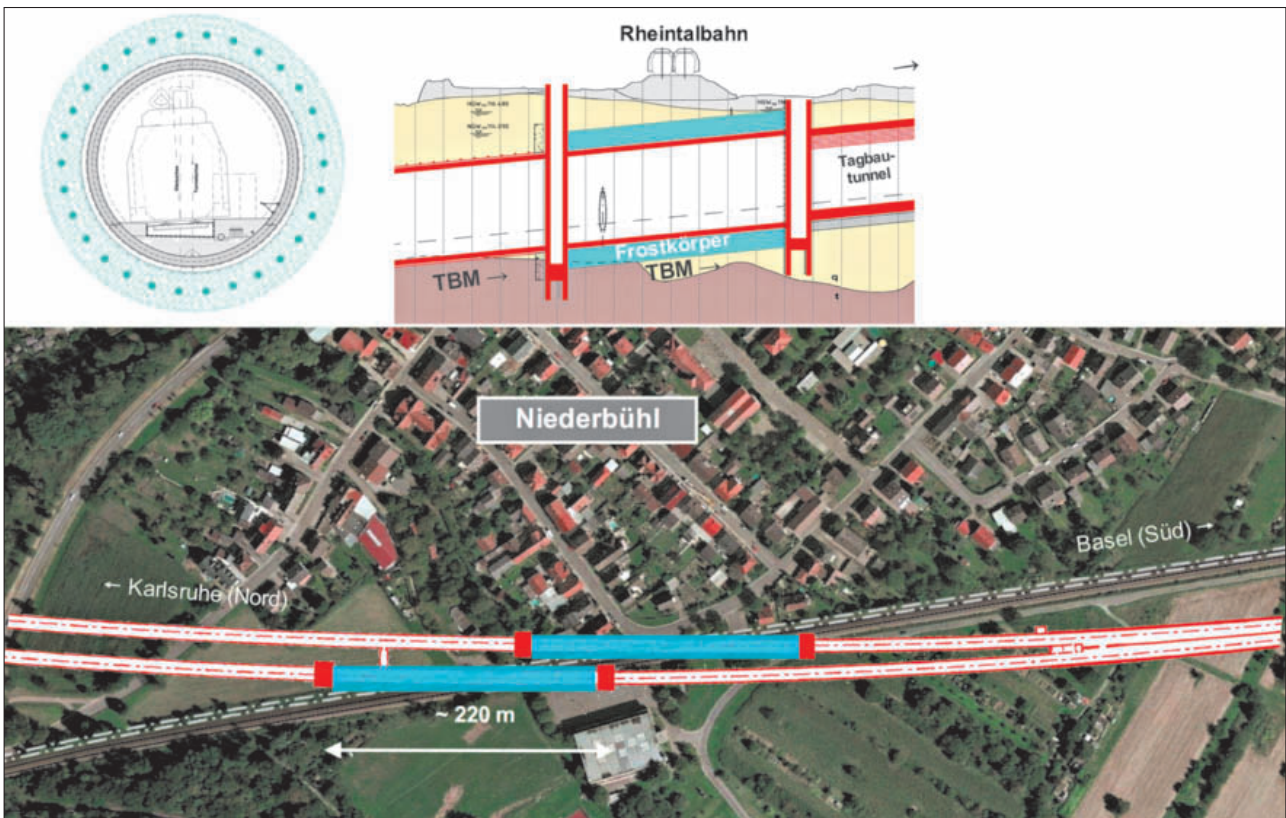
with shallow cover, less than 5.0 m in places. The Rheintalbahn cannot be closed due to its operational significance and interruptions of rail operations are to be avoided as far as possible.

Due to the very stringent requirements for safety and maintenance of rail operation on the existing Rheintalbahn line, the official design for this section of the tunnel intended conventional excavation by the shotcrete method under the protection of ring-shaped ground freezing. The tunnel boring machines should originally have been removed from intermediate shafts immediately before the crossing of the Rheintalbahn. With a view to the economic optimisation potential for both sides, the contractor proposed as an alternative to tunnel under the Rheintalbahn with a TBM and after this had been investigated, the basic technical equivalence and feasibility of the proposal was established and the contract was awarded on this basis (Fig. 14). To bore a tunnel with a TBM through an almost completely frozen body will represent a first in mechanised tunnelling.

The basic requirements for the annular frozen body are continuous water-tightness of the layer and the junctions with adjacent support walls and the structural safety of the load-bearing ring. This is intended to reduce to a minimum any effects on the existing line (for example deformations, distortions etc.), especially in the case of any necessary interventions at the face, for example to remove obstructions.

The frozen zone has a length of about 220 m for each tunnel bore. Due to the glancing angle with the Rheintalbahn, the bored sections of each tunnel are staggered to each other. The location is determined by the existing line. First, freezing shafts are excavated for both bores north and south of the Rheintalbahn with support in the form of a combination of secant pile walls and diaphragm walls. From these shafts, the freezing lances are installed in a ring shape with a spacing of about 1.00 m and about 2.00 m from the outside face of the tunnel inner lining in order to drive the future excavated cross-section and measurement holes to check the formation of the frozen body. The horizontal boreholes each about 110 m long are drilled by directional drilling. In the upper half of the perimeter, the holes are drilled by auger boring with a jacked casing and in the lower half by horizontal directional drilling. After the drilling of the holes for ground freezing and monitoring, they are successively surveyed in three dimensions. After completion, the freezing lances are fed brine as refrigerant and the frozen body is formed. The freezing plant and the site facilities area are located outside the freezing shaft. The electricity consumption of the freezing plant for the formation and maintenance of the frozen body is estimated at about 17.00 million kWh.

The thermal calculations for the frozen body take into account a groundwater flow speed of up to 1.30 m/d. Under



Quelle/credit: DB Netz AG/Bung AG

14 Schemaskizze zur ringförmigen Bodenvereisung im Bereich der Rheintalbahnunterquerung  
Schematic sketch for ring-shaped ground freezing at the crossing of the Rheintalbahn line

ausgeführt. Auf den oberen Umfanghälften erfolgen die Bohrungen mittels Pressbohrverfahren und auf den unteren Hälften mittels Spülbohrverfahren. Nach Herstellung der Vereisungs- und Messbohrungen werden diese sukzessive räumlich aufgemessen. Nach Fertigstellung werden die Gefrierlanzen mit dem Kältemedium Sole beschickt und dadurch der Eiskörper aufgebaut. Die Gefrieranlage und die Baustelleneinrichtungsflächen werden ausserhalb der Vereisungsschächte angeordnet. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der Frostkörper wird auf ca. 17,00 Mio. kWh geschätzt.

Die thermischen Berechnungen für den Frostkörper berücksichtigen eine Grundwasserfließgeschwindigkeit bis zu 1,30 m/d. Unter den angesetzten Randbedingungen wurden Aufgefrierzeiten von ca. 50 Tagen mit einem ungefrorenen Kern von rund 9,00 m prognostiziert. Bei Filtergeschwindigkeiten von mehr als 1,50 m/d kann der Frostkörper voraussichtlich mit einer Gefrierrohrreihe (Abstand 1,0 m) nicht wasserdicht hergestellt werden, bzw. die Gefrierzeit für die Herstellung eines wasserdichten Frostkörpers wird deutlich ansteigen. Als Abhilfe kann auf der Anströmseite eine zweite Gefrierrohrreihe angelegt werden, oder es können alternativ auf der Anströmseite von der Oberfläche aus vertikale Gefrierbohrungen für eine Stickstoffvereisung ausgeführt werden. Beide Massnahmen bewirken eine Abkühlung des Grundwassers und führen somit zu schnellerem Gefrieren des Bodens. Die erforderliche Auslegung der Gefrierkon-

the assumed constraints, the freezing times are forecast at 50 days, with an unfrozen core of about 9.00 m. If the filter speeds are more than 1.50 m/d, the frozen body can probably not be made water tight or else the freezing time for the production of an appropriate frozen body would be greatly increased. If required, a second pipe can be installed on the flow side, or alternatively vertical freezing holes could be drilled from the surface for nitrogen freezing. Both measures would cause cooling of the groundwater and thus lead to more rapid freezing of the ground. The required arrangement of the freezing plant was at the stage of construction planning at the start of 2016.

The formation and maintenance of the frozen bodies is to be monitored by measuring temperature, water pressure, water quantity and brine temperature and flow. While the frozen body is being formed and later thawed, frost heave and thaw settlement of about 3.5 to 4.0 cm are to be expected. Deformations of the Rheintalbahn will therefore have to be continuously checked with automatic surveying above the freezing zones. In case any corrections are necessary to the trackbed (for example tamping), the appropriate machinery and materials will be kept ready so that corrections can be undertaken promptly.

For the mechanised tunnel drive inside the fully closed frozen body under the particular conditions of low settlement, various questions were discussed in the course of designing

struktionsplanung befand sich zu Beginn des Jahres 2016 in der Ausführungsplanung.

Der Aufbau sowie der Erhaltungsbetrieb des Frostkörpers werden durch Temperaturmessungen, Wasserdruckmessungen, Wassermengenmessungen sowie Soletemperatur- und Durchflussmessungen überwacht. Beim Aufgefrieren und späteren Abtauen sind Frosthebungen und Tausetzungen in der Größenordnung von 3,5 bis 4,0 cm zu erwarten. Die Verformungen der Rheintalbahn müssen deshalb über den Vereisungsbereichen durch automatische Lagemessungen kontinuierlich kontrolliert werden. Für gegebenenfalls erforderliche Oberbaukorrekturen (zum Beispiel Nachstopfen) werden die entsprechenden Geräte sowie Materialien vorgehalten und bei Bedarf Korrekturen kurzfristig durchgeführt.

Für den maschinellen Vortrieb innerhalb eines vollständig geschlossenen Eiskörpers unter der besonderen Prämisse eines verformungsarmen Vortriebs wurden im Zuge der TVM-Konzipierung verschiedene Fragestellungen diskutiert. Dabei galt es die folgenden maschinen- und verfahrenstechnischen Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- die Wärmeenergiebilanz der Vortriebsmaschine im Eiskörper – einerseits ein übermässiger Wärmeenergieeintrag durch die TVM mit der Folge von Auftaueffekten als Worst Case, andererseits ein Festfrieren von abgeschlossenen «kalten» Bereichen der Maschinenkonstruktion der TVM während Stillständen;
- das Aufstellen von Störfallszenarien mit Darstellung von Bewältigungsstrategien in Form von Verfahrens- und Arbeitsanweisungen, unter anderem bezüglich «Festfrieren und Wiederaufahrt» und «Hindernissbewältigung»;
- die Eignung der installierten Aggregate und eingesetzten Betriebs- und Schmierstoffe;
- der Werkzeugbesatz des Bohrkopfs und die Abbaubarkeit des Frostkörpers inklusive der Berücksichtigung von Vibrationsemissionen infolge Mixed-Face-Konditionen;
- der Mischungsentwurf für den Ringspaltmörtel unter Berücksichtigung der bauverfahrenstechnischen und beton-technologischen Aspekte – unter anderem Vermeidung freien Überschusswassers im Steuer- und Ringspalt.

Nach mehrfachen intensiven Diskussionen der vorher aufgeführten Fragestellungen und Aspekte unter Zugrundelegung dezidierter wärmetechnischer Berechnungen kann beispielhaft Folgendes festgestellt werden:

- Unter Beachtung von Zusatzmassnahmen kann die Gefahr eines grossflächigen Anfrierens der TVM sowie eines unzulässigen Auftauens des Eiskörpers weitestgehend ausgeschlossen werden. Diese Zusatzmassnahmen umfassen zum einen die Reduzierung der Umlaufmenge der Suspension zur Sicherstellung eines nur geringen Wärmeeintrags und zum anderen den Betrieb ausgewählter Aggregate zur Verhinderung eines Festfrierens.
- Als kritischer Bereich wurde die Schildschwanzdichtung identifiziert, da hier nur ein geringer Wärmeeintrag statt-

the TBM. The following aspects had to be considered regarding the machine and the process technology:

- the thermal energy balance of the TBM inside the frozen body, on the one hand excessive heat introduction by the TBM with a thawing effect as a worst case scenario, or on the other hand enclosed “cold” parts of the machine freezing solid and jamming during stoppages;
- the conception of mishap scenarios with strategies to overcome them in the form of process and working instructions including the scenarios “freezing solid and restarting” and “removal of obstructions”;
- the suitability of the installed equipment and the consumables and lubricants being used;
- the tools fitted to the cutting wheel and the cuttability of the frozen body including consideration of vibration resulting from mixed face conditions;
- the mix recipe for the annular gap grout taking into account the aspects of construction process and concrete technology, for example the avoidance of free excess water in the control and annular gaps.

After many intensive discussions of the questions listed above and with the assistance of appropriate thermal calculations, the following can be stated, for example:

- With the taking of additional measures, the danger of a large-scale freezing solid of the TBM can be largely ruled out. These additional measures include reduction of the circulation quantity of slurry to ensure only a small heat input and also the operation of machinery selected for the purpose to prevent freezing solid.
- The shield tail seal was identified as a critical point since there is only a small heat input here and thus freezing solid during a stoppage cannot be fully ruled out. With an arising bonding stress of 1 MN/m<sup>2</sup> and the limited surface area of the shield tail seal, the thrust presses should be large enough to ensure restarting in case of a part of the shield skin freezing solid.
- Due to the high through flow volume and the process heat, no negative effects of the temperature on the bentonite suspension are to be expected.
- According to the current state of knowledge, the use of shield tail sealants at temperatures below 0 °C does not lead to any impairment of function. Further information will be gained through a field test.
- Current planning for the material to fill the annular gap intends the use of single-component wet mortar with the addition of an accelerator in the form of calcium aluminates so that the hardening process is controlled and “free” drainage water in the annular gap is prevented or at least can be reduced.

In the course of further construction planning, process and working instructions will be produced to ensure high-quality tunnelling and lining. This includes for example regular temperature measurements in the shield and the determination of dependencies between time, temperature development and advance rate. Through the consideration of the stated

findet und somit ein Anfrieren bei Stillstand nicht ausgeschlossen werden kann. Mit einer entstehenden Verbundspannung von  $1 \text{ MN/m}^2$  und der begrenzten Oberfläche im Bereich der Schildschwanzdichtung sind die Vortriebspresenkräfte ausreichend dimensioniert, um eine Weiterfahrt im Falle des Festfrierens eines Teils des Schildmantels sicherzustellen.

- Aufgrund der hohen Durchsatzvolumen und der Prozesswärme sind negative Auswirkungen der Temperaturen auf die Bentonitsuspension nicht zu erwarten.
- Gemäss derzeitigen Erkenntnissen führt der Einsatz von Schildschwanzdichtmasse bei Temperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  nicht zu Funktionsbeeinträchtigungen. Weitergehende Informationen werden im Rahmen eines Feldversuchs gewonnen.
- Die aktuellen Planungen zum Ringspaltverfüllmaterial sehen einen einkomponentigen Nassmörtel mit Zugabe einer Beschleunigerkomponente in Form von Calciumaluminaten vor, sodass der Ansteifprozess gesteuert und «freies» Dränagewasser im Ringspalt verhindert bzw. reduziert werden kann.

Im Rahmen der weiteren Ausführungsplanung werden Verfahrens- und Arbeitsanweisungen zur Gewährleistung eines sicheren, qualitativ hochwertigen Vortriebs und Ausbaus aufgestellt. Dazu gehören beispielsweise die Sicherstellung von regelmässigen Temperaturmessungen im Schild sowie die Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Zeit, Temperaturentwicklung und Vortriebsgeschwindigkeit. Durch die Berücksichtigung der genannten speziellen Randbedingungen eines Vortriebs im Eiskörper und die entsprechenden maschinen- und verfahrenstechnischen Adaptionen kann die Unterquerung der Rheintalbahn mit einer TVM sicher beherrscht werden.

Wegen des oberflächennahen Grundwasserspiegels muss beim Tunnel Rastatt das Gefrierverfahren auch für die Erstellung aller neun Querschläge angewendet werden, da

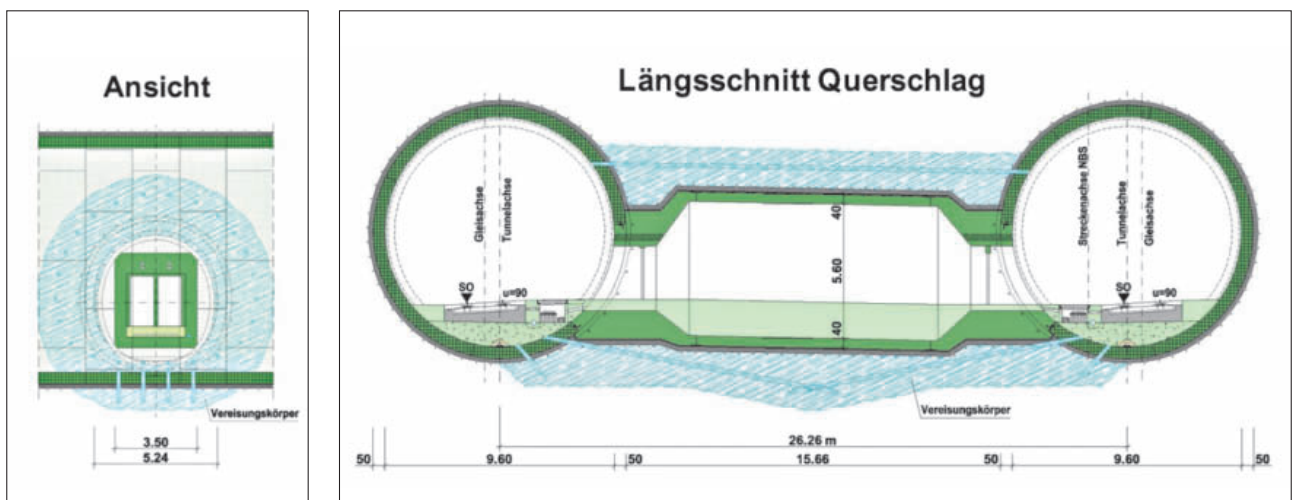
special conditions for driving through a frozen body, and the appropriate adaptations of the machinery and process technology, the crossing of the Rheintalbahn with a TBM can be successfully mastered.

Due to the shallow groundwater table, the ground freezing process will also have to be used for all nine cross passages at the Rastatt Tunnel, since they are all completely in the groundwater. The brine process will also be used for the freezing of the ground around the cross passages (Fig. 15).

The freezing holes will be drilled with the use of a preventer from both tunnel bores, so freezing plant will be needed in both bores. For the excavation work, a frozen body thickness of at least 1.50 m is required. The freezing pipes will be installed at a spacing of about 0.75 m from the excavation profile and arranged so that the maximum freezing pipe spacing of the horizontal borings for all cross passages is planned to be between 1.20 and 1.40 m. In the invert, the borings from both tunnels will have to be drilled at a slight angle to the horizontal for geometrical reasons in order to be able to form a closed frozen ring.

The planned arrangement of the freezing pipes will produce the required geometry of the frozen body in about 30 to 50 days so that excavation can proceed. After completion of the freezing process, the lances are withdrawn with grout being injected as they are withdrawn. The holes through the segments will be permanently filled.

The monitoring of the extent and temperature of the frozen body will also be undertaken here by measuring temperatures at various survey sections as well as the junctions to the segment tube. The electricity consumption of the freezing plant for the formation and maintenance of the nine frozen bodies is about 2.94 million kWh. The first freezing works (for the section under the Federbach lowlands) will start in 2016.



Quelle/credit: Bung AG

15 Geplante Vereisung der Querschläge im Tunnel Rastatt  
Planned freezing for the cross passages in the Rastatt Tunnel



alle vollkommen im Grundwasser zu liegen kommen. Bei der Vereisung der ringförmigen Frostkörper um die Querschlüsse herum (Bild 15) wird ebenfalls das Soleverfahren angewendet.

Die Gefrierrohre werden mittels Preventerbohrungen von beiden Tunnelröhren aus hergestellt, wodurch Gefrieranlagen in beiden Tunnelröhren erforderlich werden. Für die Durchführung des Ausbruchs ist eine Frostkörperdicke von mindestens 1,50 m erforderlich. Die Gefrierrohre werden in einem Abstand von ca. 0,75 m vom Ausbruchrand angeordnet, wobei der maximale Gefrierrohrabstand der Horizontalbohrungen aller Querschlüsse planmässig zwischen 1,20 bis 1,40 m liegen wird. Im Sohlenbereich müssen die Bohrungen aus geometrischen Gründen aus beiden Tunnelröhren als leicht gegenüber der Horizontalen geneigte Schrägbohrungen ausgeführt werden, um einen geschlossenen Vereisungsring aufbauen zu können.

Bei der geplanten Gefrierrohranordnung ist die erforderliche Frostkörpergeometrie nach einer Gefrierdauer von etwa 30 bis 50 Tagen erreicht, um den Vortrieb durchzuführen. Nach Beendigung des Vereisungsprozesses werden die Gefrieranlagen gezogen und während des Ziehens verpresst. Die Bohröffnungen in den Tübbingröhren werden dauerhaft und ausschleudersicher verschlossen.

Die Überwachung von Ausdehnung und Temperatur der Frostkörper erfolgt auch hier mittels Temperaturmessungen in verschiedenen Messquerschnitten sowie an den Anschlussstellen an die Tübbingröhren. Der Energiebedarf der Gefrieranlage für den Aufbau und Unterhalt der neun Frostkörper beträgt ca. 2,94 Mio. kWh. Mit den ersten Vereisungsarbeiten (für die Unterquerung der Federbachniederung) wird im Jahr 2016 begonnen.

## 4 The Rastatt Tunnel – the First Large BIM Pilot Project for the Construction of a Rail Tunnel in Germany



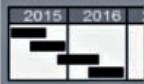

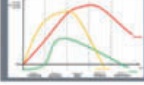
### 4.1 Recommendations of the Major Projects Reform Commission of the BMVI

Like every modern industrial nation, Germany needs major projects in order to keep industry competitive in the future. This applies to infrastructure projects to the same degree as for building projects. Out of the total German construction volume of about €330 billion (= 100%, data 2014), only 8.3 % is publicly funded civil engineering works. By far the largest part of the investment, 83 %, is for building, divided into residential building (55.6%), commercial building (21.6%) and public building (5.6%). The federal government invested €11 billion in transport routes in 2014, although with a slightly rising tendency. Considering these figures, it is not actually surprising that the subject of BIM has primarily been driven by the building industry.

Experience in recent years shows that many large projects were not in a position to maintain the agreed cost and time frames and sometimes not the required quality. In April 2013, therefore, the then federal Ministry of Transport, Construction and Town Development formed the Major Projects Reform Commission in order to ensure that public funds are efficiently used, citizens can develop more confidence in large projects and the international good reputation of the German building and consulting industry is preserved.

At the end of June 2015, the final report of the reform commission was completed. It included recommendations on the following themes [9]:

- cooperative design as a team;
- first design, then build;
- binding cost-effectiveness calculation;
- clear processes and responsibilities/competence centres;

	Bessere Planungsqualität Better design quality	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kollisionsprüfungen, d.h. automatische Prüfung auf Widersprüche zwischen den Gewerken (3D-BIM) Clash detection, i.e. automatic check for inconsistencies between the trades (3D BIM)</li> <li>■ Varianten- und Fertigungsanalysen vor Baubeginn Variants and analyses of constructability before start of construction</li> </ul>
	Höhere Kostensicherheit/ Effizienzsteigerung Higher cost efficiency and efficiency improvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Genauere, vollständige Mengen-/Kostendaten in frühen Projektphasen (4D-BIM) Exact and complete quantities / cost data in early projectphases (4D BIM)</li> <li>■ Transparente Aktualisierung abgestimmter Kostenmodelle Transparent update of coordinated cost models</li> </ul>
	Höhere Termsicherheit Better completion of deadlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bauablaufmodelle in abgestimmten, integrierten Terminmodellen (5D-BIM) Construction process defined in integrated time schedules (5D BIM)</li> <li>■ Minimierung „vergessener Leistungen“ in Terminplänen Minimisation of forgotten tasks in schedules</li> </ul>
	Akzeptanzsteigerung großer Infrastrukturprojekte Increase acceptance of major projects	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Visualisierung komplexer Gesamtzusammenhänge eines Bauwerks Visualisation of complex overall context of a construction</li> <li>■ Durchführung von verschiedenen Variantenbetrachtungen Easy execution of studies of various alternatives</li> </ul>
	Bessere Lebenszyklus- betrachtungen Better lifecycle analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Frühe Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzanalysen und Betriebssimulation vor Baubeginn Early analysis of energy consumption, CO<sub>2</sub> footprint and operation simulation</li> <li>■ Frühzeitige Übergabe der digitalen Baudokumentation Early delivery of the digital construction documentation</li> </ul>

Quelle/Credit: DB Netz AG

16 Generelle Zielsetzungen bei der Einführung von BIM bei der Deutschen Bahn  
General aims of the introduction of BIM at German Railways

### 4 Der Tunnel Rastatt – das erste grosse BIM-Pilotprojekt beim Bau von Eisenbahntunneln in Deutschland

#### 4.1 Empfehlungen der Reformkommission Bau von Grossprojekten des BMVI

Wie jede moderne Industrienation, benötigt Deutschland Grossprojekte, um mit seiner Wirtschaft auch in der Zukunft international wettbewerbsfähig zu sein. Dies gilt für die Infrastrukturbauten in gleichem Mass wie für den Hochbau. Vom gesamten deutschen Bauvolumen von rund 330 Mrd. EUR (= 100 %, Stand 2014) entfallen lediglich 8,3 % auf den öffentlichen Tiefbau, was einem Volumen von 27,4 Mrd. EUR entspricht. Der weitaus grösste Teil der Investitionen, nämlich beinahe 83 %, fliesst in den Hochbau, aufgeteilt in Wohnungsbau (55,6 %), gewerblichen Hochbau (21,6 %) und öffentlichen Hochbau (5,6 %). Der Bund in Deutschland verausgabte für den Bau von Verkehrswegen per 2014 11 Mrd. EUR, jedoch mit derzeit deutlich steigender Tendenz. Bei diesen Zahlen ist es jedoch nicht verwunderlich, dass das Thema BIM bisher primär vom Hochbau getrieben war.

Die Erfahrung aus den letzten Jahren hat gezeigt, dass viele Grossprojekte nicht in der Lage waren, den vereinbarten Kosten- und Terminrahmen und teilweise auch die geforderte Qualität einzuhalten. Im April 2013 hat deshalb das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung die Reformkommission Bau von Grossprojekten gegründet, um sicherzustellen, dass öffentliche Mittel effizient verausgabt werden, die Bürgerinnen und Bürger ein stärkeres Vertrauen in Grossprojekte entwickeln können und damit auch der bis dahin international gute Ruf der deutschen Bau- und Planungswirtschaft gesichert bleibt.

Ende Juni 2015 wurde der Endbericht der Reformkommission abgeschlossen. Dieser enthielt zehn Empfehlungen zu den folgenden Themenkreisen [9]:

- kooperatives Planen im Team;
- erst planen, dann bauen;
- verbindliche Wirtschaftlichkeitsrechnung;
- klare Prozesse und Zuständigkeiten/Kompetenzzentren;
- stärkere Transparenz und Kontrolle;
- Risikomanagement und Erfassung von Risiken im Haushalt;
- Vergabe an den Wirtschaftlichsten, nicht den Billigsten;
- partnerschaftliche Projektzusammenarbeit;
- aussergerichtliche Streitbeilegung;
- Nutzung digitaler Medien – BIM.

Unter dem jetzigen Verkehrsminister Alexander Dobrindt bekam die Empfehlung zu BIM ab Herbst 2013 starken Aufwind, sah dieser doch die grosse Chance, mit der Anwendung von BIM einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung von Grossprojekten zu leisten und mit dessen Einsatz mindestens Teilbereiche der anderen Empfehlungen günstig zu beeinflussen. Die Deutsche Bahn stellte dem Ministerium im Jahr 2014 zwei grosse Infrastrukturprojekte, nämlich den Bau der Filstalbrücke (Neubaustrecke Wendlingen–Ulm) und den Tunnel Rastatt zur Verfügung.

- stronger transparency and controls;
- risk management and recording of risks in the budget;
- award to the most economically beneficial, not the cheapest;
- project collaboration as partners;
- out-of-court dispute settlement;
- use of digital media – BIM.

Under the current transport minister Alexander Dobrindt, the recommendation for BIM received strong backing from autumn 2013, as he saw this as a good opportunity to make an essential contribution to the stabilisation of large projects through the use of BIM and with its use, be able to favourably influence at least some of the other recommendations. German Railway made two large infrastructure projects available to the ministry in 2014, specifically the building of the Filstal Bridge (new line from Wendlingen to Ulm) and the Rastatt Tunnel.

#### 4.2 The BIM Pilot Project Rastatt Tunnel

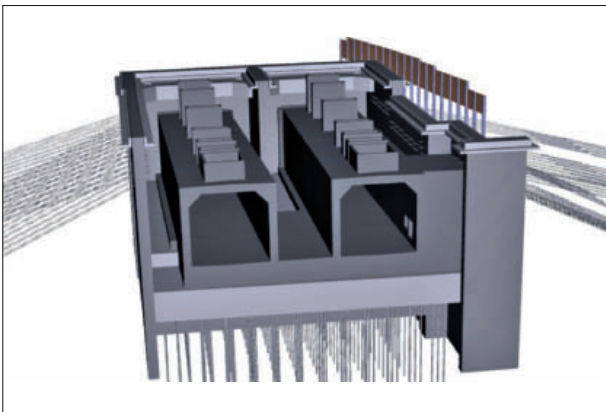
Since both DB pilot projects were shortly before or already under construction, the pilot trials can only cover part of the overall aims, which are to be achieved through the use of BIM in all phases of a project (Fig. 16).

The aims that are still achievable with the pilot projects are:

- improvement of project transparency by visualising the models for the tendered bills of quantities, visualisation of construction progress and optimisation of construction states;
- evaluation of the contribution of BIM to a more efficient project control for cost-effectiveness and observation of schedule and make a contribution to reducing variation orders;
- evaluation of the added value in maintenance and operation by forwarding information at the handover from construction to operation;
- collection of experience in the suitability for checking of performance reports, in the transparency of construction invoices and in the plausibility checking of the schedule with resource and performance data.

In March 2015, development of a BIM model for the Rastatt Tunnel was started parallel to classic design work. In close collaboration with the main contractor, a 3D model covering the entire structure of the tunnel has now been produced with descriptions of all object properties (Fig. 17). The linking of the geometrical 3D model with the associated schedule and cost elements results in a 5D model, with which construction sequences can be simulated and cost development can be determined over the project duration (Fig. 18).

DB have thus provided for the first time a fully-fledged 5D model for the structure of a complex tunnel project. This model currently administrates about 35,000 model elements just for the structure, which are linked with about 3,000 activities on the project schedule and about 3,500 items in the



Quelle/Credit: DB Netz AG

**17** 3-D-CAD-Modell des Portalbauwerks Nord mit den Druckentlastungsöffnungen gegen den Sonic-Boom-Effekt  
3D CAD model of the north portal structure with pressure relief openings against the sonic boom effect

#### 4.2 Das BIM-Pilotprojekt Tunnel Rastatt

Da beide Pilotprojekte der Bahn kurz vor oder bereits in der Ausführung standen, können die Pilotversuche nur einen Teil der übergeordneten Ziele abdecken, welche mit der Anwendung von BIM über alle Leistungsphasen zu erreichen sind (Bild 16).

Die mit den Pilotversuchen noch erreichbaren Ziele sind:

- Steigern der Projekttransparenz durch Visualisierung des Modells zu den ausgeschriebenen Leistungsverzeichnissen, Visualisierung der Bauabläufe sowie Optimierung der Bauzustände;
- Bewerten des Beitrags von BIM zu einer effizienteren Projektsteuerung für Wirtschaftlichkeit und Termintreue sowie Beitrag zur Reduktion der Nachträge;
- Bewerten des Mehrwerts bei Instandhaltung und Betrieb durch Informationsweitergabe beim Übergang vom Bauen zum Betreiben;
- Sammeln von Erfahrungen bei der Prüfbarkeit der Leistungsmeldungen, bei der Transparenz in den Bauabrechnungen und bei der Plausibilisierung des Terminplans durch Ressourcen- und Leistungshinterlegung.

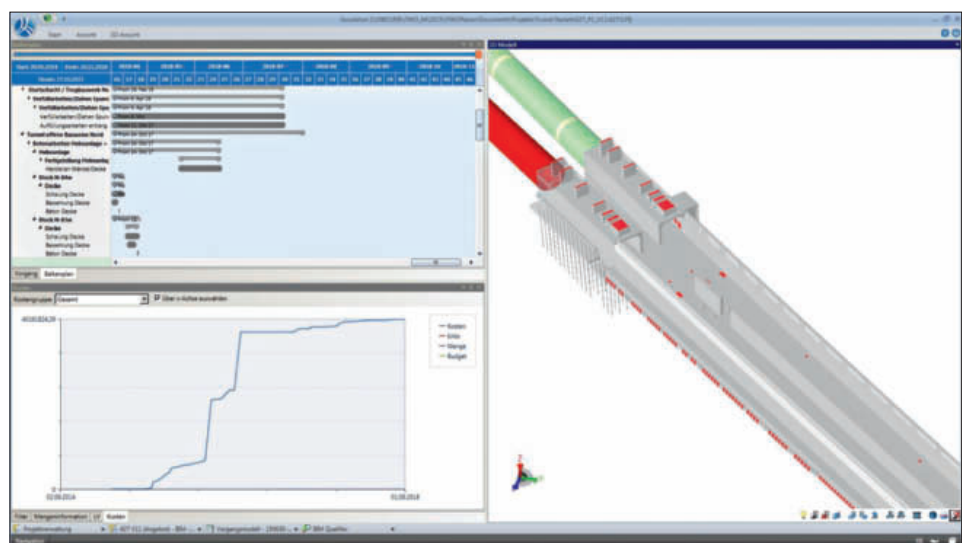
Im März 2015 wurde mit der Entwicklung eines BIM-Modells für den Tunnel Rastatt parallel zur klassischen Planung begonnen. In enger Zusammenarbeit mit dem Hauptunternehmer wurde mittlerweile ein den gesamten Rohbau des Tunnels umfassendes 3-D-Modell mit Beschreibung aller Objekteigenschaften erstellt (Bild 17).

bill of quantities. In a next phase, the railway equipment should also be integrated into the model.

In a next step, the tunnel lining and the railway equipment should also be linked to the BIM model in addition to the tunnel structure, with the aim of providing the operator on the day of handover with a comprehensive digital model of their new structure. This model should be available during the construction period to the contractor, the consultant and the site supervision team as a common working and information platform, and for the client as a holistic project control system. With scientific support, the effects of the BIM should be observed and assessed.

The BIM model of the Rastatt Tunnel is also linked to a digital ground model to enable deformation forecasts at the surface as a function of various parameters during the drive, such as advance rate and support pressure. In order to achieve this additional service, close collaboration has been entered with the Collaborative Research Center 837 "Interaction models for mechanised tunnelling" under the lead of the Ruhr University, Bochum. The first results should, if possible, be reported soon after the start of tunnelling. The example of the Wehrhahn Line in Düsseldorf encouraged DB to take the step to such a complex model in the hope of developing a powerful model for further inner-city projects such as for example the Munich's second core S-Bahn route.

In this sense, the Rastatt Tunnel is not only a key project for the construction challenges to be mastered but also for the application of BIM in tunnelling (Fig. 19). German Railways thus plan to set up a BIM competence centre based on the Karlsruhe–Basel project in Karlsruhe, which will collect the experience from their own pilot projects and make it available for further rail projects, and also for national and international standardisation efforts.



Quelle/Credit: RIB AG

**18** Bildschirmfoto des 5-D-Modells des Portalbauwerks Nord; das 3-D-Modell ist hierbei mit dem Bauprogramm und der Soll-Kostenkurve verknüpft  
Screenshot of the 5D model of the north portal structure; the 3D model is linked with the construction schedule and the planned cost curve

Durch die Verknüpfung des geometrischen 3-D-Modells mit den zugehörigen Termin- und Kostenelementen ergab sich ein 5-D-Modell, mit dem Bauabläufe simuliert und Kostenverläufe über die Projektlaufzeit ermittelt werden können (Bild 18).

Damit steht der Deutschen Bahn erstmalig ein vollwertiges 5-D-BIM-Modell für den Rohbau eines komplexen Tunnelprojekts zur Verfügung. In diesem Modell werden derzeit ungefähr 35 000 Modellelemente nur für den Rohbau verwaltet, welche mit etwa 3000 Aktivitäten des Terminprogramms und ca. 3500 Positionen des Leistungsverzeichnisses verknüpft sind. In einer nächsten Phase soll auch noch die bahntechnische Ausrüstung in das Modell integriert werden.

In einem nächsten Schritt soll nebst dem Rohbau auch der Tunnelausbau und die bahntechnische Ausrüstung mit dem BIM-Modell verknüpft werden, mit dem Ziel, dem Betreiber am Tag der Übernahme des Tunnels ein umfassendes digitales Modell seines neuen Bauwerks bereitzustellen. Dieses Modell soll während der Bauzeit dem Unternehmer, dem Planer und dem Bauüberwacher als gemeinsame Arbeits- und Informationsplattform und dem Bauherrn als ganzheitliches Projektsteuerungssystem zur Verfügung stehen. Mit einer wissenschaftlichen Begleitung sollen die Effekte des BIM-Einsatzes beobachtet und ausgewertet werden.

Das BIM-Modell des Tunnels Rastatt wird zusätzlich mit einem digitalen Baugrundmodell derart verknüpft, dass Deformationsprognosen an der Oberfläche in Funktion verschiedenster Parameter der Schildfahrt, wie Vortriebsgeschwindigkeit und Stützdruck, ermöglicht werden sollen. Um diese Zusatzleistung realisieren zu können, ist eine enge Zusammenarbeit mit dem Sonderforschungsbereich 837 «Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau» unter Leitung der Ruhr-Universität Bochum angelaufen. Von den ersten Resultaten soll, wenn möglich, schon bald nach dem Vortriebsbeginn berichtet werden. Das Beispiel Wehrhahn-Linie in Düsseldorf ermutigte die Deutsche Bahn, den Schritt zu einem so komplexen Modell zu wagen, in der Hoffnung, ein leistungsfähiges Werkzeug für weitere Projekte im innerstädtischen Bereich, wie zum Beispiel für die zweite Stammstrecke in München, zu entwickeln.

In diesem Sinne ist der Tunnel Rastatt nicht nur von der verkehrlichen Aufgabenstellung und den zu meisternden baulichen Herausforderungen ein Schlüsselprojekt, sondern auch in Sachen BIM-Anwendung für Tunnelbauten (Bild 19). Die Deutsche Bahn plant deshalb, rund um das Projekt Karlsruhe–Basel in Karlsruhe ein BIM-Kompetenzzentrum aufzubauen, welches die Erfahrungen aus den eigenen Pilotprojekten sammelt und sie den weiteren Bahnprojekten, aber auch den nationalen und internationalen Standardisierungsbemühungen zur Verfügung stellt.



Quelle/Credit: DB System GmbH

19 Der Tunnel Rastatt im virtuellen Modell «zuerst digital gebaut – dann real!»

The Rastatt Tunnel in the virtual model "first built digitally – then real!"

### Literatur/References

- [1] Vereinbarung zwischen dem Vorsteher des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements und dem Bundesminister für Verkehr der Bundesrepublik Deutschland zur Sicherung der Leistungsfähigkeit des Zulaufes zur neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) in der Schweiz, 6. September 1996
- [2] Eisenbahn Bundesamt (EBA), Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln vom 1. Juli 1997 (Anpassung per 1. Juli 2008)
- [3] Die Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel, Verkehrsachse für Europa, Daten und Fakten, Deutsche Bahn AG, 2012
- [4] Grundhoff, Thomas; Klar, Sascha Björn: ABS/NBS Karlsruhe–Basel – Realisierung des Streckenabschnitts 1 und Besonderheiten beim Bau des Rastatter Tunnels, Geomechanics and Tunneling, 2015
- [5] DB Netz AG; Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel, Rohbau Tunnel Rastatt, Projektpräsentation Info-Center Tunnel Rastatt, 10/2015
- [6] Richter, Michael et al.: Bahntunnel Rastatt: Schildvortrieb mit Vereisungsstrecken bei geringer Überdeckung, STUVA-Tagung, 2013
- [7] Müller, Benno: Bodenvereisung als temporäre Bauhilfsmassnahme – Praxisbeispiele, Kolloquium Bauhilfsmassnahmen im Tunnelbau, ETZ Zürich, 13. Dezember 2012
- [8] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/202210/umfrage/struktur-des-bauvolumens-nach-nachfragebereichen-in-deutschland/Abfrage> 24. Januar 2016
- [9] Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur, Reformkommission Bau von Grossprojekten, Endbericht, Berlin 2015
- [10] Europäische Union (EU), Verordnung Nr. 1303/2014 der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der «Sicherheit in Eisenbahntunneln» im Eisenbahnsystem der Europäischen Union, 18. November 2014
- [11] Grundhoff, Thomas; Edelhoff, Dennis: Tunnel Rastatt: Hohe Anforderungen an den maschinellen Tunnelbau, Tunnel, 1/2016

Bo Larsson, MSc, Civil engineer, Chalmers University of Technology\*

Lillian Brunbäck, MSc in International Business and Trade, Linnaeus University\*

Olle Olofsson, MSc, Geotechnical engineer, Luleå UT\*

Anders Hansson, MSc, Civil engineering, Chalmers UT\*

Mira Andersson Ovuka, PhD Physical Geography, MSc Geology, Göteborg University\*

Bengt Åhlén, PhD Technical Geology, MSc Petroleum Exploration, Chalmers UT, Civil engineer at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm/SE\*

\* Swedish Transport Administration, Gothenburg/SE

# The West Link

## Challenges Both Underground and above Ground

The West Link is a planned railway tunnel under the centre of Gothenburg. Three new underground stations will provide increased capacity for commuter rail services and improve accessibility to the city. As commuting times are reduced, the labour market will expand and promote regional growth and sustainable development. Several of the areas passed through by the West Link pose major geotechnical, hydrogeological and technical challenges for the protection of the environment and existing buildings.

### 1 The Challenge – a Growing City in a Developing Region

Gothenburg is the second largest city in Sweden and is located in the south western Västra Götaland Region. It is the main transport and industrial region of Sweden and handles a large amount of goods to and from all of Scandinavia. Because of this, the regional infrastructure is an important competition factor for the whole of Sweden.

Population and economic growth are steadily increasing and the economy of the Västra Götaland Region accounts for more than a quarter of Sweden's exports. The larger region of western Sweden, with Gothenburg at its core, is expanding and vibrant. Continued regional growth requires that local markets can be expanded so that more people can reach more workplaces within a reasonable commuting time. This demands an efficient transport system.

In Gothenburg and western Sweden, there are several problems with the transport system at present. The system is inadequate and capacity utilization is at the margin. This hampers regional development.

A development strategy was devised by regional authorities together with the Swedish Transport Administration Trafikverket in the early 21<sup>st</sup> century to counter problems with the railway system in western Sweden. The purpose was to reach national, regional and local goals leading towards a sustainable transport system.

The lack of capacity at Gothenburg Central Station and on the railway lines into Gothenburg has been, and still is, a

great challenge. With increased track capacity, train services could be extended and developed to improve passenger services nationally, regionally and locally. This would also enable improvements for the Swedish industry and the important freight traffic to and from Scandinavia's central port, the Port of Gothenburg.



1 Railway system around Gothenburg

Credit: Trafikverket

## Västlänken – die Westanbindung von Göteborg

### Herausforderungen unter und über der Erde

Västlänken ist ein Eisenbahntunnel unter dem Zentrum von Göteborg. Drei neue Bahnhöfe erhöhen die Kapazitäten für den Nahverkehr und verbessern die Erreichbarkeit der Innenstadt. Die Verkürzung der Arbeitswege soll zusätzliche Arbeitsplätze schaffen und so Wachstum in der Region sowie nachhaltige Entwicklung fördern. Allerdings durchquert die Trasse mehrere Bereiche, die geotechnische, hydrogeologische und technische Herausforderungen hinsichtlich des Schutzes von Umwelt und Gebäudebestand aufweisen. Der Baubeginn ist für 2017/2018 vorgesehen, die Inbetriebnahme des Tunnels für 2026. Die Baukosten belaufen sich voraussichtlich auf 20 Milliarden SEK.

## Västlänken, la ligne desservant l'ouest de Göteborg

### Des défis sous terre et en surface

Västlänken est un tunnel ferroviaire qui passe sous le centre de Göteborg. Trois nouvelles gares souterraines renforceront les capacités du trafic de banlieue et amélioreront l'accessibilité au centre-ville. La réduction des distances pour se rendre au travail devrait créer des emplois supplémentaires et donc stimuler la croissance dans la région et promouvoir le développement durable. Toutefois, le tracé traverse plusieurs zones qui constituent des défis géotechniques, hydrogéologiques et techniques en matière de protection de l'environnement et des bâtiments en place. Le début des travaux est prévu pour 2017/2018, la mise en service du tunnel pour 2026. Le coût est estimé à 20 milliards de SEK.

## Västlänken – La connessione occidentale di Göteborg

### Sfide sotto e sopra alla superficie

Västlänken è una galleria ferroviaria sotto al centro di Göteborg. Le tre nuove stazioni aumenteranno la capacità di traffico ferroviario sulle linee pendolari e migliorano l'accessibilità al centro della città. L'accorciamento del tragitto di andata e ritorno tra l'abitazione e il posto di lavoro avrà un forte impatto sul mercato del lavoro incrementando la crescita e lo sviluppo sostenibile della regione. Inoltre il tracciato attraversa diversi ambienti che pongono differenti problematiche geotecniche, idrogeologiche e tecniche, sia per quanto riguarda il rispetto per l'ambiente che per quello degli edifici esistenti. L'inizio dei lavori è previsto per il 2017/2018, la messa in esercizio della galleria per il 2026. Spese di costruzione stimate: SEK 20 miliardi.

## 2 The West Link – a Solution for the Future

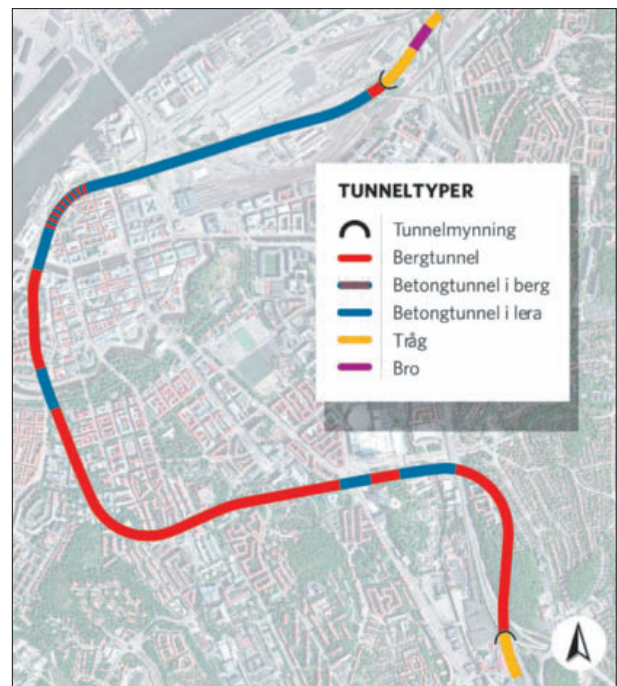
From the development strategy came the idea of a rail connection in Gothenburg to increase the capacity of the railway system. The new rail connection with the name West Link will be constructed in a tunnel under the centre of Gothenburg. The project is still at the planning and design stage, and construction is estimated to start in 2017/2018. The West Link is expected to be completed in 2026.

The new tunnel will improve travel conditions. Train frequencies can be increased, travel times reduced and with three new stations, passengers will be able to reach more destinations without changing transportation means.

The planned two tracks are primarily intended for commuter and regional trains. The line is 8 km long including a 6 km rail tunnel. The three underground stations will be at Gothenburg Central, in Haga and at Korsvägen in the centre of Gothenburg. All three locations are key hubs for the tourism industry, schools, universities, trade and other activities in central Gothenburg.

### 2.1 Easier and Faster Commuting

Today, all incoming rail passengers arrive at Gothenburg Central Station, then transfer to trams, buses or trains. With



### 2 Overview of the West Link

Blue = concrete tunnel built in fill/soil; red = tunnel built in rock; purple = bridge; blue/red = concrete tunnel in rock; yellow = trough structure

Credit: Trafikverket



Credit: Metro Arkitekter

3 Illustration of the future Centralen Station



Credit: Abako Arkitekter

4 Illustration of the future Haga Station

the new West Link stations, commuter and regional trains will be able to pass through Gothenburg. Travellers can use more stations in the city and pressure will be relieved at Gothenburg Central Station and on the public transport system.

In 2015, Gothenburg Central Station operated with 675 arrivals and departures each weekday. When the West Link opens, the two parts of the Central Station together will manage 1125 arrivals and departures per day. There will be capacity for even more trains, which will enable further expansion of the railway system in western Sweden.

## 2.2 Stations

The West Link station Centralen will be built with two platforms and four tracks, and will be located just north of the

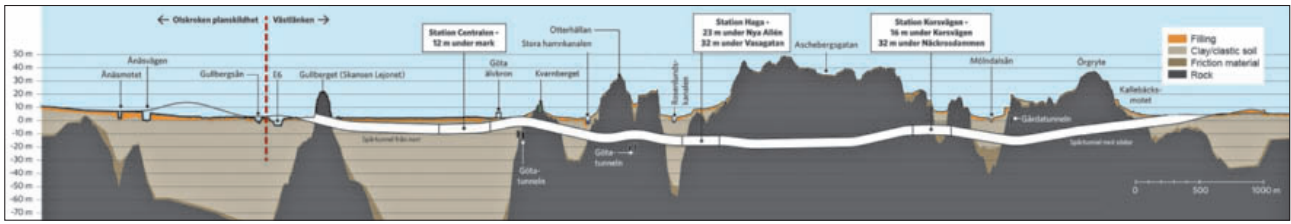
current Gothenburg Central Station. The placement of the railway tunnel and the design of the station have been adapted to the urban development plans. Escalators or elevators will take the passengers directly from the station up to central parts of Gothenburg.

Haga Station is located close to schools, universities, workplaces, residential areas and future major city planning projects. The station will also create an important new public transport hub. It will be located about 25 m below ground and have one platform and two tracks – with preparations for another two tracks and an additional platform. A total of three entrances to the station lead, via a concourse level, to the platforms. Haga station is located half in soil, crossing the Rosenlund canal, and half in rock.



Credit: White Arkitekter

5 Illustration of the future Korsvägen Station



6 Profile of the West Link

Credit: Trafikverket

Korsvägen Station is located at an important junction in the Gothenburg public transport network. It is close to museums, exhibition centres, event venues and Liseberg, the largest amusement park in the Nordic region. The station will, like Haga Station, be built with a single platform with two tracks and prepared for an additional platform and two more tracks. There are three entrances leading to a concourse level and on to the platform level. Korsvägen Station is located half in soil and half in rock.

geological and technical challenges for the protection of the environment and existing buildings. Excavations and tunnelling can for example permanently affect groundwater levels, which can cause subsidence in the ground.

Subsidence is already underway in several areas of Gothenburg and there are buildings, cultural properties and archaeological remains that are sensitive to changes in the groundwater table. The existing subsidence requires that the

**2.3 The Tunnel**

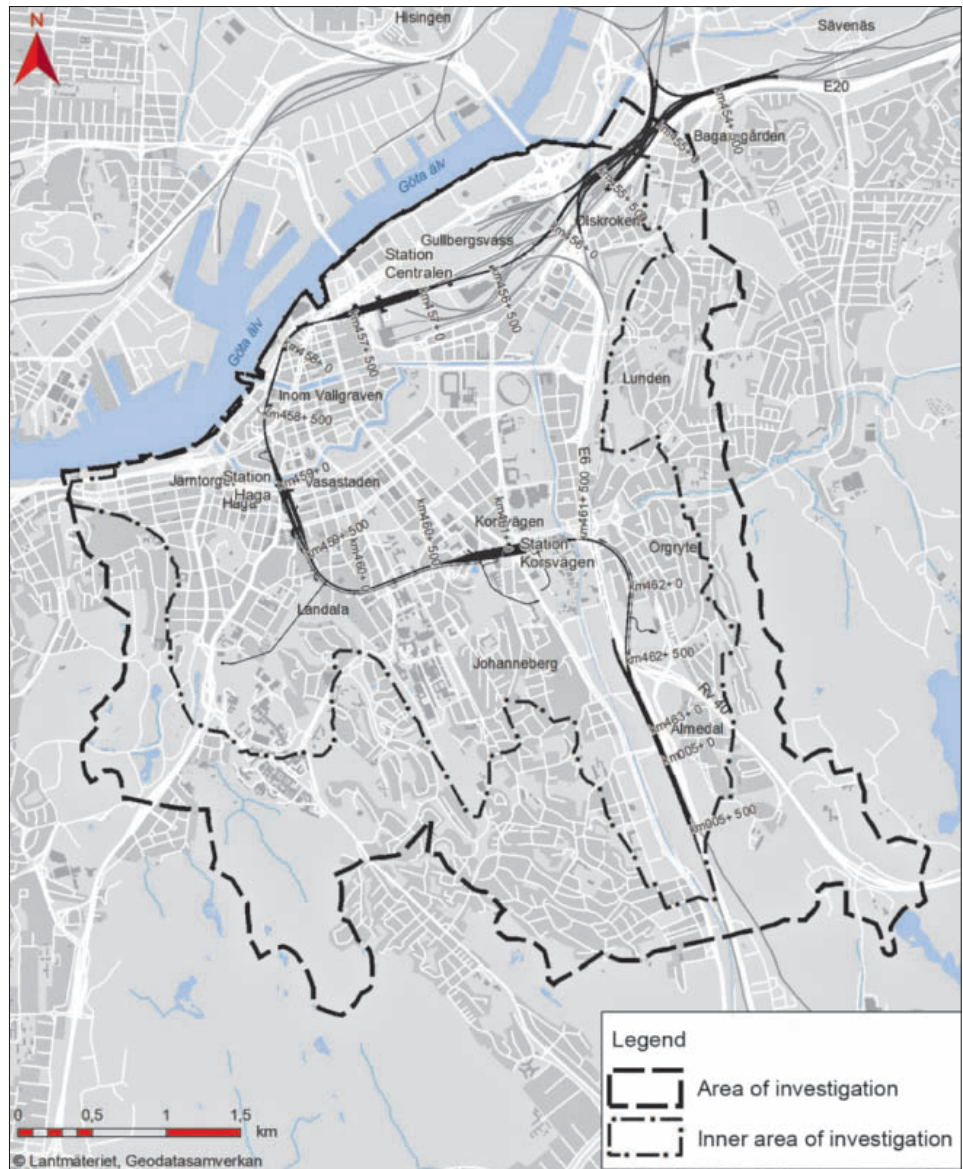
Of the total of 6 km of tunnel beneath the city of Gothenburg, 4 km will run through rock, which will have to be blasted to construct the tunnel. 2 km run through fill and massive layers of clay where the tunnel will be built using a cut-and-cover technique. Many culturally significant sites and buildings are located along the route.

**2.4 Budget and Funding**

The cost is estimated at 20 billion SEK at 2009 prices. The project is part of the West Swedish Agreement, under which 50% of the funding comes from regional and local sources including the congestion tax in Gothenburg. State funding finances the remaining 50%. The West Swedish Agreement comprises a number of investments in roads and railways for trains, buses, trams, bicycles and cars, with a total investment of 34 billion SEK until 2028.

**3 Challenges in Rock, Clay and Water**

Several of the areas the West Link passes through pose major geotechnical, hydro-



7 Area of investigation for the influence on the groundwater level

Credit: Trafikverket



foundations are adapted for the part of the tunnel built in concrete. This is to maintain the track profile and preserve the concrete construction against damage.

Because of the sensitive conditions, the Transport Administration has conducted extensive investigations in order to clarify the soil and rock conditions and the water situation in large parts of Gothenburg. In addition to the extensive investigations, experience can be drawn on from similar projects in Stockholm, Gothenburg and Malmö.

Substantial excavation works will be required to construct the tunnel and its stations, mainly by cut-and-cover. Excavation depths vary between 15 and 25 m and extensive temporary retaining structures will be necessary. The work is complicated by the fact that the rock is located in depths so great that support structures will not reach down to it. This leads to specific requirements for methods and workmanship to ensure the stability of the excavations. Since the work is to be carried out in an urban environment, there are also severe restrictions regarding deformation to the support structures to avoid damage in the surrounding area.

One of the most demanding excavations is at Gothenburg Central Station. The dimensions of the excavation are about 400 m in length and 60 m in width, the depth is about 15 m. Because of the deep and soft clay layer, stability will be a challenge. Both a robust support structure and sequenced excavations will be required. Anchors or piles will be needed to resist uplift of the bottom. All construction works will have to be carried out right next to traffic areas with many restrictions that affect the way the task can be accomplished.

Haga and Korsvägen stations will be mainly built in rock. The station rooms will have large spans of more than 25 m and for parts of the stations the rock coverage will be limited to about 10 m. This site poses special requirements for the verification of construction and the constructability of the design as well as monitoring and control during the construction stage.

It is proposed that the originally planned rock pillar between the station rooms should be substituted with concrete pillars. Concrete pillars can be made slimmer than rock pillars and thus reduce the total width of the stations. The proposed layout with slim concrete pillars and a large span is unique and a major technical challenge. So far, feasibility studies show that concrete pillars are technically viable and the layout is now being verified in more detail.

### 3.1 Groundwater

The Swedish Transport Authority knows from experience that problems with ground water leakage during the construction phase usually occur at transitions between soil and rock. Therefore the West Link project will work together with the contrac-



8 Gothenburg, 1790. The area northeast of Gothenburg City Centre, with reed growing at times of flood. This also applied to areas southwest of the City.

Credit: Trafikverket

tor to ensure that construction methods and the safeguards are adapted to minimize negative effects on the surroundings.

Extensive waterproofing will be carried out as the West Link is built, but nevertheless, groundwater will leak into the tunnel and shafts. To compensate this, water will have to be infiltrated into the ground to avoid settlement. This safeguard will most likely be needed in both the construction phase and later in the operation stage. Facilities for infiltration will be built in good time before construction can affect the groundwater levels.

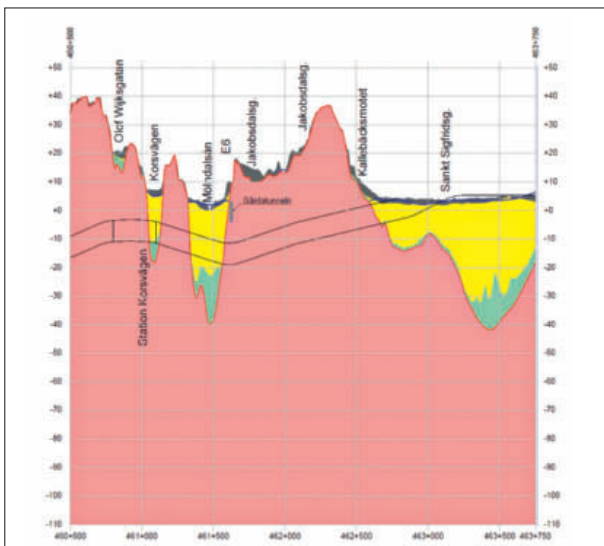
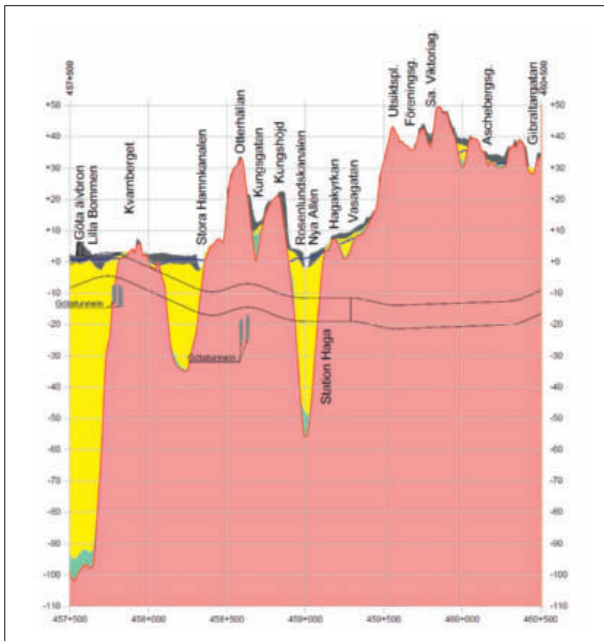
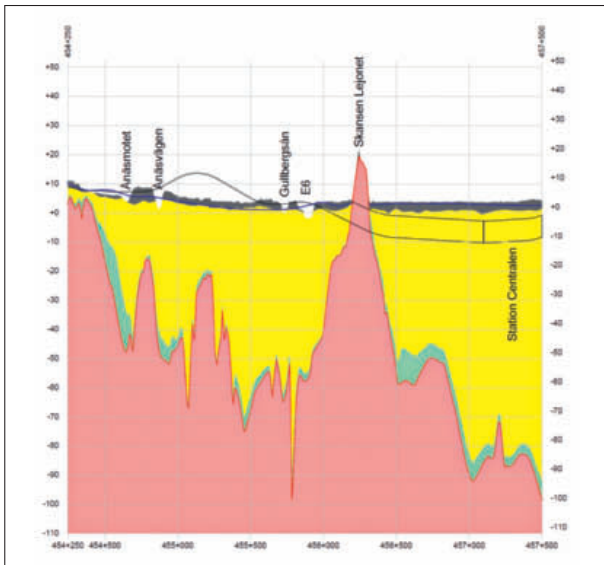
### 3.2 Geology and Hydrogeology in Gothenburg

The complex conditions in central Gothenburg are the result of a combination of the diverse geology and human activities in the area. One human activity with particular significance is filling of previously unusable land (Fig. 8), which has created artificial groundwater aquifers. There are also buildings that cut off natural groundwater flows, tunnels draining groundwater and, not least, paved surfaces that reduce natural recharging of the groundwater.

The thickness of the fill is normally 1–3 m, although locally it can reach 5–7 m. Previous construction activities have reduced the resistance of the area, so any new construction today carries the risk of a more permanent impact on the groundwater. Fill is still causing subsidence in the clay and ongoing subsidence is between 2 and 10 mm/year.

The geological conditions with a major impact on the groundwater are soil profile, rock surface topography and the presence of water-bearing fractures and zones in the rock. In Gothenburg and the surrounding area, the rock surface varies, so that several groundwater aquifers in soil are likely to be formed in depressions.

Any lowering of the upper groundwater level entails a risk to buildings and facilities founded on timber piles, which



Credit: Trafikverket

can rot when exposed to oxygen. One way to prevent timber piles from rotting is infiltration of water in order to maintain the groundwater level in the upper aquifer. To reduce the risk of flooding, extensive investigations are being conducted to clarify flow routes in the upper groundwater aquifer.

### 3.3 Permit under the Swedish Environmental Code

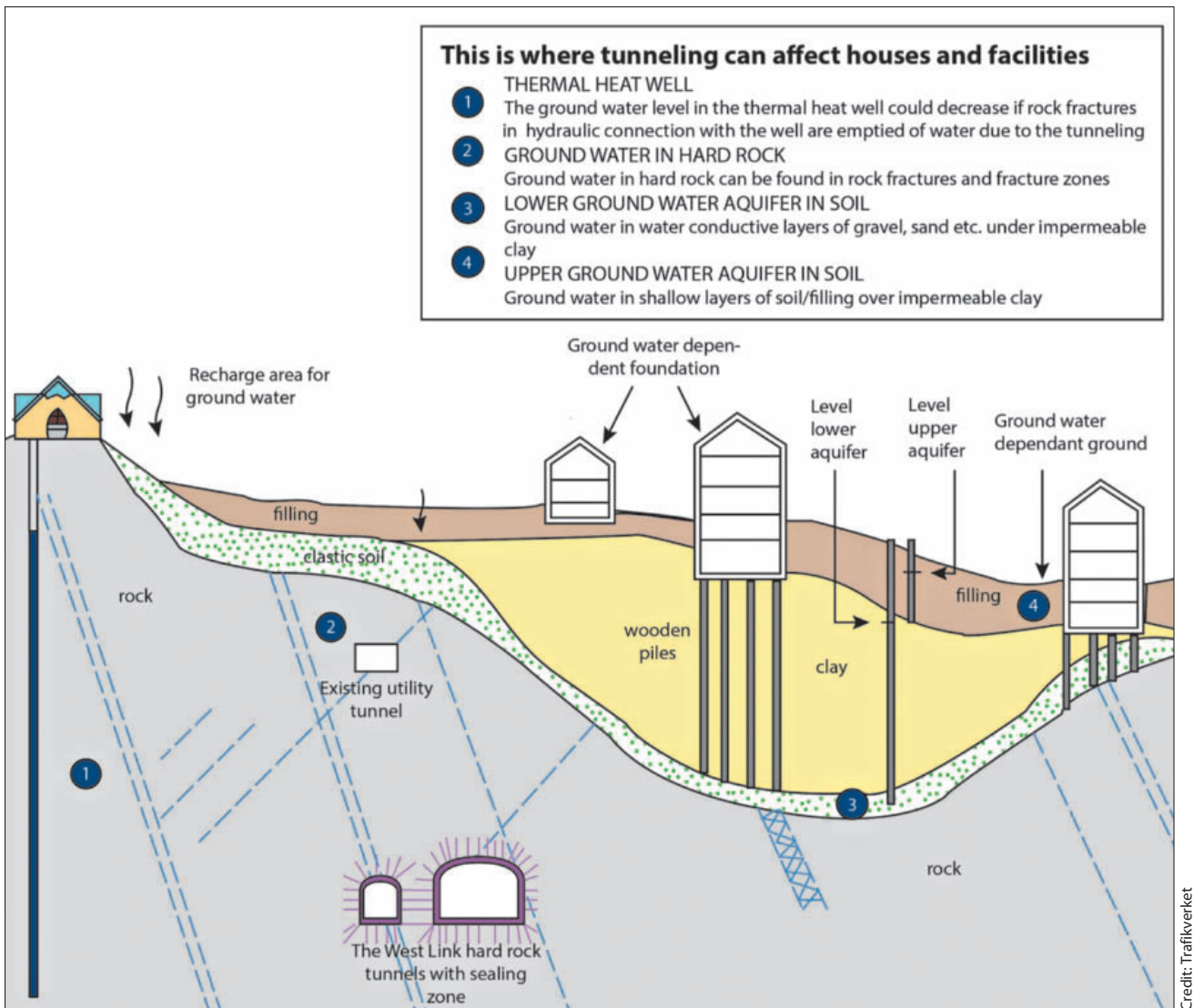
Extraction of groundwater and working in the groundwater require conditional permits under the Swedish environmental code. The Transport Administration has, in addition to these permits, also opted to voluntarily apply for permits for environmentally hazardous activities. This regulates, for example, vibration and noise levels that are acceptable during construction. These permits and conditions will govern the choice of construction methods affecting, for example, sheet piling and blasting. The scale of waterproofing work is also depending on these conditions.

## 4 Culturally and Historically Interesting Areas and How to Handle Them

Early in the planning stage, the Swedish Transport Administration identified three areas of significant influence, which will require a large effort during the planning phase. These areas are: Cultural heritage, the handling of rock and soil masses, and the impact of the construction phase. The West Link will be built with consideration for the national interest for cultural heritage. This includes the management of the masses and the transport routes. The challenge to minimize the impact and damage to the cultural heritage is great.

The Swedish Transport Administration, in its application for approval under chapter 17 of the Swedish Environmental Code, described the challenges related to the cultural environment and how this can be handled in the further progress of the project. Conditions were proposed for further work in the railway plan and the detailed design. The Government granted approval for the West Link, but this decision included a condition regarding the cultural heritage: "The location of the West Link within the corridor should, after consulting with the National Heritage Board, The County Administrative Board of Västra Götaland and the City of Gothenburg authorities, be planned and constructed so that negative effects on the cultural heritage and the urban environment in general, including parks and green spaces, are restricted as far as possible. The affected ancient monuments should as far as possible be preserved, made visible and incorporated into the new structure."

9 Geological profile along the West Link (red = rock, green = cohesive soil, yellow = clay, brown = fill). The blue line shows the water table.



10 Model of the hydrogeological conditions and the link with different risk objects. See also various geological conditions along the West Link in Fig. 9.

In 2014 and 2015, the County Administrative Board approved the environmental impact assessment for the project and also gave a favourable opinion of the railway plan, stating that the Transport Administration so far had been working with as much consideration as possible. The County Administrative Board however still believes that the West Link will cause significant harm to the national interest of cultural heritage. The challenge for the West Link project has been and will continue to be to minimize the impact and work together with the City of Gothenburg authorities regarding the cultural heritage issue.

The Transport Administration is not used to cultural heritage being of such importance as it is in the West Link Project and needs the support of government and local agencies with expertise in this field. The West Link Project has therefore proposed that the City of Gothenburg, together with the Gothenburg City Museum, contributes resources to the project to work for the best possible solutions to be

produced in the areas where the project affects cultural heritage. The solutions should be designed to preserve the cultural heritage that is identified and should be protected, while the timetable and the costs should be kept reasonable.

### 5 Contracts for Complex Construction

The procurement strategy for the project has been selected on the basis of the Swedish Transport Administration's overall objectives and strategies, with regard to the special conditions of each contract and after an extensive dialogue with the supplier market. The project strategy for achieving good competition is to package contracts in a way that attracts the type of suppliers who can construct the West Link on time, at the right cost, and with the specified content. The way this type of work is packaged also affects the degree to which the client should be responsible for coordination and to what degree coordination can be taken over by the contractor.

One of the conditions of procurement is to open up for international contractors. The contracts of the West Link, with complex construction in urban areas, can benefit from the experience and knowledge of the global market.

### 5.1 Form of Contracts

There are two main forms of contract in Sweden – construction contracts and design and build contracts. The form of contract affects the parties’ responsibilities and exposure to risk. The entrepreneur has a greater commitment and a greater exposure to risk with design and build contracts than with construction contracts, but also a greater degree of freedom and more opportunities for innovation and finding effective methods of production.

The West Link Project has chosen the design and build form for almost all contracts except for the BEST contract (Track, Electrical, Signal, and Telecom). The Olskroken and Central Station contracts will be under the design and build form ECI (Early Contractor Involvement). The fundamental idea behind the ECI design and build contract is that the contractor becomes involved in the project at a very early stage. This way the contractor, through his knowledge, can take part in influencing the structure of production methods and costs and has a greater impact on the project outcome in comparison to a traditional design and build contract.

It can be said that the turnkey contract, in its most extended form, is an ECI. The model is based on cooperation between the parties and the assumption of a “best

for the project” attitude from all parties. There is considerable interest on the part of the market in this form of contract.

Other closely related or similar designations for ECI include alliance contracting, collaboration contract, project partnering and turnkey contract in early cooperation. The project management has chosen the ECI project form for the Olskroken and Central Station contracts

#### 5.1.1 ECI and the Central Station Contract

The Central Station contract consists of concrete structures, which in Sweden are normally procured as turnkey contracts as a consequence of the impact that production methods and technical solutions have on design work. In the case of Central Station, the ECI form of turnkey contract is prescribed.

The Central Station is a complicated contract with many complex peripheral conditions, preconditions and requirements for technical solutions, which are difficult to describe and at the same time have a significant impact on the execution of the contract.

The Swedish Transport Administration believes that Early Contractor Involvement for this part of the project means that the contractor will be involved in the project at such an early stage of the project that he can influence the design through his knowledge of production measures and costs. Eventually this contract form could lead to new production methods.

<b>Clay</b>
• High plastic marine clay
• Depth up to 100 m, normally 20–40 m
• Undrained shear strength, $S_u$ , 15 kPa at 5 m depth, increases with appr. 1,4 kPa/m depth
• Water content, $w_N$ , 60–80% and liquid limit, $w_L$ , 50–80%
• Sensitivity, $S_t$ , 10–40
• Normally to slightly overconsolidated, OCR 1,3
• Drained modulus above preconsolidation pressure 400 kPa at top and increases with appr. 25 kPa/m depth.
<b>Rock</b>
• Gneiss is the dominating rock type
• Gneiss is crystalline bedrock of mainly igneous origin
• Typical three joint set in the rock mass
• Foliation in the Gneiss is one of the joint sets
• Weakness zones of different width are present in the rock mass
• Typical values for intact rock: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Young’s modulus 70 GPa</li> <li>– Uniaxial compressive strength 140 MPa</li> </ul>
• Typical values evaluated for the rock mass: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Young’s modulus 40 GPa</li> <li>– Uniaxial compressive strength 20 MPa</li> </ul>

**Table 1** Facts on clay and rock



Credit: Rafael Palomo

11 Cultural heritage: The County Residence, built in 1648, is one of the city's oldest buildings

## 5.2 Summary of Contract Forms

Contract	Contract form
1. Olskroken	Design and build – ECI
2. Centralen	Design and build – ECI
3. Kvarnberget	Design and build
4. Haga	Design and build; detailed design for rock sections
5. Korsvägen	Design and build; detailed design for rock sections
6. BEST	Construction contract

## 6 Current Status of the West Link Project

During 2015 the West Link Project worked on planning and design, as well as on preparatory works prior to construction and procurement of contractors. The project also handed in the application for confirmation of the Railway Plan.

In 2014 the engineering and consulting company ÅF, together with the Swiss firm of Basler & Hofmann, was awarded the contract for preparing the tender enquiry documents for the main contracts and for preparing the tender enquiry documents the contracts for preparatory works for the projects of Olskroken and the West Link.

Their work also includes a review of the Railway Plan with a focus on optimizing the technical solutions to reduce costs and time for the project as a whole. ÅF and Basler & Hofmann have identified several areas where optimization is possible, and Swedish Transport Administration has decided that optimization of the station design, ventilation system and service tunnels should be investigated further.



Credit: Kasper Dudzík

12 Skansen Lejonet, one of two fortresses in Gothenburg, was built in 1687 on the site of several fortifications since the 1300s.

Early estimates suggest the optimization of the technical solutions may lead to cost savings in production and also to opportunities to optimize and shorten the production time.

In January 2016, the project applied for an environmental judgment for the West Link from the Land and Environment Court. The judgment will establish conditions for the project's impact on surface and groundwater and for disturbances, such as noise and vibration. The project will also continue with the planning and design of the West Link, with preparatory works prior to construction, such as rerouting underground pipe systems, and with the procurement of contractors.

### 7 Time Schedule

2017

- Final (legally binding) Railway Plan
- Final (legally binding) water-related activities

2017/2018

- Estimated construction start

2026

- Traffic is estimated to commence



13 Proposed contracts for the West Link Project

Credit: Trafikverket

Thomas Fries, Dipl. Bau-Ing. ETH/SIA,  
Nagra Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen/CH

# Tiefenlager für radioaktive Abfälle der Schweiz

## Stand der Projekte und technische Herausforderungen aus Sicht des Untertagbaus

Die Standortsuche für geologische Tiefenlager von radioaktiven Abfällen in der Schweiz ist weit fortgeschritten. 2022 plant die Nagra, die provisorische Standortwahl bekanntzugeben und 2025 ein Rahmenbewilligungsgesuch einzureichen. Damit schreitet auch die Konkretisierung der dazu notwendigen insgesamt 45 km langen Untertagbauwerke voran.

# Deep Repository for Radioactive Waste in Switzerland

## State of the Projects and Technical Challenges for Underground Construction

The site evaluation for deep geological repositories for radioactive waste in Switzerland has come a long way. Nagra plans to announce the provisional site selection in 2022 and submit a general licence application in 2025. This means that firm plans for the altogether necessary 45 km of underground facilities have made good progress.

### 1 Wo steht das Projekt im Fahrplan?

Die Schweiz produziert seit 1969 Strom aus Kernenergie. Der Anteil an der gesamten Stromproduktion beträgt rund 40%. Dabei fallen auch radioaktive Abfälle an, welche nach Kernenergiegesetz [1] dauerhaft in geologischen Tiefenlagern eingelagert werden müssen. Die Abfallverursacher – Kernkraftwerk (KKW)-Betreiber und Bund – haben die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Planung und der dazu gehörenden Forschung und Entwicklung sowie dem späteren Bau und Betrieb der Tiefenlager beauftragt mit dem Ziel, die sichere Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz zu realisieren. Ein Tiefenlager ist ein Projekt von nationaler Bedeutung. Seit 2008 läuft daher unter Federführung des Bundesamts für Energie (BFE) ein Standortwahlverfahren mit dem Ziel, in einem breit abgestützten, dreistufigen Verfahren je einen Standort für ein geologisches Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und für hochaktive Abfälle (HAA) oder einen Standort für ein Lager für alle Abfallkategorien (ein sogenanntes Kombilager) zu bezeichnen. Die Vorgaben dazu sind im Konzeptteil zum Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) [2] festgelegt. Das Verfahren der Standortwahl ist momentan in Etappe 2; ausgehend von der gesamten Schweiz hat der Bundesrat als Endpunkt der Etappe 1 die Vorschläge der Nagra für geologisch geeignete Standortgebiete 2011 genehmigt [3]. Abgestützt auf ein breites Mitwirkungsverfahren mit den betroffenen Regionen wurden 2014 Stand-

### 1 Where Is the Project in the Schedule?

Switzerland has produced electricity from atomic power since 1969, and the proportion of overall electricity production is currently about 40%. In the process, radioactive waste is produced, which, according to the Nuclear Energy Act [1], will have to be stored longterm in deep geological repositories. The waste producers, the nuclear power supplier (NPP) and the Federal Government, have commissioned the National Cooperative for the Storage of radioactive Waste (Nagra) with the design, including the associated research and development, and the later construction and operation of deep repositories with the objective of implementing the safe disposal of radioactive waste in Switzerland. A deep repository is a project of national importance. Since 2008, a site selection procedure has been running under the lead of the Swiss Federal Office of Energy (BFE) with the objective of designating a site for a deep geological repository for low- and intermediate-level waste (LILW) and one for high-level waste (HLW) or a site for a repository for all waste categories (called a combined repository) in a widely supported, three-stage process. The requirements are specified in the concept section of the Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (SGT) [2]. The procedure for the selection of sites is at the moment at Stage 2; Considering all of Switzerland, the Federal Council approved the proposal of Nagra for geologically suitable areas as the end of Stage 1 in 2011 [3]. Supported by a wide collaboration process with the affected regions, areas

## Dépôts en profondeur pour les déchets radioactifs suisses

### Avancement des projets et défis techniques dans l'optique des travaux souterrains

La Suisse produit 40% de son électricité à partir de l'énergie nucléaire. Cette activité produit des déchets radioactifs qui, en vertu de la loi sur l'énergie nucléaire, doivent être déposés durablement dans des dépôts en couche géologique profonde. Sous supervision de l'Office fédéral de l'énergie, la recherche de sites est déjà très avancée. Sur mandat des producteurs de déchets, la Nagra prévoit de publier la sélection provisoire des sites en 2022 et de présenter une demande d'autorisation générale en 2025. Les constructions commenceront au plus tôt en 2030. Cette date permet de concrétiser également celle des constructions souterraines d'une longueur totale de 45 km qui seront nécessaires. Quelques défis spécifiques attendent les concepteurs.

ortareale für die Oberflächenanlage beim Hauptzugang zum Tiefenlager bezeichnet [4]. Im Januar 2015 hat die Nagra umfassende Gesuchsunterlagen zur Etappe 2 eingereicht mit dem Vorschlag, die Standortgebiete von drei (HAA) bzw. sechs (SMA) auf zwei Gebiete einzuengen [5] (Bild 1). Im vergangenen Jahr wurde mit vertieften Erkundungsarbeiten (3D-Seismik) in den zwei vorgeschlagenen Standortgebieten begonnen [6].

Mit der Zustimmung des Bundesrates zur Etappe 2 wird erst nach einer eingehenden Fachprüfung durch die Aufsichtsbehörden und einer Anhörung im Jahr 2018 gerechnet. Der heutige Fahrplan sieht vor, dass die Nagra ab 2022 auf der Grundlage der vertieften Erkundung die provisorische Standortwahl in Hinblick auf die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche (RBG) bekannt geben kann. Bis ins Jahr 2025 soll dann je ein RBG (zur Festlegung des Standorts und der Anlage in ihren Grundzügen) für ein SMA- und HAA-Lager oder für ein Kombi-Lager eingereicht werden. Nach Erteilung der Rahmenbewilligung durch den Bundesrat, der Zustimmung des Parlaments und einem nationalen fakultativen Referendum folgen frühestens ab 2031 die Standortuntersuchungen unter Tage. Anschliessend werden die Anlagen gebaut; die Einlagerung der Abfälle erfolgt ab ca. 2050 (SMA) bzw. 2060 (HAA) (Bild 2).

Das Projekt der geologischen Tiefenlager kostet ca. 10 Mrd. CHF (davon bisher aufgelaufene Kosten von über 1 Mrd. CHF). Der Betrieb der Tiefenlager liegt zwar noch in ferner Zukunft, doch fällt in den nächsten Jahren mit der Wahl des Standortes auch aus Sicht des Untertagbaus ein wichtiger

## Depositi per scorie radioattive elvetiche in strati geologici profondi

### Stato dei progetti e sfide tecniche dalla prospettiva del settore estrattivo

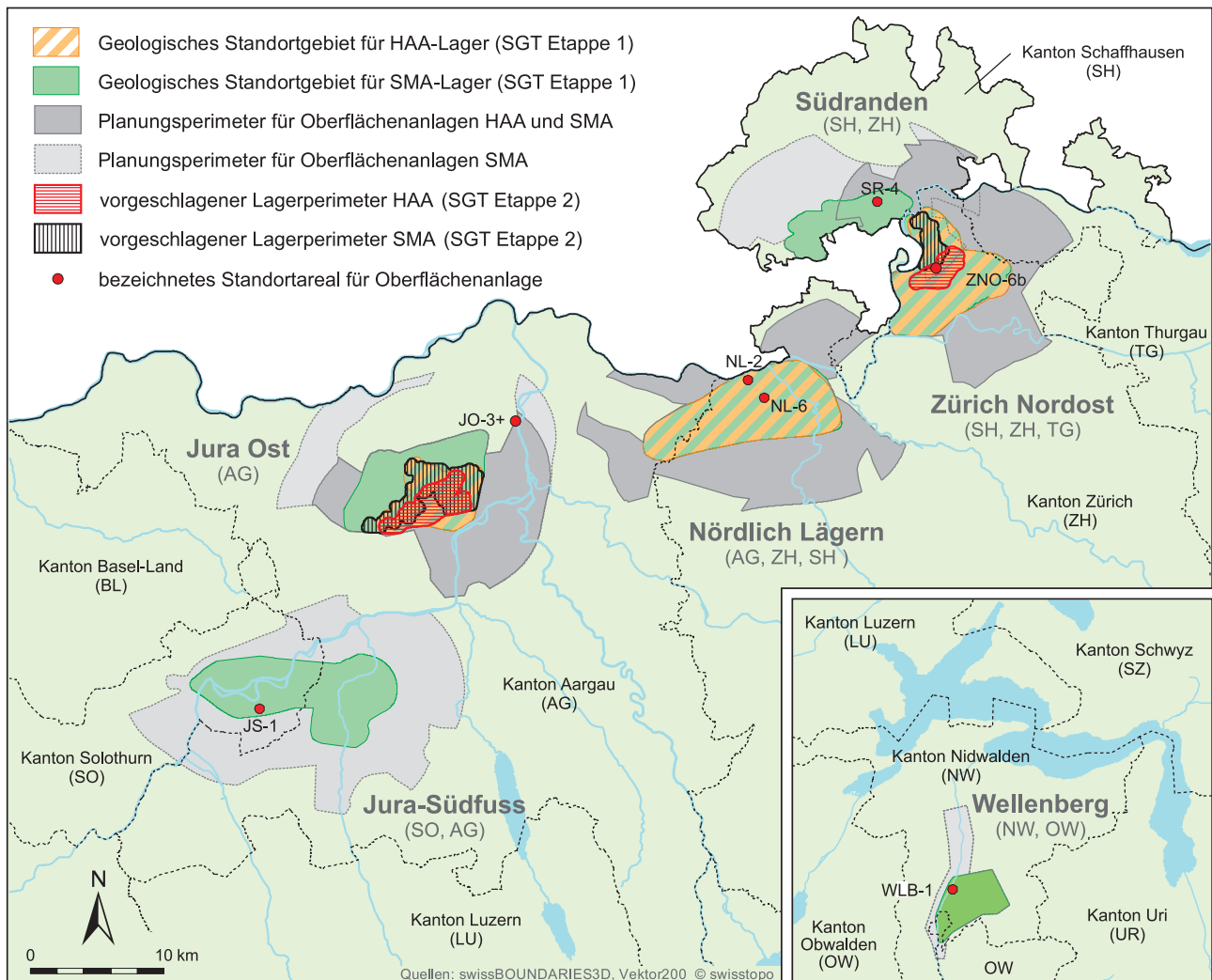
La Svizzera produce il 40% della sua energia elettrica dall'atomo. Nello stesso tempo vengono prodotti rifiuti radioattivi che, secondo la legge federale sull'energia nucleare, devono venire immagazzinati a lungo termine in strati geologici profondi. Sotto l'egida dell'Ufficio federale dell'energia, la ricerca del sito adatto è molto avanzata. La Nagra progetta, in collaborazione con i produttori di scorie, di rendere nota la scelta provvisoria del sito nel 2022 e di inoltrare nel 2025 una domanda di autorizzazione di massima. I lavori di costruzione inizieranno non prima del 2030. In questo modo si procede anche alla realizzazione dei complessivi 45 km di lavori sotterranei che sono necessari per raggiungere questo scopo. I progettisti vanno quindi incontro a delle difficili prove.

were designated for the surface facilities at the main access to the deep repository in 2014 [4]. In January 2015, Nagra submitted extensive application documents for Stage 2 with the proposal to narrow the sites from three (HLW) and six (LILW) respectively to two areas [5] (Fig. 1). During last year, detailed investigation works (3D seismic) started in the two proposed areas for sites [6].

The approval of the Federal Council for stage 2 can be expected in 2018 only after detailed expert examination by the authorities and a hearing. The current schedule intends that Nagra can announce provisional sites from 2022 based on the detailed site investigation in preparation for the general licence applications (RBG). By 2025, two RBG (for the decision of the site and the facility in its basic layout) should be submitted one for low- and intermediate level waste repository and one for high-level waste. After the general licence approval has been issued by the Federal Council, the agreement of the parliament and a national facultative Referendum, on site underground investigations will start from 2031. Finally, the facilities will be built; the emplacement of waste will start from about 2050 (LILW) and 2060 (HLW) respectively (Fig. 2).

The deep geological repository project will cost about 10 billion CHF (with accrued costs so far of more than 1 billion CHF). The operation of the repository lies in the distant future, but the selection of the site in the next few years will be an important decision from the perspective of underground construction: until the RBG is issued, the project will be substantiated, including consideration of construction technology for the underground infrastructure with





1 Vorgeschlagene geologische Standortgebiete mit Lagerperimeter und bezeichnete Standortareale für Oberflächenanlagen beim Hauptzugang (Stand Dezember 2014)

Proposed geological site area with repository perimeter and designated site area for surface facilities at the main entrance (as of December 2014)

Entscheid: Bis zum RBG wird dazu das Projekt weiter konkretisiert, auch im Hinblick auf die Bautechnik der untertägigen Infrastruktur und der Lagerkammern für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle mit den zugehörigen technischen Barrieren. Die Arbeiten der Nagra verschieben sich damit zunehmend von der Forschung und Entwicklung hin zur Projektierung, Bautechnik und Betriebsplanung. Mit dem Vortrag möchte die Nagra die interessierte Tunnelwelt über den derzeitigen Stand der Projekte und die kommenden Herausforderungen mit Schwerpunkt auf den Untertagbau informieren; auch mit der Absicht, das breite Erfahrungswissen der Ingenieur- und Bauunternehmungen bei der Weiterentwicklung vermehrt zu nutzen.

## 2 Zweck der Tiefenlagerung und ihre Voraussetzungen dazu

Der Zweck der Tiefenlagerung ist der dauerhafte, sichere und unterhaltsfreie Einschluss aller in der Schweiz angefallenen radioaktiven Abfälle in einer langzeitstabilen

the associated technical barriers. The work of the Nagra will thus increasingly change from research and development to project implementation, construction technology and operational planning. With this talk, Nagra intends to inform the interested tunnelling industry about the current status of the project and the coming challenges, concentrating on underground construction; also with the intention of making use of the broad practical experience of engineers and contractors in further developments.

## 2 The Purpose of Deep Disposal and the Preconditions

The purpose of deep geological disposal is permanent, safe and maintenance-free enclosure of all radioactive waste produced in Switzerland in a geological stratum with long-term stability. After decades of research and extensive geological investigations, Switzerland has selected the Opalinus clay, which is a sub-horizontally bedded stiff clay stone about 100 m thick, dipping to the south, as the preferred host rock

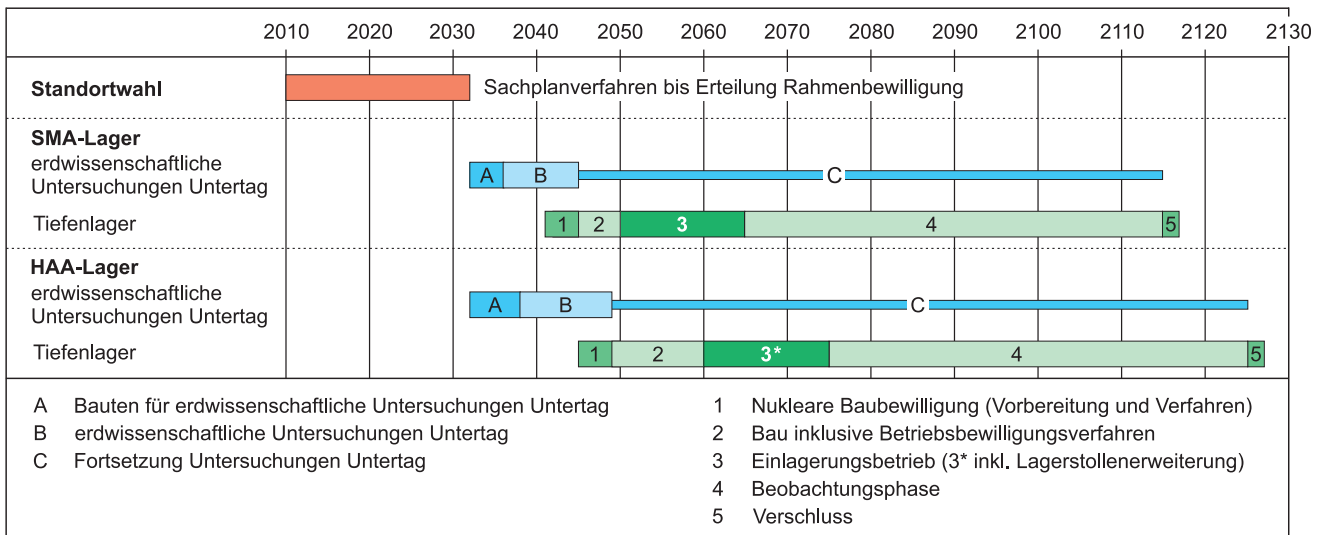
geologischen Schicht. Die Schweiz hat nach jahrzehntelanger Forschung und umfangreichen geologischen Untersuchungen den rund 100 m mächtigen, nach Süden einfallenden, subhorizontal gelagerten Opalinuston als das bevorzugte Wirtgestein für beide Lagertypen gewählt. Ausschlaggebend dafür sind die hervorragenden Einschluss- und Rückhalteeigenschaften des Tonsteins, welcher in ausreichender Ausdehnung in tektonisch nicht bzw. wenig beanspruchten Gebieten in der Nordschweiz in geeigneter Tiefe zwischen 400 bis 900 m vorkommt. Hinweise zum geotechnischen Verhalten finden sich beispielsweise in [7].

Insgesamt sind rund 90 000 m<sup>3</sup> verpacktes Volumen an SMA in Kavernen einzulagern. Dazu sind rund 205 000 m<sup>3</sup> Kavernenvolumen zu schaffen, was bei einer bevorzugten Kavernengröße von 110 m<sup>2</sup> lichter Fläche (Bild 3) einer Gesamtkavernenlänge von ca. 1900 m entspricht (neun Kavernen à 210 m Länge).

for both types of repository. The decisive factors in this decision are the excellent embedding and retention properties of the claystone (Tonstein), which is found with sufficient extent in tectonically undisturbed or slightly disturbed areas of Northern Switzerland at suitable depths of between 400 and 900 m. Information about its geotechnical behaviour can be found for example in [7].

Altogether about 90,000 m<sup>3</sup> of packed volume of low-and intermediate-level waste LILW are to be emplaced in caverns. This will require the construction of caverns of about 205,000 m<sup>3</sup> volume, which with a preferred cavern size of 110 m<sup>2</sup> clearance (Fig. 3) corresponds to a total cavern length of about 1,900 m (nine caverns each 210 m long).

For the permanent disposal of all high-level waste, about 2,000 welded thick-walled disposal containers of steel or copper coated (L = 5 m, Ø = 1.05 m, mass = 25 t) will be emplaced. Due to the still substantial heat produced by



2 Realisierungsprogramm geologische Tiefenlager in der Schweiz (Stand 2016)  
Implementation programme for the deep geological repository in Switzerland (as of 2016)

Lagerstollen	SMA-Lagerkaverne	Lagerfeldzugang	Zugangstunnel	Betriebsschacht (Lüftungsschacht)
LF = 5.7 m <sup>2</sup> ø = 2.8 m AF = 8.1 m <sup>2</sup>	LF = 110 m <sup>2</sup> LH/LB = 12.6/10.4 m AF = 124... 138 m <sup>2</sup>	LF = 20.5 m <sup>2</sup> LH/LB = 4.8/5.0 m AF = 27.4 m <sup>2</sup>	LF = 31.8 m <sup>2</sup> LH/LB = 5.3/7.0 m AF = 47.0 m <sup>2</sup>	LF = 57 m <sup>2</sup> (28 m <sup>2</sup> ) ø = 8,5 m (6.0 m) AF = 80 m <sup>2</sup> (43 m <sup>2</sup> )

LF = Lichte Fläche    LH = Lichte Höhe    LB = Lichte Breite    AF = Ausbruchfläche

3 Typische Normalprofile im geologischen Tiefenlager  
Typical standard profiles in the deep geological repository

Für die dauerhafte Einlagerung aller hochaktiven Abfälle sind rund 2000 verschweisste dickwandige Endlagerbehälter aus Stahl oder mit Kupfer beschichtet (L = 5 m, Ø = 1,05 m, Masse = 25 t) einzulagern. Aufgrund der noch beträchtlichen Nachzerfallswärme der hochaktiven Abfälle und der Empfindlichkeit des Tonsteins und des Verfüllmaterials aus Bentonit bei grossem Wärmeeintrag dürfen die Behälter nicht zu dicht eingelagert werden. Die derzeitige Auslegung geht von einem Endlagerbehälter mit 1500 W Wärmeleistung zum Zeitpunkt der Einlagerung bei einem Stollenabstand von 40 m und einem Abstand zwischen den Behältern von 3 m aus. Im derzeitigen Konzept ist vorgesehen, diese Endlagerbehälter in bis zu 1000 m langen, subhorizontalen Lagerstollen mit lichtigem Durchmesser von ca. 2,8 m einzulagern (Bild 3). Für die 2000 Behälter sind dazu ungefähr 17 km Lagerstollen in der Mittellage des Opalinuston aufzufahren.

### 3 Was unterscheidet die Tiefenlager von anderen Untertagebauwerken?

Die Planung der geologischen Tiefenlager stellt die Ingenieure aus folgenden Gründen vor neuartige Herausforderungen:

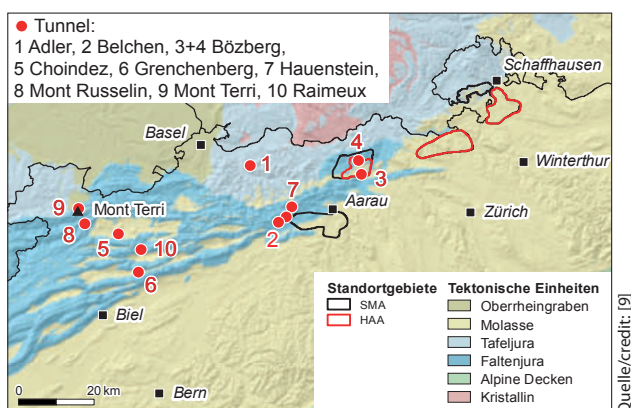
- Ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle gibt es in dieser Form weltweit noch nicht. Die Aufgabe der Nagra verlangt daher eine sorgfältige, schrittweise Planung und die enge Zusammenarbeit mit allen Akteuren in der Schweiz. Dank der etablierten Zusammenarbeit nutzt die Schweiz auch die Erfahrungen im Ausland; so wurde vergangenen Herbst der Bau des ersten geologischen Tiefenlagers für hochaktive Abfälle in Finnland bewilligt; 2011 wurde das Baugesuch für ein Tiefenlager am Standort Forsmark in Schweden eingereicht, und Frankreich plant, demnächst ein Baugesuch für ein Tiefenlager im Tonstein einzureichen [8].
- Aus der Forderung nach dauerhaftem Einschluss und Rückhaltung über einen Zeitraum von 100 000 bis 1 Mio. Jahren leiten sich zahlreiche Anforderungen an die geologischen und technischen Barrieren ab. Die wichtigste Barriere bildet der Opalinuston. Aufgrund der sehr lan-

radioactive decay and the susceptibility of the claystone and the bentonite backfilling material under high heat input, the containers cannot be placed too densely. The current layout assumes a disposal container with a heat output of 1,500 W at the time of placing in the repository with a tunnel spacing of 40 m and a spacing between the containers of 3 m. In the current concept, it is intended to store these disposal containers in sub-horizontal disposal tunnels up to 1,000 m long with a clear diameter of about 2.8 m (Fig. 3). For the 2,000 containers, about 17 km of disposal tunnels will have to be driven in the middle of the Opalinus clay.

### 3 How Does the Deep Geological Repository Differ from Other Underground Structures?

The design of the deep geological repository poses new challenges for the engineers for the following reasons:

- There is not yet any such deep geological repository for high-level waste in the world. The task of Nagra therefore demands meticulous, staged planning and the close collaboration of all stakeholders in Switzerland. Thanks to the established collaboration, Switzerland can also make use of experience from abroad; for example the construction of the first deep geological repository for high-level waste in Finland was approved in Autumn last year; in 2011, a construction permit was applied for a deep geological repository at Forsmark in Sweden, and France plans to submit an application for the approval of a deep repository in claystone soon [8].
- Starting from the requirement for longterm enclosure and retention over a period of 100,000 to 1 million years, numerous requirements can be derived for the geological and technical barriers. The most important barrier is formed by the Opalinus clay. Due to the very long time periods, the law and the regulators demand safety optimisation for every element of the repository. For example, the effects of the storage repository like the damage to the host rock as a result of excavation or the installation of construction materials with an unfavourable effect on the claystone are restricted. The quantitative implementation of these optimisations, however, still remains technically and scientifically challenging.
- The Opalinus clay, a brittle, overconsolidated claystone, is known to Swiss tunnellers from various tunnels through the Jura mountains [9] (Fig. 4). While all these tunnels were mostly driven at right angles to the dipping strata and with overburdens of less than 100 m, there is practically no experience of the construction of an entire facility in the Opalinus clay at greater depths up to 900 m and parallel to the strata of the horizontally bedded claystone. The anisotropic and time-dependent strength and deformation behaviours are known from experience at the Mont Terri rock laboratory [10], and are mostly characterised by increased ravelling and deformations at right angles to the bedding when tunnelled parallel to the strata (Fig. 5).
- In addition to construction, operation and closure are also important for the design: the operation of a storage reposi-



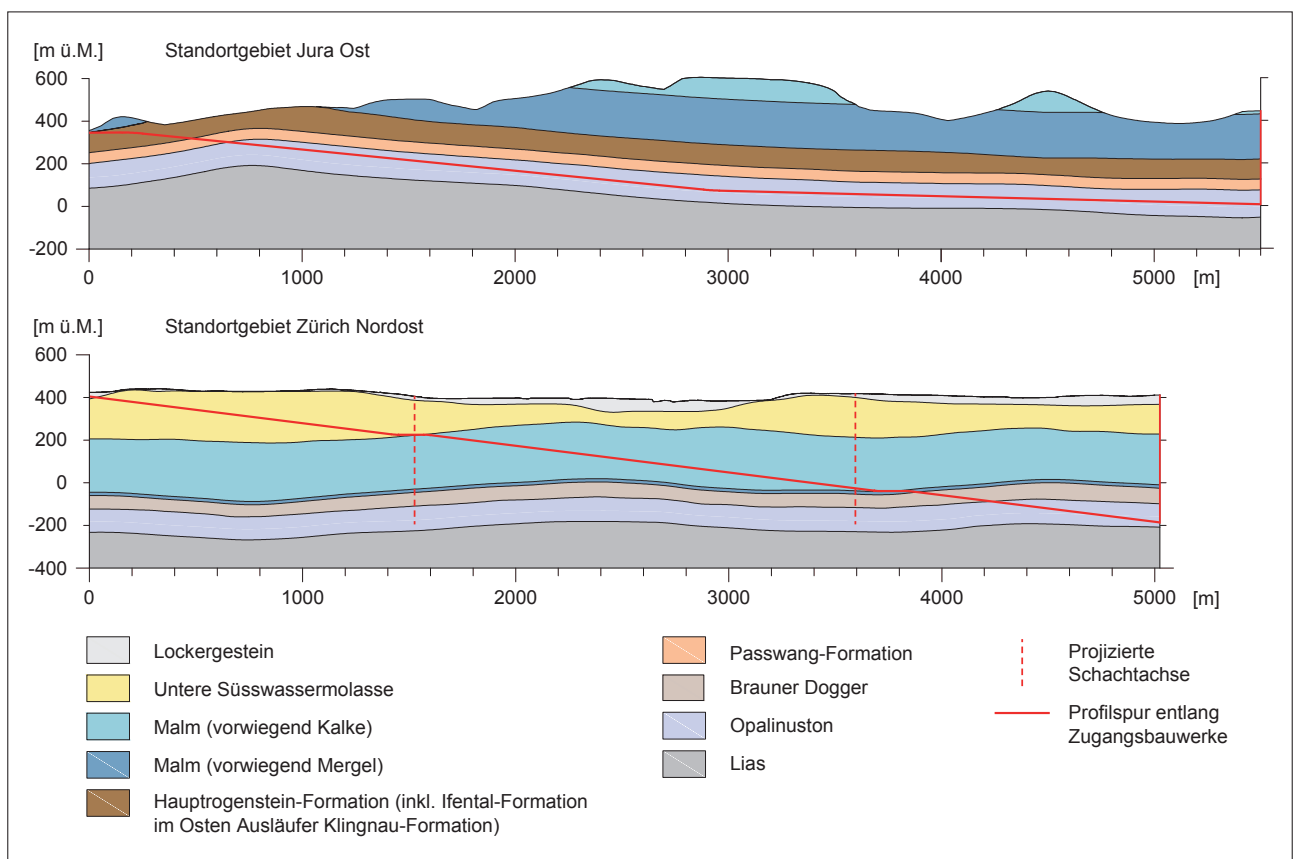
4 Geologie des Juras mit Tunnel durch Opalinuston  
 Geology of the Jura mountains with tunnel through Opalinus clay

gen Zeiträume fordern das Gesetz und das behördliche Regelwerk für jedes Lagerelement die sicherheitstechnische Optimierung. So sollen beispielsweise die lagerbedingten Einflüsse wie die Schädigung des Wirtgesteins infolge des Ausbruchs oder der Einbau von auf Tonstein ungünstig wirkenden Baumaterialien beschränkt werden. Die quantitative Umsetzung dieser Optimierungsanforderung bleibt aber technisch-wissenschaftlich anspruchsvoll.

- Der Opalinuston – ein spröder, überkonsolidierter Tonstein – ist den Tunnelbauern in der Schweiz aus verschiedenen Juradurchstichen bekannt [9] (Bild 4). Während all diese Tunnel hauptsächlich normal zu den einfallenden Schichten und mit Überlagerungen von wenigen 100 m aufgefahren wurden, liegen praktisch keine Erfahrungen für die Erstellung einer ganzen Anlage im Opalinuston in grösserer Tiefe bis 900 m und schichtparallel zum horizontal gelagerten Tonstein vor. Aufgrund der Erfahrungen im Felslabor Mont Terri [10] ist das anisotrope und zeitabhängige Festigkeits- und Verformungsverhalten bekannt, was sich vor allem bei schichtparalleler Auffahrung in verstärkten Ablösungen und Deformationen normal zur Schichtung auszeichnet (Bild 5).
- In der Planung spielen neben dem Bau auch der Betrieb und Verschluss eine wichtige Rolle: Der Betrieb der als Nuklearanlagen eingestufteten Tiefenlager verlangt grosse Sorgfalt und stellt neuartige Anforderungen an die Arbeit



5 Foto der Auflockerungszone um ein Bohrloch im Opalinuston (Felslabor Mont Terri)  
Photo of the loosened zone around a borehole in the Opalinus clay (Mont Terri rock laboratory)



6 Geologische Längensprofile durch modellhafte Zugangsrampen in den beiden vorgeschlagenen Standortgebieten Zürich Nordost (ZNO) und Jura Ost (JO)  
Geological longitudinal profile with model access ramps at the two proposed site areas Zurich Nordost (ZNO) and Jura Ost (JO)

Quelle/credit: [11]

in den untertägigen Anlagen. Dazu gehören auch die notwendigen Erhaltungskonzepte, für die unter Berücksichtigung der vorgesehenen Beobachtungsphase eine Nutzungsdauer von 100 Jahren zugrunde liegt.

- Die Vorbereitung und die bauliche Realisierung erfolgen etappiert gemäss Kernenergiegesetz [1] und Sachplan [2]; jeder Entscheidungspunkt erfordert die Bewilligung durch den Bundesrat. Diese Anforderung verlangt einerseits eine stufenweise Konkretisierung der Projekte, wobei dem Erhalt des für die Optimierung notwendigen Handlungsspielraums (zum Beispiel für die Anordnung der Lagerfelder oder der Linienführung der Zugangsbauwerke) entsprechend dem Projektstatus die notwendige Beachtung zu schenken ist.
- Der Zugang von der Oberfläche auf die Lagerebene in den vorgeschlagenen Standortgebieten erfordert die Querung ungefalteter Schichtfolgen mesozoischer und tertiärer Sedimente, zu denen auch mächtige Malmkalkformationen in Tiefen bis 500 m unter dem überregionalen Entwässerungsniveau gehören. Diese je nach Klüftung und Verkarstung potenziell stark wasserführende Formation ist aus Sicht der Nagra eine relevante Herausforderung beim fallenden Auffahren der Zugangsbauwerke (Schächte, Rampen) [11]. Das Bild 6 zeigt typische geologische Längsprofile modellhafter Zugangsrampen in den beiden von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebieten Zürich Nordost (ZNO) und Jura Ost (JO).

Anhand von ausgewählten Lösungsansätzen möchte die Nagra auf zwei mögliche Schwerpunkte in der kommenden Konkretisierung der Untertagprojekte eingehen.

#### 4 Bau der Anlage unter Betrieb und Bewahrung des Handlungsspielraums

Die Lagerarchitektur definiert alle notwendigen Bauwerke des Tiefenlagers und beschreibt deren räumliche Anordnung. Auch stellt sie sicher, dass alle notwendigen Funktionen des Tiefenlagers in allen Realisierungsphasen (Bau, Betrieb, Beobachtung, Verschluss) unter Berücksichtigung aller Anforderungen zuverlässig und sicher erfüllt werden können. Ein geologisches Tiefenlager gleicht in seiner Grundkonzeption eher einem Grubengebäude als einem Tunnel. Die räumliche Anordnung ist so gewählt, dass die geplante etappenweise Realisierung inklusive Erweiterung und Rückbau der Gesamtanlage sicher und zuverlässig möglich und dass der geforderte Handlungsspielraum und die notwendige Flexibilität in jedem Bewilligungsschritt erhalten bleiben. Das Bild 7 zeigt schematisch die Lagerarchitektur eines HAA-Lagers mit den verschiedenen Elementen und Bauetappen.

Das Anlagenkonzept stellt sicher, dass die Langzeitbarrierenwirkung des Opalinustons und der technischen Barrieren in allen Betriebsarten (Normalbetrieb, Störfallbetrieb, Baubetrieb) erhalten bleiben. Dies wird beim HAA-Lager erreicht, indem

tory, which is categorised as a nuclear facility, demands the greatest care and poses new requirements for working in underground facilities. This also includes the necessary maintenance plans, which are planned for a operating life time of 100 years considering the intended observation period.

- The preparation and the construction will be carried out in stages according to the Nuclear Energy Act [1] and the Sectoral Plan [2]; each decision requires approval by the Federal Council. This requirement demands on the one hand a staged specification of the project, while preserving the scope for action necessary for optimisation (for example for the arrangement of the deposition areas or the alignment of the access tunnel) having to be paid the appropriate attention according to the state of the project.
- Access from the surface to the repository level in the proposed deposition areas requires the crossing of unfolded strata of Mesozoic and Tertiary sediments, including the thick Malm limestone formations at depths of up to 500 m below the supra-regional drainage level. This formation, which is potentially highly aquiferous depending on the jointing and the karstification, is in the view of Nagra a relevant challenge for the downhill driving of the access structures (shafts, ramps) [11]. Fig. 6 shows typical geological longitudinal profiles of model access ramps at the two site locations proposed by the Nagra at Zurich Nordost (ZNO) and Jura Ost (JO).

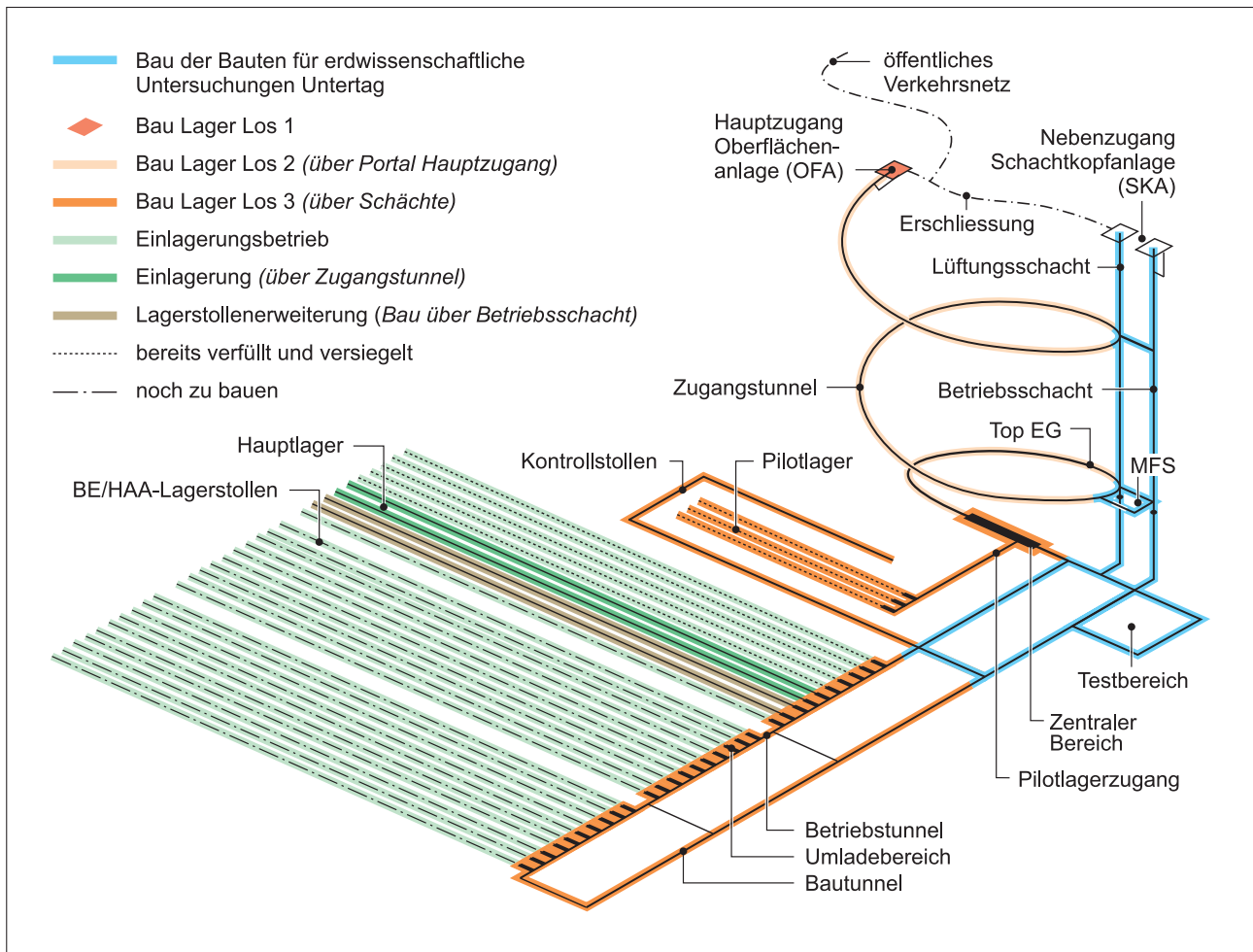
Based on selected solution approaches, Nagra will discuss below in more detail two likely key aspects in the forthcoming processing of the underground projects.

#### 4 Construction of the Facility during Operation and Preservation of Scope for Action

The repository architecture defines all the necessary structures of the deep geological repository and describes their layout. It also ensures that all the necessary functions of the underground facility can be reliably and safely fulfilled in all phases of implementation (construction, operation, observation, closure) under consideration of all requirements. A deep geological repository is more similar in its basic conception to a mine than a tunnel. The spatial layout has been selected so that the planned staged implementation including enlargement and dismantling of the entire facility is possible safely and reliably and that the required scope for action and the necessary flexibility are preserved at each step of approval. Fig. 7 shows a schematic illustration of the repository architecture of a HLW repository with the various elements and construction sequences.

The facility concept ensures that the long-term barrier effect of the Opalinus clay and the technical barriers are preserved in all types of operation (normal operation, operation in case of an incident construction operation). This is achieved for the HLW repository by the following measures

- The number and size of the underground structures in the deposition zone as well as the quantities of construction materials are restricted to the necessary degree in order to minimise the effects of the repository on the Opalinus clay



7 Systemskizze der Lagerarchitektur eines HAA-Lagers mit den Elementen und Bauetappen

System sketch of the storage architecture of the high-level HAA repository with the elements and construction stages

- die Anzahl und Grösse der untertägigen Bauwerke in der Lagerzone sowie die Menge an Baumaterialien zur Minimierung der lagerbedingten Einflüsse auf den Opalinuston auf das notwendige Mass beschränkt werden
- der Bau der Lagerstollen zeitgleich zur Einlagerung erfolgt, sodass jeweils nur eine minimale Anzahl von Stollen synchron betrieben werden muss und die Standzeit zwischen dem Auffahren und der Verfüllung auf wenige Jahre beschränkt werden kann
- die Bauwerke in der Lagerzone möglichst in der Mittellage des barrierenwirksamen Gebirgsbereichs angeordnet werden (maximaler vertikaler Migrationspfad im intakten Wirtgestein)
- die Lagerfelder bzw. Lagerkammern mit einem Sicherheitsabstand ausserhalb von regionalen und anordnungsbestimmenden geologischen Elementen (Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen) angeordnet werden
- und die Lagerbauten nach Einlagerung zügig verfüllt und verschlossen werden.

Die Gewährleistung des zuverlässigen und sicheren Betriebs wird unter anderem erreicht, indem relevante Funktionen und Prozessschritte

- The construction of the emplacement tunnels takes place concurrently to the emplacement storing, so that only a limited number of tunnels have to be operated at the same time and the standing time between excavation and back-filling can be restricted to the necessary extent.
- Structures in the deposition zone are arranged as far as possible in the middle of the rock mass with the barrier effect (maximum vertical path in the intact host rock)
- The deposition fields or the emplacement rooms are arranged with a safety margin outside regional and geological elements that determine the arrangement (fault zones, tectonic zones to be avoided)
- and the deposition facilities will be promptly backfilled and closed after emplacing.

The guarantee of reliable and safe operation will be achieved, among other factors, if relevant functions and process steps

- are kept separate in time and space as far as is sensible from the safety viewpoint (for example nuclear and non-nuclear zones)
- are constructed to be redundant and sufficiently robust (for example that safety-relevant elements of the facility can be replaced or renewed without safety restrictions).

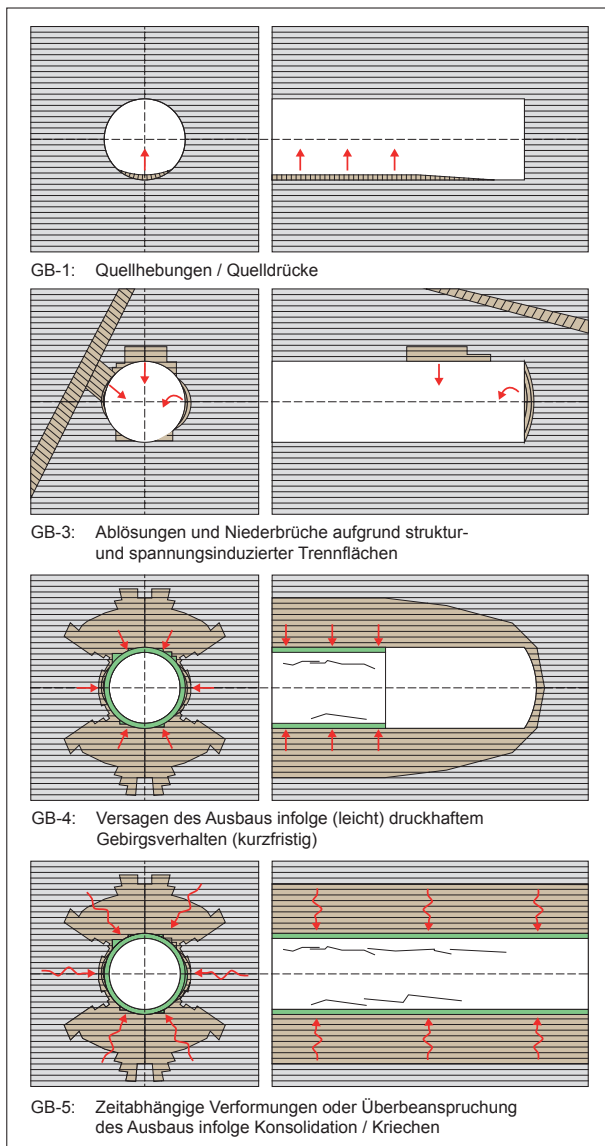
- räumlich oder zeitlich getrennt erfolgen, sofern sicherheitstechnisch sinnvoll (zum Beispiel nukleare und nicht-nukleare Zonen)
- redundant und ausreichend robust ausgelegt werden (etwa so, dass auch bei längerer Nutzungsdauer sicherheitsrelevante Anlagenelemente ohne Sicherheitseinschränkung ersetzt oder erneuert werden können).

Das aktuelle Anlagenkonzept des Tiefenlagers geht heute von folgendem Handlungsspielraum bei der Anordnung der Lagerbereiche aus:

- Die Zugangsbauwerke sollen auf Lagerebene zentral in einem Haupteintrittsbereich (HEB) zusammengeführt und hier die Bauten für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen unter Tage, der Testbereich und der Zentrale Bereich konzentriert angeordnet werden. Damit

The current conceptual design of the facility assumes the following scope for action in the arrangement of the deposition areas:

- The access structures at repository level are located centrally in a main access area (HEB) and the underground facilities for the underground earth science investigations, the test area and the central area are concentrated at this location. In this way, the host rock is preserved as far as possible in favour of the deposition fields, and there is the greatest flexibility for the optimal arrangement of the deposition fields based on results of the underground earth science investigations with regard to long-term safety and the space available. In addition, this also brings advantages concerning reliable operation, maintenance and operational safety (for example short escape and intervention routes).
- The emplacement rooms and fields are configured as "dead end tunnels" (that means accessible one-sided) in order that the available space is efficiently used (adaptation to the geological elements) and the host rock is disturbed as little as possible.



8 *Massgebende geologische Gefährdungsbilder für die Lagerstellen im HAA-Lager*  
*Decisive geological hazard scenarios for the emplacement tunnels in the HLW repository*

### 5 Construction of the Emplacement Tunnels

With a total length of about 17 km, the sub-horizontal emplacement tunnels for the high-level waste represent the most challenging part of the deep repository. In the current view, the following hazard scenarios are decisive for the design of the storage tunnels (Fig. 8):

- Impermissible invert heave and overloading of the support resulting from swelling clay and the use of water
- Danger to health and safety due to climatic conditions and the high dust exposure
- Danger to working safety and favourable implementation conditions for the technical barriers (bentonite granulate) as a result of raveling and rock falls in the area of advance (caused structurally by bedding and faults or induced by stress as a result of the deep overburden and rock mass anisotropy)
- Stress-induced overloading and deformations of the support as a result of slightly squeezing or squeezing rock mass behaviour during excavation
- Time-dependent deformations and overloading of the support due to consolidation and creeping of the saturated Opalinus clay.

Nagra is investigating various tunnelling and support concepts. Currently mechanised tunnelling with an openmode tunnel boring machine (TBM) (D = 3.2 m) with sprayed concrete liner is the preferred option. In certain sections, there will be a linear support (steel arch installation) for the implementation of intermediate seals, which will provide direct contact between the swelling bentonite buffer and the Opalinus clay in the long term (Fig. 9). In addition to this, alternative tunnelling and support concepts are not ruled out [12].

The selected support concept should ensure that ruptures and cavities near the contour, which are not desirable for

bleibt das Wirtgestein zugunsten der Lagerfelder möglichst erhalten, und es besteht grösste Flexibilität zur optimalen Anordnung der Lagerfelder auf der Basis der erdwissenschaftlichen Untersuchungen unter Tage in Bezug auf die Langzeitsicherheit und das Platzangebot. Zudem ergeben sich dadurch Vorteile in Bezug auf den zuverlässigen Betrieb, den Unterhalt und die Betriebssicherheit (zum Beispiel kurze Flucht- und Interventionswege).

- Die Lagerkammern und -felder werden als «Blindstollen» konfiguriert (das heisst: einseitig erschlossen). Damit kann das Platzangebot effizient ausgenutzt (Anpassung an geologische Elemente) und das Wirtgestein maximal geschont werden.

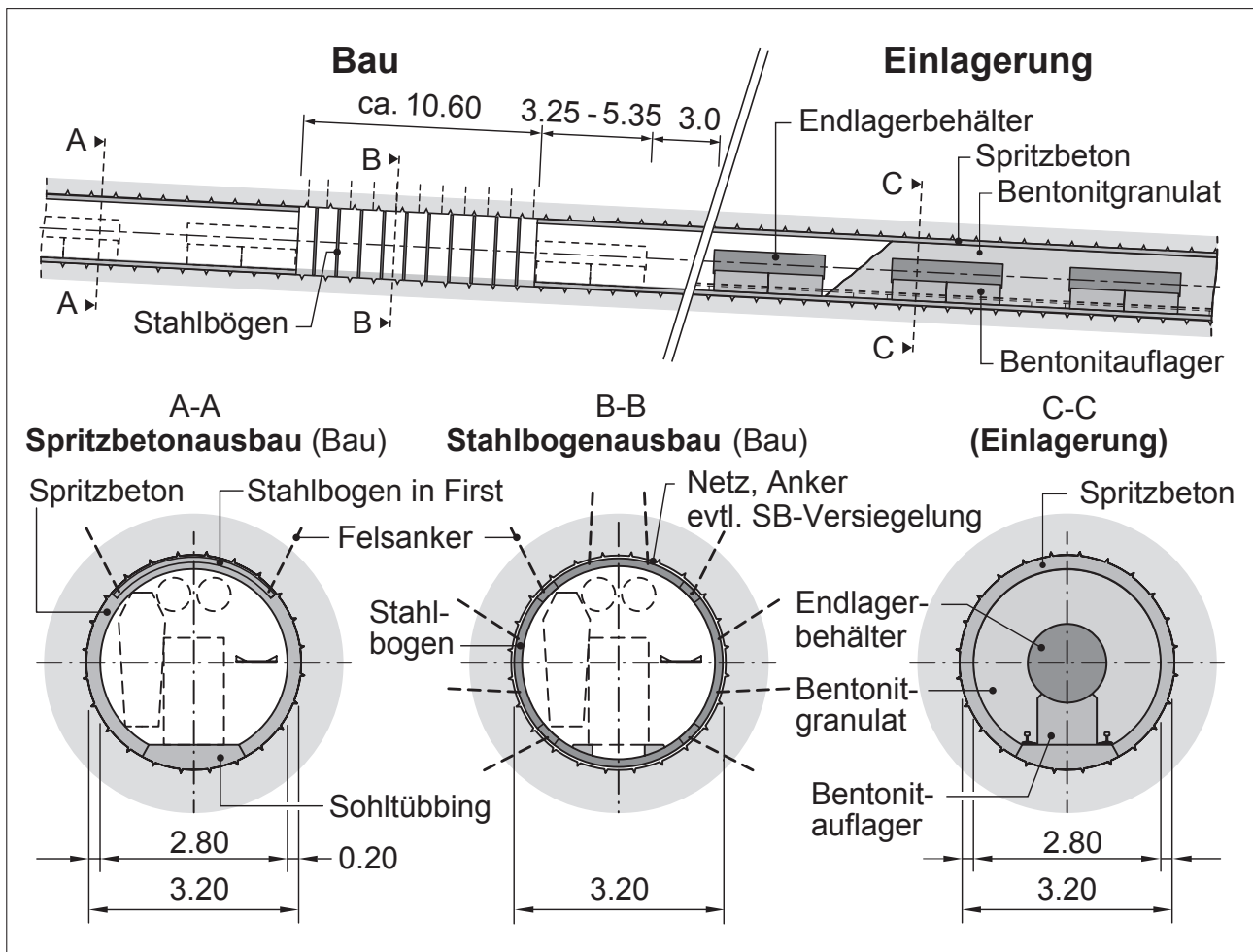
### 5 Bau der Lagerstollen

Mit rund 17 km Länge stellen die subhorizontalen Lagerstollen für das HAA-Lager den anspruchsvollsten Teil des Tiefenlagers dar. Aus heutiger Sicht sind folgende Gefährdungsbilder für die Auslegung der Lagerstollen massgebend (Bild 8):

- unzulässige Sohlhebungen und Überbeanspruchung des Ausbaus infolge Tonquellen bei Verwendung von Wasser
- Gefährdung des Gesundheitsschutzes aufgrund der klimatischen Verhältnisse und hoher Staubbelastung

reasons of long-term safety, are avoided or at least can be filled and that sufficient support resistance can be applied with yielding lining in squeezing conditions. The relatively homogeneous rock mass conditions, the long construction period, the long preparation time of ten years with full-scale tests at the repository level as well as the considerable length favour the development of an optimally designed TBM including the associated support concept. The most important requirements for such a TBM are formulated as follows (Fig. 10):

1. Avoidance of water use to prevent clay swelling
2. Guarantee of health and safety protection despite the high temperatures (rock mass temperatures of 35°C and more (depending on site area), waste heat from the tunnelling machinery and dust development (no water binder to avoid swelling rock mass, quartz content up to 20% by weight). This may possibly be achieved by mostly remote-controlled or fully mechanised tunnelling and support machinery (with access ensured for interventions)
3. Avoidance of ruptures and limitation of raveling through the installation of support measures (for example short rock bolts, steel arches in the crown) as near as possible behind the cutterhead as working protection and to



9 Mögliches Sicherungskonzept der Lagerstollen für BE und HAA-Endlagerbehälter  
Possible support concept for the emplacement tunnels for SF and HLW disposal containers

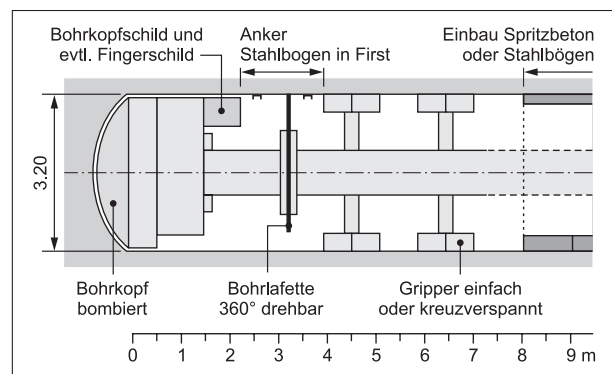


- Gefährdung der Arbeitssicherheit und der günstigen Einbaubedingungen für die technischen Barrieren (Bentonitgranulat) infolge Ablösungen und Niederbrüchen im Vortriebsbereich (strukturbedingt durch Schichtung und Störungen und spannungsinduziert aufgrund der hohen Überlagerung und Gebirgsanisotropie)
- spannungsinduzierte Überbeanspruchung und Verformungen des Ausbaus infolge druck- bzw. leicht druckhaftem Gebirgsverhalten während des Vortriebs
- zeitabhängige Verformungen und Überbeanspruchung des Ausbaus infolge Konsolidation und Kriechen des gesättigten Opalinustons.

Die Nagra untersucht verschiedene Vortriebs- und Sicherungskonzepte. Derzeit steht der mechanisierte Vortrieb mit einer offenen Tunnelbohrmaschine (TBM) ( $D = 3,2$  m) mit Spritzbetonausbau im Vordergrund. In bestimmten Abschnitten erfolgt ein linienförmiger Ausbau (Stahlbogenausbau) für den Einbau von Zwischensiegeln, welche langfristig einen direkten Kontakt zwischen quellender Bentonitverfüllung und Opalinuston sicherstellen (Bild 9). Daneben sind auch alternative Vortriebs- und Sicherungskonzepte nicht ausgeschlossen [12].

Das gewählte Ausbaukonzept soll dafür sorgen, dass die aus Gründen der Langzeitsicherheit unerwünschten konturnahen Ausbrüche und Hohlräume vermieden oder zumindest gefüllt werden können und dass ein ausreichender Ausbauwiderstand bei druckhaftem Verhalten mit nachgiebigem Ausbau aufgebracht werden kann. Die relativ homogenen Gebirgsverhältnisse, die lange Bauzeit, die grosse Vorbereitungszeit von zehn Jahren mit 1:1-Tests auf Lagerebene sowie die beträchtliche Länge begünstigen die Entwicklung einer optimal ausgelegten TBM einschliesslich des dazu gehörenden Sicherungskonzepts. Die wichtigsten Anforderungen an eine solche TBM können wie folgt formuliert werden (Bild 10):

1. Meidung von Brauchwasser zur Verhinderung von Tonquellen
2. Gewährleistung des Gesundheitsschutzes trotz hoher Temperaturen (Gebirgstemperatur von  $35^{\circ}\text{C}$  und mehr – je nach Standortgebiet – Abwärme der Vortriebseinrichtung) und Staubeentwicklung (kein Wasserbinder zur Meidung von Gebirgsquellen, Quarzgehalt bis 20 Gew. %). Dies kann vermutlich nur durch eine weitestgehend ferngesteuerte oder vollmechanisierte Vortriebs- und Sicherungseinrichtung erreicht werden (für Intervention Zugänglichkeit gewährleisten)
3. Vermeidung von Niederbrüchen und Beschränkung von Ablösungen durch Einbau von Sicherungsmassnahmen (beispielsweise kurze Felsanker, Stahlbogen in der Firste) möglichst nahe hinter dem Bohrkopf als Arbeitsschutz und zum Erhalt günstiger Einbaubedingungen bei Einlagerung der Abfälle und Einbringen des Verfüllmaterials sowie die Meidung des Verklemmens der TBM
4. möglichst frühzeitiger Einbau einer über den vollen Umfang wirkenden Gebirgsstützung (kurze Ringschlussdistanz) mit einem durchschnittlichen Ausbauwiderstand während der kurzen Nutzungsdauer zwischen 0,5 und 2 MPa



**10** Anforderungen an eine optimierte TBM mit Nachläufer  
Requirements for an optimised TBM with backup

maintain favourable implementation conditions for the emplacement of the disposal canister and stowing of the backfill material as well as to avoid jamming of the TBM

4. Earliest possible installation of a rock mass support acting around the entire perimeter (short ring closure distance) with an average support resistance during the operating life time between 0.5 and 2 MPa
5. Sufficient yielding of the support (for example yielding elements) in squeezing conditions to avoid overloading and failure until emplacing and backfilling
6. Due to the operating constraints (parallel emplacing of waste), up to 1,800 m of tunnel will have to be driven annually in a timeframe of about 30 weeks, which corresponds to an average advance rate of 6 m/d, assuming two parallel drives and five days of continuous operation
7. Optimisation of the assembly time and limitation of TBM parts left in the rock mass (e. g. shield skin) as a result of withdrawing the machine from the end of a dead end tunnel
8. Limitation of the backup length considering the restricted space available at the launching niche.

## 6 Conclusions

According to the current state of planning, about 45 km of tunnels, shafts and caverns will have to be excavated to implement the deep geological repositories in Switzerland, mostly in the Opalinus clay at depths of 600 to 900 m. Despite the mentioned special conditions, the preconditions are given that optimal conditions for construction can be created. In addition to the staged implementation, the extensive earth science investigation, the long design phase and the possibility of being able to arrange the underground facilities according to the geomechanical conditions, the option of the choice of site is one of the decisive preconditions for this. This site selection will be made in the next few years.

## Literatur/References

- [1] Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG)/Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV), Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1/SR 732.11, Schweiz

5. ausreichende Nachgiebigkeit des Ausbaus (zum Beispiel Stauchelemente) bei druckhaften Verhältnissen zur Vermeidung der Überbeanspruchung und des Versagens bis zur Einlagerung und Verfüllung
6. aufgrund der betrieblichen Randbedingungen (parallel Einlagerung der Abfälle) sind jährlich bis zu 1800 m Strecken in einem Zeitfenster von rund 30 Wochen aufzufahren, was einer durchschnittlichen Vortriebsgeschwindigkeit von 6 m/d unter Annahme von zwei parallelen Vortrieben und fünf Tagen Durchlaufbetrieb entspricht
7. Optimierung der Ummontagezeit und Minimierung der im Gebirge verbleibenden TBM-Maschinenteile (zum Beispiel Schildmantel) infolge Rückzug der TBM vom Ende des Blindstollens.
8. Beschränkung der Nachläuferlänge unter Berücksichtigung der engen Platzverhältnisse in der Startnische.

### 6 Schlussfolgerungen

Gemäss heutigem Planungsstand sind rund 45 km Strecken, Schächte und Kavernen zur Realisierung der geologischen Tiefenlager in der Schweiz aufzufahren, mehrheitlich im Opalinuston in 600 bis 900 m. Trotz der erwähnten speziellen Rahmenbedingungen und besonderen Herausforderungen sind die Voraussetzungen gegeben, dass optimale Bedingungen für den Bau geschaffen werden. Neben der schrittweisen Realisierung, den umfassenden erdwissenschaftlichen Untersuchungen, der langen Planungsphase und der Möglichkeit, die untertägigen Anlagen nach geomechanischen Bedingungen optimal anordnen zu können, ist die Option der Standortwahl eine der massgebenden Voraussetzungen dafür. Dieser Standortentscheid steht in den nächsten Jahren an.

- [2] Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil. Bundesamt für Energie, Bern, 2008
- [3] Sachplan geologische Tiefenlager (SGT): Ergebnisbericht zu Etappe 1, Festlegungen und Objektblätter, Bundesamt für Energie, UVEK, Bern, 30. November 2011
- [4] SGT Etappe 2: Standortareal für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers, Planungsstudien zwischen September 2013 und Mai 2014, Nagra Arbeitsberichte, Wettingen
- [5] SGT Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nagra Technischer Bericht 14-01, Dezember 2014
- [6] 3D-Seismik für Etappe 3, Nagra-Broschüren, www.nagra.ch, 2015
- [7] SGT Etappe 2: Geomechanische Grundlagen (Dossier IV), Nagra Technischer Bericht 14-02, Dezember 2014
- [8] <http://www.nagra.ch/de/ausland.htm>
- [9] Experience from Tunneling in Shales with high Overburden, Nagra Arbeitsbericht 16-05, Februar 2016
- [10] Lanyon et al: Development and evolution of the Excavation Damaged Zone (EDZ) in the Opalinus Clay: A synopsis of the state of knowledge from Mont Terri, Nagra Arbeitsbericht 14-87, December 2014
- [11] SGT Etappe 2: Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke, Nagra Arbeitsbericht 14-50, Dezember 2014
- [12] Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2: Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nagra Technischer Bericht 10-01, Oktober 2010

Karin Böppler, Dr. Dipl.-Ing., Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweiler/DE  
Werner Burger, Dipl.-Ing. (FH), Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweiler/DE

# Innovation Track of Multi-Mode Machines for Complex Ground Conditions

## From Grauholz, via Zurich to Kuala Lumpur

The innovation track of multi-mode TBMs started back in the 1980s for a tunnelling project that was completed in variable ground conditions. A wide scope of specific ground conditions ranging from stable to soft rock conditions, mixed face or even water bearing soils belong to the most demanding requirements in tunnelling, where TBM technology can reach its technical and economical limits. Looking back at the history of the last 35 years, key infrastructure has been completed in such conditions. Herrenknecht developed so called multi-mode machines especially for these demands and project backgrounds. Multi-mode or hybrid machines incorporate the capability to adapt the excavation technology in the tunnel to suit the actual ground conditions and thus to operate the TBM in different modes. The paper will highlight the crucial development steps of these specific machines from the first application to the latest state of technology.

### 1 Change of Operation Mode – Open Single Shield and Earth Pressure Balance Shield

The classic design of Earth Pressure Balance (EPB) machine is fitted with a screw conveyor located in the invert of the shield. This machine type can operate in open mode or compressed air mode with the excavation chamber only partly filled with excavated material and it can operate in closed mode with active face support (Fig. 1). A screw conveyor is used to remove the muck from the excavation chamber in all operation modes. In closed mode, the screw conveyor is also used to control tunnel face pressure. A classic example of EPB machine application, operating in open and closed modes, was the use of two EPB machines (Ø 11.1 m) for the Katzenberg rail tunnel in Germany. The geology along the 8.9 km twin-tube tunnel was predominantly characterised by soft rock of medium to low abrasiveness, which could be excavated in open mode; but the zones with low cover in the portal area and fault zones with soft ground conditions in places were excavated in closed mode.

Specific project conditions, such as those encountered in the Saverne twin-tube rail tunnel in France, demanded an adapted machine concept. The tunnels have a length of 3.86 km and pass through an abrasive and weak sandstone formation. Due to the anticipated unstable face conditions in the portal area and a short section in the middle of the tunnel, it was decided to use a 10 m diameter EPB Shield fitted with a central belt conveyor-muck hopper configuration as the primary muck transport system for open mode working, and a telescopic screw conveyor in the bottom for closed mode operation (Fig. 2). Both systems were permanently installed alongside each other. The muck was discharged onto a secondary belt conveyor behind the ring

erection area. This machine configuration enabled the excavation of unstable sections in closed mode with active face support.

The change from closed mode to open mode required some fitting and dismantling work such as:

- dismantling of the conditioner supply pipe installations in the cutterhead centre,
- installation of cutterhead guiding plates on the rear side of the cutterhead to transport the muck from the peripheral buckets to the muck hopper in the centre,
- use of the retractable muck hopper in the cutterhead chamber.

The special design of the muck guiding plates enabled the screw conveyor to be kept operating in the partially retracted position while advancing in open mode. The system could be changed from closed to open mode in less than one week. The concept for different mucking systems in open and closed mode, as used in the machine configuration for the Saverne project, proved to be the best solution for abrasive rock conditions. Also the open-mode configuration with an operational screw conveyor in the bottom was very beneficial for invert cleaning purposes and in helping to bridge short sections of limited face stability.

### 2 Change of Operation Mode – Slurry Shield and Single Shield TBM

Mixshields or Slurry Shields, both in their classic operation modes with liquid-supported tunnel face or as a shield with dual-mode operation, have been used frequently for complex subsurface conditions. Due to its engineering concept,

## Innovation live: Multi-Mode-Maschinen für komplexe Bodenverhältnisse

### Von Grauholz über Zürich nach Kuala Lumpur

Für unterschiedliche Projekte sind oft unterschiedliche Konzepte und innovative Tunnelbautechnologien erforderlich. Klassische Schutzschild-Vortriebstechnologien sind für ein breites Spektrum spezifischer geologischer Bedingungen wie festes Gestein, weichen Boden und unterschiedliche Ortsbrustbedingungen konzipiert. Bei extrem uneinheitlichen Bodenbeschaffenheiten stoßen diese Systeme wirtschaftlich und technisch an ihre Grenzen. Hier sind flexible TBM-Konzepte gefordert, die das bestmögliche System für jeden einzelnen Abschnitt der Trasse bereitstellen. Diese Multi-Mode-TBM (auch als hybride TBM bezeichnet) bieten die Möglichkeit, den Vortriebsmodus im Tunnel an die tatsächlichen Baugrundbedingungen anzupassen. Sie können komplexe und variable geologische, hydrologische und topographische Bedingungen in sensiblen Umgebungen bewältigen – ohne Abstriche bei den erhöhten Sicherheitsanforderungen und der Wirtschaftlichkeit.

### Innovation en direct: des machines à mode convertible (multimode) pour géologies complexes

#### De Grauholz à Kuala Lumpur en passant par Zurich

Des projets différents nécessitent des concepts différents et souvent des technologies de construction souterraine innovantes. Les technologies d'excavation classiques au bouclier sont conçues pour une large palette de conditions géologiques spécifiques comme roche dure, sols meubles et conditions diverses au front de taille. Quand les types de sols sont extrêmement hétérogènes, ces systèmes se heurtent à leurs limites, économiquement comme techniquement. Il faut alors des concepts de tunneliers qui fournissent le système le mieux adapté à chaque section du tracé. Les tunneliers à mode convertible offrent la possibilité d'adapter le mode de creusement aux conditions géologiques réelles présentes dans le tunnel. Ils peuvent maîtriser des conditions géologiques, hydrologiques et topographiques complexes et variables, sans faire de concessions quant aux exigences accrues en matière de sécurité ni quant à la rentabilité.

### Innovazioni all'avanguardia: frese meccaniche multimodali per condizioni di terreno complesse

#### Da Grauholz a Zurigo fino a Kuala Lumpur

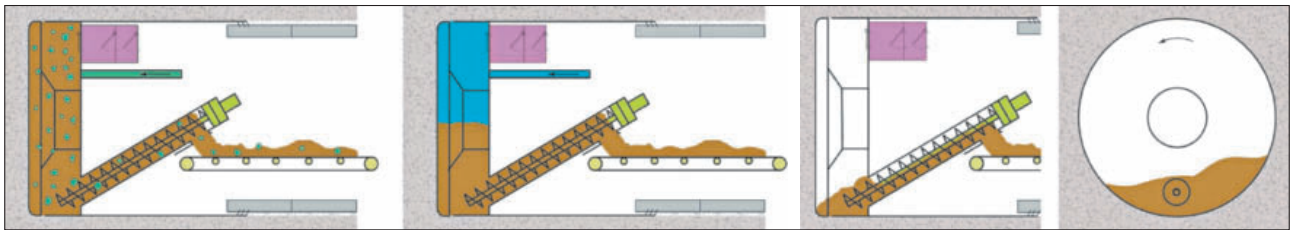
Di fronte a una grande varietà di progetti, nella realizzazione di gallerie è richiesta necessariamente anche una grande varietà di idee e tecnologie innovative. Le classiche tecnologie di avanzamento con scudo di protezione sono concepite per un'ampia gamma di condizioni geologiche specifiche come roccia solida, terreno morbido e differenti fronti di avanzamento. In condizioni di terreno estremamente disomogenee, tuttavia, questi sistemi raggiungono i loro limiti economici e tecnici. Tali situazioni richiedono soluzioni TBM flessibili che mettano a disposizione il sistema più adatto per ogni singolo tratto del tracciato. Le TBM multimodali (chiamate anche TBM ibride) offrono la possibilità di adattare il sistema di avanzamento nella galleria alle effettive caratteristiche del terreno di scavo. Sono in grado di far fronte a situazioni geologiche, idrologiche e topografiche complesse e variabili in ambienti sensibili senza andare a discapito delle esigenze sempre maggiori sia in fatto di sicurezza che di economicità.

this machine type with liquid-supported tunnel face has turned out to be a multi-purpose solution for projects posing high demands.

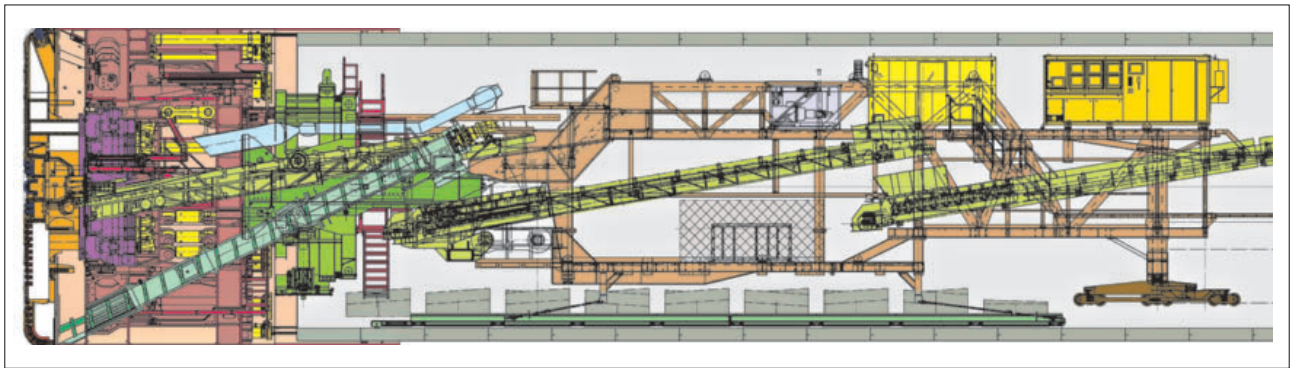
In 1989 the first concept of a dual-mode Mixshield was used to excavate the double track Grauholz rail tunnel in Switzerland. The machine design enabled changing between single shield TBM operation and slurry shield operation. While operating as single shield TBM, the cutting wheel was fitted with additional muck buckets and channels or guide plates to transfer the muck from the front through the cutterhead via a retractable muck hopper. The muck was then transferred to a centre belt. In ground conditions or sensitive environment that demanded closed mode operation

and active support of the tunnel face, the TBM mode of operation could be changed from open mode with dry mucking to closed slurry mode operation with active liquid support to the tunnel face. The muck hopper in the centre was then retracted to allow slurry shield operation with active face support and hydraulic muck removal from the excavation chamber by means of a slurry circuit. The installation of a jaw crusher in the invert was still possible in slurry shield operation; this was in no way compromised by the convertible nature of the machine.

A change of operation mode between slurry shield and single shield TBM can be configured as an integrated machine concept (Fig. 3) to enable fairly quick conversion



1 EPB Shield: (from left to right) closed mode, compressed air mode, open mode



2 Dual-mode EPB shield for Saverne

between operation modes. The conversion time is dependent on the technical effort put into the machine design, with the installation of two muck transportation systems in parallel along the gantry, in the tunnel as well as above ground. Conversion from open to closed mode, and thus safe isolation of the excavation chamber from the tunnel by retracting the muck hopper in the centre, can be carried out within two to four hours. The time to restart the TBM in closed slurry mode depends on the operational availability of the slurry circuit in the tunnel and the slurry treatment plant above ground and can be completed within a few shifts.

This kind of multi-mode TBM is still one of the most commonly used machine concepts, especially for projects characterized by long sections in soft ground beneath the groundwater table and long sections in dry rock conditions. For these conditions, such a machine design can offer an attractive and economic solution, also achieving respectable tunnelling performance.

The first generation of multi-mode TBMs that was used in 1989 for the Grauholz Tunnel was further developed for the next generation as used for the Zimmerberg Base Tunnel (Lot 2.01) and the Oenzberg Tunnel. Both are rail tunnel projects in Switzerland. A number of projects have been realised since then using the multi-mode machine concept. In 2013, a dual-mode TBM completed the excavation of the Hallandsås railway tunnel in Sweden [1] in challenging conditions of extremely hard and abrasive rocks and with a maximum pressure in closed mode of up to 13 bar.

The sophisticated 7.2 m diameter machine designed for the Lake Mead Intake No. 3 water tunnel project in Nevada in the

USA expanded the limits of application of this machine type by coping with potential support pressures of up to 17 bar. This TBM operated from 2011 to 2014 and was different from previous dual-mode TBM concepts for changing between slurry and open mode operation because this machine was fitted with a retractable screw conveyor in the centre for the transportation of muck from the excavation chamber in open mode (Fig. 4). The screw conveyor was used instead of a standard and more efficient conveyor belt due to the mandatory requirement for a system that could isolate the excavation chamber from the tunnel within seconds. This was achieved by hydraulically closing the rear discharge gate of the screw conveyor.

The machine started from a 180 m deep shaft and was subjected to water pressures of up to 15 bar. The previous record of 11 bar had been held by the Herrenknecht multi-mode TBM for the Hallandsås tunnel project in Sweden, completed in 2013. The performance of tunnelling works for the Lake Mead project with measured pressures of 15 bar is the current record pressure in mechanised tunnelling.

### 3 Change of Operation Mode – Slurry Shield and Earth Pressure Balance Shield

Both slurry shields and EPB shields are operated with a filled excavation chamber and controlled face support pressure. The main differences are the properties of the chamber filling such as viscosity, shear strength, density and type of support pressure control. The design of the cutting wheel and excavation chamber does not require any compromise between the operation modes. The major mechanical differences are the muck transportation and muck handling

systems in the excavation chamber and in the tunnel. Slurry shields use a closed, pressurized slurry circuit with a slurry treatment plant above ground. EPB shields use a screw conveyor for controlled muck extraction out of the excavation chamber and an open tunnel transport system with muck cars or continuous conveyor.

The two machine types also differ in the type of chamber and face pressure control. With an EPB shield, the face pressure is controlled by changing the advance speed and muck extraction volume (screw conveyor speed). Using a slurry shield, face pressure is controlled by a remote pressurised air bubble. Mechanically, this remote air bubble is provided in most cases by separating the excavation chamber into two compartments by means of a submerged wall.

The generous amount of space available in large diameter soft ground TBMs allows the parallel arrangement of both muck removal systems in the invert area of the excavation chamber, with some minor functional compromises. If slurry operation is required due to prevailing geological conditions with possible blocks, boulders or larger stones, a jaw crusher can be installed in front of the suction grid. It can then require a significant additional mechanical effort with manual interventions to change the operation mode, which becomes even more difficult with TBMs smaller than 8 m diameter. Interchangeable mid-size machines have therefore been designed on the basis of a modular concept that requires the exchange of individual parts or modules of the machine in an intermediate shaft along the alignment. The modular modification concept (Fig. 5) for system change in the tunnel has not been used so far since it would most likely require free air chamber access, which would be a very difficult and time-consuming challenge on most projects.

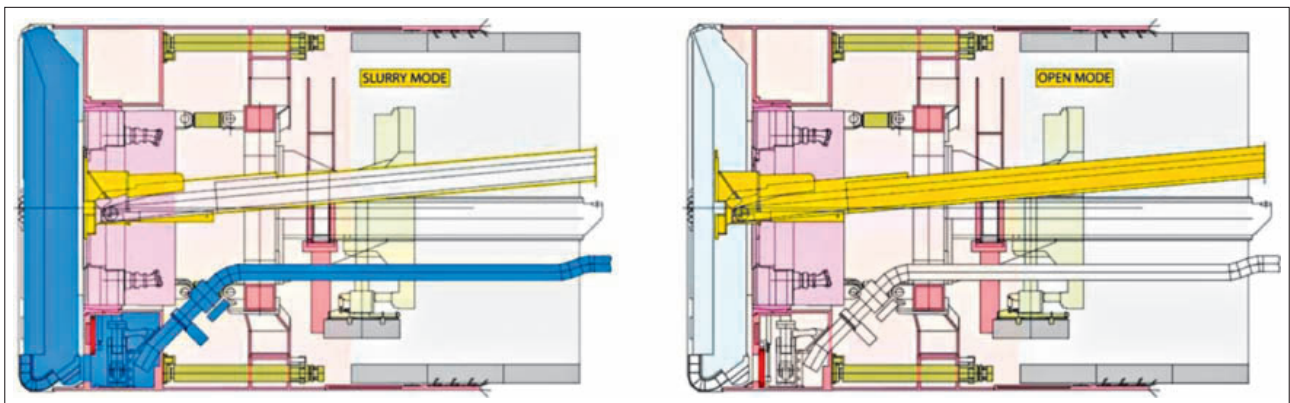
To justify the significant effort to produce a machine design that is capable of being completely changed from EPB to slurry mode in the tunnel, there must be particular project conditions. The Socatop road tunnel project in Paris featured such conditions. This tunnel has a length of 10 km with approximately 60% in soils suitable for the use of an EPB Shield. For the remaining 40% the optimum solution de-

manded a slurry supported tunnel face (Fig. 6). The machine and tunnelling concept for the Socatop project considered in particular that the respective geological formations occurred in long associated sections. Although the Socatop project was to remain a one-off solution for a rather long time, it showed conclusively that a complex combination of different technologies can make sense if the project circumstances are right.

#### 4 Innovation Track of Multi-Mode Machines

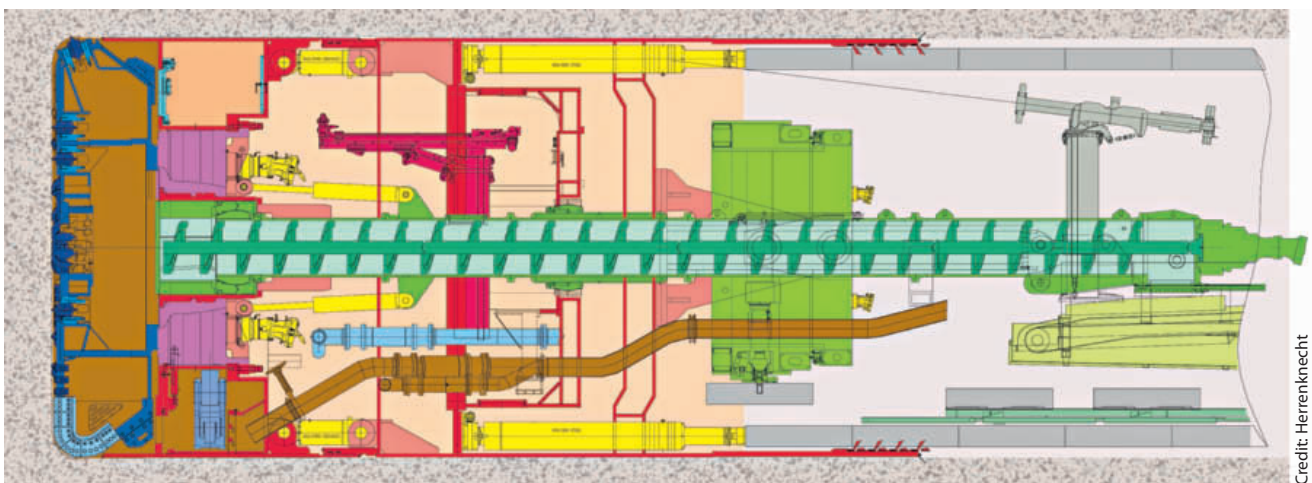
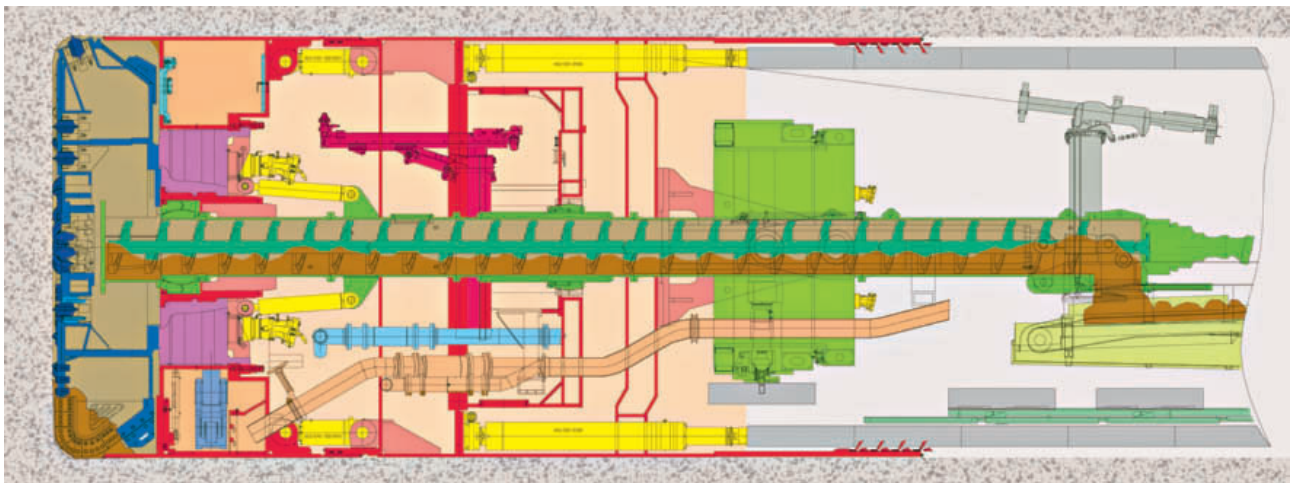
The history of multi-mode or hybrid TBMs started with the first machine concept of a dual-mode machine in 1989. The specific subsurface conditions along the 5.5 km long bored tunnel section of the Grauholz rail tunnel in Switzerland comprised long and homogeneous sections in water-bearing soils and long sections in Molasse rock. The first dual-mode Mixshield with a large diameter of 11.6 m was designed to change its mode of operation from slurry mode with liquid-supported tunnel face to dry operation mode with the TBM operating as a shielded hard rock TBM. The tunnelling team successfully mastered the many challenges of large diameter tunnelling and extremely complex geological conditions in addition to the application of a new machine technology. Although not everything went smoothly in the start-up period, it could be stated that this concept with a liquid-supported tunnel face in soft ground with the double chamber system had been proven during the advance. Tunnelling performances were achieved that would not have been possible with conventional methods. Moreover this technology enabled the construction of the tunnel without the need to lower the groundwater table.

After the first multi-mode TBM had proved its feasibility at the Grauholz tunnel in Switzerland, the project conditions for the metro Ruhr tunnel Meiderich in Duisburg, Germany were also perfectly suited for the application of a multi-mode TBM. The machine design for this 6.18 m diameter Mixshield has a modular structure incorporating a modular modification system to change from slurry mode to EPB mode operation (Fig. 5). The machine started tunnelling in slurry mode but the conversion from slurry to EPB mode was



3 Change between slurry shield (left) and open single shield (right) based on an integrated machine concept

Credit: Herrenknecht



Credit: Herrenknecht

4 Multi-mode TBM for Lake Mead Intake No. 3, open mode with centre screw conveyor (top) and closed mode with slurry system (bottom)

never used. It was decided as the tunnel proceeded to bore through the clayey sections along the alignment in slurry mode, accepting some loss of tunnelling performance.

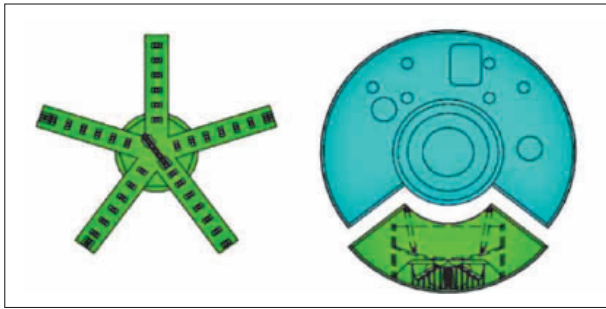
The next generation of multi-mode TBMs was used for the Glatt sewer tunnel project in Zurich in 1995. The machine was designed to operate in open hard rock mode as a shielded TBM and in closed EPB mode. The machine had a diameter of 5.29 m and was configured to excavate a 5.3 km long sewer tunnel through a 2.9 km long Molasse rock section and a 2.4 km long section in soft ground beneath the groundwater table. The project comprised two end shafts as well as the intermediate shaft near Oerlikon station (Fig. 7). The machine excavated both sections, with each TBM operation starting from the intermediate shaft. The specific project and geological conditions along the tunnel alignment were ideal for the application of a convertible machine due to long homogeneous sections both in soft ground and Molasse rock. For the Molasse section of the Glatt sewer tunnel, the machine operated as a shielded hard rock TBM with muck transfer through the centre of the cutterhead. The cutterhead was fitted with disc cutters and buckets for muck transport through a muck ring onto a centre belt conveyor. For the soft ground section in loose to dense lake depos-

its and moraine beneath the water table, the machine was modified to operate as an EPB Shield as follows:

- The cutterhead was replaced by a cutting wheel with flap doors,
- Installation of a bulkhead for the 2-chamber personnel airlock and the screw conveyor,
- Installation of the belt conveyor above the segment feeder,
- Removal of the de-duster,
- Installation of a hydraulic unit for the screw conveyor,
- Installation of control components for conditioning and air regulation.

The history of multi-mode TBM application continued on several Swiss projects, mainly with the machines designed to change operation mode from slurry shield to single shield TBM or vice versa, such as for the northern section of the Zimmerberg Base Tunnel in Zurich, the Oenzberg Tunnel and the Weinberg Tunnel.

The northern section of the Zimmerberg Base Tunnel (Lot 2.01) was a project with a number of boundary conditions due to tunnelling in an urban area with shallow overburden and the requirement to control settlement during excavation in order to avoid damage to structures above ground.

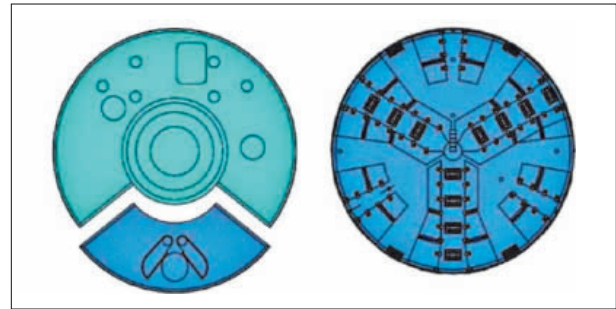


5 Modular machine concept for changing between slurry shield (left) and EPB shield (right) by replacing individual TBM modules

The ground conditions along the tunnel section comprised a 1.92 km long section with rocks belonging to the upper fresh water Molasse composed of interbedded sandstones, marls and siltstones, followed by a 700 m long soil section through Sihl gravels, which are water bearing, highly permeable gravels, sands and gravelly sands. Herrenknecht supplied a 12.33 m diameter Mixshield that could convert from a dry to wet operation mode. The concept of this machine was comparable with the one used at the Grauholz rail tunnel where a change of operation mode was achieved for the first time. However, compared to the previous machine design for Grauholz, the Mixshield for Lot 2.01 in Zurich was designed nearly 10 years later and showed various modifications:

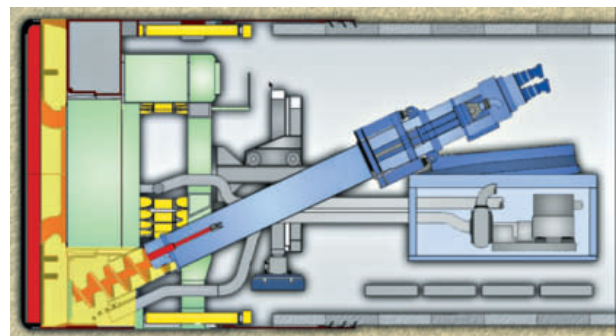
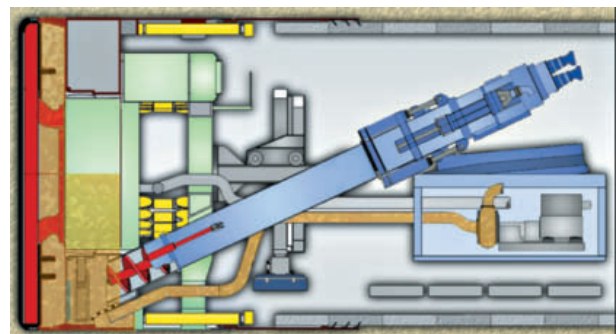
- The cutting wheel was designed as an eight-spoked cutting wheel with rim and was equipped with disc cutters. For the soft ground section, the cutting wheel could be fitted with soft ground tools. The material flow was optimised to one conveyance direction. The open spaces between the cutting wheel spokes were closed with steel plates during hard rock mode. For slurry mode, these steel plates were uninstalled and arranged as classic breast plates at the submerged wall. The cutting wheel fulfilled the requirements of hard rock TBM operation with a nearly completely closed cutterhead and reamers at the cutterhead periphery, and also fulfilled the requirements for slurry mode operation with an open cutting wheel and favourable material flow characteristics in the suspension-filled excavation chamber.
- The stone crusher was designed as a jaw crusher and was installed as usual in front of the suction grill.
- The shield had two personnel airlocks and one material airlock.
- The shield was designed with drill channels for the drilling of probe and grouting holes.
- The tailskin seal was a two-row brush seal with steel plate. The annular gap grout was pumped through the tailskin.

After tunnelling started with a short backup design followed by progressive installation of the rest of the machine, daily performances while operating as a shielded TBM in hard rock mode were in the range of 20–21 m in 16 hours. Along the soft ground section, the performance was not limited by the Mixshield but either by the capacity of the slurry treatment plant or the parallel invert works. The project was successfully completed in May 2001. After this application, the



machine was disassembled and reused for the Oenzberg rail tunnel, where the machine also operated both in slurry and in open hard rock mode.

Similar project conditions were faced for the excavation of the Weinberg rail tunnel in Zurich. An 11.24 m diameter TBM started excavation in open hard rock mode in Molasse rock for about 4 km with performances of 20 m per day. The remaining 250 m of the alignment demanded a change of operation mode to closed slurry mode where the tunnel alignment also passed with minimal cover beneath the River Limmat. This soft ground section comprised loose soils of high permeability and crossings beneath numerous important transport routes and supply lines. Slurry mode operation using a compressed air reservoir guaranteed precise control of the face pressure along this sensitive section. The conversion between the modes required the adaptations described above and also modifications to the cutting wheel and tool arrangement, in addition to the material conveying systems supporting the open and wet operation modes.



6 Multi-mode TBM for Socatop, slurry and earth pressure modes



Important drivers of innovation today are the ideas of owners and designers and specific project conditions that demand appropriate and sometimes challenging solutions for new or adapted machine concepts to safely and also economically construct current tunnel projects. One of the most challenging tunnelling projects was implemented between 2005 and 2013 for the twin-tube Hallandsås Tunnel, an upgrade of the rail link between Goteborg and Malmoe along the Swedish west coast. There were extremely difficult rock conditions at the tunnel face, with hard and abrasive rock interchanging with sections of soft and mixed face conditions. There was also the further challenge of mastering water pressures up to 10 bar. Herrenknecht, as innovation driver in respect of machine concepts, designed and delivered a high-tech multi-mode TBM that could operate in closed slurry mode and in open hard rock mode with dry muck discharge system via TBM conveyor and also in open hard rock mode with cyclic pre-excitation grouting in closed static conditions [2]. The sealing system of the machine was designed to withstand pressures of up to 13 bar. Drilling and injection equipment installed on the machine made sure that the flow of water could be controlled by grouting.

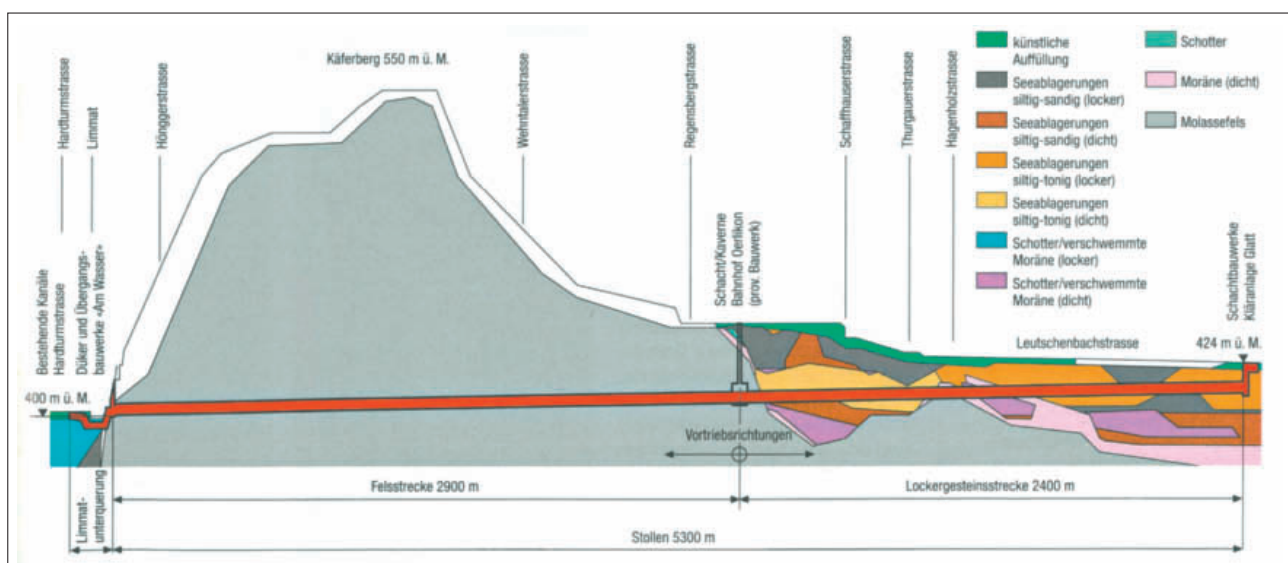
The conditions faced in Hallandsås and Lake Mead, with hard, abrasive geology and extreme water pressures, have extended and adapted specifically to the projects the operating limits of this multi-mode technology.

### 5 State of Technology – Variable Density TBM

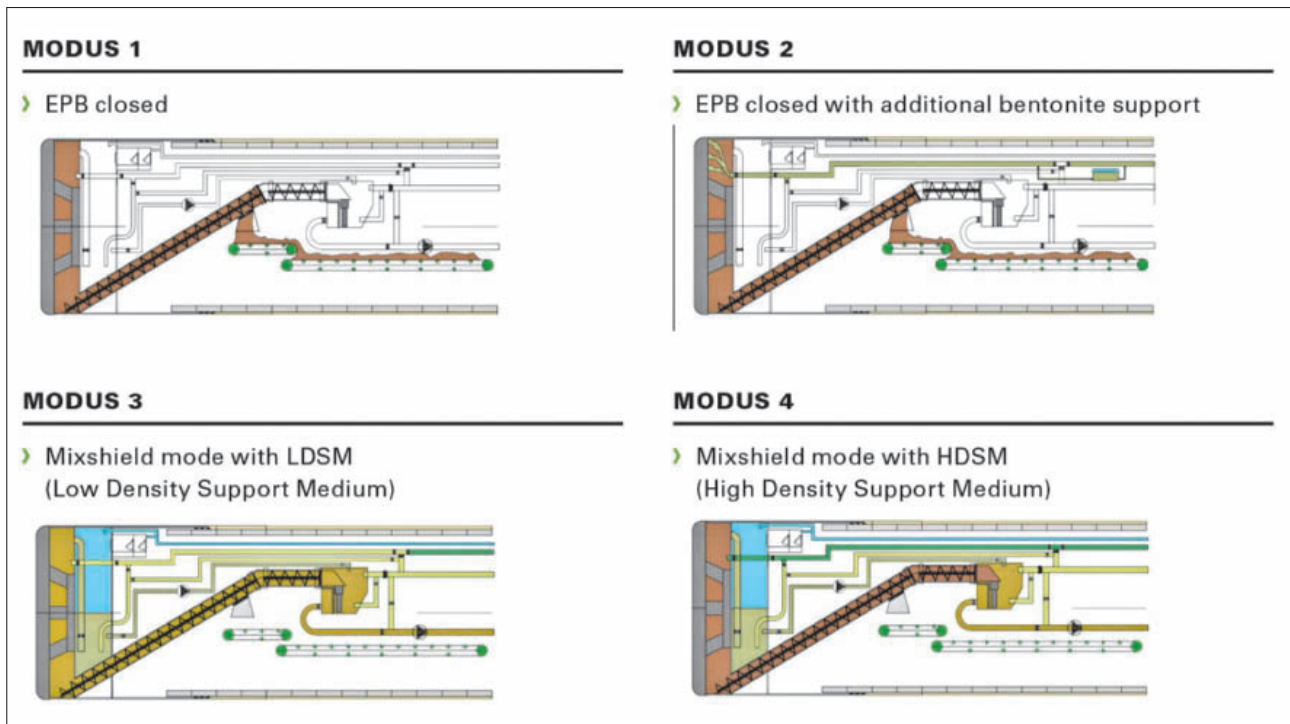
Given the fact that changing from a slurry supported face to an earth pressure supported face is the most difficult practical implementation, Herrenknecht has been working on the development objective of a new machine concept and principle that combines the individual advantages of each system in one machine. The objective was to switch between modes without the need for any mechanical modification in the excavation chamber or behind in the gantry or tunnel area. A multi-mode TBM capable of EPB and slurry-supported modes is the most complex form of convertible machine. Herrenknecht has developed such a unique machine, called the Variable Density TBM (Fig. 8). Without major mechanical modification, the machine can switch between four different modes in the tunnel. This means that geological and hydrogeological changes along the alignment can be managed with extreme flexibility. The Variable Density TBM can be operated in the classic slurry mode, incorporating an air bubble system for face pressure control, or in full EPB mode. Switching between operation modes can be carried out gradually, maintaining permanent and full control of face pressure and without the need for any working chamber interventions. Another special feature of this Variable Density TBM is an extended operation mode with the ability to operate the machine with high density material in the excavation chamber that would be too dense for pure slurry operation but too fluid for pure EPB operation.

Muck is extracted from the excavation chamber of a Variable Density TBM through a screw conveyor in both EPB and slurry modes. When fully equipped, this particular TBM would require two muck transportation systems in the tunnel. If operating in slurry or high density slurry mode, a slurry circuit is required for material transport; when operating in a dry system mode or so-called EPB mode, muck cars or continuous conveyer belts can be used. In slurry and high density modes, muck transfer along the screw conveyor is a combination of mechanical and hydraulic transportation. However, depending on the specific project conditions, one of the two transportation systems may be chosen to be the primary system for high performance, with the other being the secondary system for reduced performance.

The first application of this tunnelling technology was in 2013 for the first line of the Klang Valley MRT project from Sungai Buloh to Kajang in Kuala Lumpur. Herrenknecht de-



7 Geological longitudinal section of Glatt sewer tunnel, Zurich



Credit: Herrenknecht

8 Variable Density multi-mode TBM, four different tunneling modes for optimum adaptability in difficult soft ground

livered two EPB shields and six machines incorporating the Variable Density technology. These machines were used for the 9.5 km long underground section of the 51 km Blue Line. The Variable Density TBMs were specially designed to deal with demanding karst zones in the limestone formation along the tunnel alignment.

## 6 Conclusion

With the development of new solutions, the demands for safety, efficiency and cost-effectiveness of innovative machine designs merge. Focusing on the innovation track of multi-mode machine designs that have already been applied on numerous complex and technically sophisticated projects worldwide, it is shown that the multi-mode technology has been further developed to the even more advanced machine design represented by the Variable Density TBM. Machines are being built and solutions offered today with the

highest flexibility to construct our tunnels more safely and more economically by having the best possible system available for each individual section along the alignment. Flexible machine types and system solutions such as those introduced with the Variable Density TBM open up new prospects for the construction of efficient underground infrastructure wherever it is needed.

## References

- [1] Burger, W., Dudouit, F., 2009: The Hallandsås Dual-mode TBM. Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference 2009. Eds. Almeraris, G. & Mariucci, B. Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2009, pp. 416–437
- [2] Dudouit, F., 2011: Summary of the first TBM drive at the Hallandsås project. Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference 2011, pp. 234–252

Christian Zimmermann, Dipl. Bau-Ing. HTL, Ulrich Imboden AG, Visp/CH

# Tunnel Visp

## Drei Vortriebe – drei Herausforderungen

Eine gesamte Röhrenlänge von 16,5 km, zehn Tunnelportale, vier Lüftungsstollen mit Zentralen sowie zwei Brücken vor der Portalmündung sind die Fakten der Südumfahrung Visp im Kanton Wallis. Dabei handelt es sich um ein sehr komplexes Verkehrsinfrastrukturprojekt, das durch schwierige felsmechanische Prognosen besondere Vorkehrungen für den Sprengvortrieb erfordert.

# Visp Tunnel

## Three Excavations – Three Challenges

Total tunnel length of 16.5 km, ten tunnel portals, four ventilation tunnels with control centres as well as two bridges in front of the portal mouth – these are the bare facts for the Visp Southern bypass in the Canton of Valais. At stake is an extremely complex transport infrastructure project, which calls for special precautions for the drill+blast drive owing to tricky rock mechanical predictions.

### 1 Einleitung

Der 34,8 km lange Autobahnabschnitt der Rhone-Autobahn A9 von Siders Ost bis Brig-Glis wird etwa zur Hälfte unterirdisch gebaut. Eine umweltgerechte Linienführung steht dabei im Vordergrund. Das Ziel ist, die Wohnzonen vor Lärm zu schützen, den Einfluss der Verkehrswege im Rhonetal zu begrenzen und Naturgebiete zu schonen.

Die 8 km lange Umfahrung Visp ist ein Teil des genannten Autobahnabschnitts und besteht aus insgesamt 16,5 km Tunnelröhren, wovon der 3,26 km lange Vispertunnel bereits gebaut ist. Die restliche Strecke von 13,24 km verteilt sich auf den Tunnel Visp sowie den Tunnel Eyholz mit sämtlichen Ein- und Ausfahrten, befahr- und begehbaren Querschlägen und unterirdischen technischen Lokalen.

Die Ausbruch- und Betonarbeiten im Tunnel Eyholz sind abgeschlossen. Zurzeit werden noch die letzten Innenausbauarbeiten ausgeführt, und der Einbau der Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (BSA) hat begonnen.

### 2 Projektbeschreibung

#### 2.1 Linienführung und Tunnelsystem

Es dauerte 30 Jahre, bis die Linienführung «Südumfahrung Visp» (Bild 1) definitiv beschlossen war. Verschiedene Vorbehalte seitens der betroffenen Gemeinden und unterschiedliche Interessen der politischen Parteien prägten den Entscheid, insbesondere bis auch die betroffenen Gemeinden und Industrieunternehmen mit der Wahl der Anschlüsse einverstanden waren.

### 1 Introduction

Roughly half of the 34.8 km long motorway section of the A9 Rhone Motorway from Siders East to Brig-Glis in Switzerland is being built underground, with an environmentally friendly route alignment being accorded priority. The objective is to protect residential areas from noise, restrict the influence of transport routes in the Rhone Valley and reduce the impact on nature conservation areas.

The 8 km long Visp Bypass is a part of the above-mentioned motorway section. It consists of a total of 16.5 km of tunnel tubes, of which the 3.26 km long Vispertal Tunnel has already been constructed. The rest of the route – 13.4 km is made up of the Visp Tunnel as well as the Eyholz Tunnel with all accesses and exits, cross-passages negotiable by vehicle and by foot and underground technical rooms.

Excavation and concreting works in the Eyholz Tunnel have been completed. Currently, the final inner lining activities are in progress, and installation of the operating and safety systems has started.

### 2 Description of Project

#### 2.1 Route Alignment

It took all of 30 years until a definite decision was made on the "Visp Southern bypass" (Fig. 1). Various objections put forward by the affected communities and diverse interests on the part of the political parties influenced the decision, especially until the affected communities and industrial companies were in agreement about the choice of the accesses.

## Tunnel du Vispéral

### Trois creusements – trois défis

Long de 2,5 km, le tunnel du Vispéral relie la vallée de la Vispa à Viège ouest. La galerie d'évacuation des déblais déjà existante va être élargie au profil définitif du tunnel. Tous les partenaires impliqués au projet ont de grands défis à affronter du fait des conditions géologiques difficiles, de la proximité avec le tunnel de la vallée de la Vispa déjà en place et d'ouvrages annexes très complexes. Les travaux d'excavation dureront 20 mois en moyenne, l'ensemble des travaux environ 49 mois. Le montant du contrat d'entreprise pour le tunnel du Vispéral s'élève à 184,5 millions de CHF hors TVA.

## Galleria Visp

### Tre modalità di avanzamento – Tre sfide

La galleria di Visp lunga 2,5 km, collega la valle di Visp con Visp ovest. Il già esistente cunicolo di smarino verrà dilatato fino al definitivo profilo della galleria. La difficile situazione geologica e la prossimità della galleria di Vispéral come anche le complesse opere accessorie, sottopongono i partner coinvolti nel progetto a delle dure prove. I lavori di avanzamento dureranno circa 20 mesi mentre il tempo complessivo dei lavori ammonterà a 49 mesi. La somma del contratto di appalto per la galleria di Visp si aggira sugli 185,5 milioni di franchi svizzeri più l'imposta di valore aggiunto.

Lange Zeit wurde eine Nordvariante der Umfahrung Visp bevorzugt. Bei dieser Variante wären jedoch die Industriezone und das Areal der Chemiefabrik Lonza betroffen gewesen. Aufgrund der bereits erwähnten verschiedenen Vorbehalte sowie sicherheitstechnischen Überlegungen in Bezug auf die Lonza entschied man sich für die Südumfahrung von Visp. Diese Variante ermöglichte ausserdem einen zweckmässigeren Anschluss der Vispértäler.

For a long time a north alternative for the Visp Bypass was preferred. However, this alternative would have affected the industrial zone and the premises belonging to the Lonza chemical plant. Owing to the various objections that were previously mentioned as well as safety technical considerations relating to Lonza, it was decided to bypass Visp to the south. This alternative also enabled the Vispéral valleys to be more appropriately linked.



Quelle/credit: Amt für Nationalstrassenbau des Kantons Wallis

#### 1 Linienführung Tunnel Visp

zu erstellende Bauteile: dunkelblau – Vortrieb Nord, gelb – Vortrieb Verzweigung I, cyan – Vortrieb Süd, bestehende Bauteile: rot – Vispértunnel, orange – Südröhre, magenta – Lüftungstollen, grün – Überwurfentunnel

Route of the Visp Tunnel

construction elements: dark blue – north drive, yellow – branch I, cyan – south drive,

existing construction elements: red – Vispéral Tunnel, orange – south bore, magenta – ventilation tunnel, green – flyover tunnel

Die «Südfahrt Visp» beginnt im Grosshüs mit dem Drei- viertelanschluss Visp Ost und führt anschliessend in zwei richtungsgetretenen Röhren durch den Tunnel Eyholz bis ins Vispental. Das Vispental wird auf zwei Brücken zwischen Staldbach und Chatzuhüs überquert. Hier befindet sich auch der Vollanschluss Vispertäler, welcher aus zwei örtlich getrennten Halbanschlüssen besteht. Die Verkehrsbeziehungen A9 – Vispental–Brig–Glis werden im Tunnel Eyholz erstellt, die Verkehrsbeziehungen A9 – Vispental–Sitten befinden sich im Projektbereich des Tunnels Visp. Ab dem Chatzuhüs wird die A9 durch den Tunnel Visp geführt. Der heutige Vispentaltunnel wird als Südröhre in die A9 integriert, während die Nordröhre zuerst als Schutterstollen gebaut wurde und anschliessend auf das erforderliche Normalprofil ausgeweitet wird. Die Südfahrt von Visp endet in der Grosseia mit dem Vollanschluss Visp West.

### 2.2 Querprofile der Tunnelröhren

Für den Bau der Tunnelröhren wurde bei geologisch guten Verhältnissen das Hufeisenprofil als Basis festgelegt. In Störzonen wird das Normalprofil mit Ringschluss erstellt (Bild 2). Die Verzweigungskaverne I wird mit einer maximalen Breite von 25 m und einem Ausbruchquerschnitt von 283 m<sup>2</sup> (Bild 3) ausgebrochen und mündet in die Rhone-Simplon-Störung. Diese Zone mit einer Länge von 45 m wird mit einem Spezialprofil, bestehend aus Ulmenstollen (Widerlagerstollen) und anschliessendem Kalotten-/Strossen- und Sohlenvortrieb (Bild 4), durchörtert.

### 2.3 Geologie und Hydrogeologie

Im Bild 5 ist der geologische Horizontalschnitt abgebildet, und das geologische Längenprofil ist im Bild 6 erkennbar. Im

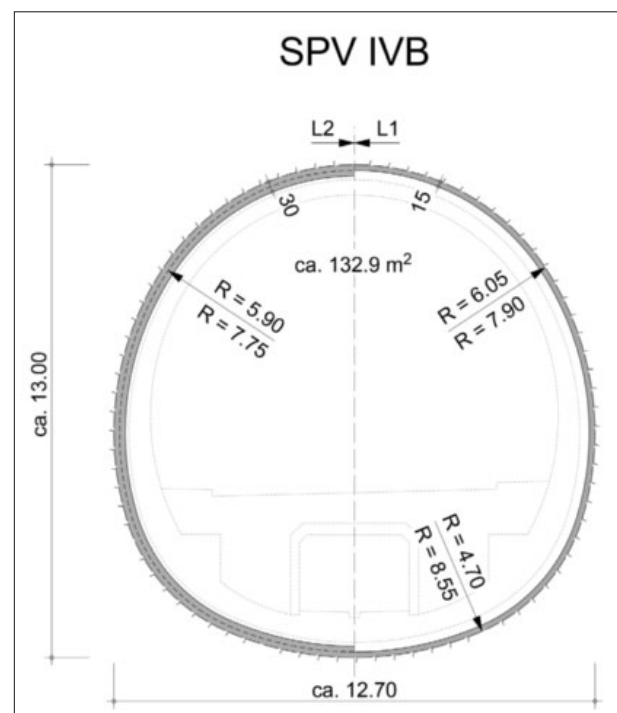
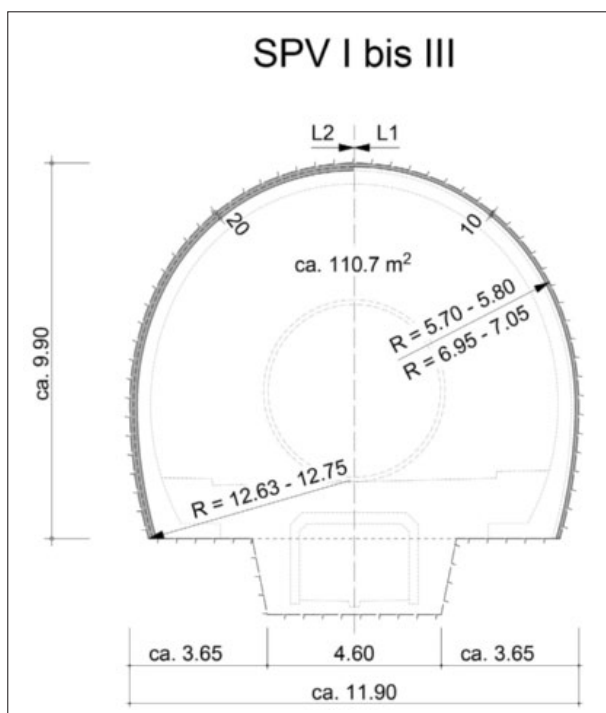
The “Visp Southern Bypass” starts at Grosshüs with the Visp East three-way junction and then passes through the Eyholz Tunnel with a tube in each direction until it reaches the Vispental valley. The Vispental is crossed by means of two bridges between Stahlbach and Chatzuhüs. This is also where the Vispertäler complete interchange is located, which consists of two locally separate two-way junctions. The A9 – Vispental-Brig-Glis links are provided in the Eyholz Tunnel, the A9 – Vispental-Sitten links are to be found in the Visp Tunnel project zone. From Chatzuhüs, the A9 passes through the Visp Tunnel. The current Vispental Tunnel is to be integrated into the A9 as the south tube, whereas the north tube will first be built as a mucking tunnel and later enlarged to the required standard profile. The Visp Southern Bypass ends at the Visp West complete interchange in Grosseia.

### 2.2 Tunnel Bore Cross-Sections

A horseshoe profile was decided on as the tunnel profile given the geologically good conditions. In fault zones, the standard cross-section has a closed ring (Fig. 2). The branch cavern I is excavated with a maximum width of 25 m and an excavated cross-section of 283 m<sup>2</sup> (Fig. 3) and culminates in the Rhone-Simplon Fault. This 45 m long zone is driven with a special profile with side headings and subsequent excavation of top heading/bench and invert (Fig. 4).

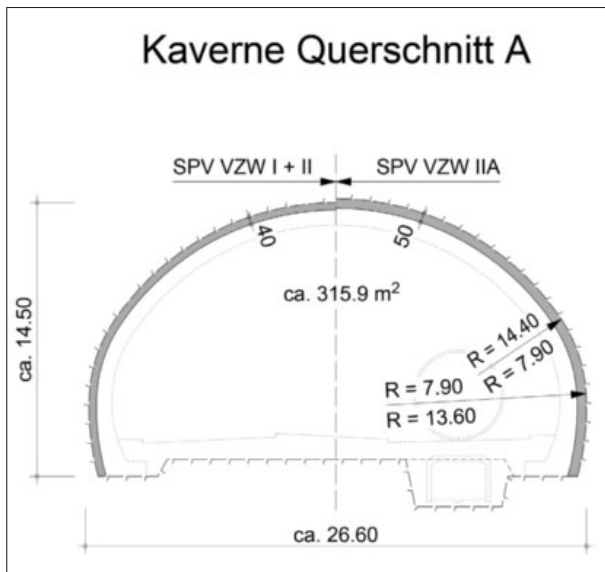
### 2.3 Geology and Hydrogeology

Fig. 5 displays the geological horizontal section, and the geological longitudinal profile is shown in Fig. 6. The loose ground sections in the portal zones were excavated as part of preparatory contracts. As a result, the driving of the Visp Tun-



2 Ausbruchgeometrie Haupttunnel ohne Ringschluss (links, SPV I bis III) und mit Ringschluss (rechts, SPV IVB)  
Excavation geometry for main tunnel without ring closure (left, SPV I to III) and with ring closure (right, SPV IVB)

Quelle/credit: Ausbruchgeometrie Haupttunnel, Ausführungsplan-Nr. A-01-001



Quelle/credit: Ausbruchgeometrie Verzweigungskaverne I, Ausführungsplan-Nr. E-01-024

3 Ausbruchgeometrie Verzweigung I im maximalen Querschnitt (Kaverne Querschnitt A)  
Excavation geometry for branch I with maximal cross-section (cavern cross-section A)

Rahmen von vorgezogenen Baulosen wurden die Lockergesteinsabschnitte in den Portalbereichen bereits aufgeföhren. Demnach erfolgen die Ausbrucharbeiten des Tunnels Visp vollständig im Fels von mittelmässiger bis mässiger Qualität. Der Tunnel liegt in der «Zone de Sion-Courmayeur». Es sind mehrheitlich Kalkglimmerschiefer, die örtlich graphithaltig sind, extrem harte und abrasive Quarzite, Prasinite und Dolomit zu durchhörtern. Diese Gesteinsschichten werden zum Teil von grossen geologischen Störungen (Quetschzonen) gegeneinander abgegrenzt. In diesem Zusammenhang können die Rhone-Simplon-Störung und die permo-triadischen tektonischen Schuppen erwähnt werden. Die maximale Überdeckung beträgt 570 m.

Die Wassereintritte sind nicht bedeutend und in der Grössenordnung von wenigen l/s anzusiedeln. Einzelne grössere Wassereintritte sind möglich, sie werden jedoch schnell wieder abklingen. Alle diese Gewässer sind als betonaggressiv, korrosiv und versinterungsfähig zu betrachten. Quarzgehalt, Gas- und Asbestvorkommen stellen Gesundheitsgefährdungen dar, für die vorgängig verschiedene Massnahmenkonzepte entwickelt wurden, welche während der Bauausführung zur Anwendung kommen. Diese Konzepte werden mit entsprechenden Messungen und Kontrollen sowie Lüftungstechnischen Installationen begleitet.

### 2.4 Bauprogramm

Der Vortrieb des Tunnels Visp wird ab drei Angriffspunkten (siehe 3 «Ausführung») aufgeföhren. Der Vortriebsbeginn war im November/Dezember 2014. Die Vortriebszeit beträgt für alle drei Vortriebe im Mittel 20 Monate und wird somit im Sommer 2016 beendet sein. Zeitgleich wurde mit den Betonarbeiten für die Zentrale, den Lüftungsstollen sowie für die Südröhre begonnen.

nel took place completely in rock of moderate to mediocre quality. The tunnel is to be found in the “Zone de Sion-Courmayeur”. Mainly calcareous mica schists, which contain local amounts of graphite, extremely hard and abrasive quartzites, prasinites and dolomite are encountered. These rock layers are partly fringed by large geological faults (crushing zones). The Rhone-Simplon Fault and the Permian-Triassic tectonic klipps should be mentioned here. The maximum overburden amounts to 570 m.

Water ingress is not insignificant and amounts to roughly a few l/s. Isolated larger water inflows are possible, although they tend to decline rapidly. All the water has to be considered as aggressive to concrete, corrosive and capable of sintering. Quartz content, gas and asbestos deposits represent health hazards, and various kinds of measures have been developed to be used in the course of construction. These concepts are backed up by corresponding measurements and checks as well as ventilation technical installations.

### 2.4 Construction Programme

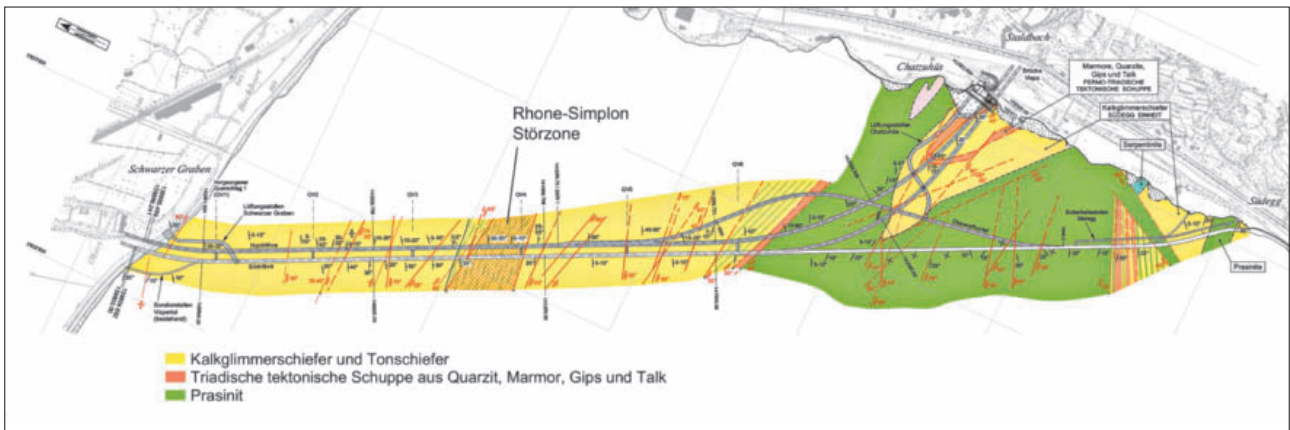
The Visp Tunnel is being driven from three points of attack (see 3 “Construction”). The excavation began in November/December 2014. The excavation period for all three drives amounts on average to 20 months so completion is due in summer 2016. At the same time work on concreting the control centre, the ventilation tunnel and the south tube started.



Quelle/credit: Ausbruchgeometrie Verzweigungskaverne I, Störzone, Ausführungsplan-Nr. E-01-061

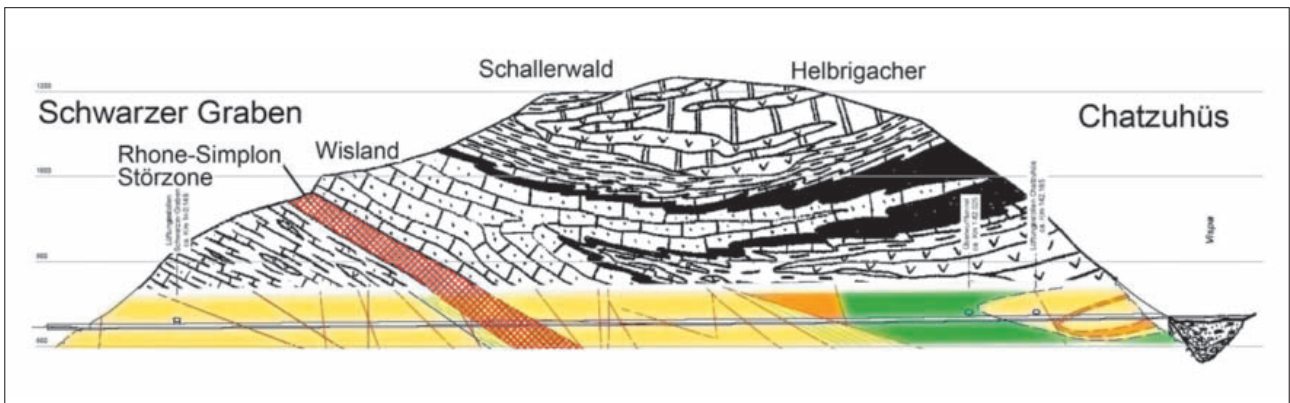
4 Ausbruchgeometrie Störzone Querschnitt C: Kalotten-/Strossen- und Sohlenvortrieb mit vorgängig erstellten und mit Beton verfüllten Widerlagerstollen

Excavation geometry for fault zone cross-section C: top heading, bench and invert advance with previously constructed abutment tunnels filled with concrete



Quelle/credit: Geologisches Dossier, Anhang 3 der Ausschreibungsunterlagen

5 Geologischer Horizontalschnitt Tunnel Visp  
Geological horizontal section of Visp Tunnel



Quelle/credit: Geologisches Dossier, Anhang 3 der Ausschreibungsunterlagen

6 Geologisches Längenprofil Tunnel Visp  
Geological longitudinal profile of Visp Tunnel

Gegen Ende des Vortriebs werden im rückwärtigen Bereich die Vorbereitungsarbeiten für die Verkleidung der Tunnelröhren beginnen. Sämtliche Betonarbeiten sowie der Innenausbau werden voraussichtlich im Frühling 2018 beendet sein. Bis Ende Juli 2018 erfolgen die Belag- und Fertigstellungsarbeiten. Anschliessend wird mit den Vorbereitungsarbeiten für den Einbau der BSA begonnen. Das Bauende ist gemäss Werkvertragsbauprogramm auf den 31. Juli 2018 terminiert. Basis für das Bauprogramm ist ein Zwei-Schicht-Betrieb im Vortrieb und ein Ein-Schicht-Betrieb für die Betonarbeiten, jeweils von Montag bis Freitag.

### 3 Ausführung

Der Ausbruch des Sollprofils ohne Sohlgewölbe wird in zwei Arbeitsgängen ausgeführt. Im ersten Arbeitsgang wird das eigentliche Tunnelprofil (Hufeisenprofil) ausgebrochen. Nach der Erstellung des Gewölbeanschlags wird mit einer Belagfräse der Ausbruch des Verkleidungskanals erstellt. Die Vorteile eines solchen Vorgehens sind einerseits der schonendere Abbau des Kanals, und andererseits kann die Schienenanlage unter anderem für das Versetzen der Fertigteile auf den Fundamenten des Gewölbeanschlags für alle nachfolgenden Arbeiten genutzt werden. Im Anschluss an

As tunnelling comes to an end, preparatory activities for lining the tunnel bores will commence in the rear area. All concreting work as well as the inner lining should be completed in spring 2018. Surfacing and fitting out operations will follow by late July 2018, followed by preparatory activities for incorporating the operating and safety facilities. According to the contract construction programme, the completion of construction is intended for July 31, 2018. The construction programme is based on two-shift operation for tunnelling and single-shift operation for concreting operations, in each case from Monday to Friday.

### 3 Construction

Excavation of the designated profile without invert arch is undertaken in two working phases. In the first working phase, the actual tunnel cross-section (horseshoe profile) is excavated. Once the foundation for the vault has been constructed, a ditch is cut for the service channel using an asphalt milling machine. The advantages of such an approach are on the one hand the gentle excavation for the channel and on the other the track system can be used among other things for installing the prefabricated elements on the foundations of the vault for all subsequent activities. Once the

den Ausbruch des Werkleitungskanals werden die vorgefertigten Elemente versetzt und hinterfüllt, danach Gewölbe und Zwischendecke betoniert. Der Innenausbau folgt als letzter Arbeitsgang.

### 3.1 Vortrieb Nord

Der Vortrieb Nord beginnt im Schwarzen Graben und ist mit einer Länge von ca. 1030 m der längste Vortrieb beim Tunnel Visp. Das Ende des Nordvortriebs befindet sich in der Verzweigungskaverne I. Der Voreinschnitt Schwarzer Graben wurde bereits vor einigen Jahren für den TBM-Vortrieb des Schutterstollens erstellt. Infolge der aktuellen Sicherheitsvorschriften musste dieser angepasst und infolge des größeren Profils eine Unterschneidung des bestehenden Lockergesteinhangs erstellt werden. Mit einer Luftbogenstrecke und dem Einbau eines Spießschirms konnten beide technische Punkte rasch und wirtschaftlich gelöst werden.

Der Vortrieb begann Anfang Dezember 2014. Die Geologie erforderte einen Ausbau mit Stahlbögen in der Sicherungskategorie SPV IV-A. Nach ungefähr 300 m Vortrieb wurde ein Versuch mit der Sicherungskategorie SPV III durchgeführt. Nach rund 18 m wurde wieder in die Klasse IV-A gewechselt, welche bis zum Schluss beibehalten wurde (Bild 7).

Infolge der kurzen Distanz zum bestehenden Vispaltunnel wurden auf dessen Zwischendecke Geophone montiert. Die Erschütterungen wurden laufend gemessen und ausgewertet. Je nach Geologie resultierten daraus zum Teil sehr hohe Übertragungswerte des anstehenden Felsens. Aufgrund dieser Erfahrungen wurden Bohr- und Zündschemas laufend angepasst. Als optimale Lösung präsentierte sich die Sektorzündung mit sechs Sektoren. Die Erschütterungen konnten mit diesem Zündschema auf die Sollwerte reduziert werden.

Ebenfalls machte die Heterogenität des Gebirges den Vortriebsleuten immer wieder zu schaffen. Die Vortriebsart wechselte abschnittsweise. Laufend musste entschieden werden, ob der Abschlag gesplitzt, gesprengt oder nur zum Teil gesprengt wird. Eine falsche Entscheidung konnte einen Zeitverlust beim Spitzeln oder massives geologisches Überprofil beim Sprengen zur Folge haben.

Die Fertigstellung des Nordvortriebs erfolgte im April 2016. Vereinzelt sind noch kleinere Ausbrüche zu tätigen, welche im Rahmen des Hauptvortriebs zurückgelassen wurden. Der Abschluss der Ausbrucharbeiten ist im Frühling 2016 geplant.

### 3.2 Vortrieb Verzweigung I

Der Zugang zum Kavernenvortrieb erfolgt via Bypass-Lüftungstollen und Überwurfunnel. Da die gesamte Infrastruktur in diesem Bereich veraltet war, mussten sämtliche Wasser- und Stromleitungen und die Lüftung in einem ersten Arbeitsgang erneuert werden. Kurz nach dem Barbaratag, dem Gedenktag der Schutzpatronin der Bergleute, konnte

service channel has been excavated, the prefabricated elements are installed and concreted, then the vault and the intermediate slab are concreted. The final working phase is fitting out.

### 3.1 North Drive

The north drive commences at the black trench ("Schwarzer Graben") and is the longest drive for the Visp Tunnel with a length of approx. 1,030 m. The north drive ends in branch cavern I. The Schwarzer Graben starting cut was already excavated several years ago for the TBM drive of the mucking tunnel. It had to be adapted to comply with current safety regulations and the existing soft ground slope was undercut on account of the larger profile. Both technical aspects were speedily resolved in an economic way with an open-air tunnel section and the installation of a spile canopy.

The drive commenced in early December 2014. The geology called for steel arches of support class SPV IV-A. After the drive had proceeded roughly 300 m, a test involving support class SPV III was undertaken. After some 18 m, class IV-A was reverted to, which was retained until the completion of the drive (Fig. 7).

On account of the short distance to the existing Vispaltunnel, geophones were mounted on its intermediate ceiling. Vibration was continuously measured and assessed. Depending on the geology, extremely high transfer values for the prevailing rock were registered in some cases. Owing to these findings, the drilling and detonation patterns were continuously adapted. Sector detonation with six sectors emerged as the optimal solution. The vibration could be reduced to the intended values using this blasting pattern.

At the same time, the heterogeneity of the rock caused constant worry for the miners. The type of excavation changed from round to round. Decisions had to be made constantly whether the round had to be excavated by breaking, blasted or partially blasted. A false decision could result in time being lost during breaking or massive geological overcut from blasting.

The completion of the north drive took place in April 2016. There are still individual, minor excavations to be accomplished, which were held over while work forged ahead on the main drive. It is envisaged that tunnelling works will be concluded in spring 2016.

### 3.2 Driving Branch Structure I

Access to the cavern excavation was accomplished through bypass ventilation tunnels and the flyover tunnel. As the entire infrastructure in this area was obsolete, all water and power lines and the ventilation had to be renewed in an initial working stage. Shortly after St. Barbara's Day, the day of the patron saint of miners, the first round of blasting for



am 5. Dezember 2014 die erste Sprengung der Verzweigung I ausgeführt werden. Geplant war der Vortriebsbeginn Anfang November 2014; deshalb wurde entschieden, die Verzweigungskaverne I im Drei-Schicht-Betrieb auszubrechen, damit der Zeitverlust gemindert bzw. aufgeholt werden kann.

Im ersten Schritt wurde eine Verbindung vom Überwurf-tunnel zum Schutterstollen erstellt. Anschliessend konnte ein Seitenstollen entlang des Schutterstollens aufgeweitet werden. Dieser Seitenstollen verläuft über die gesamte Länge der Kavernen mit dem Ziel, die Widerlagerstollen im Bereich der Kontaktzone der Rhone-Simplon-Störung zu erstellen. Während des Baus des Seitenstollens wurden im Schutterstollen radiale Reverse Head Extensometer (RHX) eingebaut, welche den Deformationsverlauf im Bereich der Kontaktzone messen.

Nach Erreichen von Tunnelmeter 1076,50 wurden ab dem Seitenstollen die beiden Widerlagerstollen erstellt. Diese kreisrunden Stollen wurden im Spreng-/Baggervortrieb aufgeföhren, weisen einen Ausbruchdurchmesser von 4,9 m auf und wurden mittels deformierbarem Stahleinbau, Radialankerung, vorausseilenden Spiessschirmen und Spritzbeton gesichert (Bild 8). Die Widerlagerstollen dienen in erster Linie der genaueren Definition der Kontaktzone und in zweiter

branch structure I was undertaken on December 5, 2014. The start of the excavation was planned for early November 2014; as a consequence it was decided to excavate the branch I cavern with three-shift operation so that the time delay could be reduced or even caught up.

In the first stage, a link was excavated from the flyover tunnel section to the mucking tunnel. Then a side tunnel was widened along the mucking tunnel. This side tunnel runs over the entire length of the caverns with the purpose of producing the abutment tunnels in the proximity of the contact zone to the Rhone-Simplon Fault. While the side tunnel was being constructed, radial reverse head extensometers (RHX) were installed in the mucking tunnel to measure the deformation against time in the contact zone.

Once tunnel metre 1,076.50 was reached, the two abutment tunnels were constructed from the side tunnel. These circular tunnels were driven by blasting/excavator, have an excavated diameter of 4.9 m and were supported by means of deformable steel sets, radial anchoring, advance spile canopies and shotcrete (Fig. 8). The abutment tunnels primarily serve to define the contact zone more precisely and also as abutments for the top heading and invert arches of the main drive.



Quelle/credit: Fotodokumentation ARGE Tunnel Visp

7 Vortrieb Nord, Bogeneinbau  
North drive, installing arches



Quelle/credit: Fotodokumentation ARGE Tunnel Visp

8 Widerlagerstollen links und rechts ab Tunnelmeter 1076,50 (Schutterstollen in der Mitte)  
 Abutment tunnels to the left and right as from tm 1,076.50 (mucking tunnel at the centre)

Linie als Auflager für die Kalotten- bzw. Sohlenbögen des Hauptvortriebs.

Analog dem Schutterstollen wurden auch die Widerlagerstollen mit Extensometern ausgerüstet. Um das Verhalten des anstehenden Gebirges zu beobachten, wurde eine dreimonatige Messkampagne ausgeführt, welche eine stündliche Messung der Extensometer sowie die täglichen 3D-Deformationsmessungen beinhaltet. Die Resultate wurden ausgewertet und bestätigten das Verhalten des Gebirges gemäss Prognose. Während der Messkampagne in den Widerlagerstollen wurde die Kaverne ab Tunnelmeter 1076,50 rückwärts auf das definitive Profil aufgeweitet und gesichert (Bild 9).

Kurz vor Weihnachten 2015 wurde die Freigabe erteilt, die Widerlagerstollen mit Beton zu verfüllen. In den Paramentbereichen wurden die Auflager für die Kalottenbögen respektive Sohlenbögen des Hauptvortriebs erstellt und anschliessend beide Stollen mit selbstverdichtendem Beton verfüllt.

Im Januar 2016 begann der Kalottenvortrieb «Kontaktzone». Die beiden Sicherungsklassen für diesen Vortrieb bestehen aus deformierbarem Stahleinbau, 10 bzw. 15 m langen Mörtelankern, Spiessschirm und Spritzbeton. Die stärkere Sicherungsklasse beinhaltet ausserdem im rückwärtigen Be-

In similar fashion to the mucking tunnel, the abutment tunnels were also fitted with extensometers. In order to observe the behaviour of the prevailing rock, a three-month long measuring campaign was carried out, which involved hourly extensometer measurements as well as daily 3D deformation measurements. The results were assessed and confirmed the rock behaviour in keeping with the forecast. During the measuring campaign in the abutment tunnels, the cavern was enlarged to its definitive profile and supported working backwards from tunnel metre 1,076.50 (Fig. 9).

Shortly before Xmas 2015, approval was granted to fill the abutment tunnels with concrete. The abutments for the top heading and invert arches for the main drive were constructed in the side wall areas and subsequently both tunnels filled with self-compacting concrete.

The “contact zone” top heading drive started in January 2016. The two support classes for this excavation consist of deformable steel sets, 10 or 15 m long mortar anchors, spile canopy and shotcrete. The stronger support class also involved installing concrete yielding elements in the rear zone. After completion of the top-heading drive the bench and the floor will be excavated. It is planned to complete underground construction in branch cavern I in summer 2016.



Quelle/credit: Fotodokumentation ARGE Tunnel Visp

9 Aufweitung Verzweigungskaverne I  
Branch cavern I enlargement

reich den Einbau von Beton-Stauelementen. Nach Fertigstellung des Kalottenvortriebs werden die Strosse und Sohle ausgebrochen. Der Abschluss der Ausbrucharbeiten in der Verzweigungskaverne I ist im Sommer 2016 geplant.

### 3.3 Vortrieb Süd

Die Nordröhre ab dem Portal Süd hat eine Länge von ca. 980 m und mündet von Süden her kommend in die Verzweigungskaverne I (Bild 10). Beim Portal Chatzuhüs wurden im Rahmen eines Vorloses bereits der Lockergesteinsvortrieb sowie einige wenige Meter im Fels erstellt.

Der Südvortrieb wird im Wesentlichen durch die 530 m mächtige Südegg-Einheit (vorwiegend harte Prasinite) definiert. Die Geologie wechselte im Südvortrieb weniger schnell als vergleichsweise im Nordvortrieb, sodass über die ganze Strecke die eher schwächeren Sicherungsklassen ausgebrochen wurden. Ein Stahleinbau konnte auf die wenigen Bereiche der Störzonen (wenige Meter mächtig) konzentriert werden.

In der oben genannten Prasinitstrecke wurde das eigentliche Vorgehen (siehe 3 «Ausführung») zur Erstellung des Werkleitungskanals angepasst. Auf einer Versuchsstrecke in der bereits ausgebrochenen Südröhre konnte die Leistungsfähigkeit der Belagfräse getestet werden. Die angestrebten Fräsleistungen konnten in den Kalkglimmerschiefern erreicht, je nach Anzahl, Ausrichtung und Mächtigkeit der Quarzitbänder sogar übertroffen werden. Im Prasinit musste jedoch der Versuch abgebrochen werden. Die gefräste Schichtdicke musste auf ein unwirtschaftliches Minimum reduziert werden, und zudem blieb der Verschleiss der Fräse enorm hoch. Aus diesem Grund wurde entschieden, den Werkleitungskanal in diesen Abschnitten sprengtechnisch auszubrechen.

In der Südröhre konnte der Ausbruch des Werkleitungskanals weitestgehend unabhängig von anderen Arbeiten und ohne eigentlichen Zeitdruck erstellt werden. Im Gegensatz dazu musste der Kanal im Vortrieb der Nordröhre laufend dem Ausbruch folgen, damit einerseits der geeignete Maschinenpark zur Verfügung stand, andererseits aber die

### 3.3 South Drive

The north tube starting from the south portal is roughly 960 m long and leads into branch cavern I coming from the south (Fig. 10). At the Chatzuhüs portal, the soft ground excavation as well as a section running a few metres into the rock were completed earlier as part of a preliminary contract.

The south drive is largely defined by the 530 m thick Südegg Unit (mainly hard prasinite). The geology in the south drive alters less quickly compared to the north drive. As a result, weaker support classes were specified along the entire section. Steel sets only had to be used in the few areas of fault zones (a few metres thick).

The actual process (see 3 “Construction”) of constructing the service channel was adapted in the above mentioned prasinite section. The performance of the milling machine was tried out on a test section in the south tube that had already been excavated. The intended milling rates were arrived in the calcareous mica schists, or even exceeded depending on the number, alignment and thickness of the quartzite veins. However, in the prasinite the test had to be abandoned. The milled layer thickness had to be reduced to an uneconomic minimum and the machine also suffered excessively high wear. As a result, a decision was made to excavate the service channel in these sections by drill+blast.

In the south tube, excavation of the service channel could largely be undertaken independent of other jobs and without any real time pressure. In contrast, the channel in the north tube had to continuously follow the excavation so that on the one hand the appropriate machinery remained



Quelle/credit: Fotodokumentation ARGE Tunnel Visp

10 Vortrieb Süd, Ortsbrust mit geologischem Aufbau (links Querverbindung 61, rechts Querverbindung 62)

South drive, face with geological structure (on left cross-link 61, on right cross-link 62)

rückwärtigen Vortriebsinstallationen nicht beschädigt wurden. Trotz allem durfte natürlich die Vortriebsleistung nicht zu stark reduziert werden. Ebenfalls führten die Eigenschaften des Prasinit dazu, dass der Sprengstoffverbrauch auf sehr hohe Mengen anstieg (bis 2,30 kg/m<sup>3</sup>) und die Bohrschemas laufend angepasst werden mussten. Im Gegensatz zu den anderen Tunnelabschnitten musste im Prasinit nicht das Über-, sondern das Unterprofil verhindert werden.

### 4 Fazit

Der Vortrieb wird in einigen Monaten termingerecht beendet. Dank der Mitarbeit und der konstruktiven Zusammenarbeit aller beteiligten Fachleute wurden sämtliche Hindernisse und Herausforderungen kurzfristig und erfolgreich gemeistert. Besonders hervorgehoben wird die Leistung der Mineure. Schwere körperliche Arbeit unter Tage, Schichtarbeit, künstliches Licht, schnell wechselnde geologische Verhältnisse gepaart mit der Forderung nach Leistung, Sicherheit und Sorgfalt bedürfen einer gewissen «Coolness» und einer enormen Erfahrung im Tunnelbau.

Die zweite Phase mit den Betonarbeiten läuft bereits an und wird im Verlauf der nächsten Monate ihren Höhepunkt erreichen. Einzelne Knackpunkte wurden bereits entdeckt und gelöst, weitere werden folgen und benötigen wiederum ein konstruktives Miteinander unter Partnern und den Einsatz aller Projektbeteiligten.

Der Bau des Tunnels Visp zeigt: Wenn alle am Projekt Beteiligten am selben Strick ziehen, die gleichen Ziele vor Augen haben, dann kann ein solches Projekt zur Zufriedenheit aller abgewickelt werden.

available and on the other to ensure the tunnelling equipment in the rear was not damaged. Nonetheless, the advance rate could not be slowed too much. In addition, the properties of the prasinite led to extremely high amounts of explosive (up to 2.30 kg/m<sup>3</sup>) being used with the drilling pattern having to be constantly adjusted. In contrast to the other tunnel sections, under-profile rather than over-profile had to be avoided.

### 4 Summary

Excavation will be completed according to schedule within a few months. Thanks to the endeavours and constructive collaboration of all the experts involved, all obstacles and challenges have been mastered successfully in a short space of time. The achievements of the miners is particularly worthy of praise. Demanding physical activities underground, shift work, artificial light, rapidly changing geological conditions coupled with the need for performance, safety and care required a certain “coolness” and enormous experience in tunnelling.

The second phase involving concreting operations is already underway and will reach its climax in the course of the next few months. Individual sticking points have already been identified and resolved, others will follow and once again require constructive cooperation among the partners and motivation on the part of all those involved.

The construction of the Visp Tunnel has shown: provided all those participating in the project pull together and keep their eyes on the same goals, then a project of this kind can be accomplished to everyone's satisfaction.

Renzo Simoni, Dr. sc. techn., Dipl. Bau-Ing. ETH, CEO AlpTransit Gotthard AG, Luzern/CH

# Inbetriebsetzung des längsten Eisenbahntunnels der Welt

## Konzept und Herausforderung beim Gotthard-Basistunnel

Bevor die Züge ab Ende 2016 fahrplanmässig durch den Gotthard-Basistunnel fahren, müssen alle Anlagen eingehend geprüft, Testfahrten absolviert und das Personal geschult werden. Erst wenn diese Inbetriebsetzung erfolgreich abgeschlossen ist, erteilt der Bund die Betriebsbewilligungen.

# Commissioning of the World's Longest Rail Tunnel

## Concept and Challenge of the Gotthard Base Tunnel

All facilities and equipment have to be exhaustively tested, trial journeys completed and staff trained before trains can start scheduled operation through the Gotthard Base Tunnel in late 2016. Only after this commissioning has been successfully concluded the Swiss Federal Government will issue the necessary operating licenses.

### 1 Überblick Inbetriebsetzung

Die Inbetriebsetzung des Grossbauwerks Gotthard-Basistunnel (GBT) ist komplex und in verschiedene Schritte unterteilt. In Teilprüfungen wird jede Komponente und Anlage auf ihre Funktionalität hin getestet. Auch die Interaktion mit der Tunnelleittechnik und die Einbettung in das Gesamtsystem sind sicherzustellen. Dies erfolgt teilweise bereits während der Einbauphase der betrieblichen Einrichtungen.

Die Inbetriebsetzung wird gemäss EN 50126 wie folgt definiert: «Ein Sammelbegriff für alle Aktivitäten, die unternommen werden, um ein System oder Produkt so vorzubereiten, dass der Nachweis der Einhaltung der festgelegten Anforderungen durchgeführt werden kann.»

#### 1.1 Die Testphasen

Nach Abschluss des Einbaus und der Teilprüfung sämtlicher Installationen beginnt auf der gesamten Tunnelstrecke die eigentliche Inbetriebsetzung (Bild 1); diese ist unterteilt in zwei Hauptschritte:

- Testbetrieb: Die AlpTransit Gotthard AG (ATG) als Erstellerin weist die Funktionalität und die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen nach. Im achtmonatigen Testbetrieb werden mit Zugfahrten die Funktionalität und das Zusammenspiel aller Tunnelkomponenten ausgiebig geprüft und die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen nachgewiesen.
- Probetrieb: Der anschliessende Probetrieb steht unter der Hauptverantwortung der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), der späteren Betreiberin des Tunnels.

### 1 Commissioning – an Overview

The commissioning of such a major engineering work as the Gotthard Base Tunnel (GBT) is complex and is subdivided into a number of phases. Each and every component and facility will be tested for correct functioning in series of sub-inspections. Trouble-free interaction with the tunnel control system and integration into the overall system also have to be assured. This has, in some cases, already been accomplished during the installation phase for the operational equipment.

The term “commissioning” is defined in the EN 50126 standard as follows: “An umbrella term for all activities undertaken in order to prepare a system or a product in such a way that it is possible to demonstrate adherence to the specified requirements.”

#### 1.1 The Test Phases

Completion of installation and individual inspection of all facilities will be followed by actual commissioning throughout the length of the tunnel (Fig. 1); this is subdivided into two main phases:

- Test operation: AlpTransit Gotthard AG (ATG), the applicant, here has to demonstrate correct functioning and the fulfilment of the safety requirements. The correct functioning and interaction of all tunnel components will be verified in detail and fulfilment of the safety requirements demonstrated by means of an eight-month period of test train journeys.

## Mise en service du plus long tunnel ferroviaire du monde

### Concept et défi du tunnel de base du Saint-Gothard

La mise en service est basée sur les tests menés et sur les justificatifs fournis dans ce cadre. La saisie, la gestion, mais aussi la planification en détail des différents tests, ainsi que l'élaboration des scénarios correspondants sont réalisées dans des outils spécialement mis au point à cet effet. Les résultats de la planification des tests servent de base à la mise à disposition des ressources humaines nécessaires, du matériel roulant et des prestations de service indispensables, ainsi qu'à l'organisation de la formation du personnel.

## Messa in servizio della galleria ferroviaria più lunga del mondo

### Concetto e sfida della galleria di base del Gottardo

La messa in servizio è basata sui test di verifica e i protocolli da questi derivanti. Il rilevamento, la gestione e anche la progettazione dettagliata dei singoli test, nonché la produzione dei relativi scenari è realizzata con dei tool speciali messi a punto a questo scopo. I risultati dell'esecuzione dei test di verifica servono da base per la messa a disposizione delle risorse in materia di personale, di materiale rotabile e di prestazione dei servizi indispensabili, nonché dell'organizzazione della formazione del personale.

Erst wenn zweifelsfrei nachgewiesen ist, dass der Betrieb mit Personen- und Güterzügen, der Personaleinsatz und die Ereignisbewältigung reibungslos funktionieren, erteilt das zuständige Bundesamt für Verkehr (BAV) die Betriebsbewilligung für den fahrplanmässigen Betrieb.

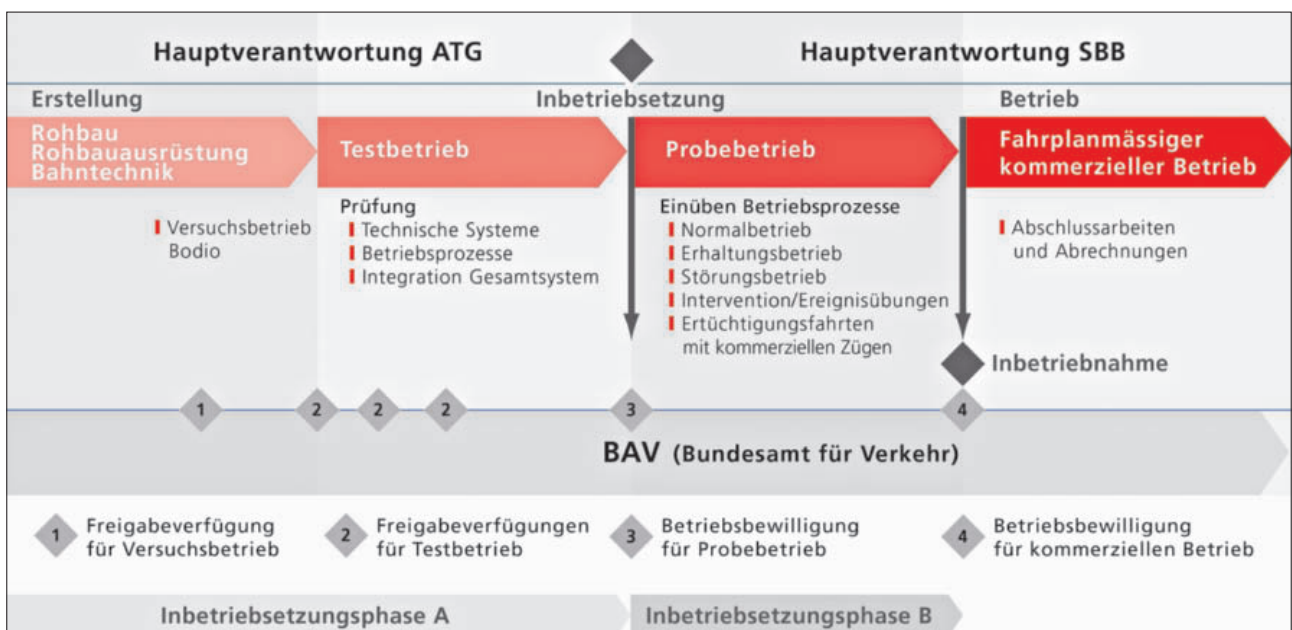
### 1.2 Die Organisation

Wegen der Komplexität der Inbetriebsetzung sind entsprechende organisatorische Vorkehrungen zu treffen, um den Anforderungen gewachsen zu sein und das Projekt aktiv steuern zu können. Diesem Ziel dient auf oberster Stufe die gemeinsame Projektorganisation von ATG und SBB. Fachliche Fragestellungen werden bei der ATG durch die entsprechenden Fachbereiche und bei der SBB durch die Linienorganisation

- Trial operation: Swiss Federal Railways (SBB), the ultimate tunnel operator, bears primary responsibility for subsequent trial operation. The Swiss Federal Office of Transport (BAV) will only issue the operating license for scheduled operation once it has been demonstrated without any residual doubt that operation of passenger and freight trains, deployment of staff, and emergency management all function without trouble.

### 1.2 Organisation

The complexity of the commissioning necessitates corresponding organisational provisions in order to ensure conformity with the requirements and the ability to actively control the project. This, at the top level, is the responsibility of



1 Phasen der Inbetriebsetzung  
The commissioning phases

Quelle/credit: ATG

sichergestellt. Die Fachbereiche werden definierten Test- und Nachweisteams zugeordnet und bilden die Projektorganisation der Inbetriebsetzung.

### 1.3 Die Voraussetzungen

Während der Inbetriebsetzungsphase sind in einem gedrängten Programm viele Einzelaktivitäten unter Einschaltung zahlreicher Ressourcen abzuwickeln. Deshalb ist eine umfassende und detaillierte Vorbereitung der Inbetriebsetzung unumgänglich. Damit der Testbetrieb termingerecht beginnen konnte, musste insbesondere die Bereitstellung der Infrastruktur, Systeme und Arbeiten gewährleistet sein.

## 2 Freigabeverfügung inklusive Nachweisungskonzept

Die Anforderungen an den GBT wurden in den verschiedenen Projektphasen von «grob» bis «sehr detailliert» ausformuliert. Die Anforderungen gründen einerseits auf Gesetzen, Normen und Vorschriften, andererseits aber auch auf Anforderungen der Bauherrschaft.

Die am Bauwerk beteiligten Unternehmer kennen diese Anforderungen. Sie haben deren Erfüllung sicherzustellen und nachzuweisen. Dabei kann unterschieden werden in Nachweise, die der Anforderungserfüllung dienen (zum Beispiel Einhalten von Qualitäts- und Terminvereinbarungen), und in solche zur Erlangung der Betriebsbewilligung durch die Aufsichtsbehörde.

Für die Freigabeverfügung des Testbetriebs liegt die Verantwortung bei der ATG. Für die Betriebsbewilligungen ist die Verfahrensführerin die SBB. Das Gesamtnachweisdossier für die Freigabeverfügung hat einen Umfang von 1283 Nachweisen, was einem Datenvolumen von 11,8 GB entspricht. Von der Antragstellung bis zum Beginn des Testbetriebs dauerte das Bewilligungsverfahren über sechs Monate (Bild 2).

Die übergeordneten Anforderungsdokumente an die Neubaustrecke Gotthard-Basistunnel (NBS GBT) sowie weitere funktionale Anforderungen wurden den Unternehmungen gegeben. Somit kennen die am Bauwerk beteiligten Unternehmer diese Anforderungen und haben deren Erfüllung sicherzustellen und nachzuweisen.

### 3 Nachweiserbringung

Die Basis für das Bewilligungsverfahren bilden die Nachweise, zentral sind dabei die

the joint project organisation set up by ATG and SBB. Technical matters are dealt with at ATG by the corresponding specialist departments and at SBB by the linear management organisation. The specialist departments are assigned to defined test and analysis teams, and constitute the project organisation for the commissioning.

### 1.3 Preconditions

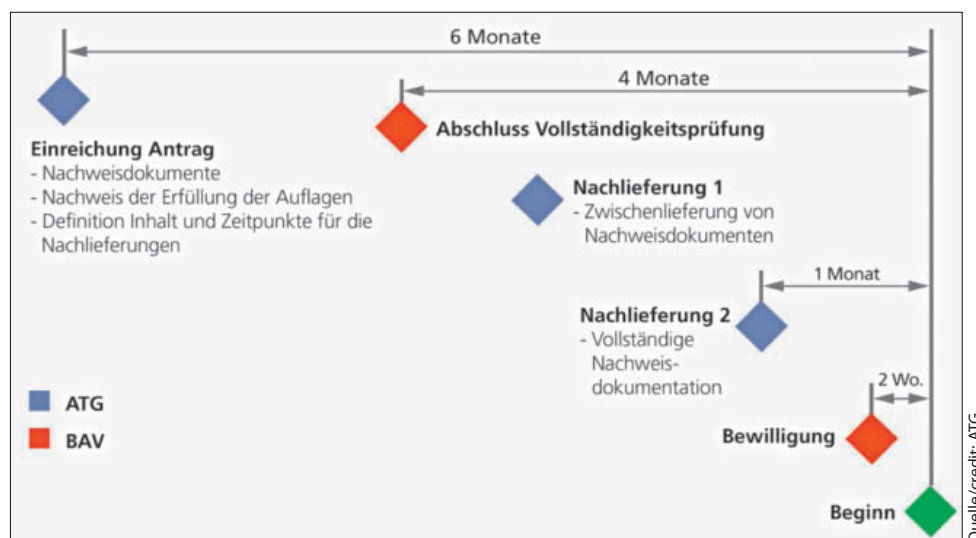
Numerous individual activities, with the involvement of a large number of bodies, have to be completed in a tightly packed programme during the commissioning phase. Comprehensive and detailed preparation for commissioning is therefore vital. In particular, readiness of the infrastructure, systems and all works have to be assured in order that test operation can begin on time.

## 2 Permits Including Analytical Concept

The requirements specified for the GBT have been stated in the various project phases and categorised as “approximate” to “extremely detailed”. These requirements are based on legislation, standards and specifications and also on the other hand, on the requirements of the project clients.

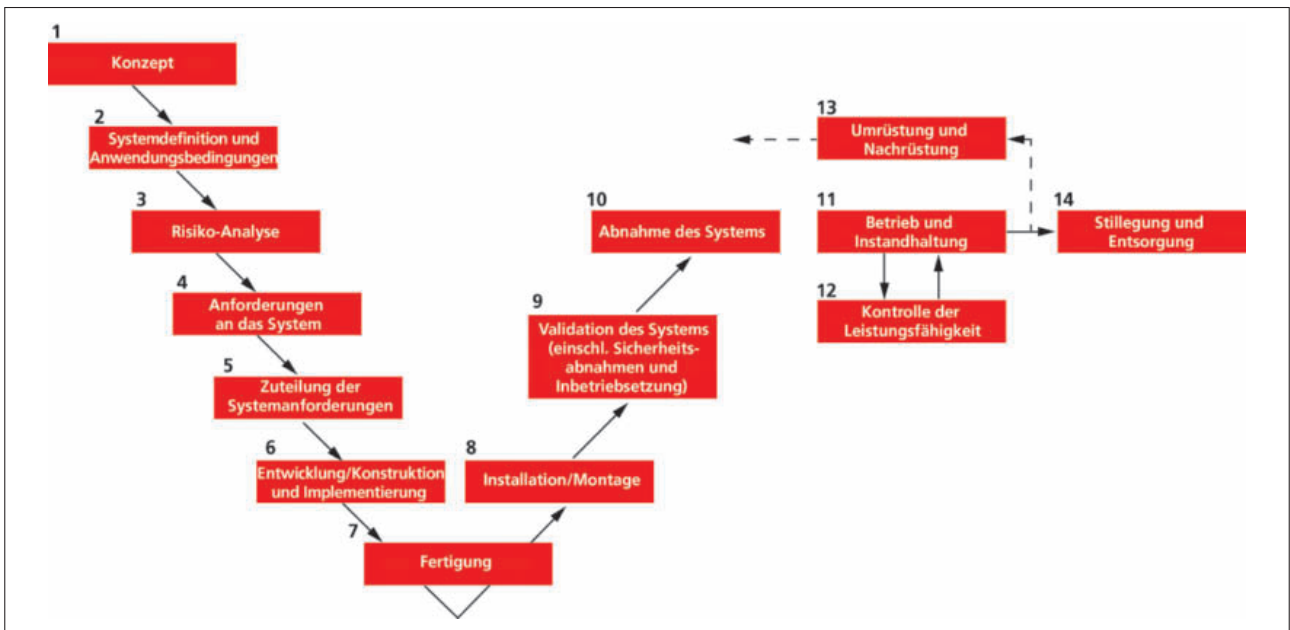
The contractors involved in the work are aware of these requirements, and must assure and demonstrate their fulfilment of them. It is possible here to differentiate between analyses which serve the purpose of meeting requirements (adherence to quality and deadline agreements, for example), and analyses necessary to obtain the operating license from the supervisory authority.

ATG bears responsibility for the permit for test operation. The lead applicant for the operating licenses is the SBB. The overall analysis dossier for the permit has a scope of 1,283



2 Generischer Ablauf des Bewilligungsverfahrens BAV (sechs Monate). Der Beginn bezieht sich hier auf den Testbetrieb.

Generic sequence of the BAV licensing procedure (six months). The start point relates here to test operation.



Quelle/credit: ATG

3 Systemlebenszyklus in «V»-Darstellung nach SN EN 50126  
 "V" view of system life-cycle in accordance with SN EN 50126

sogenannten RAMS-Nachweise. RAMS ist die Abkürzung für das Begriffspaket «Reliability, Availability, Maintainability, Safety» (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit). RAMS ist nach der Definition der Norm SN EN 50126 ein Prozess, der mithelfen soll, Fehler bereits in der Planungsphase zu verhindern. Dazu stellt ein RAMS-Management sicher, dass Systeme definiert, Zuverlässigkeits- und Risikoanalysen durchgeführt, Ausfall- und Gefährdungsraten ermittelt, detaillierte Prüfungen durchgeführt und Sicherheitsnachweise erstellt werden.

Die entwickelten Spezifikationen und zu erbringenden Nachweise bezwecken ein optimales Langzeitbetriebsverhalten des Objekts. SN EN 50126 beschreibt hierzu eine Vorgehensweise, um projektspezifische RAMS-Anforderungen zu entwickeln, zu implementieren und nachzuweisen. Die Vorgehensweise (Bild 3) erstreckt sich über mehrere Phasen des Lebenszyklus, angefangen beim Konzept (Phase 1) über die Herstellung und Prüfung bis schliesslich zur Ausserbetriebnahme des Systems (Phase 14). Zu jeder Phase des gesamten Lebenszyklus gehören definierte Arbeitsergebnisse sowie Verifizierungs- (Phasen 1 bis 8) und Validierungsprozesse (Phase 9).

Die Nachweise, welche im Rahmen des RAMS-Prozesses erbracht werden, bilden einen wesentlichen Bestandteil aller Nachweise als Voraussetzung für die Freigabeverfügungen und Betriebsbewilligungen. Weiter muss aber auch nachgewiesen werden, dass das Bauwerk den funktionalen Anforderungen entspricht, alle Vorschriften und Auflagen erfüllt sind und eine geeignete Betriebs-, Erhaltungs- und Ereignisorganisation vorhanden ist. Zum Nachweis der Erfüllung der RAMS-Anforderungen wurden bereits alle Systeme auf ihr Verhalten bei einem Systemausfall untersucht. Einige Aus-

analysen, equating to a data volume of 11.8 GB. The licensing procedure took over six months from submission of the application up to the start of test operation (Fig. 2).

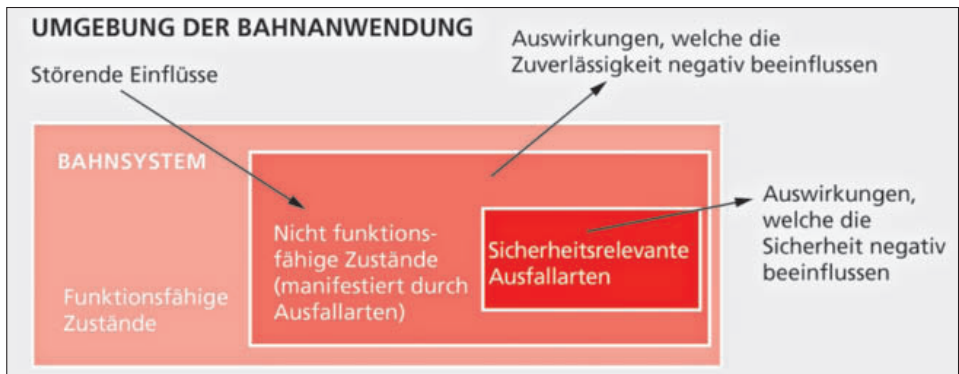
The higher-level requirement documents for the New Gotthard Base Tunnel Rail Line (NBS GBT), along with other functional requirements, have been issued to the contracting companies. The contractors involved in the engineering work are thus familiar with these requirements and must assure and demonstrate their fulfilment of them.

### 3 Furnishing of Analyses

The analyses constitute the basis for the licensing procedure, and the so-called "RAMS" analyses are of central importance here. The acronym RAMS stands for the "Reliability, Availability, Maintainability, Safety" package of criteria. According to the definition in the SN EN 50126 standard, RAMS is a process intended to assist in eliminating errors as early as the planning phase. A RAMS management system ensures that systems are defined, reliability and risks analyses performed, failure and hazard rates determined, detailed checks implemented and safety analyses drafted.

The specifications developed and analyses to be furnished are aimed at achieving optimum long-term operational performance for the project. SN EN 50126 defines for this purpose a procedure for the development, implementation and verification of project-specific RAMS requirements. This procedure (Fig. 3) extends across several phases of the life-cycle, starting with the concept (Phase 1), and progressing via construction and testing, up to and including the decommissioning of the system (Phase 14). Specific work-





4 Auswirkung von Ausfällen auf Bahnanwendungen nach SN EN 50126  
Effects of failures on rail applications in accordance with SN EN 50126

fälle können auch einen negativen Effekt auf die Sicherheit haben (Bild 4).

Die Anforderungen an Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit sind von Bedeutung für den Bahnbetrieb, sind jedoch den Sicherheitsanforderungen untergeordnet. Die Strategie der Instandhaltung ist dem Erreichen der Ziele hinsichtlich Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit verpflichtet. Die Anforderungen an die Methoden für die RAMS-Analysen wurden von der ATG vorgegeben. Damit wurden auf allen Stufen einheitliche Massstäbe angesetzt.

## 4 Bereitstellung

### 4.1 Bereitstellung der Einzelanlagen

Jede Anlage deckt jeweils ein bestimmtes funktionales Einsatzgebiet ab, das dem Gesamtsystem klar zugeordnet ist, mit definierten Nahtstellen und Systembeziehungen. Diese müssen, je nach Anforderung, durch Netzkopplungen mit dem SBB-Netz verbunden sein.

Tunnelleitsystem ist ein Sammelbegriff für drei Module, die für den Anlagenbetrieb der NBS GBT benötigt werden: die Tunnelleittechnik, das Einsatzleitsystem und das Maintenance Management Tool.

Die Bahnleittechnik wird als Prozesssteuerungs-Instrument für den Zugverkehr eingesetzt.

Das Fahrstromleitsystem wird als Prozesssteuerungs-Instrument für die Fahrstromversorgung eingesetzt.

Die elektromechanischen Anlagen sind in sich selbstständig funktionsfähige, örtlich verteilte Systeme, die hierarchisch und strukturiert zusammenwirken. Elektromechanische Anlagen können Teil der Tunnelleittechnik oder Teil der Bahnleittechnik sein.

### 4.2 Neuwertigkeit

Im Rahmen des Testbetriebs wird ein neuwertiges System getestet. Daher musste die Neuwertigkeit bis zum Beginn des Testbetriebs am 30. September 2015 erstellt sein.

ing results and verification (Phases 1 to 8) and validation processes (Phase 9) are defined for every phase of the overall life-cycle.

The proofs furnished as part of the RAMS procedure are an important component of all analyses, being a precondition for the permits and operating licenses. It also has to be demonstrated, however, that the structure conforms to the functional requirements, that

all regulations and conditions have been fulfilled, and that an appropriate operating, maintenance and emergency organisation exists. All systems are analysed for their performance in case of a system failure for the purpose of demonstrating fulfilment of the RAMS requirements. Certain failures may also have a detrimental effect on safety (Fig. 4).

Reliability, availability and maintainability requirements are of great importance for rail operation, but are nonetheless subordinate to safety criteria. The maintenance strategy is dedicated to attaining the reliability, availability and safety targets. The methodological requirements for the RAMS analyses were specified by ATG; uniform standards were set at all levels.

## 4 Readiness for Commissioning

### 4.1 Readiness for Commissioning of the Individual Facilities

Each individual facility covers a specific functional application, which is unequivocally assigned to the system as a whole, with defined interfaces and system relationships. Depending on the particular requirement, these must be connected to the SBB network by means of interconnections.

The "tunnel control system" is an umbrella term covering three modules, which are needed for system operation of the NBS GBT: the tunnel control technology, the deployment control system and the maintenance management tool.

The rail control system is used as a process control instrument for rail traffic.

The traction current control system is used as a process control instrument for the supply of traction current.

The electromechanical facilities are subdivided into independent and functionally capable locally distributed systems, which interact on a structured and hierarchical basis. Electromechanical systems may form part of the tunnel control or of the rail control systems.

### 4.3 Tunnelreinigung

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Reinigung des gesamten Tunnelsystems vor Beginn des Testbetriebs notwendig ist. So konnte die Beeinträchtigung der Sicht durch Staubpartikel reduziert werden, und die Fahrzeuge inklusive Messeinrichtungen wurden weniger abgenutzt. Insgesamt wurden durch Reinigungen vor Beginn des Testbetriebs 22 m<sup>3</sup> Staub aus dem Tunnelsystem entfernt.

### 4.4 Bereitstellung der Sicherungsanlagen

Die Sicherungsanlagen sind bereits seit August 2015 im kommerziellen Betrieb. Dies betrifft nicht nur das Stellwerk im Norden des Tunnels, sondern auch das Radio Block Center (ETCS-Streckenzentrale), die Bahnleittechnik und das Datennetz der Sicherungsanlagen. Im Weiteren werden zur vollen Funktionsfähigkeit der Sicherungsanlagen die Stromversorgung, die GSM-R-Digitalfunk-Anlage und die entsprechenden Nahtstellen (Netzkopplungen) zur SBB benötigt.

### 4.5 Bereitstellung Gesamtsystem

Alle Anlagen, die für den Betrieb des Tunnels notwendig sind, wurden im ersten Halbjahr 2014 einem Gesamtintegrationstest im Gotthard Labor (GLAB) in Zürich unterzogen, um nachzuweisen, dass alle Anforderungen erfüllt werden.

### 4.6 Netzkopplung

Die Inbetriebsetzung des GBT wurde folgendermassen strukturiert:

- Labortests: Die vorgängigen Tests im Labor gewährleisten, dass der Netzübergang zum Gesamtsystem stufengerecht vorbereitet werden kann, ohne die produktiven Systeme der SBB zu gefährden.
- Temporäre Netzkopplungen: Während der Inbetriebsetzung werden zeitlich begrenzte Kopplungen vorgenommen, damit die Datennetz- und Applikationskommunikation abschliessend vorgetestet werden kann.
- Definitive Netzkopplung: Vor Beginn des Gesamtintegrationstests wird die definitive Netzkopplung vollzogen. Die definitive Netzkopplung muss zwingend mit allen produktiven Systemen erfolgen und den finalen Endzustand darstellen.

### 4.7 Eingriffsmanagement

Die Bearbeitung von Eingriffen verläuft gemäss einem allgemeingültigen Ablauf. Die Eingriffsanträge werden durch die SBB erstellt. Sie meldet die Baustelle bei der zuständigen Leitstelle SBB an und nach dem Eingriff auch wieder ab. Die Leitstellen SBB prüfen die betriebliche Durchführbarkeit und nehmen die Eingriffsan- und -abmeldung entgegen.

### 4.8 Gesamtintegrationstest

Der Gesamtintegrationstest vor Ort wurde im Anschluss an die Funktionsprüfungen der einzelnen Anlagen durchgeführt und wies die Gebrauchstauglichkeit und die Gesamtfunktionalität nach. Er fand von Mitte August bis Mitte September 2015, unmittelbar vor dem Testbetrieb, statt (Bild 5).

### 4.2 New Condition

A facility in new condition has to be tested in the context of test operation. It was therefore necessary to assure an as-new condition prior to the start of test operation on 30 September 2015.

### 4.3 Cleaning of the Tunnel

Experience showed that the entire tunnel system had to be cleaned before the start of test operation. This reduced impairment of visibility by dust particles and also wear to the vehicles used, including measuring equipment. A total of 22 m<sup>3</sup> of dust was removed from the tunnel system in the course of cleaning operations prior to the start of test operation.

### 4.4 Readiness for Commissioning of the Control and Safety Systems

The control and safety systems have been in commercial operation since August 2015. This is true not only of the control and routing centre in the north of the tunnel, but also of the ETCS Radio Block Centre, the rail control system and the data network for the control and safety systems. The power supply, the GSM-R digital radio system and the corresponding interfaces (interconnections) with the SBB will now be required to achieve full control and safety system functionality.

### 4.5 Readiness for Commissioning of the Overall System

All systems necessary for operation of the tunnel were submitted to an overall integration test at the Gotthard Laboratory (GLAB) in Zurich during the first six months of 2014 in order to verify that all requirements are fulfilled.

### 4.6 Network Integration

The commissioning of the GBT has been structured as follows:

- Laboratory tests: advance tests in the laboratory assure that the network transition to the overall system can be prepared appropriately step-by-step without endangering the productive systems of the SBB.
- Temporary interconnections: temporary interconnections are implemented during commissioning to permit the concluding of testing of the data network and applications communications.
- Ultimate network integration: ultimate network integration is to be implemented prior to the start of the overall integration test. The ultimate network integration must under all circumstances be implemented with all productive systems and must constitute the ultimate and final system state.

### 4.7 Line Possession Management

Line possessions (for work on the track) are administered in accordance with a universally applicable procedure. Applications for possession are submitted by the SBB. The site notifies them to the responsible SBB control centre and rescinds them again after the possession. The SBB control centres check operational feasibility and receive the possession and rescinding notifications.

Dabei wurde das Zusammenspiel aller Komponenten im GBT nachgewiesen. Dazu gehörten beispielsweise Redundanz- und Belastungstests sowie Ausfallszenarien der Stromversorgung. Ebenfalls geprüft wurde, dass keine Anlage andere Anlagen oder deren Teile negativ beeinflusst.

## 4.9 Erstmaliges Einschalten der Fahrleitung

Für das erstmalige Einschalten der Fahrleitung ist eine Freigabe durch die Aufsichtsbehörde notwendig. Die erstmalige Einschaltung wurde allen beteiligten Organisationen schriftlich mitgeteilt, und im betroffenen Streckenabschnitt wurden entsprechende Hinweisschilder montiert. Seit dem 1. Oktober 2015, 00:00 Uhr, gilt die Fahrleitung als unter Spannung stehend.

## 5 Planung der Testfälle

Die Planung des Testbetriebs erfolgt durch das Projektbüro Inbetriebsetzung (IBS) unter der Leitung der ATG. Die Anmeldung für Aktivitäten im Testbetrieb erfolgt ausschliesslich über dieses Büro. Die Planung umfasst die nachfolgend aufgeführten Phasen:

- Nullfall-Planung Testbetrieb: wurde 2014 abgeschlossen und mit dem Konzept Testbetrieb dem BAV zur Prüfung und Genehmigung eingereicht.
- Detailplanung Testbetrieb: Die Informationen werden mit den Testteams ergänzt, bereinigt und per Ende 2014 abgeschlossen.
- Erhebung der Schichtdaten: Planungsinformationen wie Rollmaterial oder Örtlichkeiten werden den einzelnen Schichten zugeordnet. Diese Planungsarbeiten folgen der «Rollenden Planung» etwa sechs bis neun Monate vor der geplanten Durchführung.

## 4.8 Overall Integration Test

The on-site overall integration test was performed after completion of the functional tests on the individual systems and demonstrated serviceability and overall functionality. It took place from mid-August to mid-September 2015, immediately prior to test operation (Fig. 5).

Correct interaction of all components in the GBT was verified. The programme included, for example, redundancy and load tests, and also power failure scenarios. A check was also performed to ensure that no system has any negative influence on other systems or parts thereof.

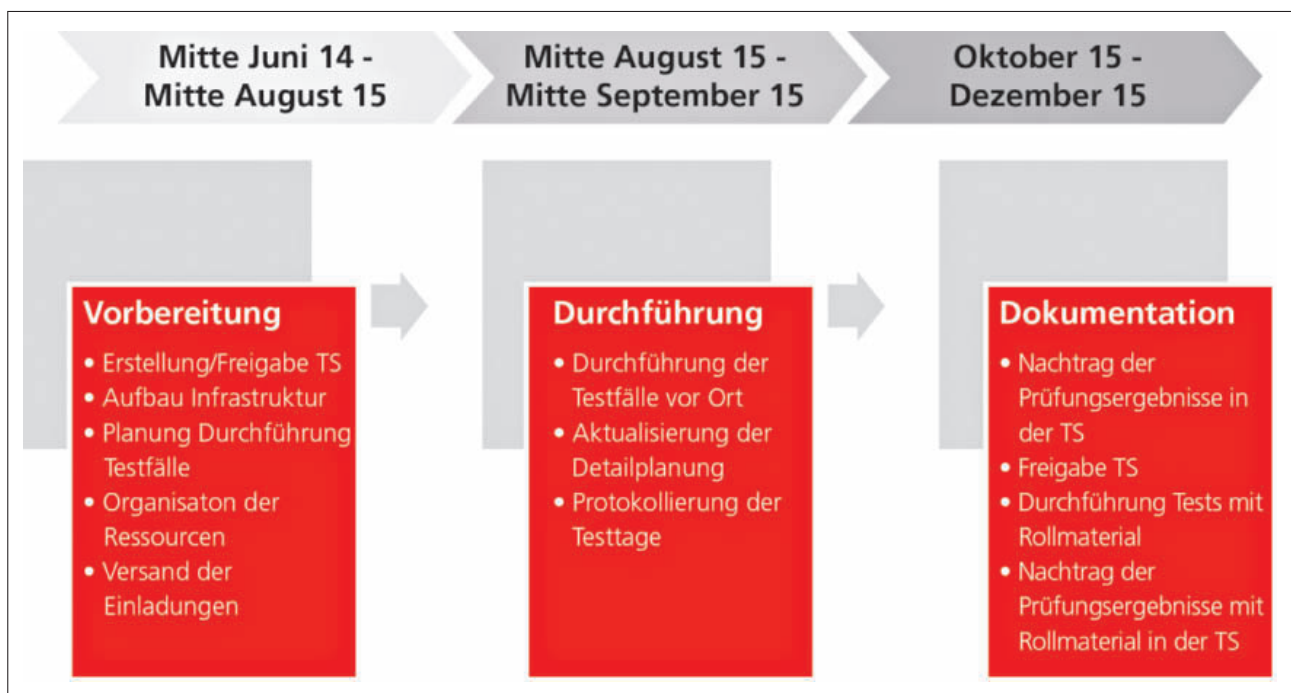
## 4.9 Energisation of the Overhead Line Equipment for the First Time

Approval by the supervisory authority is necessary for the energisation for the first time of the overhead line equipment (OLE). First-time energisation was notified to all participating organisations in writing and corresponding notices were installed in the relevant section of line. The overhead line equipment has been live since 00:00 h on 1 October 2015.

## 5 Planning of Test Cases

Test operation is being planned by the commissioning project consultancy office under ATG management and supervision. Registration of activities during test operation is solely possible through this office. The planning comprises the following phases:

- Zero Case Planning Test Operation: this was completed in 2014 and submitted with the test operation concept to the BAV for examination and approval.



5 Grobterminplan für die Gesamtintegrationstests  
Approximate time schedule for the overall integration tests

- Detailplanung der Schichten: Die Planung wird mit detaillierten Drehbüchern versehen. Die Fahrprogramme werden fixiert und die Serviceleistungen festgelegt, sämtliche Detailthemen sind dann bekannt. Diese Planungsarbeiten folgen ebenfalls dem Prinzip der «Rollenden Planung» drei bis sechs Monate vor der geplanten Durchführung des Testbetriebs.
- Durchführungsunterlagen: Im Rahmen der Erstellung der Durchführungsunterlagen erfolgt der Freigabeprozess der Drehbücher. Zudem werden die erforderlichen Trassen auf den entsprechenden Tag und Ort geplant sowie Rollmaterial, Personal und Serviceleistungen bestätigt. Diese Phase beginnt drei Monate vor der geplanten Aktivität.

## 6 Die Durchführung

### 6.1 Durchführung Inbetriebsetzung

Die Abteilung «Durchführung» war, ähnlich einer Bauleitung, dafür verantwortlich, die Randbedingungen für die Realisierung des Testbetriebs zu schaffen. Entsprechend der Komplexität des Bauwerks und der damit verbundenen Vielzahl an technischen Anlagen und Prozesswechselwirkungen sind Inhalt und Umfang der Prüfungen und Nachweise sehr verschieden. Dasselbe gilt auch für den an der Testdurchführung beteiligten Personenkreis. So sind neben Mitarbeitenden der ausführenden Unternehmen Vertreter aus Projektengineeringbüros, Universitäten und Hochschulen, Fachabteilungen von SBB und ATG sowie weitere Projektbeteiligte involviert. Bei der Durchführung der Testaktivitäten waren fünf verschiedene Stellen beteiligt (Bild 6).

### 6.2 Regelabläufe der Testschichten, Personal und Ressourcen

Im Rahmen mehrerer Workshops wurden vor Beginn des Versuchs- bzw. Testbetriebs mit den zukünftig Beteiligten Mustertesttage durchgespielt, Teil- und Gesamtprozesse erarbeitet und im Zuge der weiterführenden Planung verfeinert. Im Ergebnis entstanden strukturierte Regelabläufe. Je nach Charakteristik der Testaktivitäten wurde unterschieden in:

- Testschichten mit Messzug,
- Testschichten mit Logistikzug,
- Testschichten ohne Schienenfahrzeuge,
- Schulungen mit Besuch der Multifunktionsstelle Faido.

Aufgrund der Vielzahl angemeldeter Testschichten kam ein Schichtbetrieb mit 4 x 6 Stunden über sieben Tage pro Woche zur Anwendung (Bild 7).

Seitens der ATG war für die Realisierung des Testbetriebs Personal für die Testkoordination, für die Testunterstützung sowie für Briefing und Materialbereitstellung aufzubieten. Rund 40 Full-time equivalents mussten für diese Zeit auf dem Arbeitsmarkt rekrutiert und vorab ausgebildet werden.

### 6.3 Resultate aus dem Testbetrieb

Am 1. Oktober 2015 konnte mit dem Testbetrieb gestartet werden. Kurze Zeit später fanden bereits die ersten Test-

- Detail Planning Test Operation: the information was augmented with the test teams, adjusted, and completed as of the end of 2014.
- Obtainment of shift data: planning information, such as rolling stock or locations, is assigned to the individual shifts. This planning work follows “rolling planning” around six to nine months prior to scheduled implementation.
- Detailed shift planning: detailed “scripts” are assigned to the planning. The operating programmes are finalised and services defined; all detail topics are known then. This planning work also follows the “rolling planning” principle, three to six months prior to the scheduled performance of test operation.
- Implementation documentation: the approval process for the scripts takes place within the scope of drafting of the implementation documentation. In addition, the necessary paths are scheduled for the corresponding day and location, and rolling stock, personnel and services confirmed. This phase starts three months prior to the planned activity.

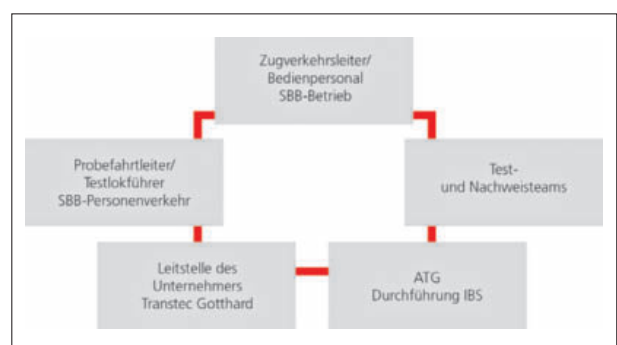
## 6 Implementation

### 6.1 Performance of Commissioning

The “Implementation” department bore responsibility, in a similar way to a site management, for the creation of the conditions for implementation of test operation. The content and scope of the tests and analyses differ very much as a consequence of the complexity of the structure and the associated large number of technical systems and process interactions involved. The same also applies to the persons involved in the performance of testing. Not only employees of the contractors, but also representatives of project engineering consultancies, universities and colleges, SBB and ATG specialist departments, and also other project participants are also involved, for example. Five different bodies participated in the performance of the test activities (Fig. 6).

### 6.2 Standardised Procedures for Test Shifts, Personnel and Bodies

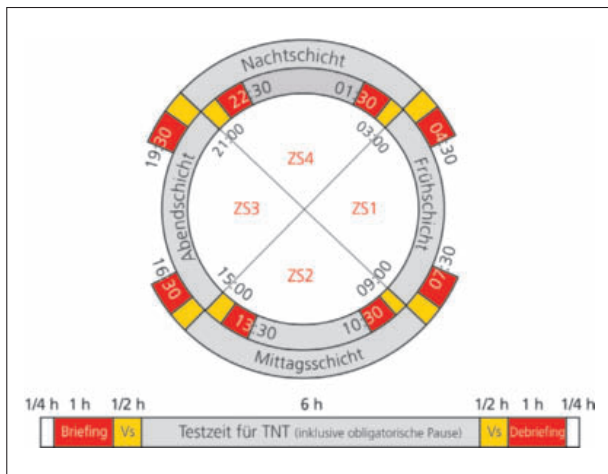
Specimen test days were rehearsed with the future participants and sub- and overall processes drafted and refined during continuing planning in the course of a number of



Quelle/credit: ATG

6 Hauptbeteiligte bei der Testdurchführung

The main participants in the performance of the tests



Quelle/Credit: ATG

**7 Schichtmodell Testbetrieb Gotthard-Basistunnel (TNT: Test- und Nachweisteam, Vs: Verschiebung vor Ort)**

*Shift model for test operation, Gotthard Base Tunnel (TNT: Test and analysis team, Vs: Relocation within the tunnel)*

fahrten mit dem neuen Zugführungssystem European Train Control System (ETCS) Level 2 statt. Mit dem Funkmesswagen der SBB wurde der Digitalfunk GSM-R und der Tunnelfunk getestet. Im November und Dezember 2015 fanden die Hochstastfahrten statt. Dazu wurde die Fahrgeschwindigkeit schrittweise bis zu maximal 275 km/h gesteigert. In der Nacht vom 7. zum 8. November 2015 wurden beide Röhren mit 230 km/h befahren, und am 8./9. November 2015 wurde in der Oströhre erstmals die Höchstgeschwindigkeit von 275 km/h erreicht.

Von Oktober 2015 bis Januar 2016 konnten die Prozesse GBT (Schwerpunkt Normalbetrieb und Ereignisbetrieb) systematisch und erfolgreich getestet werden. Den Abschluss dieser Tests bildete der sogenannte «Big Test» vom 25./26. November 2015, in dem mit bis zu acht Zügen gleichzeitig Szenarien aus dem Ereignisbetrieb getestet wurden. Mit diesem Test wurde nachgewiesen, dass folgende Vorgaben im Betrieb eingehalten werden können:

- Evakuierung der Reisenden innerhalb von 70 bis 90 Minuten nach Ereignisauslösung am Beispiel bei einem Brand im Zug mit Personenbeförderung,
- Intervention durch den Lösch- und Rettungszug innerhalb von 20 bis 45 Minuten,
- Nachweise, ob die Reisenden richtig gelenkt werden und dass sie sich in einer gesunden, beleuchteten Umgebung bewegen (Überdrucklüftung),
- Selbstrettung der Reisenden in der Nothaltestelle,
- Selbstrettung der Reisenden an beliebiger Stelle.

Am 6. Februar 2016 wurde der Einsatz eines 1500 m langen Güterzugs im GBT getestet. Der Testzug bestand aus 76 Flach-, Teleskop- und Containerwagen ohne Ladung. Der 2216 t schwere Güterzug wurde mit drei Lokomotiven des Typs Re620 gefahren, je eine an der Spitze, in der Mitte und am Ende des Zuges. Auf diversen Fahrten wurde getestet, ob im Bedarfsfall solch lange Güterzüge mit dem neuen Zug-

workshops held prior to the start of test operation. The results took the form of structured standardised procedures. Differentiation was made between the following, on the basis of the characteristics of the test activities:

- Test shifts with a geometry and inspection train,
- Test shifts with a logistics train,
- Test shifts with no rail vehicles,
- Training events, with visits to the Faido combined technical and rescue station.

In view of the large number of test shifts registered, 4 x 6 hour shift operation for seven days per week was selected (Fig. 7).

In the context of the implementation of test operation, ATG was responsible for provision of staff for test coordination, test support and also for briefing and for the provision of materials. It was necessary for this period to recruit forty full-time equivalent employees on the labour market and train them in advance.

### 6.3 Results of Test Operation

Test operation was started on 1 October 2015, and the first test runs using the new European Train Control System (ETCS) Level 2 took place just a short time later. The SBB radio reception monitoring car was used for testing of GSM-R digital radio and the tunnel radio system. The high-speed trials were held in November and December of 2015, with train speed gradually being increased step-by-step up to the maximum of 275 km/h for this purpose. The two bores were traversed at 230 km/h during the night of 7 to 8 November 2015, and the maximum speed of 275 km/h was attained for the first time in the east bore on 8/9 November 2015.

The GBT processes (with emphasis on normal and emergency operation) were successfully systematically tested from October 2015 to January 2016. These tests concluded with the so-called “Big Test” from 25/26 November 2015, in which scenarios from emergency operation were tested using up to eight trains simultaneously. This test demonstrated that the following requirements can be met during operation:

- Evacuation of passengers within 70 to 90 minutes from an alarm being given, the example here being a fire in a train carrying passengers,
- Intervention by the firefighting and rescue train within 20 to 45 minutes,
- Multiple demonstrations that the passengers are correctly directed and that they move in a healthy and lighted environment (positive-pressure ventilation),
- Escape (“self-rescue”) by passengers at the emergency stopping point,
- Escape of passengers at a random location.

The use of a freight train 1,500 m long was tested in the GBT on 6 February 2016. The test train consisted of 76 flat cars, sliding hood coil cars and container cars, all without cargo. Traction for this 2,216 t train was provided by three Type Re620 locomotives, one at the front, one in the centre, and

sicherungssystem ETCS Level 2 problemlos durch den 57 km langen Gotthard-Basistunnel geführt werden können.

### 7 Der Probetrieb

Die SBB ist gemäss ihrer Vereinbarung mit dem Bund beauftragt, den Probetrieb durchzuführen. Dieser umfasst im Wesentlichen das Einüben der Betriebsprozesse, der verschiedenen Betriebsarten unter realistischen Bedingungen und das Hochfahren der Betriebs-Interventions- und -Erhaltungsorganisation. Damit die SBB ab Beginn Probetrieb die Hauptverantwortung übernehmen kann, müssen Teile, die inhaltlich zum Probetrieb gehören, bereits im Testbetrieb der ATG durchgeführt werden. Dazu gehören beispielsweise die Rettungsübungen und Tests zur Ertüchtigung der Erhaltung.

In dieser Phase wird der Tunnel vom Testbetrieb mittels Probetrieb in den Regelbetrieb überführt. Dazu werden Ertüchtigungsfahrten mit kommerziellen Zügen durchgeführt und der Betrieb schrittweise hochgefahren.

Die Aktivitäten im Probetrieb werden in drei Gruppen unterteilt:

- Kommerzieller Betrieb,
- Erhaltungsbetrieb (wenn sich Personen im Tunnel aufhalten),
- Probefahrten.

Bei den kommerziellen Fahrten im Probetrieb soll ein Stresstest mit einer grossen Anzahl Güterzügen erfolgen. Hierzu ist eine kontinuierliche Steigerung der Anzahl Fahrten vorgesehen. Von August bis November 2016 finden zusätzlich Stresstests mit Personenzügen statt.

### 8 Betriebskonzept

Im Gegensatz zu vielen neueren Hochleistungs-Bahnstrecken, die ausschliesslich für Hochgeschwindigkeits-Personenverkehr ausgelegt sind, ist die Gotthard-Achse sowohl für den Güter- (bis 110 km/h) als auch für den Personenverkehr (bis 250 km/h) ausgelegt. Dies wirkt sich nicht nur auf die Sicherheitseinrichtungen, sondern auch auf das gesamte Betriebsregime aus. In einer ersten Betriebsphase wird der Mischverkehr mit fünf Güter- und zwei Personenzügen je Stunde und Richtung geplant. Für dieses Konzept sind sämtliche Nachweise zu erbringen. Im Tunnel gilt der Grundsatz, dass während des kommerziellen Betriebs keine Wartungsarbeiten vorgenommen werden. Der Regelunterhalt muss während der betriebsfreien Stunden nachts durchgeführt werden.

Alle Massnahmen im Zuge der Testfahrten, der Stresstest sowie die Genehmigungs- und Bewilligungsverfahren werden nach derzeitiger Planung bis Dezember 2016 abgeschlossen sein. Dann kann der längste Eisenbahntunnel der Welt in den fahrplanmässigen, kommerziellen Betrieb übernommen werden.

one at the rear of the train. A number of runs were used to determine whether such long freight trains can, when necessary, be routed without difficulty through the 57 km long Gotthard Base Tunnel using the new ETCS Level 2 system.

### 7 Trial Operation

In accordance with its agreement with the Swiss federal government, SBB has been commissioned to perform trial operation. This essentially comprises practising operational processes, the various modes of operation under realistic conditions, and activation of the operational intervention and maintenance organisation. Certain elements, which in content terms are part of trial operation, had to be performed during ATG test operation in order that the SBB can assume prime responsibility from the start of trial operation. These include, for example, rescue exercises and tests for the rationalisation of maintenance.

During this phase, the tunnel is to be transferred from test operation, by means of trial operation, to normal operation. Final adjustment runs using revenue-earning trains are to be performed for this purpose, and operation increased step-by-step.

The trial operation activities are subdivided into three groups:

- Revenue-earning operation,
- Maintenance mode (while persons are present in the tunnel),
- Trial runs.

A "stress test" using a large number of freight trains is to be performed amongst the revenue-earning trips in trial operation. A continuous increase in the number of trips is planned for this purpose. Additional stress tests involving passenger trains are to take place from August to November 2016.

### 8 Operating Concept

Unlike many recent high-speed rail lines, which are designed solely for high-speed passenger traffic, the Gotthard Axis is intended for both freight (up to 110 km/h) and passenger (up to 250 km/h) traffic. This fact has implications not only for the safety systems, but also for the entire operating regime. Mixed traffic, featuring five freight and two passenger trains per hour per direction, is planned for an initial operating phase. All analyses must be furnished for this concept. The fundamental principle that no maintenance work may be performed during revenue-earning operation applies in the tunnel. Scheduled maintenance must be performed during the traffic-free night-time hours.

On the basis of present planning, all activities for the test runs, the stress test and the approval and licensing procedures should be completed by December 2016. The world's longest rail tunnel can then be opened for scheduled revenue-earning traffic.



# SWISS TUNNEL COLLOQUIUM 2016

«Fire and Safety» für Bahn- und Strassentunnels

“Fire and Safety” in Rail and Road Tunnels

15. Juni 2016



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



Christoph Schneider, Dipl. Masch.-Ing. FH, Bundesamt für Verkehr BAV, Ittigen/CH

# Brand und Sicherheit im Bahntunnel

## Sicherheitsaspekte aus Sicht der Bewilligungsbehörde

«Der öffentliche Verkehr der Schweiz ist sehr sicher.» Diese Aussage macht das Bundesamt für Verkehr (BAV) im Sicherheitsbericht 2014. Als Bewilligungsbehörde ist das BAV mitverantwortlich für die Tunnelsicherheit. Die Erwartungen an die Sicherheit im Bahnverkehr sind hoch, denn im Bahntunnel ergeben sich nicht nur Sicherheitsaspekte, sondern auch Herausforderungen und Zielkonflikte.

# Fire and Safety in Rail Tunnels

## Safety Aspects from the Approval Authority Viewpoint

“Public transport in Switzerland remains extremely safe” – a statement made by the Federal Office of Transport (FOT) in its 2014 safety report. The FOT, as the relevant approval authority, bears co-responsibility for tunnel safety. The expectations for rail transport safety are high, because not only safety aspects, but also challenges and conflicts of aims play a role in rail tunnels.

### 1 Aspekte zu Brand und Sicherheit im Bahntunnel

Gemäss der Zielsetzung im Sicherheitskonzept des BAV [1] müssen Personen im Ereignisfall eine faire Überlebenschance haben. Zu den schwerwiegenden Ereignisfällen in einem Bahntunnel zählt zweifelsohne ein Brand. Der fortschreitende Brandverlauf und die damit verbundene Ausbreitung von Hitze, Rauch und unsichtbaren Gasen bedingen moderne Sicherheitsmassnahmen, um eine faire Überlebenschance gewährleisten zu können.

#### 1.1 Tunnelbrand

Gegenüber einem Brand in offener Umgebung unterscheiden sich Tunnelbrände in zwei wichtigen Punkten: Von der Hitzerückstrahlung des engen Tunnelquerschnitts sowie vom Einfluss der natürlichen Belüftung [2]. Reicht die natürliche Belüftung nicht aus, um eine vollständige Verbrennung aufrechtzuerhalten, erhöht sich die Bildung von Kohlenmonoxid (CO), und das unsichtbare, giftige Gas verbreitet sich mit dem Rauch. Besonders gefährliche Situationen ergeben sich, wenn die Rauchsichtung nicht beibehalten werden kann.

#### 1.2 Sicherheit

Die Gewährleistung einer fairen Überlebenschance setzt spezifische Massnahmen voraus. Nachfolgend werden mögliche Massnahmen zur Selbst- und Fremdrettung sowie zur Vorbeugung erläutert.

##### 1.2.1 Selbstrettung

Im Ereignisfall sind die Erstinformationen für die Passagiere entscheidend. Seien es die Angaben der Zugbegleitung, die Durchsagen des Lokomotivführers oder vom Band ab-

### 1 Fire and Safety Aspects in Rail Tunnels

The objectives of the FOT safety concept [1] require that persons have a fair chance of survival if incidents occur. Fires belong without doubt to the serious incidents which can occur in a rail tunnel. The progressive development of a fire, and the associated spread of heat, smoke and invisible gases, necessitate modern safety provisions in order to be able to assure a fair chance of survival.

#### 1.1 Tunnel Fires

Tunnel fires differ from fires in a non-enclosed environment in two important respects: the reflection of heat within the narrow tunnel cross-section and the influence of natural ventilation [2]. Where natural ventilation is not sufficient to maintain complete combustion, the formation of carbon monoxide (CO) increases, and this invisible toxic gas spreads together with the smoke. Particularly dangerous situations arise if smoke stratification cannot be maintained.

#### 1.2 Safety

The maintenance of a fair chance of survival presupposes certain specific provisions. Possible provisions for escape (self-rescue) and assisted rescue, and also for prevention, are examined below.

##### 1.2.1 Self-rescue

The initial information provided to passengers is decisive if an incident occurs. Whether it will be information provided by the train crew, the announcements of the driver or taped messages played automatically – a “fair chance of survival” depends primarily on how the passengers are informed concerning their behaviour and concerning further action.

## Incendie et sécurité dans les tunnels ferroviaires

### Les aspects de sécurité dans l'optique des autorités délivrant les autorisations

Un grand incendie dans un tunnel ferroviaire peut se transformer en un évènement catastrophique de très grande portée. Les mesures destinées au sauvetage autonome et au sauvetage par des tiers sont multiples. Dans le domaine de la sécurité dans les tunnels, la coordination entre les concepts théoriques, la construction effective et les processus pratiques constitue pour l'OFT un vrai défi. Il s'agit aussi d'évaluer des solutions pour les conflits d'objectifs. La garantie d'un transport public toujours très sûr pour l'avenir demande de l'innovation et le perfectionnement de la technologie, des processus et de la formation.

## Incendio e sicurezza nella galleria ferroviaria

### Aspetti relativi alla sicurezza dal punto di vista dell'organo competente

Un incendio in una galleria ferroviaria può evolversi in una catastrofe di dimensioni drammatiche con pesanti conseguenze. Misure di sicurezza per la salvezza propria e quella di altri sono complesse. Una sfida per il BAV (Ente Federale per il Traffico) riguardo alla sicurezza in galleria è il coordinamento tra i concetti teorici, l'effettiva costruzione e le procedure pratiche. Contemporaneamente è anche necessario trovare delle soluzioni ai conflitti di interesse. Per garantire anche in futuro un trasporto pubblico molto sicuro, vengono richiesti innovazione e sviluppo tecnologico, delle procedure e della formazione.

gespielte Texte; die faire Überlebenschance hängt in erster Linie davon ab, wie die Passagiere hinsichtlich ihres Verhaltens und des weiteren Vorgehens informiert werden. Liegen keine genauen Erkenntnisse über das Ereignis vor, ist in einer ersten Phase ein ruhiges Verhalten und Sitzenbleiben generell zielführend. Sofern aufgrund zusätzlicher Informationen oder Abklärungen eine Evakuierung eingeleitet werden muss, sind die Passagiere umgehend über das weitere Vorgehen genauestens zu informieren.

Eine hohe Überlebenschance haben jene Personen, welche nach dem Verlassen des Zuges innert kürzester Zeit einen sicheren Bereich erreichen. Zum einen kann man davon ausgehen, dass der Evakuationsprozess deutlich weniger beeinträchtigt wird, wenn Passagiere ihr mitgeführtes Gepäck liegen lassen. Andererseits sind Angaben zur Ausstiegsseite, zur Fluchtrichtung, zum Fluchtweg selber sowie zum Verhalten am Zielort eminent wichtig.

Während der Selbstrettung spielt neben der Information auch die Infrastruktur eine entscheidende Rolle. Mit ideal ausgelegter Sicherheitsausrüstung können die Bedingungen der Selbstrettung optimiert werden. Grundvoraussetzung ist dabei das Vorhandensein eines ausreichend dimensionierten Fluchtweges. Zudem können ein Handlauf, eine Fluchtwegbeschilderung, eine Notfallbeleuchtung, eine Ereignislüftung und Sicherheitstüren den Prozess der Selbstrettung unterstützen. Erreichen die sich rettenden Personen einen sicheren Bereich, so ist das temporäre Überleben in der Regel gewährleistet. Die Betroffenen können nun die Fremdrettung abwarten.

#### 1.2.2 Fremdrettung

Die Fremdrettung kann von verschiedenen Ereignisdiensten gewährleistet werden. Bei einem Tunnelbrand steht jedoch der Einsatz der Feuerwehr im Vordergrund. Im Zusammen-

When no precise knowledge about the event is available, calm behaviour and remaining seated are generally appropriate during the initial phase. When additional information or clarification necessitates evacuation, the passengers must be informed immediately and as accurately as possible about further procedure.

Those persons who are able to reach a safe area within the shortest possible time after leaving the train have a high chance of survival. It can, on the one hand, be assumed that the evacuation process will be hindered significantly less if the passengers leave their baggage in the train. On the other hand, information on the correct exit side, on the direction of escape, on the escape route itself and on conduct at the destination point are also of prime importance.

Not only information, but also the infrastructure play a decisive role during escape. Ideally designed safety equipment



1 Notbeleuchtung und Fluchtwegbeschilderung  
Emergency lighting and escape route signage

Quelle/credit: Bundesamt für Verkehr, Gotthard-Basistunnel



Quelle/credit: Bundesamt für Verkehr, Lösch- und Rettungszug

2 Ausrüstung im Lösch- und Rettungszug  
Equipment on a firefighting and rescue train

hang mit Brandeinsätzen in Strassentunneln sind folgende Faktoren für eine erfolgreiche Intervention massgebend: Ausbildung, Kenntnisse über die Tunnelanlage, Einsatzvorbereitung sowie die Taktik und die Technik im Einsatz selber [3]. Es ist davon auszugehen, dass die Erfolgsfaktoren aus Strassentunneln grösstenteils auch für Bahntunnel anzuwenden sind.

Das BAV kann gegenüber den verantwortlichen Infrastrukturbetreibern der Eisenbahntunnel regelmässige Rettungsübungen verfügen. Bei solchen Rettungsübungen werden unter anderem die Prozesse und die Schnittstellen der einzelnen Ereignisdienste unter möglichst realen Bedingungen trainiert.

Die persönliche Schutzausrüstung bietet den Feuerwehrleuten während des Einsatzes im Eisenbahntunnel den nötigen Schutz. Als zusätzliche Hilfsmittel für die Fremdrettung dienen verschiedene Fahrzeuge. In der Schweiz kommen dabei vorwiegend die schienengebundenen Lösch- und Rettungszüge zum Einsatz. Sind Ereignissenarien mit mehreren hundert Passagieren möglich, ist der Einsatz von einem Evakuationszug oder Bussen vorgesehen. Diese Fahrzeuge können Passagiere in einem ungefährdeten Bereich im Tunnelsystem aufnehmen und an einen endgültigen sicheren Ort bringen.

is capable of optimising the conditions for escape. The basic precondition here is the existence of an adequately dimensioned escape route. In addition, a handrail, escape route signage, an emergency lighting system, an emergency ventilation system and safety doors can all support the escape process. At least temporary survival is generally assured once the escaping persons reach a safe area where they can wait for assisted rescue.

### 1.2.2 Assisted Rescue

Assisted rescue can be assured by various emergency services, although in case of a tunnel fire, deployment of the fire services is most likely. The following factors are critical for successful intervention in connection with fire deployments in road tunnels: training, knowledge of the tunnel system, deployment preparation, plus tactics and equipment for the deployment itself [3]. It can be assumed that the success factors in road tunnels are very largely also applicable to rail tunnels.

The FOT has the power to require rescue exercises at regular intervals from the responsible rail tunnel infrastructure operators. Such rescue exercises involve, among other things, training in the processes and interfaces of the indi-

### 1.2.3 Vorbeugung

Zur Vorbeugung von Ereignissen in Bahntunneln können verschiedene Massnahmen ergriffen werden. Auf bautechnische Mittel wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Die Frage, ob die Ausrüstung des Rollmaterials als Fremdrettung betrachtet werden kann, sei an dieser Stelle offen gelassen. Fakt ist jedoch, dass Werkstoffanforderungen das Ausmass entscheidend beeinflussen können. Die für das Brandverhalten massgebenden Merkmale wie Entflammbarkeit, Rauchdichte sowie Toxizität sind bereits bei der Auswahl von Werkstoffen und Komponenten zu berücksichtigen [4]. Hinzu kommen Detektions- und Bekämpfungsanlagen, welche einen allfälligen Brand in einem frühen Stadium erkennen und sogleich eindämmen können.

Ein weiteres Mittel, um einen Zugbrand in einem Tunnel zu verhindern, sind die Zugkontrollleinrichtungen. Diese erlauben bei der Vorbeifahrt die Züge auf bestimmte Risiken zu überprüfen. In der Schweiz sind Heissläufer- und Festbremsortungsanlagen, Radlastcheckpoints, Profil- und Antennenortungsanlagen sowie Brand- und Chemieortungsanlagen in Betrieb. Diese Anlagen ermöglichen es, Züge gezielt vor der Einfahrt in kritische Streckenabschnitte wie beispielsweise in Tunnel zu überprüfen oder Gefahren festzustellen. Wird eine mögliche Gefährdung mit ausreichender Wahrscheinlichkeit detektiert, kann der Zug am nächstmöglichen geeigneten Ort angehalten werden [5].

## 2 Schwerpunkte der Tunnelsicherheit im BAV

Das BAV beurteilt sicherheitsrelevante Aspekte Risiko-orientiert. Das bedeutet, es erfolgt eine selektive Überprüfung sicherheitsrelevanter Aspekte mit Stichproben. Die Fachbereiche des BAV bestimmen dabei im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben Risiko-orientiert die zu prüfenden Elemente, den Prüfumfang, die Prüftiefe etc. Das Wissen um bestimmte Risiken entnimmt das BAV dem Sicherheitsnachweis des Gestalters, den Auswertungen der sicherheitsrelevanten Informationen sowie dem eigenen Fachwissen und der eigenen Erfahrung [1].

Unter diesem übergeordneten Handlungsprinzip der Bewilligungsbehörde lassen sich einzelne Schwerpunkte aus dem Tagesgeschäft ableiten. Jene für den Fachbereich Tunnelsicherheit werden in den nachfolgenden Abschnitten umschrieben. Diese lassen sich in die Bereiche Analysen und Konzepte (siehe 2.1 «Analysen und Konzepte»), Rohbau und Ausrüstung (siehe 2.2 «Rohbau und Ausrüstung») sowie Prozesse (siehe 2.3 «Prozesse») unterteilen.

### 2.1 Analysen und Konzepte

Während einer Projektrealisierung beurteilt das BAV eine Vielzahl von Analysen und Konzepten, sowohl schon während der Vorprojektphase als auch im Bauprojekt und schliesslich im Ausführungsprojekt. An dieser Stelle werden jene Analysen und Konzepte erwähnt, welche aus Sicht der Tunnelsicherheit wichtige Grundsteine bilden, damit schlussendlich ein sicherer Tunnelbetrieb angestrebt werden kann.

vidual emergency services under the most realistic conditions possible.

The personal protection equipment (PPE) of the firefighters provides them with the necessary protection during their deployment in a rail tunnel. Various vehicles serve as additional aids for assisted rescue. Rail-mounted firefighting and rescue trains are mostly used in Switzerland. An evacuation train or evacuation buses are available in cases where incident scenarios involving several hundred passengers are possible. Such vehicles are capable of picking up passengers in a non-endangered zone within the tunnel system and conveying them to a completely safe place.

### 1.2.3 Prevention

Various provisions can be implemented for the prevention of incidents in rail tunnels. Design and structural measures will not be examined in more detail here, and the question of whether the equipment of the rail rolling stock can be considered for assisted rescue will also be left open. The fact is, however, that materials considerations can decisively influence incident severity. The definitive characteristics for fire behaviour, such as flammability, smoke density and toxicity, must be taken into account early during the selection of materials and components [4]. Also not to be forgotten are detection and firefighting systems, which are capable of detecting a possible fire at an early stage and containing it immediately.

A further means of preventing a train fire in a tunnel can be found in Wayside train monitoring systems. These make it possible to examine passing trains and detect specific risks. Hot axle and sticking brake detection systems, wheel/axle load check points, clearance and antenna detection systems are in operation in Switzerland, as are fire and chemicals detection systems. These facilities make it possible to examine trains or detect hazards systematically prior to their entry to critical line sections, such as for example tunnels. The affected train can then be stopped at the next suitable point if a potential hazard is detected with adequate probability [5].

## 2 Focuses of Tunnel Safety at the FOT

The FOT assesses safety-relevant aspects on a risk-orientated basis. This means that a selective check of safety-relevant aspects is performed on a random sample basis. The technical departments at the FOT determine in this context, within the legal framework and on a risk-orientated basis, the elements to be inspected, the scope of inspection, the depth of inspection, etc. The FOT obtains knowledge about specific risks from the applicant's safety analysis, from evaluations of safety-relevant information and from its own technical knowledge and experience [1].

Individual focuses can be derived from daily business under this higher level principle of action by the approval authority. Those applicable to the "Tunnel Safety" department are

Die Risikoanalyse kann als Grundlage dienen, wenn für einen Neubau die Systemwahl getroffen werden muss. Dabei wird zum Beispiel zwischen Einspur- oder Doppelspurtunnel entschieden. Je nach Systemwahl und Auslegung von Weichenanlagen wird das Risiko einer Entgleisung und einer Kollision entscheidend beeinflusst. Zudem muss die Anordnung der Fluchtwege festgelegt werden. Dabei sind die Abstände der Querverbindungen oder die Zugangsmöglichkeiten zu einem Fluchtstollen relevant. Die Risikoanalyse durchleuchtet die relevanten Szenarien, zeigt mögliche Gefährdungen auf, erläutert entsprechende Massnahmen und beschreibt schliesslich das Restrisiko.

Das Sicherheitskonzept zeigt auf, mit welchen betrieblichen, technischen und organisatorischen Massnahmen ein sicherer Betrieb gewährleistet werden soll. Zudem enthält es die Massnahmen, welche in der Risikoanalyse erläutert wurden. Das Betriebskonzept beinhaltet unter anderem die betrieblichen Rahmenbedingungen und Anforderungen.

### 2.2 Rohbau und Ausrüstung

Je grösser und komplexer ein Tunnelbauwerk, desto umfangreicher der Rohbau und dessen Ausrüstung. In diesem Abschnitt werden zwei wesentliche Aspekte erläutert, die bei einem Neubau einen wichtigen Bestandteil der Tunnelsicherheit ausmachen.

#### 2.2.1 Fluchtwege

Bei einem verheerenden Ereignis ist die rasche Selbstrettung massgebend für eine sichere Evakuation der betroffenen Personen. Für eine rasche Selbstrettung wiederum sind möglichst optimal ausgelegte Fluchtwege nötig. Der eigentliche Fluchtweg beginnt bereits im Innern eines Personenzuges. Nach dem Verlassen des Zuges sind hinsichtlich des Rohbaus die Platzverhältnisse der Fluchtwege entscheidend. Ein ebener und hindernisfreier Weg sowie ausreichender Raum begünstigen den Personenfluss. Aus Sicht des BAV werden dabei die Lichtraumprofile neben dem stehenden Zug, auf dem Bankett sowie bei Notausgängen und Fluchtstollen überprüft.

Im Zusammenhang mit der Ausrüstung kann der Fluchtweg mit unterschiedlichen Massnahmen zur Selbstrettung ausgerüstet werden. Dazu gehören zum Beispiel Handlauf, Notfallbeleuchtung und Fluchtwegbeschilderung. Diese Selbstrettungsmassnahmen sind heute in Richtlinien und Normen detailliert umschrieben und vorgegeben. Das BAV prüft den regelkonformen Einsatz.

#### 2.2.2 Lüftung

Eine Lüftungsanlage in einem Bahntunnel kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Zum einen können sich im Bahntunnel aufgrund der geologischen und meteorologischen Bedingungen unerwünschte Temperatur- und Feuchtigkeitswerte ergeben und zum anderen können bei einem Brand giftiger Rauch sowie tödliche Gase entstehen.

outlined in the following sections. They can be subdivided into the "Analyses and Concepts" (see Section 2.1, "Analyses and Concepts"), Unlined Tunnel and Equipment (see Section 2.2, "Unlined Tunnel and Equipment") and Processes (see Section 2.3, "Processes") sectors.

### 2.1 Analyses and Concepts

During the implementation of any project, the FOT assesses a large number of analyses and concepts, both as early as the pre-project phase and also during the project design and, ultimately, the project operation phases. Only those analyses and concepts, which are directly relevant for tunnel safety in order that safe tunnel operation can ultimately be achieved, are mentioned here.

A risk analysis can serve as a basis when it is necessary to select a system for a new tunnel project. Decisions are taken here, for example, to select a single-track or double-track tunnel. The risk of derailments and collisions is decisively influenced by system selection and the design of rail switch ("point") installations. The arrangement of escape routes must also be specified. The intervals between the cross-tunnel links and access facilities to an escape tunnel are relevant in this context. The risk analysis identifies the relevant scenarios, highlights possible hazards, describes corresponding provisions and, ultimately, defines the residual risk.

The safety concept outlines the operational, technical and organisational provisions to assure of safe operation. It also includes the provisions mentioned in the risk analysis. The operating concept includes, among other things, operating conditions and requirements.

### 2.2 Unlined Tunnel and Equipment

The larger and more complex a tunnel structure, the more extensive is the unlined tunnel and its equipment. This section examines two main aspects that constitute an important element in tunnel safety in new tunnel projects.



3 Notbeleuchtung integriert im Handlauf  
Emergency lighting integrated into handrail

Quelle/credit: Bundesamt für Verkehr, Münsterertunnel (A)



Quelle/credit: Bundesamt für Verkehr, Gotthard-Basistunnel

**4** Absaugöffnung Lüftungsanlage  
Extraction port in ventilation system

Durch die Inbetriebnahme einer Lüftungsanlage können einerseits Temperaturen und Feuchtigkeitswerte beeinflusst werden, indem zum Beispiel wärmere, feuchte Luft abgeführt und Frischluft in den Tunnel eingeblasen wird. Andererseits kann mittels Lüftungsanlage während eines Brandereignisses ein sicherer Bereich für die Selbst- und Fremdreteung erzeugt werden. Während auf der einen Seite des Ereigniszuges die belastete Luft in eine gewünschte Richtung geblasen und abgesaugt wird, ergeben sich auf der anderen Seite sichere Bedingungen, damit Flüchtende sich retten und Ereignisdienste eingreifen können.

Aus Sicht des BAV gilt es in erster Linie die Plausibilität sowie die Zweckmässigkeit der Lüftungsstrategie zu überprüfen. Zudem muss die Auslegung der Lüftungsanlagen kontrolliert werden, um sicherzustellen, dass nicht nur richtig, sondern auch mit ausreichendem Volumen belüftet wird.

### 2.3 Prozesse

Die prozessbezogenen Schwerpunkte aus Sicht der Tunnelsicherheit werden im Alarm- und Rettungskonzept festgehalten. Dabei werden zunächst die Zielsetzungen definiert, wobei Rettungs- und Einsatzzeiten sowie Rahmenbedingungen vorgegeben werden. Weiter werden die relevanten Ereignis- sowie entsprechende Rettungsszenarien aufgeführt und die dazu nötigen Prozesse beschrieben. Zudem werden der Ablauf der Alarmorganisation und die Strukturen der Notfallorganisation dargelegt. Im Zusammenhang

### 2.2.1 Escape Routes

Rapid escape ("self-rescue") is of critical importance for the safe evacuation of persons affected in case of a serious incident. On the other hand, escape routes have to be designed as optimally as possible to permit rapid escape. The actual escape route in fact starts inside the passenger train. Once passengers have left the train, the spatial circumstances of the escape routes in the tunnel are decisive. A flat and unobstructed route combined with an adequate cross-section favours the flow of people. From the point of view of the FOT, the unobstructed space profiles around the stationary train, on the tunnel shoulder and at emergency exits and escape tunnels require examination.

The escape route can be equipped with various provisions to assist escape. These include, for example, handrails, emergency lighting and escape route signage. These escape provisions are nowadays described and specified in detail in relevant directives and standards. The FOT checks them for conformity with these rules.

### 2.2.2 Ventilation

A ventilation system in a rail tunnel can serve various purposes. Geological and meteorological conditions can, on the one hand, cause undesirable temperatures and humidity in rail tunnels while, on the other hand, toxic smoke and lethal gases can be generated in case of fire.

The installation of a ventilation system makes it possible to control temperatures and humidity by removing warmer moist air from the tunnel and blowing fresh air into it. During a fire incident, on the other hand, a ventilation system can be used to generate a safe zone for escape and assisted rescue. Contaminated air is blown in the desired direction and extracted on one side of the affected train, while safe conditions are maintained on the other side, permitting fleeing persons to escape and the emergency services to intervene.

The first priority here for the FOT is to verify the plausibility and correctness of the ventilation strategy. The design of the ventilation systems must also be checked in order to ensure that the tunnel is not only ventilated correctly, but also with an adequate volume.

### 2.3 Processes

The process-related aspects from a tunnel safety viewpoint are set down in the alarm and rescue concept, where the objectives are first defined, with rescue and deployment times, and also local conditions, being specified. The relevant incident scenarios and corresponding rescue scenarios are also stated, and the correspondingly necessary processes described. The alarm organisation procedure and the structures of the emergency organisation are also stated. The FOT assesses the plausibility and the completeness of the processes listed in conjunction with the alarm and rescue concept.

mit dem Alarm- und Rettungskonzept beurteilt das BAV die Nachvollziehbarkeit sowie die Vollständigkeit der aufgeführten Prozesse.

### 3 Herausforderungen und Zielkonflikte

Der öffentliche Verkehr soll nicht nur sicher und leistungsfähig sein, sondern auch wirtschaftlich und umweltfreundlich. Alleine diese Aussage lässt mehrere Herausforderungen und Zielkonflikte erkennen. Nachfolgend wird darauf eingegangen, welche wichtigen Herausforderungen das BAV unter dem Aspekt der Tunnelsicherheit zu bewältigen hat bzw. welche Zielkonflikte es zu entschärfen gilt.

#### 3.1 Herausforderungen

In der Regel sind beim Bau eines Bahntunnels sehr viele Beteiligte involviert. Auch verändert sich der Stand der Technik laufend aufgrund des kontinuierlichen technischen Fortschritts.

##### 3.1.1 Konzepte, Bau und Prozesse aufeinander abstimmen

Das Konzipieren, das Bauen und das Betreiben eines Bahntunnels können unter Umständen mehrere Jahre auseinander liegen. In der Vorstudie werden zwecks Systemwahl Rahmenbedingungen festgelegt respektive mit bestem Gewissen angenommen. Während des jahrelangen Baus verändern sich jedoch die betrieblichen Bedürfnisse. Um das geplante Angebot wirtschaftlicher auszulegen, werden ursprüngliche Rahmenbedingungen angepasst. Das BAV sorgt dafür, dass auch bei Änderungen der ursprünglichen Rahmenbedingungen die Tunnelsicherheit gewährleistet bleibt.

Im Fahrbahnbereich werden regelmässige Unterhaltsarbeiten geplant. Da Maschinen und Instandsetzungsarbeiten möglichst geräumige Platzverhältnisse bedingen, wird das Bankett so minimal wie möglich gebaut. Dasselbe Bankett muss jedoch im Ereignisfall während des Evakuationsprozesses den Passagieren eine optimale Ausstiegshilfe sein. Um Verletzungen zu verhindern sowie den Personenfluss nicht zu beeinträchtigen, sollte also die Kante des Banketts möglichst nahe ans Trittbrett des Zuges gebaut werden. Das BAV muss bei der Beurteilung der bautechnischen Gesichtspunkte gleichzeitig Aspekte der Rettungsprozesse berücksichtigen, welche allerdings erst zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt werden.

##### 3.1.2 Alt–Neu, Normal–Schmal, Interoperabilität (IOP) – Nicht-IOP

Das BAV setzt Gesetze, Verordnungen und Richtlinien in Kraft. Zudem stellt das BAV Leitfäden, Merkblätter, Anleitungen und Checklisten zur Verfügung. Allein die Grundlagen stets auf dem neuesten Stand zu halten ist eine Herausforderung. Dabei müssen einerseits die erst kürzlich in Betrieb genommenen Tunnel mit eingeschlossen und andererseits ältere, teils über hundert Jahre alte Tunnel mit dem gleichen Massstab berücksichtigt werden. Hinzu kommt, dass eine Vielzahl der Grundlagen stets für Normal- und Schmal-

### 3 Challenges and Conflicts of Aims

Public transport is required to be not only safe and effective, but also cost-efficient and environmentally friendly. This statement alone indicates a number of challenges and conflicts of aims. The challenges which the FOT must overcome regarding the criterion of tunnel safety, and the conflicts of aims which must be resolved, are examined below.

#### 3.1 Challenges

A very large number of persons are generally involved in the construction of a rail tunnel. The technological state-of-the-art also changes continuously as a result of ceaseless technical progress.

##### 3.1.1 Harmonising concepts, construction and processes

The design, construction and operation of a rail tunnel can, under certain circumstances, be separated by intervals of several years. Boundary conditions are defined during the preliminary study phase, or adopted according to the best available knowledge and ideas, for the purpose of system selection. But operational needs change during a multi-year construction period. The original boundary conditions are modified in order to make the planned bid more cost-effective. It is the responsibility of the FOT to ensure that tunnel safety remains assured even in case of changed boundary conditions.

Regular maintenance is scheduled for the track section. The tunnel shoulder is constructed to minimal dimensions, since machinery and maintenance/repair work themselves require the most generous possible space conditions. The same tunnel shoulder must, however, be optimised to enable passengers to alight during the evacuation procedure in case of an incident. To prevent injuries and avoid obstruction to the flow of escaping passengers, the edge of the tunnel shoulder should therefore be located as close as possible to the boarding step of the train. In assessing the civil engineering criteria, the FOT must also take into account rescue process aspects which, however, are only defined at a later time.

##### 3.1.2 Old vs. New, Standard vs. Narrow, Interoperability (IOP) vs. Non-IOP

The FOT enacts laws, regulations and codes of practice. In addition, it provides guidelines, note sheets, instructions and check lists. Just keeping this documentation up-to-date at all times is a challenge. Tunnels that are newly opened to traffic have to be included in this context, but existing tunnels, some more than one hundred years old, also have to be taken into account, applying the same standards. Another factor is that a large number of documents must be interpreted in all cases for both standard and narrow gauge railways. Another big difference is between an infrastructure operator whose system is primarily located in mountains and one with a system in an urban area, with a connection to a lake or the sea included.

spurbahnen ausgelegt werden muss. Man bedenke schon nur die Unterschiede zwischen einem Infrastrukturbetreiber, dessen Netz vorwiegend im Gebirge liegt, und einem mit Netz im Stadtgebiet, Seeanschluss inklusive.

Eine weitere, herausfordernde Komponente sind Europäische Regelwerke. Deren Umsetzung und Implementierung in den Schweizer Gesetzen bedingen zum einen die Definition von IOP-Anforderungen für das Hauptnetz, zum anderen für das Ergänzungsnetz. Das BAV ist bemüht, bei der Einführung neuer sowie bei Revision bestehender Grundlagen deren Benutzerfreundlichkeit hoch zu halten.

### 3.2 Zielkonflikte

Ein grosser Teil der Massnahmen für die Tunnelsicherheit wird für eventuelle Ereignisfälle ausgelegt. Bei grossen und modernen Tunnelanlagen gehören unter anderem Massnahmen zur Lüftung und Rettung dazu. Nachfolgend werden zwei Situationen geschildert, in welchen jeweils Lüftungs- und Rettungsziele einen Konflikt aufzeigen.

#### 3.2.1 Notausgangstüren und Lüftungsanlage

Werden Querschläge oder ein Fluchtstollen gebaut, führt der Fluchtweg durch Notausgangstüren. Um einen optima-

European codes and standards are yet another challenging component. Their adoption and implementation in Swiss legislation necessitate, on the one hand, the definition of IOP requirements for the main line network and, on the other hand, for the subsidiary network. The FOT is concerned at all times to maintain the best user-friendliness when introducing new or amending existing documentation.

### 3.2 Conflicts of Aims

A large part of tunnel safety provisions are designed with possible incidents in mind. In large modern tunnel facilities, these include ventilation and rescue provisions. Two situations are discussed below to illustrate where ventilation and rescue objectives can conflict.

#### 3.2.1 Emergency Exit Doors and Ventilation System

At cross-passages or escape tunnels, escape routes include emergency exit doors. The emergency exit door should remain open during the escape process in order to assure an optimum flow of people. The ventilation system, meanwhile, has the aim of creating and maintaining a safe area by means of positive pressure. The emergency exit door should, ideally, remain closed at all times to attain this.



5 Notausgangstür  
Emergency exit door

Quelle/credit: Bundesamt für Verkehr, Gotthard-Basistunnel



len Personenfluss sicherzustellen, sollte die Notausgangstür während des Selbstrettungsprozesses offen bleiben. Gleichzeitig hat jedoch die Lüftungsanlage das Ziel, mittels Überdruck einen sicheren Bereich aufzubauen und aufrechtzuerhalten. Idealerweise müsste dazu die Notausgangstür stets geschlossen sein.

Soll sich nun die Notausgangstür, nachdem sie zur Selbstrettung geöffnet wurde, möglichst rasch wieder schliessen oder einen Moment offen stehen? Das BAV begleitet Feldversuche und hinterfragt die Argumente der Planer sowie die Begründungen der Hersteller verschiedener Komponenten.

### 3.2.2 Hohe oder moderate Geschwindigkeiten

Grundsätzlich ist im Ereignisfall ein schnelles Verlassen des Tunnels zielführend. Dies gilt für die Passagiere des Ereigniszuges wie auch für weitere Züge, welche sich im Tunnel befinden. Je schneller unbeteiligte Züge den Tunnel verlassen, desto schneller können Lösch- und Rettungszüge sowie allenfalls ein Evakuationszug in den Tunnel einfahren. Hohe Geschwindigkeiten begünstigen den Rettungsprozess.

Im Ereignisbetrieb gewährleistet die Lüftungsanlage sichere Bereiche. Dazu werden Lüftungsziele formuliert. Zum Beispiel muss im Bereich der Notausgänge und Querschläge ein Rauchübertritt von der Ereignisröhre in den weiteren Fluchtweg verhindert werden. Je höher nun jedoch die Geschwindigkeit der aus- oder einfahrenden Züge ist, desto stärker werden durch den aerodynamischen Über- oder Unterdruck die Druckverhältnisse in den sicheren Bereichen beeinträchtigt oder gar negativ beeinflusst.

Soll nun eher bei den Lüftungszielen oder bei den Rettungszielen ein Kompromiss eingegangen werden? Das BAV beurteilt Konfliktlösungen und erwägt Lösungsstrategien.

## 4 Tunnelsicherheit 2030 – Ein Ausblick

Im nachfolgenden Ausblick werden Bereiche erwähnt, welche durch ihre Weiterentwicklung die Tunnelsicherheit in Zukunft mit prägen werden, damit der zunehmende Verkehr auch künftig sicher abgewickelt werden kann.

Moderne Bautechnik und neueste Rohbauausrüstungen werden auf der Seite der Infrastruktur für eine sichere Ausgangslage sorgen. Das Rollmaterial wird sich ebenfalls weiterentwickeln und innovative Rettungsprozesse werden flüchtende Personen schneller in Sicherheit bringen können.

Werden diese Thesen umgesetzt, können zum Beispiel vermehrt Tunnelprojekte in geologisch schwierigen Gebieten oder in dicht bewohnten Stadtbereichen realisiert werden. Sicherungsanlagen gewährleisten einen flexiblen Betrieb. Die Trassen können ausgiebiger für Personen- und Güterverkehr vergeben werden. In Personenzügen werden Detektions- und Bekämpfungsanlagen dazu beitragen, dass Brände schon früh erkannt und bewältigt werden können.

So should the emergency exit door close again as quickly as possible after being opened for escape, or should it remain open for a few seconds? The FOT supports field tests and analyses the arguments of the planners and the rationales of the manufacturers of various components.

### 3.2.2 High or Moderate Train Speeds?

Rapid evacuation from the tunnel is, in principle, expedient in case of an incident. This is true both of the passengers on the train affected and of other trains also in the tunnel. The quicker unaffected trains can leave the tunnel, the more rapidly firefighting and rescue trains, and possibly an evacuation train, can enter it. High speeds favour the rescue process.

In emergency operation mode, the ventilation system assures safe areas. Ventilation objectives are formulated for this purpose. The spread of smoke from the affected tube at and around emergency exits and cross-passages into the remainder of the escape route must be prevented, for example. The higher the speed of incoming and outgoing trains, the stronger the pressure situation in the safe areas will be affected or even worsened by the resultant aerodynamic positive or negative pressure.

Should a compromise now be made in the ventilation objectives rather than in the rescue objectives? The FOT assesses solutions for conflicts and solution strategies.

## 4 Tunnel Safety in 2030 – a Look Forward

The following look forward outlines certain areas, which will develop further in future, and have an effect on tunnel safety, in order that steadily increasing traffic can continue to be handled safely.

Modern construction technology and the latest tunnel equipment will ensure a safe starting situation on the infrastructure side. Rolling stock will also continue to evolve, and innovative rescue procedures will conduct fleeing persons to safety faster.

The achievement of this development potential will, for example, make it possible to construct more tunnels in geologically difficult circumstances and in densely populated urban areas. Safety systems will assure flexible operation. Paths can be assigned more generously for both passenger and freight traffic. On passenger trains, detection and firefighting systems will assist the early detection and extinguishing of fires. Augmented safety information for passengers will improve individual behaviour during the escape phase.

## 5 Conclusion

The range of tunnel projects in Switzerland permits the interpretation that the importance of tunnel safety will increase. The FOT will continue to assess and approve tunnel projects

Erweiterte Sicherheitsinformationen für die Passagiere sollen das individuelle Verhalten während der Selbstrettungsphase verbessern.

### 5 Schlussbemerkung

Das Tunnelprojekt-Portfolio der Schweiz lässt die Interpretation zu, dass die Tunnelsicherheit an Bedeutung gewinnen wird. Das BAV wird die Tunnelprojekte unter den Aspekten Sicherheit, Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit beurteilen und bewilligen.

Damit bestehende, neue, Schmalspur- oder interoperable Eisenbahntunnel auch künftig sicher betrieben und unterhalten werden können, sind Innovation und Weiterentwicklung der Industrie und der Bahnunternehmen bei sämtlichen Sicherheitsaspekten gefordert. Nur so kann auch in Zukunft ein sehr sicherer öffentlicher Verkehr gewährleistet werden.

according to the criteria of safety, effectiveness, cost-efficiency and environmental friendliness.

Innovation and further development by the industry and by the rail operating companies in all aspects of safety are needed in order that existing, new, narrow gauge and/or interoperable rail tunnels can continue to be operated and maintained safely. Only in this way an extremely safe public transport can be assured for the future.

### Literatur/References

- [1] Sicherheitskonzept BAV, 1. Januar 2013
- [2] Tunnel Fire Dynamics, Ingason, Li, Lönnermark, 2015
- [3] Brandeinsätze in Strassentunneln – Taktik, Technik, Hintergrund, IFA, 2014
- [4] Technische Spezifikationen Interoperabilität (TSI), LOC&PAS, 2014
- [5] ZKE – Gesamtkonzept, BLS/SBB, 16. September 2012

Marco Bettelini, Dr. sc. techn., Dipl. Masch.-Ing. ETH/SIA, Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH  
Samuel Rigert, Dipl. Masch.-Ing. ETH, Amberg Engineering, Regensdorf-Watt/CH

# Ereignislüftung Strassentunnel

## Eine Schlüsselkomponente in der Sicherheitskette

Ereignislüftungen spielen eine zentrale Rolle für die Sicherheit von Strassentunneln, indem sie im Brandfall die Selbstrettung und die Intervention mittels geeigneter Kontrolle der Rauchausbreitung ermöglichen. Eine optimale Einbettung der Lüftung in das Gesamtsystem, sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase, garantiert die optimale Funktionalität und Sicherheit des Bauwerks.

# Emergency Ventilation in Road Tunnels

## A Key Component in the Safety Chain

Ventilation in case of an incident is vital for the safety of road tunnels. In case of fire, the ventilation system enables self-rescue and intervention by emergency services through appropriate control of smoke propagation. Optimal integration of the ventilation into the overall system, both in the design phase and the construction phase, guarantees optimal functionality and safety of the tunnel.

### 1 Einleitung

Unterirdische Verkehrsanlagen sind einem breiten Spektrum von Risiken und Ereignisszenarien ausgesetzt, welche vom Verkehrsunfall bis hin zur Freisetzung von Gefahrgut reichen können. Massgebend für die Sicherheit eines Strassentunnels sind in der Regel Tunnelbrände. Grosse Rauchmengen können schon bei moderaten Brandstärken, wie zum Beispiel beim Brand eines Busses oder eines Lieferwagens, in sehr kurzer Zeit freigesetzt werden. Die Rauchausbreitung kann extrem zügig sein, eine grosse Anzahl von Verkehrsteilnehmern auf einmal gefährden und die Intervention weitgehend verunmöglichen.

In diesem Beitrag werden grundlegende Aspekte der Ereignislüftung behandelt, mit besonderem Blick auf Generalisten und Spezialisten aus anderen Fachrichtungen, die mehr an Grundlagen und Schnittstellen als an technischen Einzelheiten interessiert sind.

### 2 Die Ereignislüftung als Schlüsselkomponente der Sicherheitskette

Die grösste Gefährdung im Brandfall ergibt sich in den ersten Minuten nach dem Brandausbruch. Mehrere Personen befinden sich im Tunnel und müssen sich in Sicherheit begeben. Die Tunnelbenützer sind in dieser Phase auf sich selbst gestellt und müssen gute Bedingungen antreffen, um zu einem Notausgang oder ins Freie zu gelangen. Die Einsatzkräfte treffen erst nach 10 bis 20 Minuten oder später am Ereignisort ein.

### 1 Introduction

Underground transport infrastructures are exposed to a wide range of risks and incident scenarios, which can range from traffic accidents to the release of dangerous goods. The decisive incident for the safety of road tunnels is normally fire in the tunnel. Large quantities of smoke can be released in a short time, even from moderate fires such as a burning bus or van. Smoke propagation can be extremely rapid, which can endanger a large number of road users at once and make any intervention impossible.

This paper deals with basic aspects of ventilation in case of incidents, with a special view to the interests of generalists and specialists from other disciplines, who are more interested in basics and interfaces than technical details.

### 2 Incident Ventilation as a Key Component in the Safety Chain

The greatest threat in case of fire occurs in the first minutes after a fire breaks out. A considerable number of persons could be in the tunnel and have to get themselves to a point of safety. The tunnel users are on their own during this phase and have to encounter good conditions in order to reach an emergency exit or the open air. Emergency services will only arrive at the scene of the incident after 10 to 20 minutes or later. Combustion gases can affect people in the tunnel in the most varied ways. They are irritating (impairment of sight or breathing) and can very quickly lead to dramatic loss of visibility in the tunnel. Further dangers come from the high temperatures and the enormous heat radiation. Reports of experience with fires in road tun-

## La ventilation des tunnels routiers en cas de sinistre

### Une composante clé dans la chaîne de sécurité

Le large éventail des systèmes de ventilation permet de trouver des solutions sur mesure pour chaque ouvrage, ainsi que pour toutes les conditions d'exploitation et tous les types d'évènements. Seule une optimisation de la commande de la ventilation en fonction de la situation permet d'exploiter tout le potentiel de l'installation. Les simulations numériques y contribuent de manière significative et permettent d'obtenir un haut niveau de flexibilité et de fonctionnalité dans les ventilations en cas de sinistre. Pour l'exploitation du système et la maîtrise des sinistres, le poste de contrôle central du tunnel et les services d'urgence doivent disposer de solides connaissances du système de ventilation.

## Ventilazione delle gallerie stradali in situazioni normali e di emergenza

### Una componente essenziale del sistema di sicurezza

Una grande varietà di differenti sistemi di ventilazione rende possibili soluzioni adeguate a ogni tipo di opera, di condizioni di esercizio e di situazione. Il completo potenziale dell'impianto di ventilazione può venire sfruttato solamente tramite un'ottimizzazione del controllo della ventilazione, in funzione delle condizioni specifiche. Le simulazioni numeriche forniscono contributi particolarmente significativi e danno la possibilità di raggiungere un'elevata flessibilità e funzionalità della ventilazione. Per l'esercizio e la gestione degli eventi, il posto di comando e le forze di soccorso della galleria devono disporre di solide conoscenze del sistema di ventilazione.

Brandgase können die Personen im Tunnel auf unterschiedlichste Arten beeinträchtigen. Sie sind reizend (Beeinträchtigung der Sicht und der Atmung), häufig giftig und können sehr schnell zu einem dramatischen Verlust der Sichtweite im Tunnel führen. Weitere Gefährdungen resultieren aus den hohen Temperaturen und durch die enorme Wärmestrahlung. Erfahrungsberichte aus Brandereignissen in Strassentunneln zeigen, dass der Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Selbstrettung immer die Aufrechterhaltung ausreichender Sichtverhältnisse ist. Unzureichende Sicht führt zu Orientierungslosigkeit und Panik. Die flüchtenden Personen können die Notausgänge nicht mehr erreichen.

Rauch gefährdet die Intervention in wesentlich reduzierter Schärfe, weil die Einsatzkräfte entsprechend ausgerüstet und vorbereitet sind. Eine angemessene Rauchkontrolle ist dennoch ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Intervention.

Verkehrsinfrastrukturen spielen aus sozialer und wirtschaftlicher Sicht eine sehr wichtige Rolle und müssen eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Die Sperrdauer nach einem Brandereignis muss so kurz wie möglich gehalten werden. Die Ereignislüftung kann häufig einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Rauchausbreitung einzudämmen und somit Schäden an der Infrastruktur zu beschränken.

Die Aufgaben der Ereignislüftung in Strassentunneln können somit folgendermassen priorisiert werden:

1. Personenschutz, insbesondere während der Selbstrettungsphase;
2. Schaffung geeigneter Bedingungen für die Intervention;
3. Schutz der Infrastruktur.

nels show that the key factor to permit self-rescue is always the preservation of adequate visibility. Insufficient visibility leads to disorientation and panic. The escaping people are no longer able to reach the emergency exits. Smoke is much less dangerous for emergency service interventions since the personnel are appropriately equipped and prepared. Appropriate control of smoke is however still a decisive factor for the success of their intervention.

Transport infrastructures are very important from the social and economic points of view and have to show high availability. The duration of closure after a fire incident must be kept as short as possible. Incident ventilation can often make a significant contribution to confining smoke propagation and thus limiting damage to the infrastructure.

The tasks of incident ventilation in road tunnels can thus be prioritised as follows:

1. Protection of tunnel users, particularly during the self-rescue phase;
2. Creation of suitable conditions for intervention;
3. Protection of the infrastructure.

## 3 Different Ventilation Systems for Various Requirements

### 3.1 Selection and Design of the Road Space Ventilation

The selection of a ventilation system and the layout of the ventilation components in road tunnels are determined today almost completely by safety requirements derived from the case of fire. Different ventilation systems can influence smoke propagation in a tunnel in various ways and to various degrees. Further requirements, such as air quality in normal operation and maintenance, are normally of much less significance.

## 3 Unterschiedliche Lüftungen für verschiedene Anforderungen

### 3.1 Wahl und Gestaltung der Fahrraumlüftung

Die Wahl des Lüftungssystems und die Auslegung der Lüftungskomponenten für Strassentunnel sind heute fast ausschliesslich durch sicherheitstechnische Anforderungen bestimmt, die aus dem Brandfall resultieren. Mit unterschiedlichen Lüftungssystemen kann die Rauchausbreitung in einem Tunnel auf verschiedene Arten und zu unterschiedlichen Graden beeinflusst werden. Weitere Anforderungen, die zur Einhaltung der Luftqualität im Normalbetrieb und Unterhalt dienen, spielen meist eine stark untergeordnete Rolle.

Es lassen sich vier grundlegende Arten von Lüftungssystemen unterscheiden:

- Natürliche Lüftung,
- Mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren,
- Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung,
- Querlüftung mit Rauchabsaugung und Frischluftzufuhr.

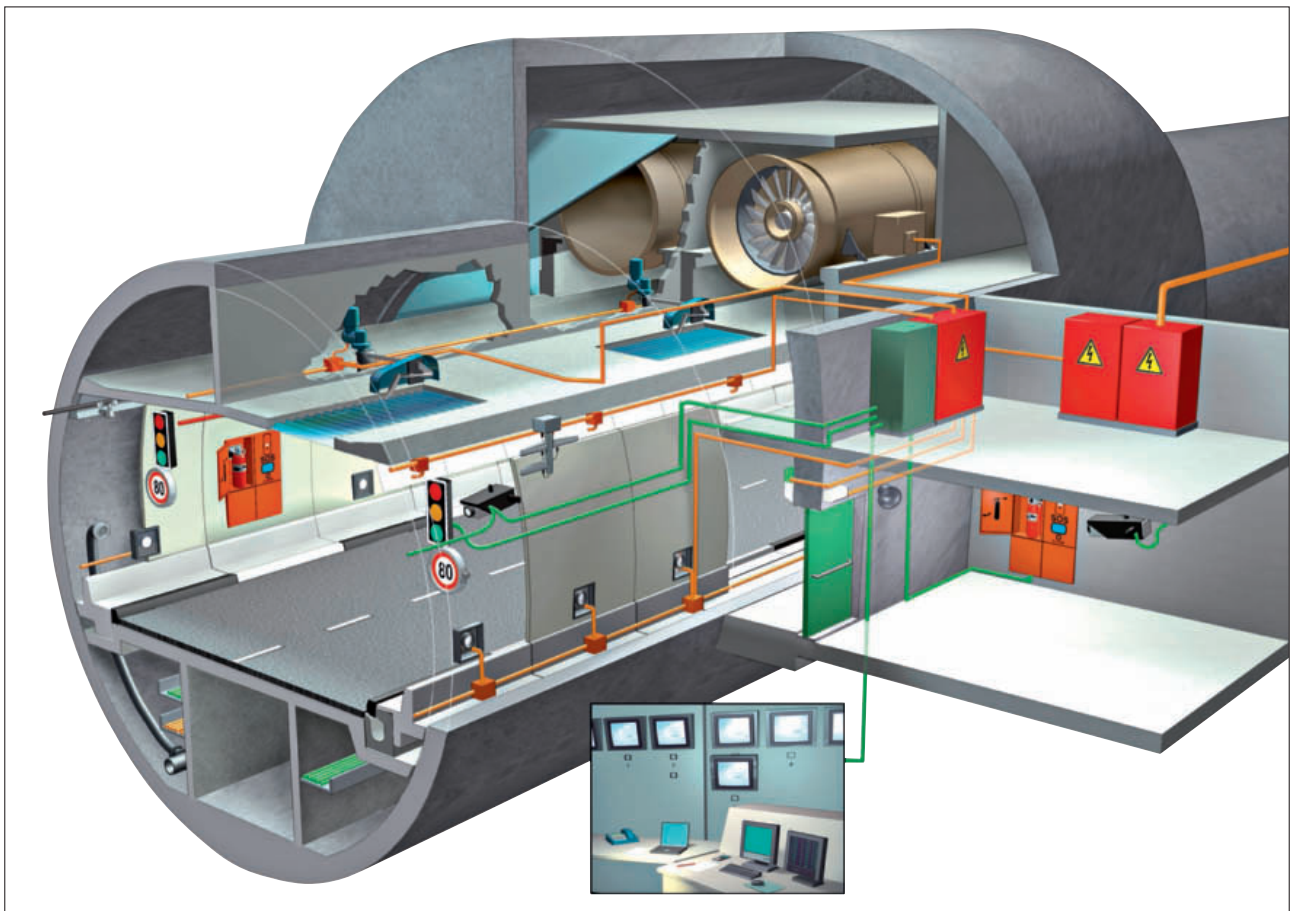
Neben den einfachen Grundformen können viele unterschiedliche Mischformen eingesetzt werden, insbesondere bei Sanierungen von bestehenden Tunneln, bei denen die Wünsche des Lüftungsingenieurs sich nicht immer vollständig realisieren lassen.

Four basic types of ventilation system can be differentiated:

- Natural ventilation,
- Mechanical longitudinal ventilation with jet fans,
- Ventilation systems with smoke extraction,
- Transverse ventilation with smoke extraction and fresh air supply.

In addition to the simple basic forms, many different mixed forms can be used, particularly for the refurbishment of existing tunnels, where the intentions of the ventilation engineer cannot always be fully achieved.

The selection of a ventilation system will be influenced by the tunnel properties (particularly the tunnel length and gradient), traffic management and traffic volume. Natural ventilation is only suitable for very short tunnels. In longer tunnels, the control of the longitudinal air velocity with jet fans is normally sufficient, and from 1 to 5 km length, depending on the tunnel properties, smoke extraction is normally necessary. Fresh air supply is usually required today from a tunnel length of about 10 km. Complex ventilation systems with smoke extraction (Fig. 1) and possibly with fresh air supply are very elaborate and expensive for constructional and equipment reasons. The implementation of ventilation ducts and ventilation stations requires significant



1 Komplexes Lüftungssystem mit Rauchabsaugung  
Complex ventilation system with smoke extraction

Die Wahl des Lüftungssystems richtet sich an die Tunnelleigenschaften (insbesondere Tunnellänge und Längsneigung), an die Verkehrsführung und an das Verkehrsaufkommen. Natürliche Lüftungen eignen sich nur für sehr kurze Tunnel. Bei längeren Tunneln reicht eine Kontrolle der Längsgeschwindigkeit mit Strahlventilatoren, und ab 1 bis 5 km, je nach Tunnelleigenschaften, ist in der Regel eine Rauchabsaugung erforderlich. Eine Frischluftzufuhr ist heutzutage erst ab einer Tunnellänge von über 10 km notwendig. Komplexe Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung (Bild 1) und möglicherweise Frischluftversorgung sind aus baulicher und ausrüstungstechnischer Sicht sehr aufwendig und kostenintensiv. Die Realisierung von Lüftungskanälen und Lüftungszentralen erfordert bedeutende Zusatzinvestitionen und optimale Koordination zwischen dem Bau- und dem Lüftungsingenieur.

### 3.2 Normative Vorgaben zur Wahl des Lüftungssystems

Die Vorgaben zur Wahl des Lüftungssystems variieren sehr stark von Land zu Land. Sogar innerhalb der EU konnte diesbezüglich keine Einigung erzielt werden, und die Europäische Richtlinie 2004/54/EG [2] überlässt den Mitgliedstaaten die Wahl des Lüftungssystems. Die in der Schweiz geltenden Vorgaben (ASTRA-Richtlinie 13001) [1] sind im Bild 2 veranschaulicht.

### 3.3 Risiko-orientierte Ansätze zur Wahl des Lüftungssystems

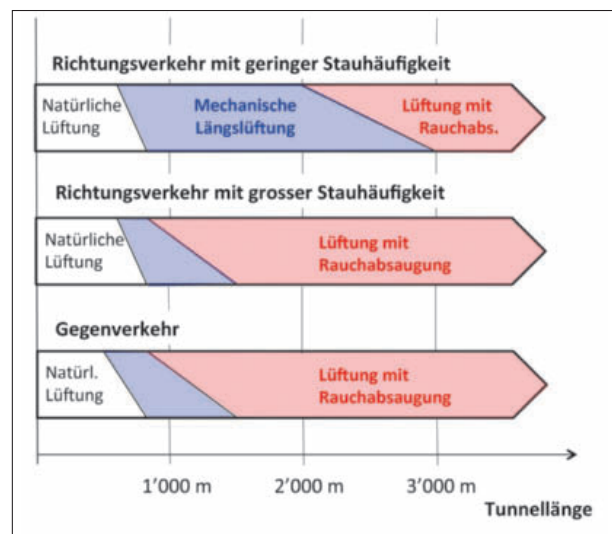
Neben rein normativen Vorgaben zur sicherheitstechnischen Ausstattung von Strassentunneln wurden in allen europäischen Ländern Vorgaben für die Analyse, Quantifizierung und Bewertung der Risiken in einem Strassentunnel festgelegt. Dies sind in der Schweiz die Richtlinie 19004 des Bundesamts für Strassen (ASTRA) und die ASTRA-Dokumentation 89005. Sie bilden eine mögliche Grundlage für die Risiko-orientierte Wahl und Auslegung der Ereignislüftung.

Risiko-orientierte Ansätze berücksichtigen alle relevanten Eigenschaften eines Bauwerks und seiner Nutzung und legen objektive Kriterien (zum Beispiel die Kostenwirksamkeit der Massnahmen) zur Festlegung der Anforderungen an die Tunnelausstattung vor. Die Mitberücksichtigung solcher Aspekte liefert einen entscheidenden Beitrag zur Erhöhung der Tunnelsicherheit und auch zur Verbesserung von Tunnellüftungen.

## 4 Lüftungsstrategie und Lüftungssteuerung

### 4.1 Längslüftung

Bei Längslüftungen ist nur eine indirekte und in der Regel unvollständige Kontrolle der Rauchausbreitung möglich. Es kann also nur auf einer Seite vom Brandort (zwischen Einfahrtportal und Brandort oder zwischen Brandort und Ausfahrtportal) verhindert werden, dass sich Rauch ausbreitet. Dies hat, abhängig von der Verkehrssituation, weitreichende Konsequenzen. Zur Erläuterung ist die Klärung einiger Begriffe erforderlich:



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

2 Wahl des Lüftungssystems nach ASTRA 13001

Selection of a ventilation system according to ASTRA 13001

additional investment and optimal coordination between the civil and ventilation engineer.

### 3.2 Requirements of Standards for the Selection of a Ventilation System

The requirements for the selection of a ventilation system vary widely from country to country. Even inside the EU, no agreement has been achieved and the European directive 2004/54/EC [2] leaves the selection of ventilation systems to each country. The valid regulations in Switzerland (ASTRA Guideline 13001) [1] are shown in Fig. 2.

### 3.3 Risk-oriented Approaches to the Selection of a Ventilation System

In addition to the requirements resulting from standards for the safety-related equipment of road tunnels, requirements have also been specified in many countries for the analysis, quantification and assessment of the risks in a road tunnel. In Switzerland, this is Guideline 19004 of the Swiss Federal Roads Office (ASTRA/FEDRO) and the ASTRA document 89005. These provide a possible basis for the risk-oriented selection and design of the incident ventilation.

Risk-oriented approaches consider all the relevant properties of the tunnel and its use and lay down objective criteria (for example the cost-effectiveness of the measures) for the specification of requirements for the tunnel equipment. The inclusion of consideration of such aspects provides a decisive contribution to improving tunnel safety and also to the improvement of the tunnel ventilation.

## 4 Ventilation Strategy and Ventilation Control

### 4.1 Longitudinal Ventilation

Longitudinal ventilation only permits indirect and normally incomplete control of smoke propagation. The propagation of smoke can only be prevented on one side of the fire loca-

## Ereignislüftung Strassentunnel • Eine Schlüsselkomponente in der Sicherheitskette

- Die kritische Geschwindigkeit ist die kleinste Längsgeschwindigkeit der Luft in einem Tunnel, bei welcher sich Rauch nicht entgegen der Strömungsrichtung ausbreiten kann («Backlayering»).
- Mit Rauchschichtung wird die Ausbreitung des Rauchs im Deckenbereich des Tunnels bezeichnet, bei der im unteren Tunnelbereich noch günstige Bedingungen für die Selbstrettung herrschen (Luftqualität, Temperatur und Sichtweite). Rauchschichtung ist ein sehr empfindliches Phänomen und basiert darauf, dass heiße Rauchgase üblicherweise zum Aufsteigen tendieren. Kleinste Störungen können jedoch zu einer Durchmischung von Luft und Rauch, also zu vollständigem Schichtungsverlust, führen.

Rauchschichtung ist für die Selbstrettung und für die Rettung entscheidend. Wird eine Längslüftung mit kritischer Geschwindigkeit betrieben (typischerweise etwa 3 m/s), erfolgt ein teilweiser oder vollständiger Schichtungsverlust, der verheerende Konsequenzen haben kann. Die Haupt-Lüftungsstrategien bei mechanischen Längslüftungen sind insbesondere von der Verkehrsführung und von der Verkehrssituation abhängig (Bild 3):

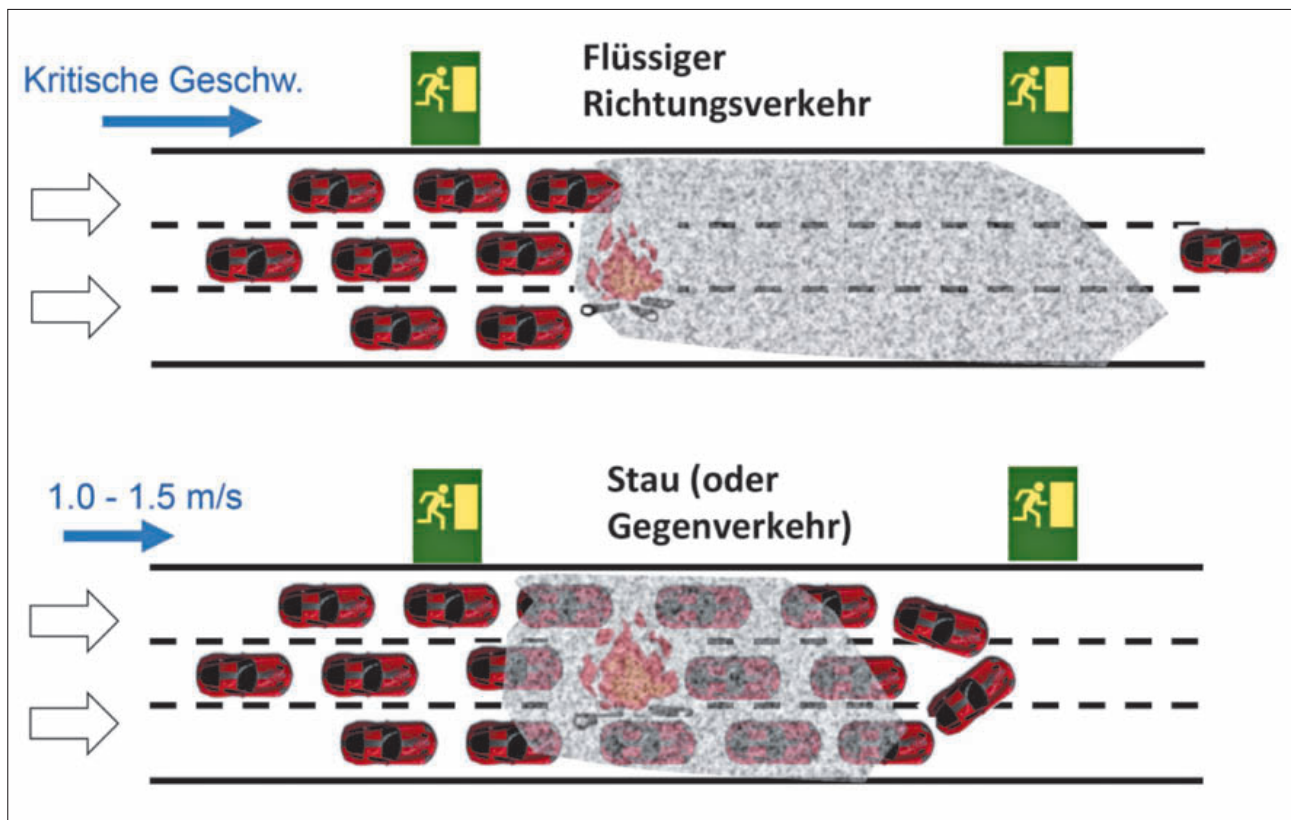
- Bei flüssigem Richtungsverkehr können die Fahrzeuge, welche den Brandort bereits passiert haben, den Tunnel ungestört verlassen. Es wird hier in der Regel mit kritischer Geschwindigkeit in Verkehrsrichtung gelüftet.
- Bei Richtungsverkehr mit Stau stromab der Brandstelle bzw. bei Gegenverkehr ist die vorherige Strategie nicht

tion (between the entry portal and the fire or between fire and exit portal). This can have extensive consequences, depending on the traffic situation. For purposes of explanation, a few terms have to be clarified:

- The critical velocity is the lowest longitudinal velocity of the air in a tunnel, at which smoke cannot propagate against the flow direction (“backlayering”).
- Smoke stratification denotes the propagation of smoke in the crown of the tunnel, with more favourable conditions usually prevailing in the lower part of the tunnel (air quality, temperature and visibility distance). Smoke stratification is a very sensitive phenomenon and is based on the fact that hot gases tend to rise. The smallest disturbances, however, can lead to mixing of smoke and air with a complete loss of stratification.

Smoke stratification is decisive for self-rescue and rescue. If a longitudinal ventilation system is operated with critical velocity (typically about 3 m/s), this leads to partial or complete loss of stratification, which can have serious consequences. The main ventilation strategies for mechanical longitudinal ventilation systems are dependent on the traffic management and the traffic situation in particular (Fig. 3):

- If there is fluid uni-directional traffic, the vehicles, which have already passed the fire location, can leave the tunnel without hindrance. The ventilation in this case is normally run at critical velocity in the direction of traffic.
- If there is uni-directional traffic with congestion downwind of the fire location, or bi-directional traffic the previous



3 Einfluss der Verkehrssituation auf die Lüftungsstrategie bei Längslüftung

The effect of the traffic situation on the ventilation strategy with longitudinal ventilation

zulässig, weil sie zu einer verheerenden Zerstörung der Rauchschichtung führen würde, welche die Selbstrettung eines Teils der Verkehrsteilnehmer verunmöglichen würde. Eine moderate (typischerweise 1 bis 1,5 m/s) Längsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung ist in der Regel die beste Lösung, um die natürliche Rauchschichtung möglichst zu erhalten.

Weiterhin ist grundsätzlich wichtig, die zum Zeitpunkt der Branddetektion beobachtete Strömungsrichtung möglichst aufrechtzuerhalten. Ausnahmen sind jedoch insbesondere in den Portalbereichen häufig sinnvoll.

### 4.2 Lüftungssysteme mit Rauchabsaugung

Bei korrekt ausgelegten und betriebenen Lüftungssystemen mit Rauchabsaugung kann der verrauchte Tunnelbereich auf wenige 100 m um den Ereignisort herum beschränkt werden. Dazu wird eine bestimmte Anzahl Klappen (in der Regel zwischen zwei und sechs) beim Brandort geöffnet und eine grosse Menge Rauchgase, typischerweise im Bereich von 100 bis 200 m<sup>3</sup>/s, aus dem Fahrraum abgesogen. Eine geeignete Kontrolle der Längsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel ist in der Regel erforderlich, damit kein Rauch an der Absaugstelle vorbei strömt. Normalerweise werden daher auch bei Lüftungssystemen mit Rauchabsaugung Strahlventilatoren vorgesehen.

### 4.3 So einfach wie möglich, so komplex wie nötig

Brandentwicklung und Rauchausbreitung in Strassentunneln können extrem rasch erfolgen. Das haben die Brände im Gotthard-Strassentunnel (2001) und im Tunnel Via Mala (2006) sehr deutlich gezeigt. Zeit ist immer ein Schlüsselfaktor, insbesondere in Bezug auf Selbstrettung. Ereignislüftungen werden in der Regel nach Ereignisdetektion vollautomatisch gestartet, auf der Basis von vordefinierten Szenarien.

Einfache, robuste und intuitive Lüftungsstrategien sind grundsätzlich anzustreben. Dieser Grundsatz kann aber nicht immer voll eingehalten werden. Moderne Lüftungssteuerungen unterstehen hohen Anforderungen und resultieren zunehmend aus vertieften Analysen. Daher die wachsende Bedeutung der Simulation, welche die zeitliche Entwicklung komplexer Ereignisszenarien veranschaulicht und die Prüfung der zugehörigen Lösungsstrategien ermöglicht. Die resultierende Anzahl Lüftungsszenarien ist aufgrund der unterschiedlichen Situationen in der Regel recht hoch und erfordert eine konsequente Schulung des Betriebspersonals und der Einsatzdienste.

## 5 Die Rolle der Simulation

Simulationstechniken wurden mittlerweile so weit entwickelt, dass sie umfassende und realitätsnahe Simulation von Brandereignissen erlauben. Diese spielen sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase eine zunehmende Rolle.

strategy is impermissible since it would lead to a serious destruction of the smoke stratification, making it impossible for some of the road users to escape. A moderate (typically 1 to 1.5 m/s) longitudinal velocity in the flow direction is normally the best solution in order to maintain natural smoke stratification as well as possible.

It is also generally important to maintain the flow direction observed at the time of detecting the fire as far as possible. Exceptions are however often sensible, especially near the portals.

### 4.2 Ventilation Systems with Smoke Extraction

With correctly designed and operated ventilation systems with smoke extraction, the smoke-affected tunnel section can be limited to a few hundreds of metres around the incident location. For this purpose, a certain number of fire dampers (normally between two and six) are opened at the fire location and a large quantity of smoke, typically in the region of 100 to 200 m<sup>3</sup>/s, is sucked out of the road space. A suitable control of the longitudinal velocity of the air in the tunnel is normally necessary in order that no smoke can flow past the extraction location. Ventilation systems with smoke extraction are thus normally provided with jet fans.

### 4.3 As Simple as Possible, as Complex as Necessary

Fire can break out and smoke can propagate extremely fast in road tunnels. This was shown very clearly by the fires in the Gotthard road tunnel (2001) and in the Via Mala tunnel (2006). Time is always a key factor, particularly with regard to self-rescue. Incident ventilation is normally started completely automatically after the detection of an incident, usually based on predefined scenarios.

Simple, robust and intuitive ventilation strategies are generally to be aimed at. This basic rule can however not always be obeyed. Modern ventilation control systems are subject to stringent requirements and increasingly the result of detailed analyses. This leads to the growing significance of simulation, which can model the development with time of complex incident scenarios and enables the testing of the associated solution strategies. The resulting number of ventilation scenarios is, due to the different situations, quite high and demands thorough training of the operations and the emergency services personnel.

## 5 The Role of Simulation

Simulation techniques have meanwhile been developed so far that they permit extensive and realistic simulations of fire events. This is of increasing significance, both in the design phase and in the operating phase.

### 5.1 Why Simulate Fire Scenarios?

In contrast to conventional techniques, as were essentially used in the design of tunnel ventilation systems since the middle of the last century, comprehensive fire simulations



### 5.1 Warum Simulation von Brandszenarien?

Im Unterschied zu konventionelleren Techniken, wie sie im Wesentlichen bereits Mitte des letzten Jahrhunderts in der Planung von Tunnellüftungen eingesetzt wurden, berücksichtigen umfassende Brandsimulationen die zeitliche Entwicklung eines Szenarios. Dies spielt insbesondere während der Selbstrettungsphase eine entscheidende Rolle. Brandsimulationen werden routinemässig im Rahmen der Projektierung eingesetzt und führen zunehmend zu deutlichen Verbesserungen in der Gestaltung, Dimensionierung und insbesondere Steuerung von Ereignislüftungen. Brandsimulationen werden zunehmend auch für im Betrieb befindliche Tunnel eingesetzt, um bestehende Brandbekämpfungsstrategien kritisch zu prüfen, neue zu entwickeln sowie Leitstellenpersonal und Einsatzkräfte zu schulen.

### 5.2 Eindimensionale Simulation von Brandszenarien

Gesamtszenarien spielen häufig eine zentrale Rolle im Rahmen der Optimierung der Steuerung von Ereignislüftungen sowie zur Identifikation der kritischen Szenarien, welche für die Dimensionierung massgebend sind. Eindimensionale Simulationen bieten sich aufgrund des geringen Simulationsaufwands für die Analyse vieler Ereignisszenarien optimal an.

Der Tunnel wird dabei eindimensional abgebildet und die zeitliche Variation aller massgebenden Kenngrössen nur in Abhängigkeit von der Position entlang der Tunnellängsachse analysiert. Die Tunnelaerodynamik, die Verkehrsentwicklung nach Brandausbruch und die Branddynamik (inklusive Kamineffekt) werden vollständig abgebildet. Der Selbstrettungsprozess kann aufgrund der Position der Rauchfronten detailliert analysiert werden (Bild 4). Unterschiedliche Lüftungsstrategien können verglichen und optimiert werden [3].

### 5.3 Dreidimensionale Simulation von Brandszenarien

Computational Fluid Dynamics (CFD) ist eine dreidimensionale Simulation (numerische Strömungsberechnung) und eignet sich optimal zur detaillierten Analyse der im Ereignisfall im Tunnel vorherrschenden Bedingungen [5]. Die relevanten Tunnelabschnitte werden mit hohem Detaillierungsgrad im Simulationsprogramm nachgebildet und analysiert (Bild 5). Diese deutlich aufwendigere Vorgehensweise liefert im Vergleich zu eindimensionalen Analysen einen weit höheren Detaillierungsgrad. Alle sicherheitsrelevanten Kenngrössen können zeitlich und örtlich korrekt nachgebildet werden. So lassen sich zum Beispiel sämtliche für die Selbstrettung und für die Intervention relevanten Bedingungen (Sichtweite auf Augenhöhe, Sauerstoffgehalt der Tunnelluft, Schadstoffkonzentration, Temperatur, Strahlungsdichte etc.) genau ermitteln.

### 5.4 Evakuierungssimulation

Der Selbstrettungsvorgang untersteht der komplexen Wechselwirkung von zahlreichen Einflussfaktoren. Die Tunnellüftung spielt dabei eine wesentliche Rolle, um geeignete Bedingungen zur Ermöglichung der Selbstrettung zu realisieren. Evakuierungssimulationen werden häufig eingesetzt, gekoppelt mit Simulationen der Rauchausbreitung, um die

consider the development of a scenario with time. This plays a decisive role, particularly during the self-rescue phase. Fire simulations are routinely used in the course of design work and are increasingly leading to a clear improvement of design and dimensioning and particularly of the control of incident ventilation. Fire simulations are also being increasingly used for tunnels in operation in order to critically test the existing fire fighting strategies, develop new strategies and train control centre and emergency services personnel.

### 5.2 One-Dimensional Simulation of Fire Scenarios

Overall scenarios are often central for the purpose of optimising the control of incident ventilation systems and identifying critical scenarios that are decisive for dimensioning. One-dimensional simulations are ideal for the analysis of many incident scenarios due to the simple simulation.

The tunnel is represented in one dimension and the variation with time of the decisive parameters is only analysed depending on the position along the longitudinal axis of the tunnel. The tunnel aerodynamics, the traffic development after the fire has broken out and the fire dynamics (including chimney effect) are completely represented. The self-rescue process can be analysed in detail from the position of the smoke fronts (Fig. 4). Different ventilation strategies can be compared and optimised [3].

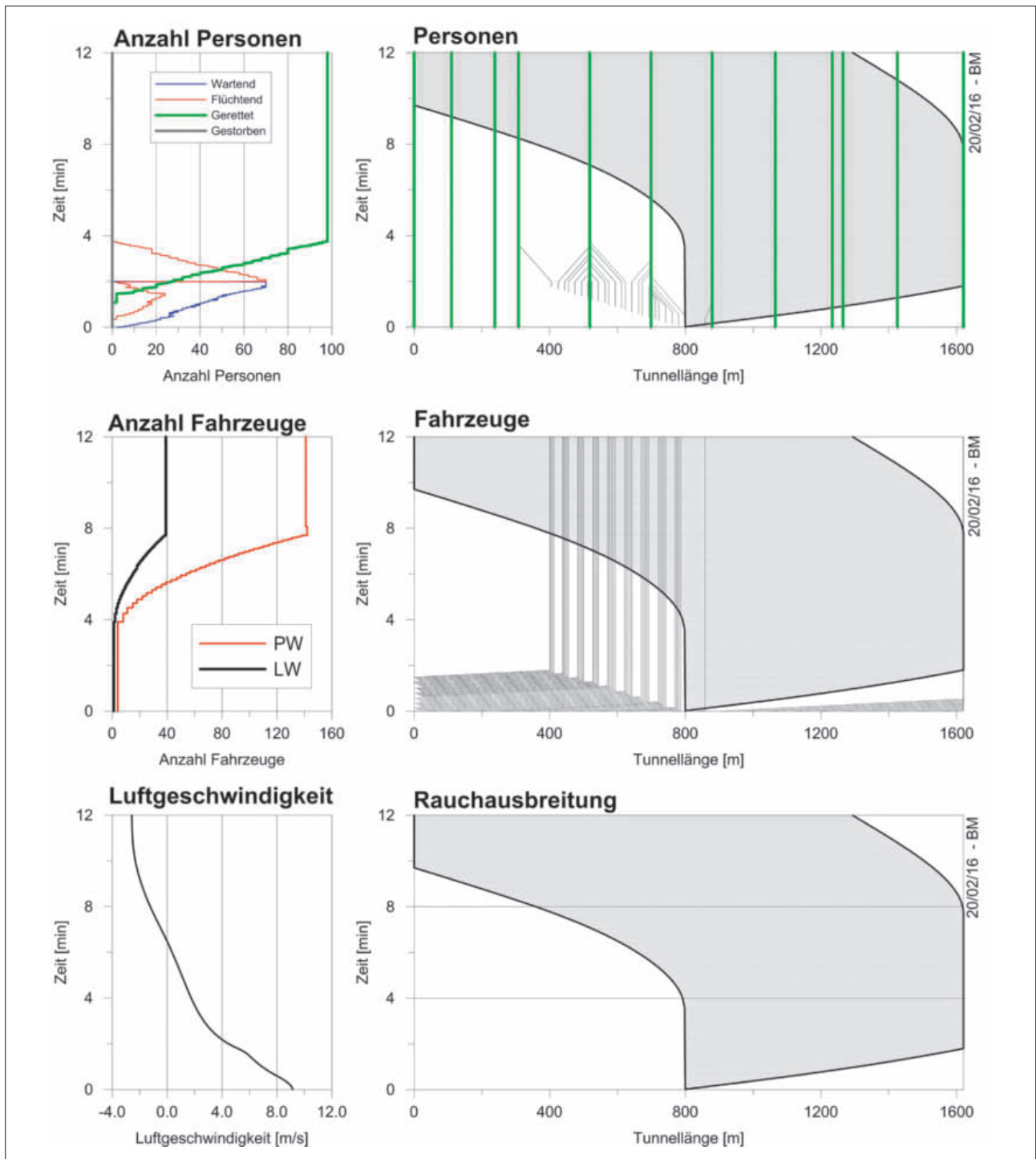
### 5.3 Three-Dimensional Simulation of Fire Incidents

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a three-dimensional simulation (numerical flow calculation) and is ideal for detailed analysis of the conditions prevailing in the case of an incident in a tunnel [5]. The relevant tunnel sections are represented and analysed in the simulation program with a high degree of detail (Fig. 5). This considerably more laborious procedure delivers a much better degree of detail compared to one-dimensional analyses. All safety-relevant parameters can be correctly represented with time and location. For example, all conditions that are relevant for self-rescue and for the intervention (visibility at eye level, oxygen content of the tunnel air, hazardous gas concentrations, temperature, radiation density etc.) can be determined precisely.

### 5.4 Evacuation Simulation

The self-rescue process is subject to a complex interaction of numerous factors. The tunnel ventilation is of decisive importance in order to provide suitable conditions to enable self-rescue. Evacuation simulations are often used, coupled with simulations of smoke propagation, in order to test the effectiveness of the safety chain with regard to self-rescue [4].

A first estimate of the self-rescue time can, for example, be undertaken from the standard 130 [6] of the National Fire Protection Association (NFPA) (Fig. 6). In the simplest case, it is only investigated whether the conditions prevailing in the tunnel during self-rescue, particularly regarding visibility, air quality and thermal exposure, are appropriate. Significantly more reliable simulations can be performed with specialised simulation programs such as Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals (ASERI) [7].



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

4 Eindimensionale Brandsimulation zur Optimierung der Lüftungssteuerung (flüssiger Richtungsverkehr von links nach rechts, Längslüftung mit Strahlventilatoren). Das Bild zeigt von unten nach oben: Luftgeschwindigkeit der Luft und Rauchausbreitung, Fahrzeugposition und Anzahl Fahrzeuge im Rauch, Personenbewegung und Personensituation (wartend, fliehend, gerettet, gestorben)

One-dimensional fire simulation for the optimisation of ventilation control (flowing traffic in one direction from left to right, longitudinal ventilation with jet fans). The picture shows, bottom to top: air velocity and smoke propagation, vehicle location and number of vehicles in the smoke, movement of people and situation of people (waiting, escaping, rescued, died)

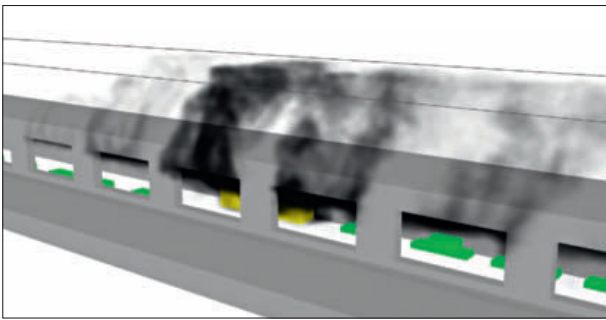
Wirksamkeit der Sicherheitskette in Bezug auf Selbstrettung zu prüfen [4].

Eine erste Schätzung der Selbstrettungszeit kann zum Beispiel auf der Basis der Norm 130 [6] der National Fire Pro-

## 6 Requirements and Interfaces

### 6.1 Construction

Depending on the ventilation and tunnel system, the ventilation can have a very great effect on construction. Although this is generally valid for the operational and safety equip-



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

**5** Brand in einer Galerie – Visualisierung der Rauchausbreitung bei 3D-Brandsimulation mit FDS

*Fire in a gallery – Visualisation of smoke propagation in a 3D fire simulation with FDS*

tection Association (NFPA) vorgenommen werden (Bild 6). Im einfachsten Fall wird lediglich geprüft, ob die im Tunnel vorherrschenden Bedingungen während der Selbstrettung, insbesondere in Bezug auf Sicht, Luftqualität und thermische Belastung, geeignet sind. Wesentlich zuverlässigere Simulationen können mittels spezialisierter Simulationsprogramme wie der Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals (ASERI) [7] durchgeführt werden.

## 6 Anforderungen und Schnittstellen

### 6.1 Bau

Je nach Lüftungs- und Tunnelsystem kann die Lüftung einen sehr grossen Einfluss auf den Bau haben. Obwohl dies allgemein für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) Gültigkeit hat, sind zwei Schlüsselaspekte der Tunnellüftung besonders zu beachten: Der Raum- und der Leistungsbedarf kann enorm sein. Zu- und Abluftkanäle haben oft einen Querschnitt von mindestens 10 bis 15 m<sup>2</sup>, Lüftungszentralen weisen selten eine Kubatur von weniger als 500 m<sup>3</sup> auf, und die Leistung eines einzelnen Abluftventilators erreicht häufig 1 MW oder mehr. Die richtige Platzierung und Gestaltung aller Komponenten ist ebenfalls entscheidend. Es besteht in der Regel ein erhebliches Optimierungspotenzial, insbesondere bei Tunnelsanierungen, welches vom Bau- und Lüftungsingenieur gemeinsam ausgeschöpft werden muss. Die Bedeutung einer sehr engen Wechselwirkung zwischen Bau und Lüftung kann nicht überschätzt werden!

### 6.2 Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA)

Neben den eigentlichen Lüftungskomponenten sind Sensoren für den korrekten automatischen Lüftungsbetrieb im Ereignisfall unerlässlich. Hierzu gehören zum Beispiel die Ereignisdetektion, die Messung der Luftgeschwindigkeit im Fahrraum und die Staudetektion. Die Wechselwirkung zwischen Ereignislüftung und weiteren BSA-Komponenten ist vielschichtig und wird in der Regel im Rahmen der Projektierung relativ gut beherrscht. Eine Reflexmatrix kann alle Wechselwirkungen zwischen Lüftung und BSA systematisch für alle Betriebsbedingungen wiedergeben. Erfolgskritische Aspekte, welche die grösste Aufmerksamkeit erfordern, sind

ment, two key aspects of tunnel ventilation should particularly be noted: The space and power requirement can be enormous. Air supply and extraction ducts often have a cross-sectional area of at least 10 to 15 m<sup>2</sup>, ventilation stations seldom have a volume of less than 500 m<sup>3</sup>, and the power of a single extraction fan can often reach 1 MW or more. The correct placing and design of all components is also decisive. There is normally a considerable potential for optimisation, particularly in tunnels under refurbishment, which has to be exploited by collaboration between civil and ventilation engineers. The significance of a very close interaction between construction and ventilation cannot be underestimated!

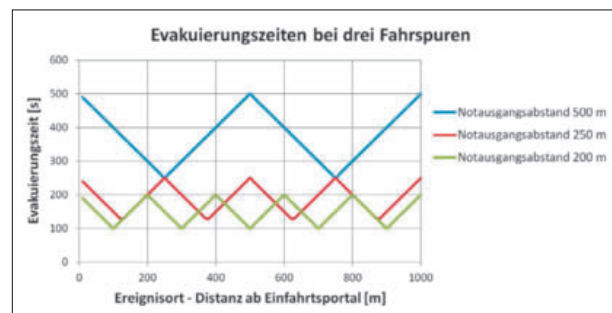
### 6.2 Operational and Safety Equipment

In addition to the actual ventilation components, sensors are essential for correct automatic ventilation operation in case of an incident. This includes, for example, incident detection, measurement of air velocity in the road space and traffic blockage detection. The interaction between incident ventilation and further safety equipment is many-layered and is normally kept relatively well under control during the design stage. A reflex matrix can represent all interactions between ventilation and tunnel equipment systematically for all operating conditions. Aspects that are critical for success, which demand the greatest attention, are often the implementation and commissioning of ventilation control and the correct integration of the ventilation sensors. The detection of stopped traffic is subject to different requirements and can be stated as an example here.

### 6.3 Operating and Incident Services

Maintenance, repair and periodic functional checks are essential in order to guarantee the required availability and reliability of incident ventilation. Such requirements grow with the complexity of the system and have to be considered at the design phase. For example the analysis of possible breakdown situations is an essential basis for the specification of the required redundancy. This allows tunnel closures due to technical breakdowns to be minimised.

From the personnel in the control room, the ventilation engineer expects detailed knowledge of the system and the



Quelle/credit: Marco Bettelini, Samuel Rigert

**6** Evakuierungszeit in Abhängigkeit von Brandort und Abstand der Notausgänge

*Evacuation time depending on fire location and spacing of the emergency exits*

häufig die Realisierung und Inbetriebnahme der Lüftungssteuerung und die korrekte Anbindung der Lüftungssensoren. Die unterschiedlichen Anforderungen unterstehende Staudetektion kann an dieser Stelle als Beispiel aufgeführt werden.

### 6.3 Betrieb und Ereignisdienste

Wartung, Unterhalt und periodische Funktionskontrollen sind eine unerlässliche Grundlage, um die erforderliche Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Ereignislüftungen zu garantieren. Diesbezügliche Anforderungen steigen mit der Komplexität der Anlagen und müssen schon bei der Planung berücksichtigt werden. So stellt zum Beispiel die Analyse möglicher Ausfallsituationen eine wesentliche Grundlage dar, um die erforderlichen Redundanzen festzulegen. Dadurch können Tunnelsperrungen aufgrund von technischen Ausfällen minimiert werden.

Vom Personal im Kontrollraum erwartet der Lüftungstechniker grundlegende Kenntnisse der Anlage und der wichtigsten Lüftungsszenarien. Dies ist erforderlich, weil vorgängig festgelegte Szenarien teilweise manuelles Eingreifen erfordern, insbesondere falls nicht alle Komponenten uneingeschränkt verfügbar sind. Manuelles Eingreifen kann weiter erforderlich sein, um die Lüftungsstrategie in Bezug auf die von der Einsatzleitung festgelegte Vorgehensweise zu optimieren.

Die Feuerwehr und teilweise auch die weiteren Blaulichtorganisationen müssen in Bezug auf Tunnellüftung und automatische Lüftungsszenarien geschult werden. Einsatzstrategien und Lüftungsbetrieb werden aneinander angepasst und optimiert. Die Einsatzdienste sind in der Lage, bei Bedarf Anpassungen des Lüftungsbetriebs anzufordern.

## 7 Schlusswort

Ereignislüftungen spielen eine zentrale Rolle in der Sicherheitskette eines Strassentunnels. Durch gezielte Kontrolle der Rauchbewegung können günstige Bedingungen für die Selbstrettung und für die Intervention bereitgestellt werden.

Damit die Lüftungsfunktion zuverlässig und wirksam wahrgenommen werden kann, müssen einige Voraussetzungen erfüllt werden: ausreichender Unterhalt, damit alle Komponenten des Lüftungssystems im Ereignisfall wirklich verfügbar sind, ebenso wie Verständnis der wichtigsten Lüftungsszenarien seitens der Tunnelbetreiber und der Einsatzkräfte. Simulation kann diesbezüglich eine sehr wichtige Unterstützung liefern. Dies garantiert, dass im Ereignisfall die Lüftung ihre zentrale Rolle in der Sicherheitskette voll wahrnehmen kann.

Nicht alle Probleme lassen sich mit Lüftungstechnischen Massnahmen ausreichend beherrschen. Zusätzliche, weit aufwendigere Massnahmen, wie zum Beispiel die Verdichtung der Notausgänge, sind teilweise unerlässlich.

most important ventilation scenarios. This is necessary since scenarios laid down in advance can sometimes need manual intervention, particularly if not all components are available. Manual intervention can also be necessary in order to optimise the ventilation strategy in accordance with a procedure requested by the fire chief.

The fire services and to some extent also other emergency service organisations have to be trained with regard to tunnel ventilation and automatic ventilation scenarios. Intervention strategies and ventilation operation are then adapted to suit each other and optimised. The emergency services are able to request changes to ventilation operation as required.

## 7 Summary

Incident ventilation is an important link in the safety chain for a road tunnel. Targeted control of smoke movement can provide favourable conditions for self-rescue and intervention.

In order that the ventilation can work reliably and effectively, several preconditions have to be fulfilled: adequate maintenance, in order that all components of the ventilation system are actually available in case of an incident, understanding of the most important ventilation scenarios on the part of the tunnel operator and the emergency services. Simulation can be of great assistance in this regard. This guarantees that in case of an incident, ventilation can play its central role in the safety chain.

Not all problems can be adequately controlled with ventilation measures. Additional, far more expensive measures such as more closely spaced emergency exits, are sometimes unavoidable.

## Literatur/References

- [1] ASTRA: Lüftung der Strassentunnel. Richtlinie 13001. Ausgabe 2008 V2.01
- [2] Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network
- [3] Bettelini, M.: "Transient One-Dimensional Simulation For Optimum Road Tunnel Ventilation". ITA-AITES World Tunnel Congress, 19–25 September 2008, Agra, India
- [4] Bettelini, M.: "Coupled One-Dimensional Simulation of Smoke Propagation and Evacuation In Road Tunnels". AFTES Int. Congress 2011, 17–19 October 2011, Lyon, France
- [5] Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV), <http://firemodels.github.io/fds-smv/>
- [6] NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2010 Edition
- [7] ASERI (Advanced Simulation of Evacuation of Real Individuals), A model to simulate evacuation and egress movement based on individual behavioural response (2004), <http://www.ist-net.de>

Severin Wälchli, Dr. sc. techn. ETH (Masch.-Ing.), Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH  
Jens Badde, M. Eng. Maschinenbau, Pöyry Schweiz AG, Zürich/CH

# Ereignislüftung unterirdischer Bahnanlagen

## Theorie und Praxis am Beispiel der Durchmesserlinie Zürich

Die Durchmesserlinie (DML) Zürich beinhaltet mit einem 5 km langen Eisenbahntunnel, einem Flucht- und Rettungsstollen und einem unterirdischen Bahnhof verschiedene Elemente einer unterirdischen Bahnanlage. Während im Bahntunnel keine mechanische Lüftungsanlage installiert ist, sorgen eine Überdrucklüftung im Fluchtstollen und eine Entrauchungsanlage im Bahnhof für optimale Fluchtbedingungen im Brandfall.

# Emergency Ventilation in Underground Rail Systems

## Theory and Practical Experience from the Zurich Cross Rail

The Zurich Cross Rail is an underground rail system with a 5 km long rail tunnel, an escape and rescue tunnel and an underground station. No mechanical ventilation system is installed in the rail tunnel, but an over-pressure ventilation system in the escape tunnel and a smoke extraction system at the station ensure optimum escape conditions in case of fire.

### 1 Einleitung

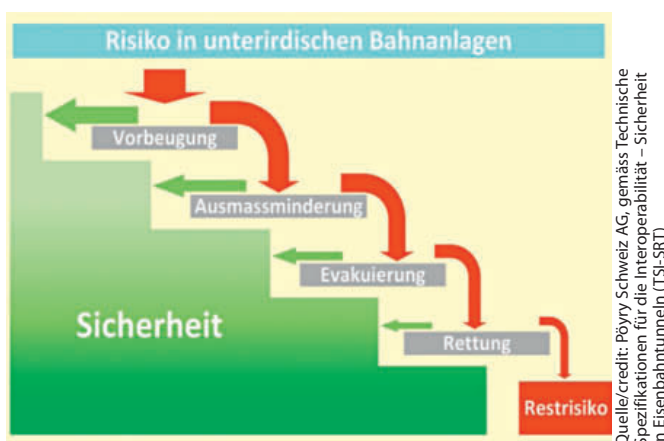
Die Sicherheit in Bahntunneln ist von unzähligen Faktoren abhängig. Die Bahninfrastruktur kann wesentlich zur Sicherheit beitragen. Die Wahl des Tunnelsystems mit ein- oder zweispuriger Verkehrsführung, die Länge eines Tunnels, der Tunnelquerschnitt, die Fluchtweganzahl und -anordnung sowie Betriebs- und Sicherheitsanlagen haben einen direkten Einfluss auf die Sicherheit. Eine weitere Einflussgrösse ist der Bahnverkehr, wobei hier die Zugfrequenz, die Geschwindigkeit der Züge oder die Art des Verkehrs (reiner Personen- oder Mischverkehr

### 1 Introduction

Safety in rail tunnels is determined by innumerable factors. The rail infrastructure itself can make a significant contribution to safety. Selection of the tunnel configuration, single- or double-track rail operation, the length of the tunnel, the tunnel cross-section, the number and arrangement of escape routes and the operational and safety equipment all have a direct effect on safety. Yet another factor which has an influence is the rail traffic itself, with train frequency, train speeds and the traffic mode (purely passenger traffic, or mixed traffic including freight trains) playing a role. The rolling stock used and the operational arrangements can also enhance the safety level of rail systems.

Tunnel safety can be improved by four approaches: 1) prevention of incidents, 2) minimisation of the severity of incidents, 3) escape by the persons affected, and 4) active rescue or intervention (Fig. 1). Prevention makes the greatest contribution to the safety of rail systems, followed by minimisation of severity. The interaction of all four provisions will result in a low residual risk.

There are various types of underground rail systems within the overall rail network. The most frequently encountered underground feature is the tunnel. Tunnels may consist of one or two tunnel tubes and may carry one or more tracks.



1 Massnahmen zur Erhöhung der Tunnelsicherheit  
Provisions for the enhancement of tunnel safety

## La ventilation en cas d'incident dans les tunnels ferroviaires

### Théorie et pratique à l'exemple de la ligne diamétrale de Zurich

Le système de ventilation des installations ferroviaires a pour but de minimiser la propagation des fumées et donc de maintenir autant que possible les voies d'évacuation et issues de secours à l'abri des fumées. Habituellement, on n'installe pas de ventilation pour cas d'incident dans les tunnels ferroviaires. Certaines zones protégées doivent pourtant être impérativement maintenues à l'abri des fumées. L'Office fédéral des transports OFT exige des justificatifs explicites sur la capacité de fonctionnement d'un système de ventilation en cas d'incident. A l'exemple de la ligne diamétrale de Zurich, cette démonstration est présentée au moyen de tests de fumée, de mesures aérodynamiques et de simulations détaillées sur la propagation des fumées.

## Ventilazione di emergenza per impianti ferroviari sotterranei

### Teoria e procedura: il caso del passante ferroviario di Zurigo

La ventilazione di emergenza in impianti ferroviari ha lo scopo di rendere minima la diffusione del fumo e quindi di tenere libere dal fumo vie di fuga e di soccorso. Le gallerie ferroviarie sono generalmente prive di ventilazione d'emergenza. Le zone protette devono necessariamente essere libere da fumo. Il ufficio federale dei trasporti UFT richiede esplicitamente una dimostrazione positiva del funzionamento della ventilazione di emergenza. Utilizzando l'esempio del passante ferroviario di Zurigo la dimostrazione viene effettuata tramite esperimenti con fumo, misurazioni aerodinamiche e simulazioni di diffusione del fumo.

mit Güterzügen) eine Rolle spielen. Auch das verwendete Rollmaterial sowie betriebliche Massnahmen können das Sicherheitsniveau in Bahnanlagen erhöhen.

Die Erhöhung der Tunnelsicherheit kann über vier Schritte erreicht werden: 1) die Vorbeugung von Ereignissen, 2) die Minimierung des Ereignisausmasses, 3) die Selbstrettung der betroffenen Personen sowie 4) die Rettung oder Intervention (Bild 1). Den grössten Beitrag zur Sicherheit in Bahnanlagen leistet die Vorbeugung, gefolgt von der Ausmassminderung. Das Zusammenwirken aller vier Massnahmen führt zu einem niedrigen Restrisiko.

Im gesamten Eisenbahnnetzwerk gibt es verschiedene Arten unterirdischer Bahnanlagen. Die häufigste unterirdische Anlage ist der Tunnel. Dieser kann aus einer oder zwei Tunnelröhren bestehen und eine oder mehrere Spuren enthalten.

In Tunneln mit zwei Röhren kann im Ereignisfall die Gegenröhre, die nicht vom Brand betroffene Röhre, als sicherer Bereich für die Passagiere dienen. In einröhriigen Tunneln übernimmt diese Funktion der parallele Flucht- und Rettungstollen.

In urbanen Gebieten ist die Verlegung von Bahnhöfen in den Untergrund aufgrund beschränkter Platzverhältnisse an der Oberfläche vorteilhaft und immer häufiger anzutreffen. Speziell Stationen mit zusätzlichen, meist oberhalb der Perronebene liegenden Gewerbeflächen stellen eine besondere Herausforderung an die Sicherheit dar. Neben den Passagieren im Ereigniszug werden in einem Brandfall auch wartende Personen auf den Perrons und Personen in den Ladengeschossen gefährdet.

In twin-tube tunnels, the tube not affected by the fire, i.e., the "opposite-direction tube", may serve as a safe zone for passengers if an incident occurs. In single-tube tunnels, this function is performed by the parallel escape and rescue tunnel.

In urban areas, the positioning of stations underground offers advantages due to the lack of available space on the surface, and is therefore encountered ever more frequently. Stations with additional commercial areas, generally located above the platform level, pose particular safety challenges. In case of a fire, not only the passengers in the affected train, but also persons waiting on the platforms and persons on the shop levels can be endangered.

## 2 Emergency Ventilation in Underground Rail Systems

Space in rail tunnels is comparatively restricted. Relative to the frontal area of the rolling stock, rail tunnel cross-sections are much smaller than those of road tunnels. The possibilities for self-rescue, for train passengers to escape and for access by emergency services from outside the tunnel are restricted. Maximum priority must therefore be given to design and operational provisions during safety planning. Such provisions ensure that an affected train is able to leave the tunnel as quickly as possible, and that persons can escape if the train is not able to leave the tunnel. The essential elements for the support of self-rescue are the escape routes, possible emergency exits leading to protected areas, and the emergency ventilation system. Mechanical ventilation systems are one of the most effective methods of increasing safety in case of fire in underground rail facilities. Such systems can be subdivided into three main categories: ventilation systems with

## 2 Ereignislüftung in unterirdischen Bahnanlagen

In Eisenbahntunneln sind die Platzverhältnisse relativ eng. Die Tunnelquerschnitte sind im Vergleich zur Fläche des Rollmaterials viel geringer als in Strassentunneln. Die Möglichkeiten für die Selbstrettung, für die Flucht der Zugpassagiere oder für Interventionskräfte von ausserhalb des Tunnels sind eingeschränkt. Es muss darum bei der Planung der Sicherheit höchste Priorität auf bauliche oder betriebliche Massnahmen gelegt werden. Diese stellen sicher, dass ein betroffener Zug den Tunnel möglichst rasch verlassen kann und dass sich die Personen selber retten können, falls der Zug den Tunnel nicht verlassen kann. Die wesentlichen Elemente zur Unterstützung der Selbstrettung sind die Fluchtwege, allfällige Notausgänge in geschützte Bereiche oder die Ereignislüftung. Eine der wirksamsten Methoden zur Erhöhung der Sicherheit im Brandfall in unterirdischen Bahnanlagen sind die mechanischen Lüftungsanlagen. Die Anlagen können in drei Hauptkategorien unterteilt werden: Lüftungssysteme ohne Absaugung, Systeme mit Rauchabsaugung und Überdrucklüftungen. Die Wahl des optimalen Lüftungssystems hängt von diversen Faktoren ab, welche im Folgenden diskutiert werden.

### 2.1 Ziele der Ereignislüftung

Ein Brandereignis in einem Reisezug tritt zwar äusserst selten auf, jedoch kann das Ausmass wegen der oft grossen Personenanzahl in den Zügen sehr hoch sein. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Sicherheitsplanung dar. In den meisten Ereignisfällen ist es für die Züge möglich, den Tunnel zu verlassen und die Selbstrettung der Passagiere auf offener Strecke zu ermöglichen. Dies bietet in jedem Fall die besseren Evakuationsbedingungen als eine Flucht im Tunnel. Ein Brandereignis in einer unterirdischen Bahnanlage tritt daher nur dann auf, wenn der Zug nicht mehr in der Lage ist, den Tunnel selbstständig zu verlassen.

Die Ereignislüftung soll durch eine frühzeitige Beeinflussung der Rauchausbreitung die Flucht- und Rettungswege soweit wie möglich von Rauch, Brand- oder anderen Gasen freihalten. Die Sichtweite darf für die flüchtenden Personen nicht zu stark beeinträchtigt sein, und Bedingungen von begrenzten Temperaturen sowie Toxizität sollen eingehalten werden. Die Ventilationsanlage muss zudem das Eindringen von Rauch und Brandgasen in geschützte Bereiche verhindern und in diesen Bereichen für eine ausreichende Luftqualität sorgen.

In einem Brandfall muss die Lüftungsanlage sicherstellen, dass eine Rezirkulation von Rauch oder Schadstoffen aus der Ereignisröhre in weitere Tunnelröhren, in Dienst- und Rettungstollen oder in anschliessende Haltestellen ausgeschlossen wird.

### 2.2 Planung einer Ereignislüftung

In einem Eisenbahntunnel kann mit einer mechanischen Ventilationsanlage, sowohl mit Strahlventilatoren als auch mit einem Rauchabzugssystem, eine definierte Luftströmung

no smoke extraction, systems with smoke extraction, and over-pressure ventilation systems. The selection of the best ventilation system in each case depends on a variety of factors, which are discussed below.

### 2.1 The Purposes of Emergency Ventilation

Fire incidents in passenger trains only occur very rarely, but their consequences may be extremely severe due to the often large numbers of persons travelling in trains. This is therefore a special challenge for safety planning. In most incidents, trains are able to leave the tunnel, permitting the escape of the passengers onto the track in the open air. This provides better evacuation conditions in all cases than escape within the tunnel. A fire incident in an underground rail system therefore only occurs if the train is no longer capable of leaving the tunnel on its own.

Emergency ventilation is intended to keep escape and rescue routes as free as possible from smoke and combustion gases or other fumes by controlling the spread of smoke at an early stage. Visibility for escaping persons must not be excessively impaired, and low temperature and low toxicity conditions must be maintained. The ventilation system must, in addition, prevent the ingress of smoke and combustion gases into protected areas and ensure adequate air quality in such areas.

In case of fire, the ventilation system must ensure that recirculation of smoke or other harmful substances from the affected tube into other tunnel tubes, into service and rescue tunnels, and to adjacent stations/stopping points is prevented.

### 2.2 Planning of an Emergency Ventilation System

A defined air flow can be generated in a rail tunnel by means of a mechanical ventilation system, using jet fans and/or a smoke-extraction system. With appropriate design, the air flow ensures that one side of the fire site can be kept free of smoke to facilitate escape for the passengers, or that emergency services can gain access to the fire site, although an extremely high-power ventilation system is needed to move a column of air in a tunnel. The piston effect of moving trains is generally very much greater than the capacity of the ventilation system, and not only in single-track tunnels. Stopping an air flow in a tunnel, or actually reversing its direction of flow, can take a long time. For this reason, a ventilation system can only become completely effective once all trains have left the tunnel or have been stopped.

A number of factors need to be taken into account in the planning of an emergency ventilation system in underground rail facilities. Natural factors may determine the rating and design of the ventilation system, particularly in long tunnels. In sloping tunnels (tunnels with a longitudinal gradient) major differences between exterior and interior temperatures can cause thermal buoyancy. In addition, dif-

mung erzeugt werden. Diese garantiert bei entsprechender Auslegung, dass eine Seite des Brandorts rauchfrei gehalten werden kann und damit eine Flucht der Passagiere erleichtert wird oder ein Zugang zum Brandort für die Interventionskräfte zur Verfügung steht. Um eine Luftsäule in einem Tunnel jedoch bewegen zu können, ist ein sehr leistungsstarkes Lüftungssystem erforderlich. Der Einfluss von fahrenden Zügen ist nicht nur in Einspurtunneln meist sehr viel grösser als die Leistung einer Ventilationsanlage. Soll die Luftströmung im Tunnel gestoppt oder gar die Strömungsrichtung umgekehrt werden, so kann dies eine lange Zeit in Anspruch nehmen. Eine Ventilationsanlage wird darum nur dann vollständig wirksam, nachdem alle Züge den Tunnel verlassen haben oder gestoppt wurden.

Bei der Planung einer Ereignislüftung in unterirdischen Bahnanlagen sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Natürliche Faktoren können speziell bei langen Tunneln leistungsbestimmend für das Lüftungssystem sein. Grosse Unterschiede zwischen Aussen- und Innentemperaturen bewirken bei geeigneten Tunneln (Tunnel mit einem Längsgradienten) einen thermischen Auftrieb. Zusätzlich können meteorologische Portaldruckdifferenzen auftreten, welche eine natürliche Luftströmung verursachen. Für den Gotthard-Basistunnel können beispielsweise bei gewissen klimatischen Bedingungen natürliche Luftströmungen von über 3 m/s auftreten.

Neben den natürlichen Faktoren spielt auch die Tunnelinfrastruktur eine wesentliche Rolle. Die Beschaffenheit oder Rauigkeit der Tunnelwände beeinflusst die erforderliche Leistung zur Erzeugung einer Längsströmung. Im Vergleich zu Tunneln mit relativ glatten Betontübbingungen kann bei Tunneln mit Sprengvortrieb und Spritzbetonverkleidung der Schubbedarf fast doppelt so hoch ausfallen, um bei identischem Querschnitt und Tunnellänge die gleiche Längsströmung zu erzeugen.

Der Tunnelquerschnitt beeinflusst mehrere Aspekte der Lüftungsanlagen. Die Kolbenwirkung der fahrenden Züge in Tunneln mit kleineren Querschnitten bewirkt eine hohe Längsströmung. Die Ausbreitung von Rauch im Ereignisfall ist damit in den ersten Minuten nur schwer zu beeinflussen. Durch die hohen Temperaturen der Brandgase stellt sich meist eine Rauchsichtung ein. Der warme Rauch konzentriert sich im Deckenbereich des Tunnels und ermöglicht den Passagieren eine Flucht bei ausreichenden Sichtweiten unterhalb des Rauches. Je kleiner der Tunnelquerschnitt, desto kleiner auch die rauchfreie Schicht – was die Fluchtbedingungen damit verschlechtert. Bei der Planung ist darum ein optimaler Kompromiss zwischen den Baukosten (möglichst kleiner Tunnelquerschnitt) und der Sicherheit (möglichst grosser Querschnitt) zu finden.

Auf ein Rauchabzugssystem in Eisenbahntunneln wird aus Gründen der Kosten-Wirksamkeits-Effizienz verzichtet. Ausnahmen bilden unterirdische Bahnhöfe, Nothaltestellen oder

ferenzen in meteorological pressure at the portals may occur and generate a natural air flow. In the Gotthard Base Tunnel, for example, natural air flows faster than 3 m/s may occur under certain climatic conditions.

Not only natural factors, but also the tunnel infrastructure play a significant role. The condition or roughness of the tunnel walls influences the energy needed to generate a longitudinal flow. Assuming identical tunnel cross-section and length, the fan thrust needed to generate the same longitudinal flow may be nearly twice as high in shotcrete-lined tunnels constructed by drill and blast than in tunnels with relatively smooth concrete lining segments.

The tunnel cross-section influences several aspects of the ventilation system. The piston effect of trains moving in tunnels with smaller cross-sections generates a high longitudinal flow. In case of an incident, this makes it difficult to control the spread of smoke during the first few minutes. Smoke stratification generally occurs as a result of the high temperatures of combustion gases. Hot smoke accumulates in the roof zone of the tunnel, allowing passengers to escape in conditions of adequate visibility below the smoke level. The smaller the tunnel cross-section, however, the smaller is the smoke-free layer, worsening the conditions for escape. An optimum compromise between construction costs (smallest possible tunnel cross-section) and safety (largest possible cross-section) must therefore be found at the design stage.

Smoke extraction systems are omitted in rail tunnels for reasons of cost-effectiveness and efficiency, although underground stations, emergency stop stations and bifurcations are exceptions. Stations and emergency stop stations are defined stopping areas with optimised escape conditions. In interaction with the generally numerous escape routes, a local extraction system is provided to minimise the smoke spread and improve conditions for passengers to escape. At stations, a smoke-extraction system can generate a negative pressure in the platform zone, resulting in fresh air flowing through the station to the fire site. This flow must prevent the spread of smoke from the platform area to higher levels. At points where a double-track tunnel joins two single-track tunnels, a smoke-extraction system in the bifurcation zone can prevent the spread of smoke.

Under the applicable standards and codes of practice, escape doors leading to a safe underground zone must be provided in rail tunnels every 500 m, or an exit to the open air every 1000 m. Ventilation systems in rail systems are primarily deployed to keep such safe zones free of smoke. This can be ensured by means of an over-pressure ventilation system. In this case, the design of the air intake system, cross passages or escape areas and/or the dimensioning of the escape doors all influence the design of the ventilation system.



Verzweigungen. Bahnhöfe und Nothaltestellen sind definierte Haltebereiche mit optimierten Fluchtbedingungen. Zusammen mit den meist zahlreichen Fluchtwegen minimiert eine lokale Absaugung den verrauchten Bereich und verbessert die Bedingungen für die Selbstrettung der Passagiere. In Bahnhöfen kann mit der Rauchabsaugung ein Unterdruck im Perronbereich erzeugt werden, wodurch Frischluft durch die Station zum Brandort nachströmt. Diese Strömung muss einen Rauchübertritt vom Perronbereich in darüber liegende Geschosse verhindern. Mündet ein zweigleisiger Tunnel in zwei eingleisige Tunnel, so kann eine Rauchabsaugung im Verzweigungsbereich die Ausbreitung von Rauch verhindern.

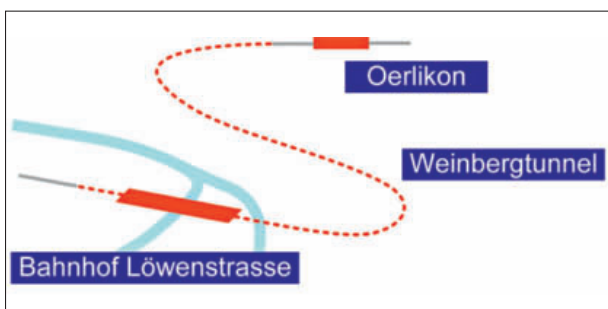
Gemäss gültigen Normen und Richtlinien sind in Bahntunneln mindestens alle 500 m Fluchttüren in einen sicheren unterirdischen Bereich oder alle 1000 m ein Ausgang ins Freie vorzusehen. Lüftungssysteme in Eisenbahnanlagen werden vorwiegend zur Rauchfreihaltung dieser sicheren Bereiche eingesetzt. Dies kann mit einer Überdrucklüftung garantiert werden. Die Gestaltung der Luftansaugung, Querverbindungen oder Fluchtbereiche oder die Grösse der Fluchttüren beeinflussen dabei die Definition der Lüftungsanlagen.

### 3 Die Ereignislüftung der Durchmesserlinie Zürich

Der rund 5 km lange Weinbergtunnel bildet zusammen mit dem 420 m langen Bahnhof Löwenstrasse ein geschlossenes unterirdisches Tunnelsystem (Bild 2). Im Normalbetrieb wird das System allein durch die natürliche Luftströmung belüftet, welche massgeblich von den meteorologischen Verhältnissen an den beiden Tunnelportalen und der Kolbenwirkung der Züge abhängt. Eine künstliche Belüftung im Normalbetrieb ist bei einem Bahntunnel dieser Länge nicht erforderlich.

#### 3.1 Schutzziele

Die Ziele der Ereignislüftung der DML sind einerseits, durch eine Absaugung des Rauches aus dem Perronbereich des Bahnhofs Löwenstrasse die Rauchausbreitung im Bahnhof zu minimieren, und andererseits, die Aufgänge zum Ladengeschoss rauchfrei zu halten. Die Evakuierung der Bahnbenutzer soll unterstützt und die Rauchsichtung beibehalten werden.



Quelle/Credit: Pöyry Schweiz AG

2 Unterirdisches Tunnelsystem der Durchmesserlinie  
The Zurich Cross Link underground tunnel system

### 3 The Emergency Ventilation System on the Zurich Cross Rail

The Weinberg Tunnel is about 5 km long and forms a self-contained underground tunnel system together with the 420 m long Löwenstrasse station (Fig. 2). During normal operation, the system is ventilated solely by means of natural air flow, which essentially depends on the meteorological conditions at the two tunnel portals and the piston effect of moving trains. Artificial ventilation is not generally necessary during normal operation in rail tunnels of this length.

#### 3.1 Safety Targets

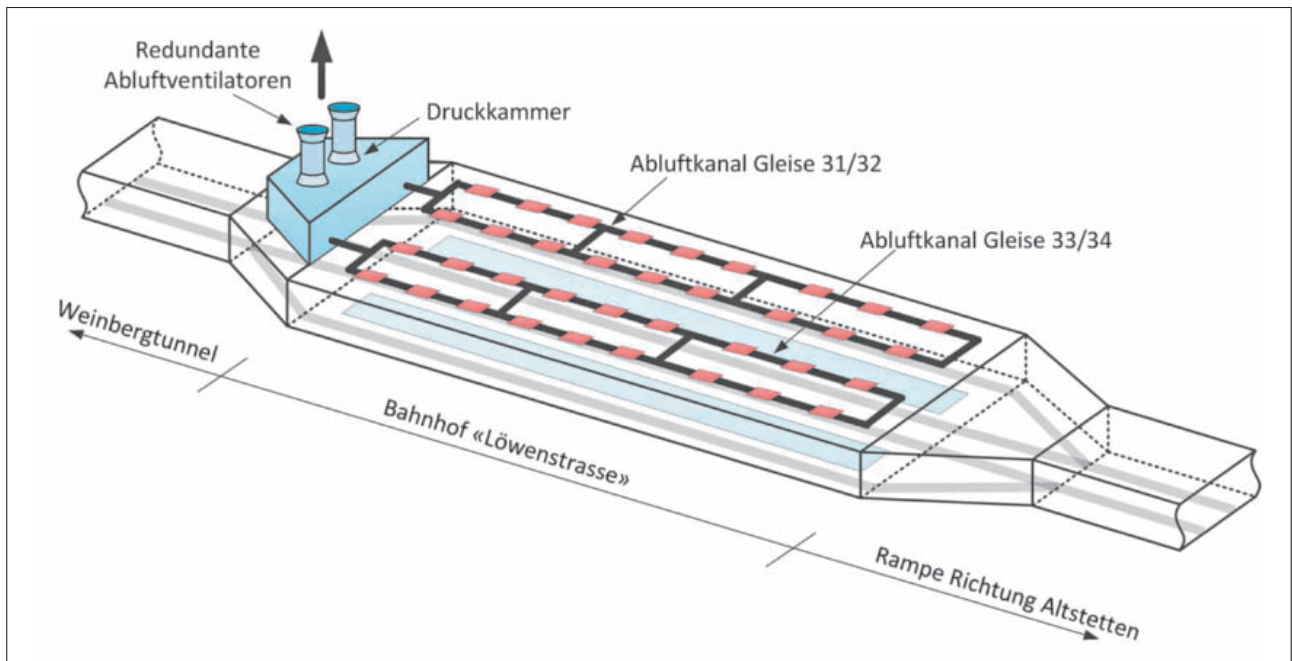
The aims of the Zurich Cross Rail emergency ventilation system are, on the one hand, to minimise the spread of smoke within the station by extracting smoke from the platform area at Löwenstrasse station, and on the other hand to keep the stairways to the shop level free of smoke. Evacuation of station users is to be facilitated and smoke stratification maintained.

In case of a fire in the Weinberg Tunnel, spread of smoke into Löwenstrasse station is to be prevented. No fire-ventilation system is installed for the Weinberg Tunnel itself. The escape and rescue tunnel of the Weinberg Tunnel is to be kept free of smoke by means of an over-pressure ventilation system.

#### 3.2 Ventilation Installations

In case of a fire in the Weinberg Tunnel, train passengers are able to leave the tunnel through eight emergency exits leading to the escape and rescue tunnel. The tunnel is aerodynamically sealed by means of an airlock at both portals. Two redundant axial fans generate an over-pressure in the rescue tunnel. The ventilation system is designed and dimensioned in such a way that an outflow of not less than 1 m/s through the opened escape doors into the rail tunnel is ensured in case of an incident. This prevents the ingress of smoke into the safe zone. Sliding doors are installed, and the over-pressure in the escape system is limited by means of a pressure-relief damper in order to reduce the force needed to open an escape door.

The Operating Regulations of Swiss Federal Railways (SBB) specify that in case of the discovery of a fire in a train, the train must not stop in the tunnel and may only stop at an underground station under certain conditions. If the train crew is not aware of the fire or a train remains immobilised at an underground station, however, the fire ventilation system must assure that sufficient time remains for all persons to escape. If a burning car comes to a standstill next to a stairway, the spread of smoke must be controlled by means of systematic extraction in such a way that the fleeing persons can reach a safe area through the nearest stairways. Systematic control of the smoke dampers and an appropriate extraction fan volume flow rate must ensure that fresh air can flow from the shop level through the stairways and thus suppress the spread of smoke and keep the escape routes free of smoke.



Quelle/credit: Pöry Schweiz AG

**3** Lüftungsanlagen Bahnhof Löwenstrasse  
Ventilation systems at Löwenstrasse station

Bei einem Brand im Weinbergtunnel soll eine Rauchausbreitung in den Bahnhof Löwenstrasse verhindert werden. Für den Weinbergtunnel selber ist keine Brandlüftung installiert. Der Flucht- und Rettungsstollen des Weinbergtunnels ist mittels Überdrucklüftung rauchfrei zu halten.

### 3.2 Installierte Lüftungsanlagen

Im Falle eines Brandes im Weinbergtunnel können die Zugpassagiere den Tunnel über acht Notausgänge in den Flucht- und Rettungsstollen verlassen. Der Stollen wird an beiden Portalen durch eine Schleuse aerodynamisch abgeschlossen. Zwei redundante Axialventilatoren setzen den Rettungsstollen unter Überdruck. Das Lüftungssystem ist so dimensioniert, um im Ereignisfall durch die geöffneten Fluchttüren eine Ausströmung in den Bahntunnel von mindestens 1 m/s zu gewährleisten. Dies verhindert ein Eindringen von Rauch in den sicheren Bereich. Um die Öffnungskräfte der Fluchttüren gering zu halten, wurden Schiebetüren eingebaut und der Überdruck im Fluchtsystem über eine Druckentlastungsklappe beschränkt.

Die Betriebsreglemente der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) schreiben beim Feststellen eines Brandes in einem Zug vor, dass im Tunnel nicht und im unterirdischen Bahnhof nur unter bestimmten Bedingungen angehalten werden darf. Kann das Zugpersonal einen Brand aber nicht wahrnehmen oder es bleibt ein Zug im unterirdischen Bahnhof stecken, muss die Brandlüftungsanlage sicherstellen, dass für alle Personen ausreichend Zeit zum Flüchten bleibt. Kommt ein brennender Wagen unmittelbar neben einem Ausgang zum Stehen, muss die Rauchausbreitung durch gezieltes Absaugen so beeinflusst werden, dass die Flüchtenden über die nächstgelegenen Aufgänge in einen sicheren Abschnitt gelangen können. Durch die gezielte Steuerung der Ent-

At Löwenstrasse station, the ventilation control centre is located immediately at the point of transition from the station to the Weinberg Tunnel (Fig. 3). This permits extraction of combustion gases both from the tunnel and from the station. However, effective control of flow velocities in the tunnel is not possible using the ventilation system.

When a fire alarm is activated, the appropriate dampers close to the fire are opened and the extraction fans started. The two redundant axial fans are capable of extracting not less than 150 m<sup>3</sup>/s of smoke in the station close to the fire site. Around 200 m<sup>3</sup>/s can be extracted directly at the point of transition from the tunnel to the station in order to prevent the spread of smoke from the Weinberg Tunnel. The combustion gases are extracted vertically to the atmosphere up a smokestack.

### 3.3 Proof of Proper Functioning

The Swiss Federal Office of Transport (FOT), the approval authority, required a proof of proper functioning for the case of a design fire of 10 MW for the emergency ventilation system at Löwenstrasse station. This requirement necessitated functional certification of the ventilation control system, which includes fire detection, and also verification that the safety targets can be met at all times in case of fire. A three-stage procedure was used in order to fulfil the FOT requirements. Hot smoke tests were intended to demonstrate the correct functioning of the sensor systems and of the control and automation system. An extensive 3D numerical model was generated and used to simulate the design fire and to demonstrate compliance with the safety targets for a range of different fire scenarios. The model was first calibrated using aerodynamic measurements.



Quelle/credit: Pöyry Schweiz AG

4 Rauchversuchsanlage auf Flachwagen  
Smoke test apparatus on a railway flat car

rauchungsklappen und durch eine entsprechende Absaugleistung der Abluftventilatoren wird erreicht, dass über die Aufgänge Frischluft aus dem Ladengeschoss strömen kann und so die Rauchausbreitung zurückdrängt und die Fluchtwege rauchfrei bleiben.

Im Bahnhof Löwenstrasse ist die Brandlüftungszentrale unmittelbar beim Übergang des Bahnhofs zum Weinbergtunnel angeordnet (Bild 3). Dies erlaubt das Absaugen der Rauchgase sowohl aus dem Tunnel als auch aus dem Bahnhof. Eine massgebliche Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel ist mit der Lüftung jedoch nicht möglich.

Durch das Auslösen eines Brandalarms werden die entsprechenden brandnahen Klappen geöffnet sowie die Abluftventilatoren gestartet. Die zwei redundanten Axialventilatoren sind in der Lage, im Bahnhof brandortnah mindestens 150 m<sup>3</sup>/s Rauch abzusaugen. Zur Verhinderung eines Rauchübertritts aus dem Weinbergtunnel können ca. 200 m<sup>3</sup>/s direkt am Übergang vom Tunnel in den Bahnhof abgesaugt werden. Der Austritt der Rauchgase an die Umgebung erfolgt vertikal über einen Kamin.

### 3.3 Nachweisführung

Das Bundesamt für Verkehr (BAV) als bewilligende Behörde verlangte für die Ereignislüftung des Bahnhofs Löwenstrasse einen Funktionsnachweis für den Fall eines Auslegungs-

#### 3.3.1 Hot Smoke Tests

The smoke tests were performed according to VDI guideline 6019 [1]. Their aim was definition of the spread of smoke within the station, demonstration of the correct functioning of the sensors, visual display of flows of smoke and fresh air, and testing of the tripping of the ventilation system, for various fire scenarios. For this purpose, the entire smoke test apparatus was mounted on a railway flat car and operated in either stationary or mobile mode, depending on the scenario (Fig. 4).



Quelle/credit: Pöyry Schweiz AG

5 Rauchausbreitung im Deckenbereich  
Spread of smoke in the roof zone

brandes von 10 MW. Diese Auflage erforderte den Nachweis der Steuerung der Ventilationsanlage, welche die Branderkennung einschliesst, sowie das Aufzeigen, dass im Brandfall die Schutzziele jederzeit eingehalten werden.

Um die Auflage des BAV zu erfüllen, wurde ein dreistufiges Vorgehen angewendet. Warmrauchversuche sollten die Funktionalität der Sensorik und das Steuerungs- und Leitungssystem nachweisen. Ein umfangreiches numerisches dreidimensionales Modell wurde erstellt, mit welchem der Bemessungsbrand und das Einhalten der Schutzziele für verschiedene Brandszenarien simuliert wurden. Das Modell wurde vorgängig mit aerodynamischen Messungen kalibriert.

### 3.3.1 Warmrauchversuche

Die Rauchversuche wurden in Anlehnung an die VDI 6019 Richtlinie [1] durchgeführt. Die Ziele der Versuche waren die Ermittlung der Rauchausbreitung im Bahnhof, die Funktionalität der Sensoren nachzuweisen, die Rauch- und Frischluftströmungen zu visualisieren und die Auslösung der Ventilationsanlage für verschiedene Brandszenarien zu testen. Die gesamte Rauchversuchsanlage wurde dazu auf einen Flachwagen montiert und je nach Szenario stationär oder bewegend betrieben (Bild 4).

Der Grossteil des Perrongeschosses blieb bei den Tests rauchfrei. Die Rauchversuche zeigten keinen Rauchübertritt in die darüber liegenden Geschosse bei aktiver Lüftung. Dichter Rauch war mehrheitlich direkt oberhalb des betroffenen Gleises im Deckenbereich zu finden (Bild 5).

### 3.3.2 Aerodynamische Messungen und Modellkalibration

Die aerodynamischen Messungen wurden vorgenommen, um das rechnerische Modell für den Nachweis der Entrauchungsanlage zu validieren und zu kalibrieren. Das Simulationsmodell enthielt den kompletten Weinbergtunnel und die Rampe Richtung Bahnhof Altstetten, das Perrongeschoss des Bahnhofs Löwenstrasse, sämtliche Aufgänge in die Zwischen- und Ladengeschosse und einen Teil der Passagen und Gewerbeflächen (Bild 6). Der gesamte unterirdische Teil des Bahnhofs mit allen Öffnungen und Zugängen ins Freie hätte die für die Simulation erforderliche Rechenkapazität und den notwendigen Zeitbedarf deutlich gesprengt. Es war darum erforderlich, die Randbedingungen des Modells zu kalibrieren. Dazu wurden die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen im Bahnhofsbereich an verschiedenen Stellen bei aktiver Lüftung und zusätzlich die Strömung im Weinbergtunnel sowie in der Rampe Richtung Bahnhof Altstetten gemessen. Basierend auf den Resultaten der aerodynamischen Messungen konnten die erforderlichen Druckverlustbeiwerte für die Randbedingungen des Simulationsmodells ermittelt werden.

### 3.3.3 Brandsimulationen

Zwei Typen von numerischen Brandsimulationen wurden für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Ereignislüftung angewendet. Mithilfe von zeitlich aufgelösten, transienten

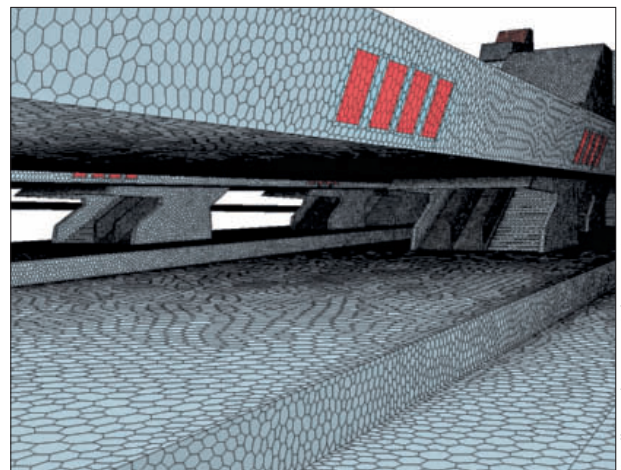
Most of the platform level remained smoke-free during the tests. The smoke tests indicated no spread of smoke into the higher levels while the ventilation system was in operation. Dense smoke was predominantly observed in the roof zone directly above the affected track (Fig. 5).

### 3.3.2 Aerodynamic Measurements and Model Calibration

The aerodynamic measurements were made in order to validate and calibrate the mathematical model for functional certification of the smoke extraction system. The simulation model included the entire Weinberg Tunnel and the gradient toward Altstetten station, the platform level at Löwenstrasse station, all stairways to the mezzanine and shop levels, and part of the passages and commercial areas (Fig. 6). Modelling of the entire underground part of the station, with all openings and access routes to the outside, would have excessively expanded the computing capacity needed for the simulation and also the required time. For this reason, it was necessary to calibrate boundary conditions for the model. For this purpose, air velocities and temperatures in the station area, and also the flow in the Weinberg Tunnel and along the gradient leading to Altstetten station, were measured at various points with the ventilation system in operation. The necessary coefficients of pressure loss needed for the boundary conditions of the simulation model were determined on the basis of the results of this aerodynamic data.

### 3.3.3 Fire Simulations

Two types of numerical fire simulation were used for the proof of proper functioning of the emergency ventilation system. Time-resolved transient one-dimensional simulations [2] made it possible to analyse the piston effect of trains moving in the tunnel. The results of these simulations were utilised as global boundary conditions for the detailed 3D computational fluid dynamics (CFD) simulations [3]. CFD is a method suitable for the analysis of local variations in temperature, air flows, smoke stratification and smoke spread. The



6 CFD-Modell des Bahnhofs Löwenstrasse  
CFD model of Löwenstrasse station

Quelle/credit: Pöyry Schweiz AG

eindimensionalen Simulationen [2] konnte die Kolbenwirkung der fahrenden Züge im Tunnel untersucht werden. Die Resultate dieser Simulationen dienten als globale Randbedingungen für die detaillierten dreidimensionalen Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen [3]. CFD ist ein geeignetes Hilfsmittel, um lokale Variationen der Temperatur, Luftströmungen, Rauchsichtung und -ausbreitung zu untersuchen. Der Brandort wurde gemäss Richtlinie VSWKI [4] als volumetrische Wärme- und Rauchquelle innerhalb eines Doppelstockreisezugwagens modelliert. Die Simulationen zeigten einen leichten, zeitlich begrenzten Rauchübertritt in den brandnächsten Treppenaufgang und das Zwischengeschoss beim Erreichen der maximalen Brandleistung (Bild 7). Der eintretende Rauch wird jedoch durch die aus dem Ladengeschoss nachströmende Frischluft sehr schnell verdünnt und an einer weiteren Ausbreitung gehindert. Eine Beeinträchtigung oder gar Gefährdung der flüchtenden Passagiere oder von Personen im Ladengeschoss wurde zu keiner Zeit festgestellt (Bild 8).

### 3.3.4 Resultate der Nachweisführung

Basierend auf den Resultaten der Warmrauchversuche konnte festgestellt werden, dass das installierte Rauch- und Wärmedetektionssystem richtig funktioniert. Die gesamte automatische Prozesskette von der Detektion über die Alarmierung und das Auslösen/Starten und der Betrieb der Ventilationsanlage erwiesen sich als sicher und gut geplant.

Die aerodynamischen Messungen und die Kalibration des Simulationsmodells konnten Gewissheit geben, dass die Resultate der Brandsimulationen vertrauenswürdig sind und diese als Nachweis für die Funktionstüchtigkeit der Ereignislüftung verwendet werden konnten.

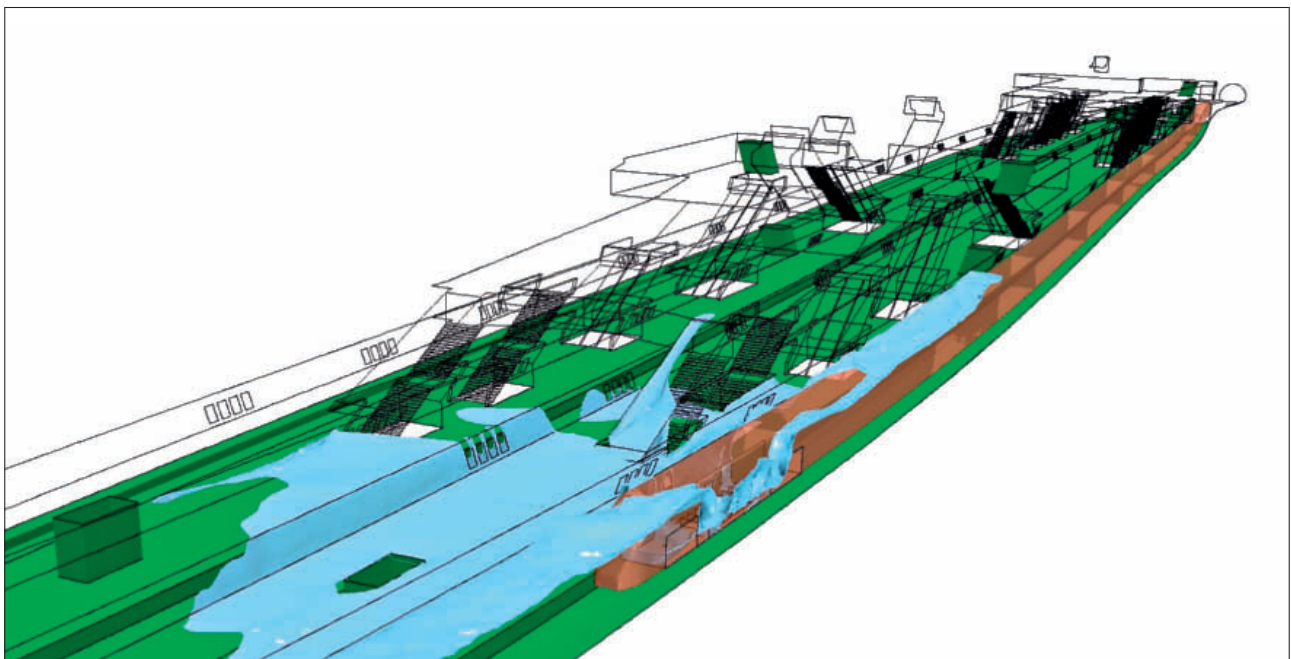
fire site was modelled in accordance with the VSWKI guideline [4] as a volumetric source of heat and smoke within a double-decker passenger carriage. The simulations indicated a slight, temporally limited spread of smoke into the stairway closest to the fire and the mezzanine level when peak heat release rate was reached (Fig. 7). The ingressing smoke is however quickly diluted by the fresh air flowing in from the shop level, and further spread of smoke is prevented. No hindrance or even danger to escaping passengers or persons at shop level was indicated at any time (Fig. 8).

### 3.3.4 Results of Functional Certification

On the basis of the results of the hot smoke tests it was ascertained that the installed smoke and heat detection system functions correctly. The entire automatic process chain, from detection, to alarm tripping and the tripping/starting and operation of the ventilation system was shown to be safe, reliable and well planned.

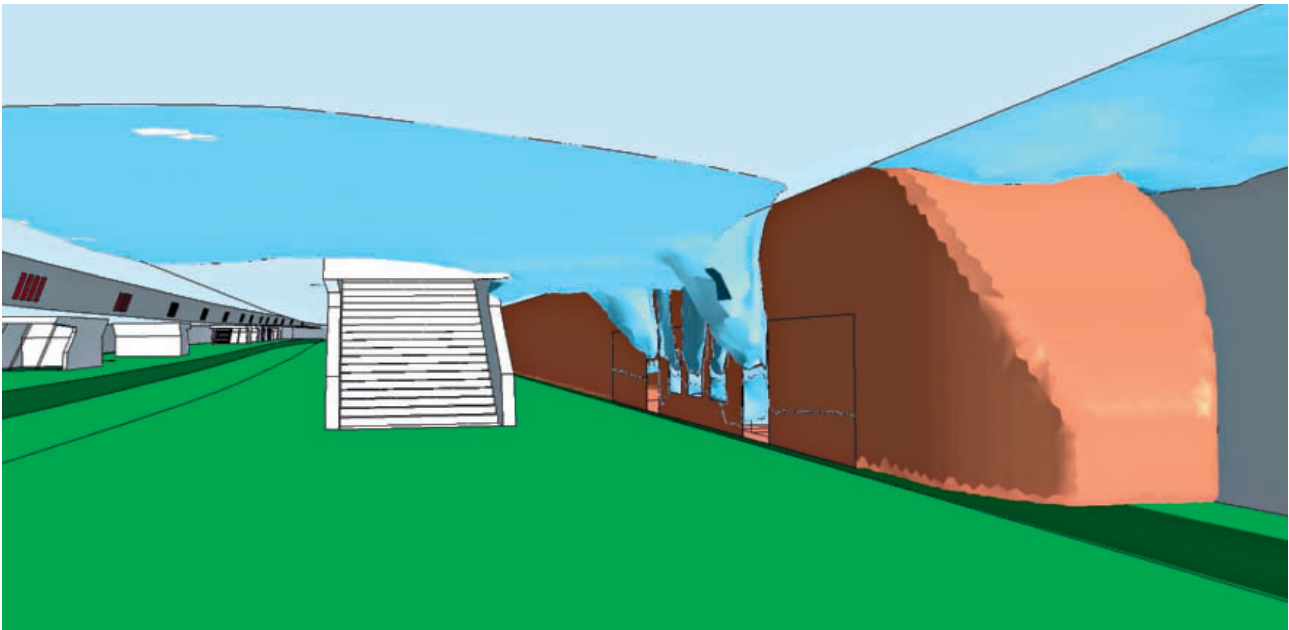
The aerodynamic measurements and the calibration of the simulation model provided the certainty that the results of the fire simulations are dependable and that they could be used as proof of the correct functioning of the emergency ventilation system.

The results of the CFD simulations showed that all escape routes and stairways to the levels above the platform zone remain free of smoke for most of the time for the evacuation process and thus permit passengers to escape successfully and safely. It was also demonstrated that visibility on the platform, and on the mezzanine levels and shop levels, was well above the specified limits throughout the evacuation period.



Quelle/credit: Pöyry Schweiz AG

7 Resultate der Rauchaubreitungssimulationen  
Results of smoke spread simulations



Quelle/credit: Pöry Schweiz AG

#### 8 Fluchtbedingungen auf Perron *Escape conditions on platform*

Die Resultate der CFD Simulationen zeigten, dass alle Fluchtwege und Aufgänge in die über dem Perronbereich liegenden Geschosse für die meiste Zeit des Evakuationsprozesses rauchfrei bleiben und damit eine erfolgreiche, sichere Selbstrettung der Passagiere ermöglichen. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass die Sichtbedingungen während der gesamten Evakuationszeit auf dem Perron- wie auch in den Zwischen- und Ladengeschossen weit über den geforderten Grenzwerten liegen.

#### 4 Schlussbemerkungen

Die DML Zürich ist ein sehr gutes Beispiel für die Beschreibung der Anforderungen und Charakteristiken einer Ereignislüftung in Bahnanlagen. Neben einem ca. 5 km langen Doppelspurtunnel mit einem parallelen Flucht- und Rettungstollen stellt der direkt anschliessende unterirdische Bahnhof eine Herausforderung für die Brandsicherheit der Passagiere und Bahnhofsbenuer dar. Die Ereignislüftung ist für das gesamte Tunnelsystem auf die Gewährleistung von optimalen Selbstrettungsbedingungen ausgelegt.

Die Autoren danken den SBB für die Erlaubnis zur Publikation dieses Referats.

#### 4 Concluding Remarks

The Zurich Cross Rail is an extremely good example to describe the requirements and characteristics of an emergency ventilation system in rail facilities. In addition to an approx. 5 km long double-track tunnel with a parallel escape and rescue tunnel, the directly adjacent underground station presents a challenge for the fire safety of passengers and station users. The emergency ventilation system is designed to ensure optimum escape conditions for the entire tunnel system.

The authors wish here to thank SBB for permission to publish this paper.

#### Literatur/References

- [1] Richtlinie VDI 6019 Blatt 1, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, 2006
- [2] IDA Tunnel, Equa Simulation AB, Schweden
- [3] Star-CCM+ v. 9.04, CD-Adapco Ltd, USA
- [4] Richtlinie VSWKI BT101-04, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen – Teil 4: Ingenieurverfahren zur Bemessung von Entrauchungsanlagen – Grundlagen, 2011

Michael Lierau, Dipl. Masch.-Ing. ETH/MBA GWU, Elkuch Group, Bendern/LI  
 Marcus Römer, Dipl. Oec., M. A., M. Sc., Elkuch Eisenring AG, Jonschwil/CH  
 Luigi De Candido, Masch.-Bautechniker HF, Elkuch Eisenring AG, Jonschwil/CH

# Tunnel-Fluchttüren

## Erfahrungen und Erkenntnisse aus 20 Jahren Tunnelbau

Fluchttüren nehmen bei der Planung der Tunnelausrüstung eine zentrale Rolle ein. Neben Funktionalität und Sicherheit müssen dabei auch Wartung, Unterhalt und Lebenszykluskosten über meist 50 Jahre in Betracht gezogen werden. Ein frühes Verständnis dieser Zusammenhänge ermöglicht Bauherren wie Unternehmern eine erfolgreiche Realisierung von Tunnelprojekten.

# Tunnel Escape Doors

## Findings and Recognitions Based on 20 Years of Tunnelling

Escape doors are a central feature of the design of tunnel equipment. Apart from functionality and safety, servicing and maintenance also have to be taken into consideration, as well as lifecycle costs for a period mostly in excess of 50 years. Early consideration of these interrelationships can help clients and contractors to complete tunnel projects successfully.

### 1 Anforderungen an Tunnel-Fluchttüren

Aufgrund der vielseitigen und hohen Anforderungen im Tunnel nehmen Fluchttüren bei der Planung der Tunnelausrüstung eine zentrale Rolle ein (Tabelle 1). Obwohl der Begriff «Flucht» bereits auf eine Hauptfunktionalität der Tür hin-

### 1 Requirements for Tunnel Escape Doors

Escape doors are a central feature in the design of tunnel equipment (Table 1) due to the diverse and stringent requirements in tunnels. Although the term “escape” already points to a main function of an escape

Betriebszustand Operating status	Funktionen/Anforderungen aus Betriebszuständen Functions/requirements from operating status	Anforderungen unabhängig von Betriebszuständen Requirements independent of the operating status
Bauphase Construction phase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschluss/Öffnung für Lüftungsszenarien</li> <li>• Trennung QS-Innenbereich vom Rest der Baustelle (staubdicht)</li> <li>• Closing/opening for ventilation scenarios</li> <li>• Separating cp inner area from remainder of site (dustproof)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• korrosionsbeständig</li> <li>• wechsellastbeständig</li> <li>• alterungsbeständig</li> <li>• selbstschliessend</li> <li>• montagefreundlich</li> <li>• unterhaltsfreundlich</li> <li>• corrosion-resistant</li> <li>• alternating load-resistant</li> <li>• ageing-resistant</li> <li>• self-closing</li> <li>• easy installation</li> <li>• easy to maintain</li> </ul>
Probetrieb/ Normalbetrieb Trial operation/ Normal operation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennung QS-Innenbereich von der Fahrröhre (staubdicht gegen aggressiven Eisenstaub)</li> <li>• Separating cp inner area from traffic tunnel (dustproof against aggressive iron dust)</li> </ul>	
Unterhaltsbetrieb Maintenance operation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschluss/Öffnung für Lüftungsszenarien</li> <li>• Personensicherheit und Ausrüstungsschutz</li> <li>• Closing/opening for ventilation scenarios</li> <li>• Health and safety and protection of equipment</li> </ul>	
Ereignisfall Brand Fire incident	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandabschottung (verhindert das Übergreifen des Brands auf die Fluchtröhre)</li> <li>• Rauchabschottung</li> <li>• Sealing against fire (prevents fire spreading to the evacuation tube)</li> <li>• Sealing against smoke</li> </ul>	

Quelle/Credit: Elkuch Group

**Tabelle 1** Anforderungen an Tunnel-Fluchttüren

**Table 1** Requirements for tunnel escape doors

## Les portes d'issues de secours dans les tunnels

### Expériences et enseignements de 20 ans de construction souterraine

Le système le plus courant est celui de la porte à battants. A partir d'une différence de pression de 50 Pa, celle-ci ne peut toutefois pas être actionnée avec les 100 N nécessaires sans un système d'entraînement. Les portes va-et-vient asynchrones pallient cet inconvénient, mais dans les tunnels à cloisons minces, elles débordent sur la voie. Lorsque, par ailleurs, la porte doit pouvoir être actionnée à tout moment sans alimentation électrique, ce sont en général des portes coulissantes avec contrepoids qui sont utilisées comme mécanisme de fermeture. En cas d'espace limité, on a recours à des portes accordéon coulissantes ou à des portes indépendantes de la pression. Dans les tunnels suisses, ces aspects ont fait s'imposer les portes coulissantes.

## Porte via di fuga in galleria

### Esperienze e conoscenze dopo 20 anni di costruzione di gallerie

Il sistema più diffuso è la porta a battente. Con la differenza di pressione più di 50Pa la porta a battente non può più essere azionata con la forza richiesta di 100N, senza l'utilizzo di un sistema di azionamento. Le porte va e vieni sono adatte per evitare questo inconveniente, ma sporgono nella carreggiata della galleria. Per usare la porta in qualsiasi caso di pressione entrano in azione le porte scorrevoli con contrappeso per la chiusura. Inoltre, la porta deve essere mossa senza alimentazione.

Se lo spazio è limitato, si possono usare porte pieghevoli oppure porte girevoli e scorrevoli con pressione neutrale. Sotto questi aspetti nelle gallerie svizzere si sono imposte le porte scorrevoli.

weist, deckt der Begriff das effektive Anforderungsspektrum der Fluchttür nur sehr unzureichend ab.

In der Bau- und Betriebsphase des Tunnels dienen die Fluchttüren primär als Schutz respektive Zugang zu den diversen Gebäudeteilen sowie der Sicherstellung der Luft- und Klimakontrolle im Tunnel. Da die Fluchttüren wie etwa die Querschlagtüren im Gotthard-Basistunnel (Bild 1) zu einem sehr frühen Zeitpunkt eingebaut werden, müssen diese einer erhöhten Umgebungsbelastung wie Staub, Dreck, Temperatur und Feuchtigkeit standhalten. Auch Schläge und Stöße als Fremdeinwirkungen durch Dritte können das Sicherheitssystem bereits früh beeinträchtigen. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch auch die ordnungsgemässe Verwendung der Fluchttür. So wurde im Gotthard-Basistunnel bei der Dimensionierung der Querschlagtür generell von zehn Betätigungen pro Jahr ausgegangen, währenddessen in der Rohbauphase über eine Dauer von vier Monaten auf einer einzigen Tür über 10 000 Öffnungszyklen registriert wurden. Dies kann gerade bei komplexeren Türsystemen die Lebensdauer stark beeinträchtigen.

Als Sicherheitssystem muss die Fluchttür im Weiteren auch den gesetzlichen Flucht- und Rettungsanforderungen gerecht werden. Neben vorgeschriebenen Mindestmassen müssen die Türen zudem selbstschliessend sowie über eine definierte Zeit feuerbeständig und rauchdicht sein. Weiterhin dürfen sie während der Fluchtphase nicht blockiert sein und müssen bereits mit einer Bedienkraft von 100 N geöffnet werden können. Massgebend ist hier einerseits die EU-weit geltende Verordnung über die «Technische Spezifikation für die Interoperabilität» (TSI-SRT) des Eisenbahnsystems, welche zum Beispiel für Fluchttüren ein Lichtmass von mindestens 1,4 m x 2,0 m vorschreibt. Andererseits gilt es auch

door, it only inadequately covers the effective range of demands related to it.

During the tunnel construction and operation phases, escape doors primarily serve protective purposes, providing access to various parts of the structure as well as looking after air and climatic control in the tunnel. As the escape doors, for example the cross-passage doors in the Gotthard Base Tunnel (Fig. 1), are installed at an extremely early point in time, they have to resist an increased environmental load in the form of dust, dirt, temperature and moisture. Impacts and blows caused by third parties can affect the safety system at an early stage. At the same time, we must not neglect the proper application of the escape door. In the Gotthard Base Tunnel, for example, the cross-passage doors were designed on the basis of ten actuations per year. However, during the construction phase, more than 10,000 opening cycles were registered for a single door in four months. This can seriously affect the life cycle of complex door systems.



1 Querschlagtür im Gotthard-Basistunnel  
Cross-passage door in the Gotthard Base Tunnel

Quelle/credit: Elkuch Group



Abschlusstyp Types of closure	Funktion Function	Fluchtweg Escape route	Typ Type
Portal Portal	Abgrenzung des Bauwerk bzw. Abschluss ins Freie Delimiting the structure or closure to the open air	ja yes	Tür/Tor Door
Schleuse Air lock	Trennung zwischen Räumen mit unterschiedlichem Druck- und Reinheitsgrad Partition between rooms with different pressure and purity levels	ja yes	Tür/Tor Door
Technikraum Services Room	Abgrenzung zu besonders schützenswerten Einrichtungen Delimiting special installations in need of protection	nein no	Tür Door
Nothaltsstelle Emergency station	Abschluss zwischen Tunnel und direktem Fluchtweg Closure between tunnel and direct escape route	ja yes	Tür Door
Querschlag Cross-passage	Abschluss zwischen Bahntunnel und Querschlag oder anschliessendem Bahntunnel als indirekter Fluchtweg Closure between rail tunnel and cross-passage or adjacent rail tunnel as indirect escape route	ja yes	Tür Door
Sonderkonstruktion Special structure	Spezifische Abschlüsse wie mobiles Tor, Spurwechsellator, Bodentor, Muffenkammerntür etc. Specific closures such as mobile door, crossover door, floor gate, socket chamber door etc.	möglich possible	Tür/Tor Door

Quelle/credit: Elkuch Group

**Table 2** Abschlusstypen für den Gotthard-Basistunnel

**Table 2** Types of closure in the Gotthard Base Tunnel

länder-, betreiber- oder planerspezifische Vorschriften zu berücksichtigen, welche die internationalen Vorgaben zum Teil verschärfen.

Neben diesen Grundanforderungen müssen auch eine Reihe von weiteren Funktionalitäten für den Regelbetrieb erfüllt werden. Massgebend ist hier die üblicherweise im Tunnel verlangte Systemverfügbarkeit von 50 Jahren. Neben der Korrosions- und Alterungsbeständigkeit müssen die Türen den spezifizierten Druckwechsellasten standhalten. In der Bauphase werden diese hauptsächlich durch die Baulüftung bestimmt. In der Betriebsphase resultieren, ausgelöst durch den Verkehr, höhere Werte.

Unter dem Gesichtspunkt der gesamten Lebensdauer muss die Fluchttür unterhalten und gewartet werden können. Das komplette System muss unter Berücksichtigung der Interventionszeiten schnell und einfach montier- und demontierbar sein. Relevante Komponenten müssen leicht zugänglich und wartbar sein, was bei einer kompakten Bauweise im Tunnel nicht immer einfach gelöst werden kann.

## 2 Systemauswahl und Vergleich

Die Wahl des geeigneten Tür- bzw. Tor-Systems hängt neben den Anforderungen und Funktionalitäten auch vom Ort und Abschlusstyp (Table 2) ab. Ein frühes Verständnis dieser Aspekte sowie die Kenntnis über Vor- und Nachteile des jeweiligen Abschlusskonzeptes kann die Systemwahl entscheidend vereinfachen.

Die Drehflügeltür ist – bei entsprechenden Rahmenbedingungen – das wohl am häufigsten eingesetzte Türsystem (Bild 2). Das Türblatt ist dabei über die Bandseite an der Zarge befestigt und wird auf der Schlossseite mit einem Ver-

Furthermore, as a safety system, the escape door must comply with the applicable evacuation and rescue requirements. Apart from prescribed minimum dimensions, doors also have to be self-closing as well as capable of resisting fire and smoke for a certain time. In addition, they must not be blocked during the escape phase and it must be possible to open them with a maximum activation force of 100 N. The applicable regulations are on the one hand the requirements of the Technical Specifications for Interoperability (TSI-SRT) for the rail system, which applies throughout the EU and which for instance prescribes minimum dimensions of 1.4 x 2.0 m for escape doors. On the other hand, there are also national, operator or design-specific regulations, which in some cases are stricter than the international ones.

Alongside these basic requirements, a range of other functions have to be fulfilled for standard operation. Here the customary determining factor for tunnels is that the system will actually be available for 50 years. Apart from corrosion and resistance to age, doors must sustain specific alternating pressure loads. During the construction phase, these are governed mainly by construction ventilation. During the operational phase, higher values apply as a result of traffic.

Seen from the viewpoint of the overall lifecycle, an escape door must be suitable for servicing and maintenance. The complete system must be capable of being assembled and dismantled quickly and straightforwardly taking intervention periods into account. Relevant components must be easily accessible for servicing, which is not always simply resolved considering the compact construction of tunnels.

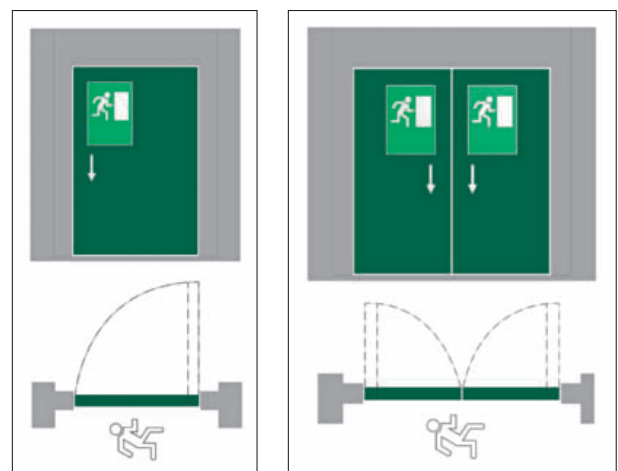
## 2 Choice of System and Comparison

The choice of a suitable door or door system depends on the location and type of closure (Table 2) as well as the

schluss verriegelt. Die Ausführung kann ein- oder zweiflügelig sein, wobei sich Drehflügeltüren nur in eine Richtung öffnen lassen. Ein Vorteil der Drehflügeltür ist zum Beispiel die einfache, kostengünstige Bauweise, welche ein weites Einsatzspektrum zulässt. Drehflügeltüren können als Fluchttüren nur in eine Begehrichtung eingesetzt werden, um sicherzustellen, dass der Personenstrom bei Panik die Türen nicht blockiert. Grösster Nachteil der Drehflügeltür ist jedoch deren Druckabhängigkeit. Liegt in Öffnungsrichtung ein zu hoher Überdruck an, um die Rauchentweichung in den Fluchttunnel zu verhindern, kann die Tür nicht mehr mit den geforderten 100 N geöffnet werden. Bei einer 1,4 m x 2,0 m grossen Fluchttür genügen dafür bereits 36 Pa (Tabelle 3). Zusätzliche mechanisch-elektrische Öffnungshilfen können hier Abhilfe schaffen.

Pendeltüren bauen im Grundsatz gleich wie Drehflügeltüren auf, können aber in beide Richtungen geöffnet werden (Bild 3). Die Ausführung kann ein- oder zweiflügelig sein, wobei die Flügel jeweils in die «Geschlossen»-Stellung zurück «pendeln». Gerade bei genügend grossen Verbindungen zwischen zwei Tunnelröhren kann eine Pendeltür statt zwei Drehflügeltüren eingesetzt werden. Nachteilig wirkt sich jedoch die Druckabhängigkeit aus, welche ein komplexeres Antriebs- und Schliesssystem zum Öffnen und Schliessen der Tür benötigt. Wie bei der Drehflügeltür ist auch hier der Überdruck auf der Fluchtseite begrenzt. Gegenläufige (asynchrone) Pendeltürflügel könnten den Druckausgleich herstellen, sind aber gesetzlich nicht zugelassen, da die Flügel nicht entgegen der Fluchtrichtung öffnen dürfen. Zudem besteht das Risiko, dass grosse Flügel bei sehr schmalen Tunnelquerverbindungen in die Tunnelbahn ragen können. Aus diesem Grund erlaubt das Bundesamt für Strassen (ASTRA) den Einsatz von Pendeltüren als Querschlagtüren nicht in Strassentunneln.

Schiebetüren bestehen aus einem Türblatt, welches oben und unten geführt ist. Die Ausführung kann einflügelig



2 Ein- und zweiflügelige Drehflügeltür  
Single and double-leaf hinged door

functional requirements. Early comprehension of these aspects as well as knowledge of the pros and cons of the given closing concept can make the choice of system a great deal easier.

The hinged door is – given corresponding requirements and conditions – the most commonly used door system (Fig. 2). In this case, the door leaf is attached to the frame at the hinge side and is locked by a bolt at the closing side. There are single and double leaf versions. Hinged doors can only open in one direction. The simple, favourably priced mode of construction, which permits a broad range of applications, represents one advantage of the hinged door. Hinged doors can only be used for one direction of passage in order to ensure that the throng of people does not block the doors if panic breaks out. The greatest disadvantage of the hinged door is, however, that it is affected by pressure. If the positive pressure in the opening direction is too high in order to prevent smoke escaping into the escape tunnel, the door is no

Tür Dimension/Door dimensions			Neue Tür/New door		Gealterte Tür/Aged door	
Höhe Height	Breite Width	Fläche Area	Zulässige Öffnungskraft Permissible opening force	Max. Druckdifferenz Max. pressure difference	Zulässige Öffnungskraft Permissible open- ing force	Max. Druckdifferenz Max. pressure difference
m	m	m <sup>2</sup>	N	Pa	N	Pa
<b>Türen nach DIN 18101/Doors according to DIN 18101</b>						
1,985	0,610	1,211	100	83	120	99
1,985	0,735	1,459	100	69	120	82
1,985	0,860	1,707	100	59	120	70
1,985	0,985	1,955	100	51	120	61
1,985	1,110	2,203	100	45	120	54
<b>Fluchttür nach TSI-SRT/Escape door according to TSI-SRT</b>						
2,000	1,400	2,800	100	36	120	43

Tabelle 3 Druckdifferenz bei maximal zulässiger Öffnungskraft von Drehflügel- und Pendeltüren

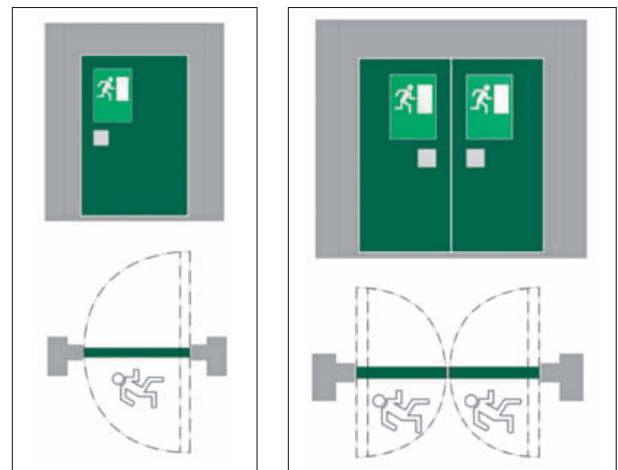
Table 3 Pressure difference and maximum permissible opening force for hinged and swing doors

(Schiebetür; Schwenkschiebetür), zweiflügelig (Gliederschiebetür, Teleskopschiebetür) oder mehrflügelig (Teleskopschiebetür, Faltschiebetür) sein. Die geringe Drucksensibilität ermöglicht den Einsatz bei Raumabschlüssen mit höheren Druckdifferenzen. Nachteilig wirken sich unter Umständen bauseitige Massnahmen zur Aufnahme des Türblattes, der höhere Platzbedarf und zum Teil hohe Gewichte in Abhängigkeit der Druckbelastung aus, welche Antriebssysteme zum Bedienen der Türen erforderlich machen. Einflügelige und zweiflügelige Schiebetüren bestechen durch eine simple und kompakte Bauweise mit verhältnismässig einfachen Dichtkanten (Bild 4). Obwohl Schiebetüren häufig mit Antrieben versehen sind, können diese auch manuell mittels geschickt gewählter Schienenneigung oder Gegengewicht als automatischem, stromlosen Schliessmechanismus den Fluchttüranforderungen genügen.

Die Gliederschiebetür ist aus zwei mit Gelenken verbundenen Türblättern aufgebaut (Bild 5). Durch das Wegklappen eines Flügels kann das System auch bei engen Platzverhältnissen eingebaut werden. Ein automatischer, stromloser Schliessmechanismus mit Gegengewicht kann auch hier zum Einsatz kommen. Nachteilig wirken sich die komplexeren Dichtsysteme in den Gelenken aus. Bei hohen Dichtigkeitsanforderungen muss daher ein zusätzliches Dichtsystem wie zum Beispiel eine aufblasbare Dichtung verwendet werden.

Teleskopschiebetüren können aus zwei oder mehreren Türblättern aufgebaut sein (Bild 6). Die einzelnen Flügel werden beim Öffnen «gestapelt». Je nach Ausführung kann pro Flügel eine Führungsschiene oder ein Schienen-/Weichensystem verwendet werden. Die etwas aufwendigere und schwere Bauweise wird durch die Kompaktheit besonders bei sehr grossen Ausführungen kompensiert.

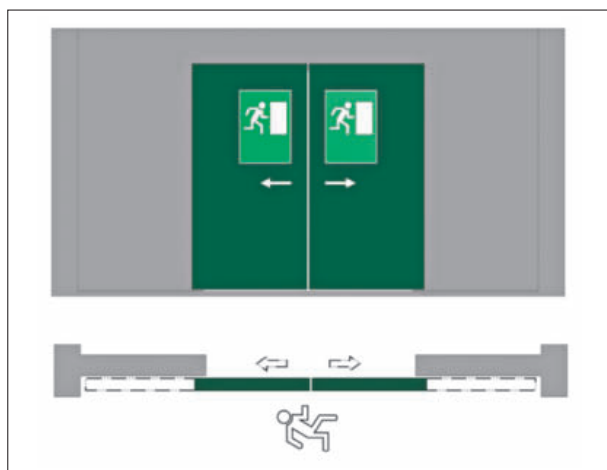
Die druckneutrale Drehschiebetür verbindet die Vorteile der Schiebe- und Drehflügeltür (Bild 7). Der Öffnungsvorgang ist für den Flüchtenden gleich wie bei der Schwenkschiebetür, jedoch ohne einen Drücker betätigen zu müssen. Die Tür



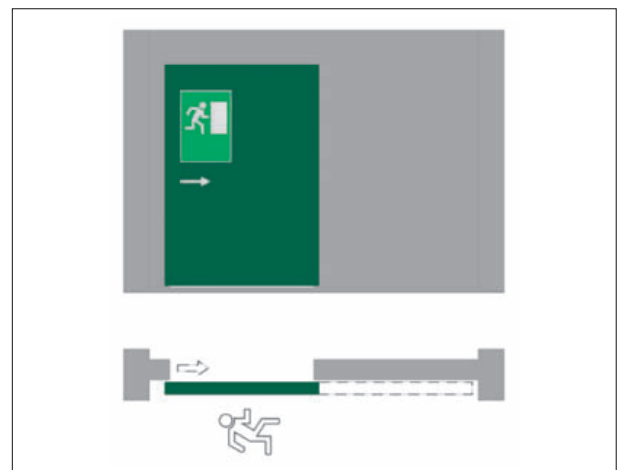
3 Ein- und zweiflügelige Pendeltür  
Single and double-leaf swing door

longer capable of being opened with the required 100 N. As little as 36 Pa of pressure (Table 3) will have this effect on a 1.4 m x 2.0 m escape door. Additional mechanical-electric opening aids can resolve the situation.

Swing doors are essentially mounted in the same fashion as hinged doors but can be opened in both directions (Fig. 3). There are single or double leaf versions, with the leaves always reverting to the closed position. A swing door can be used instead of two hinged doors when the links between two tunnel tubes are sufficiently large. However, the fact that this type of door is sensitive to pressure and therefore requires a complex drive and closing system for operation, is a definitive disadvantage. As in the case of hinged doors, there is a limit to the positive pressure on the escape side. Asynchronous swing doors could provide pressure compensation, but they are not legally permissible as the wings are not allowed to open against the escape direction. In addition, there is the risk that large leaves can protrude into the tunnel track, in case of very narrow tunnel cross-connections. As a result, the Federal Roads Office (FEDRO/ASTRA) does not permit swing doors to



4 Ein- und zweiflügelige Schiebetür  
Single and double-leaf sliding door





5 Gliederschiebetür  
Segmental sliding door



6 Teleskopschiebetür  
Telescopic sliding door

wird lediglich aufgedrückt. Beim Öffnungsvorgang entsteht gleichzeitig eine Dreh- und Schiebewegung. Die Schließung erfolgt automatisch mittels Gegengewicht, wobei die Schliessgeschwindigkeit über einen Dämpfmechanismus geregelt wird. Diese sehr platzsparende Bauweise ermöglicht ebenfalls das Öffnen bei hohen Druckdifferenzen. Zudem eignet sich diese Tür sehr gut als barrierefreie Lösung.

Schwenkschiebetüren zeichnen sich durch den Drehpunkt in den Achsen der Türblätter aus (Bild 8). Da sich dieser in der Raummitte befindet, benötigt dieses ansonsten einfache System sehr viel Platz.

Die Karussell- oder Drehtür besteht aus zwei oder mehreren Türflügeln, welche an einer vertikalen Mittelachse befestigt sind, und dreht sich in einem runden Gehäuse. Aufgrund der Beschaffenheit erlaubt die Tür den Durchgang von beiden Seiten gleichzeitig. Da die Karusselltür druckneutral funktioniert, kann sie auch als Schleuse eingesetzt werden. Nachteilig wirkt sich vor allem die platzraubende Bauweise aus. Ausserdem kann sie blockieren, wenn Flüchtende auf beiden Seiten passieren wollen.

Das Rolltor besteht aus einer Vielzahl von horizontalen Türflügeln oder Lamellen, welche auf einer horizontalen Welle auf- respektive abgerollt werden. Dieses sehr kompakte und schnell öffnende System kann sicher vor Fremdeinwirkungen über der Türöffnung angebracht werden. Aufgrund der vielen Verbindungsstellen der Lamellen eignen sich Rolltore wenig für dichtende Funktionen. Auch empfiehlt es sich, Rolltore nicht als Abschluss auf Hauptfluchtwegen zu installieren, denn ihr Öffnungsmechanismus ist im Fluchtfall nicht sofort zu erkennen.

### 3 Lebenszyklusbetrachtung

Neben den technischen Aspekten muss auch der Alterung des Systems Rechnung getragen werden. Gerade die Gewährleistung des Türsystems über eine übliche Lebensdauer

be integriert in road tunnels for the use in cross-passages.

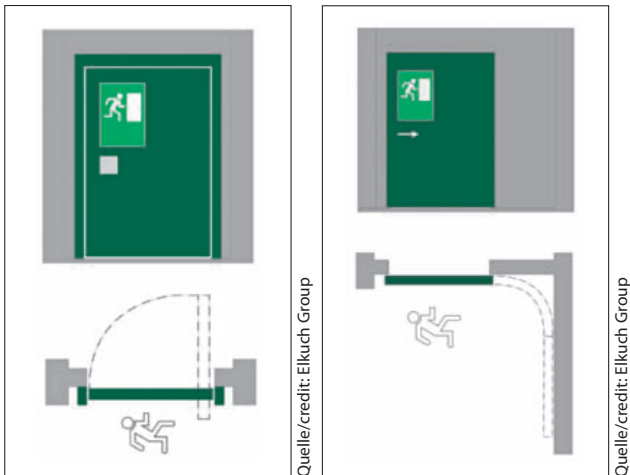
Sliding doors consist of a door leaf, which is guided at the top and bottom. There are various versions: single (sliding door; hinged sliding door), double (segmental sliding door, telescopic sliding door) or multi-leaf (telescopic sliding door, folding door). Their low pressure sensitivity enables them to be used for structures with high pressure differences. As disadvantages could be considered, measures required

on site to accommodate the door leaf, the greater space needed and in some cases, heavy weights, as mandated by lateral pressure difference, call for a drive system to operate the door. Single-leaf and double-leaf sliding doors stand out by dint of their simple and compact manner of construction with relatively straightforward sealing edges (Fig. 4). Although sliding doors are frequently provided with drive units, they can also be moved manually by means of a skillfully selected guide rail inclination or a counterweight forming an automatic, non-electric closing mechanism that satisfies escape door requirements.

A segmental sliding door consists of two door leaves connected by hinges (Fig. 5). The system can be installed in constricted space conditions by folding away one leaf. An automatic, non-electrical closing mechanism with counterweight can also be used in this case. The more complex sealing systems in the hinges exert an unfavourable influence. Should a high sealing capacity be required, an additional sealing system must be used, for instance in the form of an inflatable seal.

Telescopic sliding doors can comprise two or more door leaves (Fig. 6). The individual leaves are "stacked" when opened. Depending on the version, a separate guide rail or a rail/switch system can be used for each leaf. The rather more complicated and heavy manner of construction is compensated by their compactness, particularly where very large models are concerned.

The pressure-neutral swivel-sliding door combines the advantages of the sliding door and the hinged door (Fig. 7). The opening procedure is the same for those escaping as in the case of the hinged sliding door, however, without having to operate a door lever. The door is merely pushed open. The opening procedure results in a simultaneous turning and sliding movement. The door is closed automatically by a counterweight, with the closing speed regulated by means of a dampening mechanism. This extremely space-saving



**7** Druckneutrale Dreh-schiebetür  
Pressure-neutral swivel-sliding door

**8** Schwenkschiebetür  
Roller-guided sliding door

von 50 Jahren stellt eine grosse Herausforderung dar. Eine massgebende Rolle spielen dabei Temperatur und Feuchtigkeit. Diese liegen im Gotthard-Basistunnel zwischen  $-15^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$  bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von bis zu 90%. Gerade in Anbetracht dieser Umgebungsbedingungen sollten Türmaterialien in betriebsnahen Orten aus hochwertigem Material gefertigt werden. Bei Metallstrukturen bewähren sich rostfreie Stähle. Verzinkte Oberflächen bieten zwar ebenfalls guten Schutz; dieser kann aber durch Staub, Steinschlag und andere Fremdeinwirkungen beschädigt werden, sodass das Grundmaterial korrodiert. Auch Bauteile und Betriebsmittel wie Öle und Fette sollten dauerbeständig sein, um Alterungsschäden wie Ablagerungen und Ausscheidungen zu verhindern.

Die grösste Beanspruchung der Fluchttüren entsteht aber durch die Druckwechselbelastung aus dem Zugverkehr im Tunnel. Je nach Länge und Durchmesser des Tunnels können Wechsellasten von über  $\pm 10$  kPa entstehen. Im Falle des Gotthard-Basistunnels wurden als Dimensionierungskriterium  $\pm 20$  kPa definiert. Diese hohen Druckbelastungen werden hauptsächlich durch den Ein- und Austritt des Zuges in den respektive aus dem Tunnel verursacht. Die dabei entstehende Druckstosswelle läuft durch den Tunnel und wird am Tunnelausgang reflektiert. Die dabei entstehenden Wellenüberlagerungen führen so zu langsam abschwingenden Druckwechselbelastungen. Geht man von einem «mittleren SBB-Tunnel» mit täglich 113 Zügen an 360 Tagen im Jahr und vier relevanten Nachschwingungen aus, erhält man über 8 Mio. Lastwechsel im Jahr. Diese müssen bei der Dimensionierung für das gesamte Türsystem über die ganze Lebensdauer berücksichtigt werden. Im Vergleich dazu wurden im Lötschberg wie im Gotthard-Basistunnel 2 Mio. Lastzyklen als Dimensionierungsmass vorgegeben (siehe 4 «Erfahrungen aus dem Schweizer Tunnelbau für zukünftige Projekte»).

manner of construction enables doors to be opened even under high pressure differences. This type of door is also very effective as a barrier-free solution.

Roller-guided sliding doors are characterized by a pivot point in the axles of the door leaves (Fig. 8). As this is located in the centre of the room, this in other respects simple system needs a lot of space.

The carousel or revolving door comprises two or more door leaves, attached to a vertical middle axis turning within a round enclosure. Due to its nature, this door allows passage through both sides at the same time. As the carousel door works in a pressure-neutral way, it can also be used as an air lock. The large amount of required space is a considerable disadvantage.

The roller door or sectional overhead door consists of a large number of horizontal slats, which are rolled up and down on a horizontal shaft. This highly compact and rapidly opening system can be safely installed above the door opening, safe from any intrusion. Owing to the many joints between the slats, roller doors are less suitable for sealing functions. It is also advisable not to install roller doors within main escape routes as their opening mechanism cannot be immediately recognized in case of evacuation.

### 3 Lifecycle Considerations

Apart from the technical aspects, attention must be paid to how the system ages. To guarantee a door system over a conventional lifecycle of 50 years represents a major challenge. Temperature and moisture play a decisive role in this regard. In the Gotthard Base Tunnel, temperatures lie between  $-15^{\circ}\text{C}$  and  $+40^{\circ}\text{C}$ , with relative air humidity of up to 90%. It is advisable to use high grade materials for door components in near operation locations. As far as metal structures are concerned, stainless steels have proved their worth. Galvanized surfaces admittedly also provide good protection but can be damaged by dust, rockfall and other outside influences so that the base material corrodes. Component parts and resources such as oils and lubricants must be sustainable in order to prevent indications of ageing such as deposits and precipitations.

The greatest strain on escape doors, however, results from the alternating pressure loading from trains passing in the tunnel. Depending on the length and diameter of the tunnel, alternating loads in excess of  $\pm 10$  kPa can result. In the case of the Gotthard Base Tunnel  $\pm 20$  kPa was defined as the design criterion. These high pressure loads are mainly caused by trains entering or exiting the tunnel. The resultant pressure impulse wave runs throughout the tunnel and is reflected at the tunnel exit. The resulting overlaying waves cause gradually subsiding alternating pressure loads. If we consider an average SBB tunnel with 113 trains per day on 360 days per annum and four relevant post-oscillations, this

Im Zusammenhang mit der Wechselbelastung steht auch der Staub im Mittelpunkt der Lebenszyklusbetrachtung. Aufgrund der anhaltenden Saug-Pump-Bewegung im Tunnel lagert sich der feucht-klebrige Staub überall ab. Besonders bei elektrischen Komponenten kann dies zu unerwünschten Kurzschlüssen und Ausfällen dieser Bestandteile führen, welche den Tunnelbetrieb wesentlich beeinträchtigen können.

Unter diesen Einflüssen ist die regelmässige Wartung und der Unterhalt der Systeme ein wichtiger Faktor zur Sicherung der gestellten Anforderungen und geforderten Qualität. Neben dauerhaften Bauteilen muss eine rasche Zugänglichkeit und Austauschbarkeit von Komponenten gewährleistet werden. Gerade bei langen Tunneln kann die Anfahrt zum Arbeitsort einen wesentlichen Teil der Wartungsschicht in Anspruch nehmen, sodass für die eigentliche Wartung meist nur vier bis fünf Stunden bleiben. Die örtlich bedingten sehr kompakten Systeme stehen hier im Widerspruch. Abhilfe schaffen Schnellverschlüsse und intelligente Austauschkonzepte für Schlüsselkomponenten, Hilfsaggregate und Wartungseinheiten.

### 4 Erfahrungen aus dem Schweizer Tunnelbau für zukünftige Projekte

Rückblickend auf mehrere Jahrzehnte Tunnelbau in der Schweiz stellt man eine Vielfaltigkeit bei der Realisierung

results in more than 8 million alternating load cycles per year. These have to be considered for the entire lifecycle for the design of the complete door system. In comparison with this, in the Loetschberg and Gotthard Base Tunnels, 2 million load cycles were determined as the design standard (see 4 “Experience from Swiss Tunnelling for Future Projects”).

When contemplating the lifecycle, dust is also imperative in conjunction with alternating loads taking dust into consideration. On account of the continuous suction and pumping effect in the tunnel, moist and sticky dust is deposited everywhere. This can lead to unwanted short-circuits and outages particularly affecting electric components, which can considerably affect tunnel operation.

Given these influences, regular maintenance and servicing of the system is essential to safeguard the specified requirements and quality. In addition to lasting components, speedy accessibility and replacement of parts must be ensured. Particularly in the case of long tunnels, travelling to the location can represent a substantial part of the maintenance shift so that only some four to five hours are available for the actual maintenance work itself. Location-mandated very compact systems represent a contradiction here. Quick-release fixtures and intelligent replacement concepts for key components, ancillary units and service units provide the answer.



9 Querschlagtür im Lötschberg-Basistunnel  
Cross-passage door in the Loetschberg Base Tunnel

Quelle/credit: Elkuch Group



Quelle/credit: Elkuch Eisenring AG

**10** Druck-Wechselast-Prüfstand im Versuchsstollen Hagerbach  
Pressure-alternating load test rig in the Hagerbach Test Gallery

von Projekten fest. Auch Fluchttüren sind davon nicht ausgenommen. Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist die enge Zusammenarbeit zwischen Bauherren, Betreiber und Unternehmern. Bereits in einem frühen Stadium des Projektes können dabei Lüftungs- sowie Flucht- und Rettungskonzepte abgestimmt werden. Bei den Fluchttüren hat sich dabei in der Schweiz das System der Schiebetür (Bild 9) als Hauptfluchttür zwischen Fahrbahn und Fluchtstollen etabliert. Die Gründe liegen einerseits in der Anforderung, dass die Türen jederzeit geöffnet und geschlossen werden können. Dies muss insbesondere in Situationen gewährleistet sein, in der die Notbelüftung im Brandfall eine Druckdifferenz zwischen Fluchtstollen und Fahrbahn generiert. Andererseits wird mit der Schiebetür verhindert, dass der Flügel einer Dreh- oder Pendeltür in die Fahrbahn ragen und zu Unfällen führen kann. Die Fluchttüren in der Schweiz sind aus rostfreiem Material (V4 A, zum Beispiel 1.4404) gefertigt und entsprechen im Bahnbereich der Feuerwiderstandsklasse E 90 und im Strassenbereich der Klasse E 30.

Unter Berücksichtigung des Brandschutzes und der damit gebotenen Sicherheit rückt die Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit des Systems für einen möglichst störungsfreien Betrieb in den Vordergrund. Ein wesentliches Merkmal

#### 4 Experience from Swiss Tunnelling for Future Projects

Looking back on several decades of tunnelling in Switzerland, diversity is the striking feature of completed projects, and escape doors are no exception in this respect. One of the most important conclusions is the need for close collaboration among owners oder stakeholders, operators and contractors. Towards this end, ventilation as well as escape and rescue concepts can be harmonized at an early stage of the project. As far as escape doors are concerned, in Switzerland the sliding door system (Fig. 9) has established itself as the main emergency door between the track and evacuation tunnel. The reasons are to be found on the one hand in the demand that doors can be opened and closed at any time, especially in situations where the emergency ventilation in the event of fire generates a pressure difference between the evacuation tunnel and the track. On the other hand, the use of sliding doors avoids the leaf of a revolving or hinged door protruding into the track thus leading to accidents. Escape doors in Switzerland are made of stainless material (V4 A, for example 1.4404) and comply with fire resistance class E 90 for railways and class E 30 for roads.

Taking fire protection and the related safety demands into consideration, the functionality of the system and the sus-

dazu bildet hier die realitätsnahe Erfassung der Wechselbelastung. Wurde in der Vergangenheit hauptsächlich über das Lastkumulativ ausgelegt, sollte die Dauerbeständigkeit vor allem über die Lastspitze, also die Dauer und Intensität der Druckwelle, dimensioniert werden. Die immer verfeinerten Drucksimulationsprogramme sowie Messwerte aus den verschiedenen Tunneln ermöglichen mittlerweile sehr präzise Angaben für die Dimensionierung.

Hinsichtlich dieser hohen Dauerbelastung wird derzeit ein Versuchslabor mit einem Druck-Wechselast-Prüfstand im Versuchsstollen Hagerbach eingerichtet (Bild 10). Damit soll das Langzeitverhalten von Bauteilen in einem realen Tunnelumfeld erforscht werden.

Auch der Staubbelastung muss mehr Beachtung geschenkt werden, um Systemausfälle auf elektrischen Komponenten zu verhindern. Mögliche Ansätze sind ein ausgeklügeltes Filter-Lüftungskonzept, effizientere Dichtungssysteme auf Türen oder Schaltschränken oder aber die Verlagerung der elektrischen Systeme in einen separaten, kontrollierten Bereich. Im Grundsatz sollte aber das Motto einer möglichst einfachen Lösung umgesetzt werden.

Einfache technische Lösungen müssen auch im Zusammenhang mit elektrischen Komponenten angestrebt werden. Gerade bei grossen Bauwerken mit einer langen Lebensdauer können defekte Sensoren, Antriebe und Regler die Zuverlässigkeit beeinträchtigen und den Wartungsaufwand ins Unermessliche steigen lassen.

Zukünftig ist mit einer Verschärfung der Fluchtanforderungen unter Berücksichtigung von Behinderten, Betagten und Kindern zu rechnen. Besonders in Anbetracht einer alternden Bevölkerung ist es erforderlich, Fluchttüren auch rollstuhlgerecht auszustatten, damit sie mit geringstem Kraftaufwand sicher benutzt werden können.

### 5 Schlussfolgerung

Die Anforderungen an Fluchttüren in Tunneln sind vielseitig und anspruchsvoll. Neben der hohen technischen Systemverfügbarkeit über mehrere Jahrzehnte stellt auch die Abstimmung der Lüftungs- sowie Flucht- und Rettungskonzepte eine Herausforderung dar. Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Projektrealisierung sind erfahrungsgemäss:

- eine frühzeitige technische und betriebswirtschaftliche Betrachtung und Planung der Fluchttüren über den gesamten Lebenszyklus unter Einbindung der jeweiligen Experten;
- die Verwendung von hochwertigen Materialien, welche den anspruchsvollen Umgebungsbedingungen möglichst kompromisslos und dauerhaft genügen;
- die Anwendung von möglichst einfachen Konzepten und Systemen, welche die Komplexität der Lösung kontrollierbar halten und durch regelmässige Wartung und Instandhaltung den Stand der Technik auch über mehrere Jahrzehnte zeitgemäss gewährleisten.

tainability of unimpeded operation are the most important factors. An important feature in this respect is to represent alternating loading as realistically as possible. Admittedly, durability has mainly been derived from the cumulative loading in the past, but now should above all be designed in relation to the peak loading, or in other words the duration and intensity of the pressure wave. More refined pressure simulation programmes are increasingly available as well as measured data from various tunnels, which has now enabled extremely precise design parameters.

As far as the high permanent loading is concerned, a test lab with a pressure-alternating load test rig is now being set up at the Hagerbach Test Gallery (Fig. 10). In this way, long-term behaviour of components can be researched in a real tunnel environment.

Dust nuisance must also be paid more attention to avoid system outages affecting electric components. Possible approaches are an intricate filter-ventilation concept, more efficient sealing systems on doors or switch cabinets or simply relocating electric systems to a separate, controlled area. A solution that is as straightforward as possible should be the slogan here.

Simple technical solutions must also be the objective for electric components. Defective sensors, drives and control units can affect reliability and cause the need for maintenance to increase out of all proportion, particularly in the case of major structures with a long lifecycle.

In future, it can be reckoned that escape requirements will be made even stricter when the disabled, senior citizens and children are taken into account. In view of an ageing population, it is necessary to make escape doors accessible for wheelchair users, ensuring they can be safely operated with a minimum of effort.

### 5 Conclusion

The demands posed on escape doors in tunnels are manifold and sophisticated. In addition to the high technical system availability over a number of decades, coordinating the ventilation as well as the escape and rescue concepts represents a challenge. Experience has shown that accomplishment of a successful project depends on the following key factors:

- Technical and economic review and design of escape doors as early as possible for the entire lifecycle including expert advice;
- Use of high-grade materials, which comply with the complex surrounding conditions as satisfactorily and sustainably as possible;
- Application of concepts and systems, which are as straightforward as possible. They must ensure that the complexity of the solution can be controlled and comply with the state of the art for decades with regular servicing and maintenance.



*Yves Rödiger, Betr. oec. FHSG, EMBE HSG, GIFAS-ELECTRIC GmbH, Rheineck/CH*

# Fluchtwegbeleuchtungen in Strassen- und Bahntunneln

Aktuelle Praxis, Technik und Zukunft aus Sicht eines Schweizer Herstellers

Als Folge von schweren Unfällen mit Tunnelbränden in den Jahren 1999 und 2001 wurden in europäischen Strassen- und Bahntunneln die Sicherheitsvorschriften überarbeitet und verschärft. Ein Aspekt daraus waren geänderte Vorgaben für die Signalisierung und Beleuchtung, in denen die optischen Führungsbeleuchtungen auf den Strassenbanketten und LED-Sicherheits-Handlaufsysteme (HRS) in den Bahntunneln ihren Ursprung haben.

## Escape Route Lighting in Road and Rail Tunnels

Current Practice, Technology and Future Challenges from the Viewpoint of a Swiss Manufacturer

As a consequence of serious accidents with tunnel fires in 1999 and 2001, the safety regulations for European road and rail tunnels were revised and made more stringent. One aspect was changed requirements for signalling and lighting, leading to the introduction of optical guidance lighting on road shoulders and LED safety handrail systems (HRS) in rail tunnels.

### 1 Einleitung

Seit den verheerenden Brandunglücken von 1999 im Mont-Blanc-Tunnel und 2001 im Gotthard-Strassentunnel wurden auf europäischer Gesetzesebene erhebliche Verschärfungen und Änderungen bezüglich Tunnelsicherheit eingeführt. Im Sinne der Unfallverhütung wurde gefordert, dass die Strassen- und Bahntunnel mit zusätzlichen, verbesserten Beleuchtungselementen ausgerüstet werden. Im folgenden Beitrag wird auf die Funktion dieser Systeme eingegangen, werden die zwei Referenzobjekte Tunnel Entlisberg und Durchmesserlinie Zürich (DML) grob erläutert und ein Ausblick auf mögliche Trends und Entwicklungen gegeben.

Als ein Element dieser lichttechnischen Verbesserungen wurde einerseits in den Strassentunneln neu eine optische Führungsbeleuchtung an den Strassenbanketten vorgesehen, das heisst, auf dem Bankett respektive an der Kante der Fahrspuren in Strassentunneln wurden einzelne, aktiv leuchtende Lichtpunkte vorgeschrieben. Diese sollen den Kurvenverlauf visuell unterstützen und dem Fahrer ein erhöhtes Sicherheitsgefühl vermitteln.

In den Bahntunneln andererseits erfolgte die Vorgabe, dass die Tunnel über beleuchtete Sicherheits-Handläufe verfügen; anfangs mittels Schutzrohr- oder Einzelpunktleuchten an den Wänden, zunehmend auch mithilfe von durchgängigen Handlaufbeleuchtungen mit Licht emittierenden Di-

### 1 Introduction

Since the disastrous fires of 1999 in the Mont Blanc Tunnel and 2001 in the Gotthard road tunnel, European lawmakers have considerably tightened up and revised the regulations applicable to tunnel safety. In order to prevent accidents, road and rail tunnels have to be fitted with additional, improved lighting elements. The following article explains the function of these systems, briefly describes two reference projects, the Entlisberg Tunnel and the Zurich Cross-City Link (CCL), and offers an outlook with possible trends and new developments.

One element of these new lighting improvements is the provision in road tunnels of a new optical guidance lighting in road shoulders, with individual actively lit points being specified on the shoulder or at the edge of the lane. These are intended to visually emphasise the curve of the road and provide road users with an additional feeling of safety.

In rail tunnels, on the other hand, there is a requirement that the tunnel has illuminated safety handrails, initially with conduits or isolated lights on the walls, but increasingly with continuous handrail lighting with light-emitting diodes (LED) integrated into the handrail itself. These are intended to provide a minimum lighting of the escape route in addition to the handrail with its basic function in order that adequate visibility is ensured in case of evacuation. This equip-

## Éclairage des voies d'évacuation dans les tunnels routiers et ferroviaires

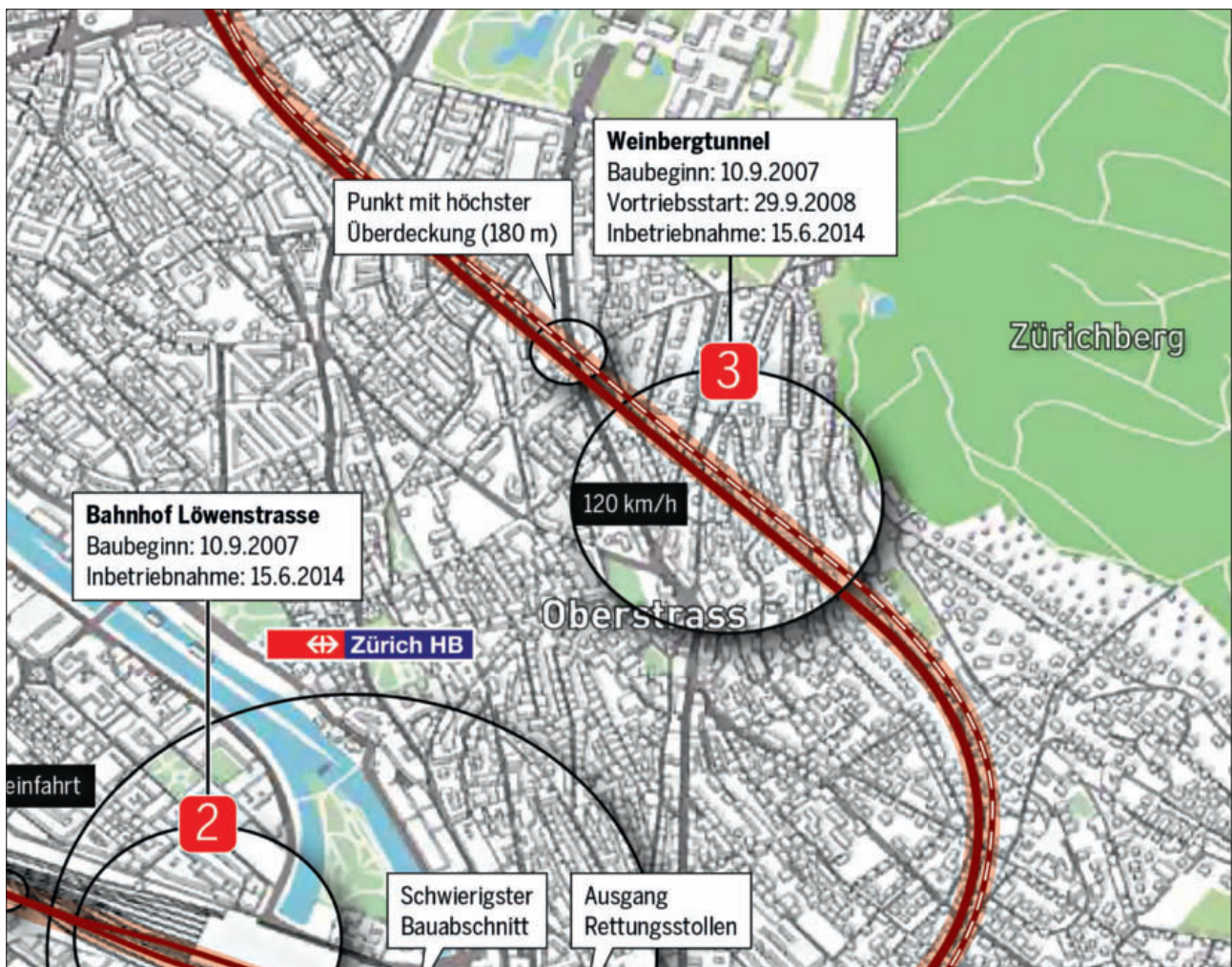
Pratique actuelle, technique et avenir dans l'optique d'un fabricant suisse

Dans le domaine du balisage optique lumineux, le tunnel Entlisberg (Zurich) a pu être modernisé en 2015. En six nuits, 2500 m de câbles ont été posés, 184 nouveaux modules installés, livrant une installation prête à fonctionner. Les post-équipements de ce genre présentent des caractéristiques typiques du projet en matière d'exécution, de technique et de délais. L'article se réfère à l'exemple pratique du projet de la ligne diamétrale de la nouvelle gare souterraine de Zurich pour présenter une main courante à éclairage LED. Ici, la technique LED n'est qu'une partie du tout, ce sont surtout les paramètres souhaités et/ou exigés de l'ensemble de l'équipement en mains courantes qui sont déterminants.

## Illuminazione delle vie di fuga nelle gallerie stradali e ferroviarie

Pratica attualmente applicata, tecnica e futuro dal punto di vista di un produttore svizzero

Nel campo dell'illuminazione della guida ottica, nel 2015 è stata attrezzata la galleria Entlisberg (Zurigo). Per fare ciò in sei notti sono stati posati 2500 m di cavo, montati 184 nuovi moduli e l'impianto è stato consegnato pronto alla messa in esercizio. Questi ammodernamenti hanno il tipico carattere progettuale in termini di modalità d'esecuzione, tecnica e tempi. Come esempio pratico per un corrimano illuminato a LED, facciamo riferimento al progetto del passante (DML) nella nuova stazione sotterranea di Zurigo. Qui la vera e propria tecnica LED è solo una parte del tutto, decisivi sono prima di tutto i desiderati e/o richiesti parametri di sistema dell'intero impianto corrimano.



1 DML Zürich  
Zurich Cross-City Link

oden (LED), welche im Handlauf selbst integriert sind. Diese sollen für eine Mindestausleuchtung der Fluchtwege nebst Handlauf mit seinen Grundfunktionen an sich sorgen, damit in einem Evakuierungsfall eine entsprechende Sicht gewährleistet ist. Diese Ausrüstungen wurden ab 1999 auch in der Schweiz angewendet und sind in ihren Grundfunktionen bis heute gültiger Standard.

Der folgende Artikel beleuchtet aus der Sicht eines Schweizer Herstellers solcher Lichtelemente den aktuellen Stand, die sich verändernden Kundenanforderungen sowie die technische Innovation und zeigt mögliche künftige Entwicklungen und Wege auf. Als konkrete und anschauliche Praxisbeispiele wurden die DML (Bild 1) für einen Bahntunnel und der Tunnel Entlisberg mit einer optischen Führungsbeleuchtung in einem Strassentunnel ausgewählt.

## 2 Produkt- und Projektbeschreibungen

### 2.1 Optische Führungsbeleuchtung in Strassentunneln

Optische Führungsbeleuchtungen dienen auf Autobahnen und speziell in Tunneln einer markant verbesserten Erkennung des Fahrbahnverlaufs. Insbesondere bei Einfahrten, diffusen Lichtverhältnissen, witterungsbedingten Wechseln sowie im Tag-/Nachtverlauf tragen die Signaleinheiten in hohem Masse zur Sicherheit auf der Strasse und speziell in Tunneln bei (Bild 2).

Optische Führungsbeleuchtungen unterstützen im Idealfall die baulichen Gegebenheiten, zeigen den Verkehrsteilnehmern visuell so weit wie möglich den vorgegebenen Streckenverlauf und vermitteln ein Sicherheitsgefühl. Es handelt sich hier um die neueste Entwicklung auf diesem Gebiet, welches durch sogenannte passive Markierungen wie zum Beispiel Reflektoren, «Katzenaugen» und Glas-Marker schon etliche Evolutionen durchlaufen hat. Der grösste Vorteil der aktiven Beleuchtung ist sicherlich, dass der Lichtaustritt gleichmässig verteilt wird. Auch natürliche Abnutzung, Verschmutzung, unterschiedliche Lichtverhältnisse oder unterschiedlich einstrahlendes Licht haben keinen grossen Einfluss. Das aktive Licht der Führungsbeleuchtung definiert die Umgebung und ist von externen Faktoren weitgehend unabhängig. Der Nachteil ist der grössere Montageaufwand, und somit fallen auch höhere Kosten im Vergleich zu einer passiven Beleuchtung an.

Im Bereich der Führungsbeleuchtungen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Produkten, Anbietern und Funktionen. So gibt es überfahrbare Versionen, solche aus Edelstahl, verschiedene Einspeisungsmöglichkeiten oder auch Lichtfarben. In der Schweiz wird eine einfache Signaleinheit mit weisser Lichtfarbe bevorzugt (Bild 3).

Die Lebensdauer einer optischen Führungsbeleuchtung beträgt für eine Gesamtanlage ca. zehn bis zwölf Jahre, wobei die Signaleinheiten häufig auch aufgrund von mechani-

ment has also been in use in Switzerland since 1999 and is still the current standard in its basic functions.

The following article explains the current situation, the changing customer requirements and the technical developments from the view of a Swiss manufacturer of such lighting elements and describes some possible future developments and routes. To provide definite and clearly understandable practical examples, the CCL (Fig. 1) as a rail tunnel and the Entlisberg Tunnel with an optical guide lighting are selected as examples.

## 2 Product and Project Descriptions

### 2.1 Optical Guidance Lighting in Road Tunnels

Optical guidance lighting serves on autobahns and especially in tunnels to enable noticeably better recognition of the course of the carriageway. Particularly when entering a tunnel, under diffuse lighting conditions, with changes due to weather and day/night transitions, these signal units make a great contribution to safety, especially in tunnels (Fig. 2).

Ideally, optical guidance lighting systems support the features of the structure, visually show the road users the given course of the road as well as possible and give a feeling of safety. This is the latest development in this field, which has already experienced considerable development, for example reflectors, "cat's eyes", and glass markers. The greatest advantage of active lighting is certainly that the light emission is uniformly distributed. Natural wear, dirt, different lighting conditions or different entrance of light from outside do not have a great effect. Active light for guidance lighting defines the environment and is largely independent of external factors. The disadvantage is the increased amount of installation work and thus higher costs in comparison to passive lighting.

In the field of guidance lighting, there are numerous product, suppliers and functions. There are, for example, versions



2 Tunnel Berner Jura  
Berner Jura Tunnel

Quelle/Credit: gifas.ch

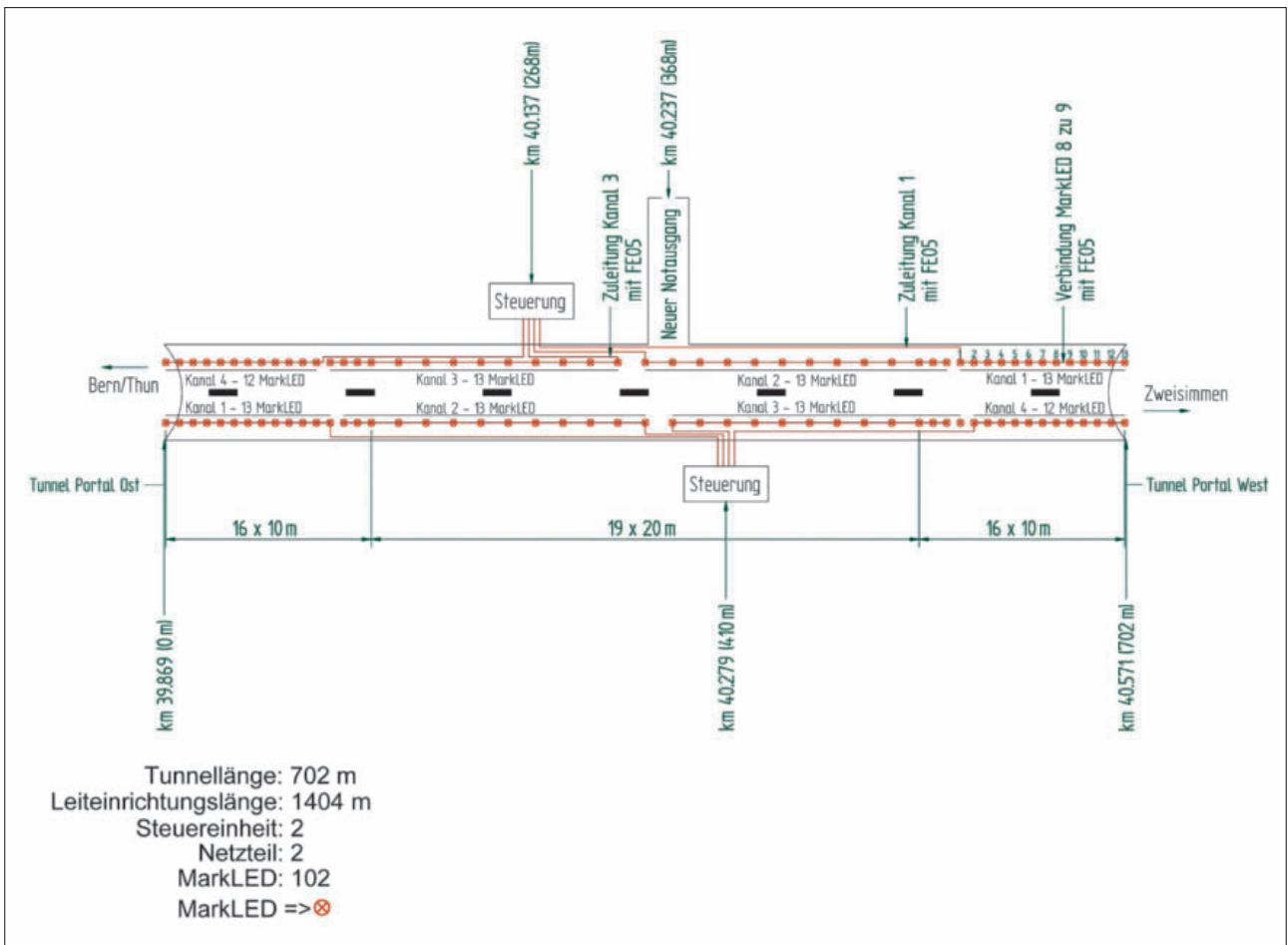


Quelle/credit: gifas.ch

3 Signaleinheit MarkLED – Bankettbeleuchtung  
Signal unit MarkLED – shoulder lighting

schon Beschädigungen wie Unfällen oder bei Schneeräumungen (Einsatz Schneepflug) schon frühzeitig ersetzt werden müssen.

that can be installed in the road surface, of stainless steel, various supply possibilities or colours. In Switzerland, a simple signal unit with white light is preferred (Fig. 3).



Quelle/credit: gifas.ch

4 Prinzip Verkabelung – Einspeisung  
Principle of cabling – power supply

Ein- oder beidseitig mit sechs LEDs/ Single or double-side with six LEDs	
Lichtfarbe/Light color	weiss (5100 K)/white (5,100 K)
Lichtstärke/Light intensity	>30 cd
Schutzart/Protection category	IP 68
Schutzklasse/Protection class	III
Betriebsspannung/Electrical operating data	24 VDC (Bereich/range 16–40 VDC)
Stromaufnahme/Current consumption	40 mA
Masse/Dimensions	Ø 110 mm, height 18 mm
Oberteil/Upper part	Polycarbonat, farblos, nanobeschichtet/ Polycarbonate, colourless, nano coated
Unterteil/Lower section	Polyamid/Polyamide
Temperaturbeständigkeit/Temperature resistance	–40 °C bis/to +55 °C
Höhe über Strasse/Height over road surface level	18 mm
Lichttransmission/Light transmission	ca. 9 mm über Boden/ approx. 9 mm above ground

**Tabelle 1** Technische Details Signaleinheit MarkLED

**Table 1** Technical details Signal unit MarkLED

### 2.1.1 Technik und Montage

Eine optische Führungsbeleuchtung beinhaltet als Basis eine Steuereinheit, welche den Eingangsstrom von 230 V in 24-V-Kleinspannung umwandelt und alle externen und internen Steuerbefehle verarbeitet. Aus der Steuereinheit gehen maximal vier Kanäle weg, aus welchen die Systemkabel auf Bankett geführt werden und dort in einen 6 mm breiten und 30 mm tiefen Schlitz eingelegt sind. Am Systemkabel werden in definierten Abständen von 12,5 m in der Adaption und 25 m im Tunnelinnern die Signaleinheiten befestigt (Bild 4).

Die Signaleinheiten selbst sind 15 mm hoch und haben einen Durchmesser von 110 mm, wobei die Lichtaustrittsfläche auf ca. 9 mm stattfindet (Tabelle). Das Gehäuse der Signaleinheiten wird aus Makrolon gefertigt und zusätzlich nanobeschichtet (antistatisch für höchstmögliche Schmutzabweisung und Korrosionsschutz). Alle Elektronikteile innerhalb der Signaleinheit sind von unten her eingebaut und komplett vergossen für maximalen Schutz (Bild 5 und Bild 6).

Die Montage startet mit der Platzierung der Steuereinheit und dem Auslegen des Systemkabels. An dieses werden die Unterteile montiert und dann mittels Dichtmasse und Verschrauben an der gewünschten Stelle platziert. Danach erfolgen die Montage des Oberteils und das abschliessende Abdichten des Schlitzes mit bituminöser Vergussmasse. Um häufige Sperrungen soweit wie möglich zu vermeiden, werden die Montagearbeiten von Führungsbeleuchtungen häufig parallel zu anderen Unterhaltsarbeiten ausgeführt.

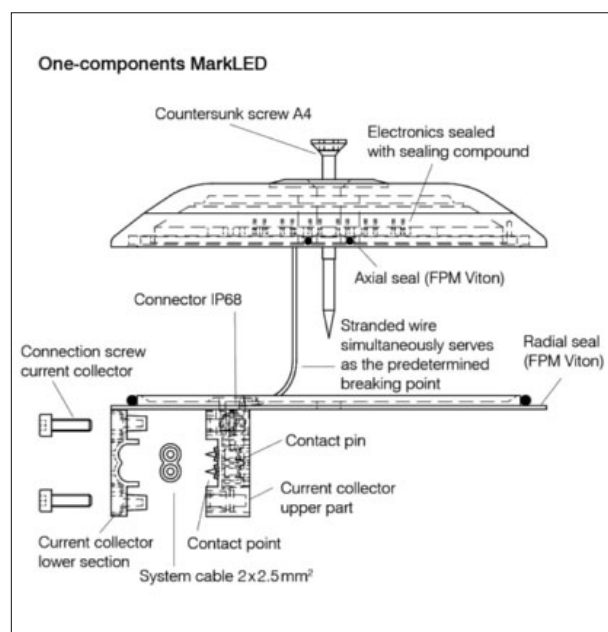
### 2.1.2 Projektbeispiel Tunnel Entlisberg

Die Überdeckung Entlisberg liegt zwischen den Anschlüssen Zürich-Wollishofen und Zürich-Brunau an der National-

The lifetime of optical guidance lighting is about ten to twelve years for the entire system, although the signal units often have to be replaced earlier due to mechanical damage such as collisions or during snow clearing (use of snow ploughs).

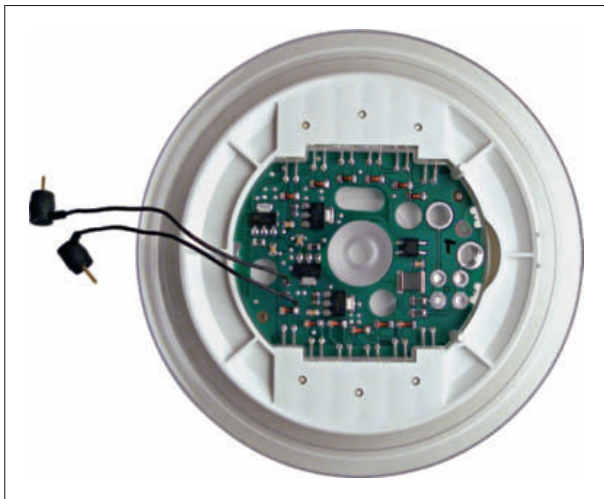
### 2.1.1 Technology and Installation

An optical guidance lighting system includes as the basis a control unit, which converts the mains supply of 230 V to 24 V and processes all external and internal commands. A maximum of four channels leave the control unit, from which the system cables are run to the shoulder and laid in



**5** Prinzip MarkLED  
Principle MarkLED

Quelle/credit: gifas.ch



6 Signaleinheit vergossen  
Signal unit sealed



Quelle/credit: gifas.ch

strasse A3. Sie besteht aus zwei richtungsgetrennten Röhren, der Ost- und Weströhre, mit jeweils einer Tunnellänge von 550 m. Jede Röhre besteht aus drei Fahrspuren und einer Standspur. Die Erstausrüstung des Tunnels Entlisberg erfolgte im Herbst 2004 und zwar mit zwei Steuereinheiten, 2500 m Systemkabel und 184 Signaleinheiten (Bild 9).

Für die Erneuerung der Führungsbeleuchtung wurde ein neuer Schlitz gefräst, mit 6 mm Breite und 30 mm Tiefe. Die gesamte Ausführungszeit wurde auf acht bis zehn Nächte festgesetzt. Dafür wurde eine Röhre jeweils gesperrt. Die gesamten Arbeiten wurden an die GIFAS-ELECTRIC GmbH (GIFAS) als Generalunternehmer vergeben, welche für die technische Ausarbeitung und Koordination der Arbeiten vor Ort verantwortlich war.

Nach sechs Nächten konnte die Anlage fertig übergeben werden; wichtig für diese rationelle Bearbeitung waren erfahrene Montagemitglieder, jahrelanges Know-how in der Installation von Leiteinrichtungen, sicherlich aber auch die entsprechenden Spezialwerkzeuge und -einrichtungen des Herstellers.

Für die insgesamt 2500 m Fräsarbeiten und Montagemeister kann also von einer Gesamtleistung von ca. 400 m pro Nacht ausgegangen werden, wobei dies projektspezifisch abhängig ist (Sperrumstände, Sperrzeiten, Tag-/Nachtarbeit, Anzahl Montageequipen etc.).

Wesentliches Merkmal solcher Installationen ist der Projektcharakter. Nur selten kann auf Standardmaterial zurückgegriffen werden, denn oft müssen objektspezifische Anpassungen vorgenommen werden. Mögliche Herausforderungen sind so zum Beispiel unterschiedliche Bankette, Zuleitungen, verschiedene Tunnelprofile und -radien, Bankettbeschaffenheiten (Bild 7 und Bild 8) oder auch fehlende Bankette – und somit alternative Signaleinheiten-Standorte und Lösungsansätze.

a slot 6 mm wide and 30 mm deep. The signal units are fixed to the system cable at defined spacings of 12.5 m in the transition and 25 m in the tunnel interior (Fig. 4).

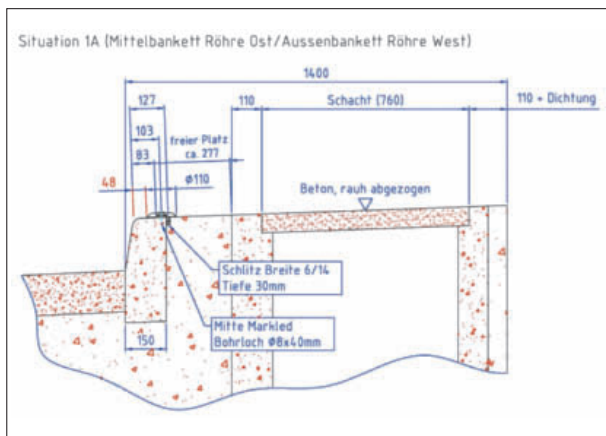
The signal units themselves are 15 mm high and have a diameter of 110 mm, with the illuminated surface itself being at about 9 mm (table). The housing of the signal units is made of Makrolon and is also nano-coated (antistatic for the best possible dirt repellence and corrosion protection). All electronic parts inside the signal unit are installed from below and completely encapsulated for maximum protection (Fig. 5 and Fig. 6).

Installation starts with the placing of the control unit and the laying of the system cable, to which the base units are mounted and then fixed with sealant and screws to the intended location. Then the upper part is mounted followed by sealing the slot with poured bituminous sealant. In order to avoid frequent lane closures as far as possible, installation of guidance lighting is often carried out parallel with other maintenance work.

### 2.1.2 Project Example, Entlisberg Tunnel

The housing at Entlisberg is situated between the Zurich-Wollishofen and Zurich-Brunau junctions on the national road A3. It consists of east and west tunnels, one for each direction, each with a tunnel length of 550 m. Each tunnel houses two lanes and a hard shoulder. The initial fitting out of the Entlisberg Tunnel was in autumn 2004 with two control units, 2,500 m of system cable and 184 signal units (Fig. 9).

For the renewal of the guidance lighting, a new slot was cut with 6 mm width and 30 mm depth. The entire installation time was fixed at eight to nine nights; during that time one tunnel had to be closed. The entire works were awarded to GIFAS-ELECTRIC GmbH (GIFAS) as the general contractor who was responsible for the technical processing and coordination of the work on site.



7 Schema Bankett  
Diagram of shoulder



8 Situation Bankett  
Situation of shoulder

### 2.1.3 Ausblick

Die LED-Technologie hat sich in den letzten zehn Jahren stark weiterentwickelt. Dadurch wurde es einerseits möglich, immer längere und günstigere Installationen zu realisieren, andererseits mussten aber auch die Lebenszyklen der ganzen Anlagen aufgrund der erhöhten Anforderungen nach unten revidiert werden. Ebenfalls gestiegen sind die administrativen Projektaufwände, die Vorplanungen sowie die Dokumentationen. Der eigentliche Installationsaufwand hat sich nicht gross geändert und konnte aufgrund der langjährigen Erfahrung und Prozessoptimierung leicht rationalisiert werden.

Im Projektverfahren zeigt sich eine klare Tendenz der Bauherren hin zu einem Ansatz des Total Cost of Ownerships. Man wünscht sich für eine Funktion wie etwa einer optischen Leiteinrichtung fix kalkulierbare Kosten und Risiken für eine gewisse Laufzeit und übergibt den Auftrag sowie alle Vor- und Nachteile an einen einzelnen Auftragnehmer. Diese Tendenz ist weltweit stark spürbar.

Spannend und sehr aufschlussreich hat sich das ganze internationale Umfeld entwickelt. Aus einer anfangs europäischen Idee ist ein weltweiter Markt mit laufend neuen Anforderungen und Wünschen entstanden. Zunehmend ist die optische Leiteinrichtung nicht mehr nur ein simples Licht, sondern Basis für weitere Funktionen. So gibt es Entwicklungen in verschiedenen Bereichen wie der Sicherheitsbeleuchtung, in Notbeleuchtungskonzepten oder der Detektion.

## 2.2 LED-Handlauf in Bahntunneln

Für die Sicherheit und gleichmässige Ausleuchtung müssen künftig alle Bahntunnel, die länger als 500 m sind, im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitssystem mit einem Handlauf zur Selbstrettung ausgerüstet werden.

Die Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) schreibt Handläufe in Griffhöhe vor, die bei Evakuierungen als Festhalte- und Führungsmöglichkeit die sichere Führung der Passagiere zu den Notausgängen ermöglichen. Diese

The completed installation could be handed over after six nights. This rational implementation was possible due to experienced installation team members, years of know-how in the installation of lighting, and certainly also the appropriate special tools and equipment of the manufacturer.

For the altogether 2,500 m of slot cutting and installation metres, an overall installation rate of about 400 m per night can be assumed, although this is project-dependent (closure conditions, closure times, day/night working, number of installation teams etc.).

An essential feature of such installations is the project character. Only seldom can standard material be used since it often has to be adapted for the specific project. Possible challenges are, for example, different shoulder types, supply cables, various tunnel profiles and radii, shoulder characteristics (Fig. 7 and Fig. 8) or also the absence of a shoulder and thus alternative signal unit locations and solutions.

### 2.1.3 Outlook

LED technology has developed strongly in the last ten years. On the one hand this has made it practical to install longer and cheaper installations, and on the other hand the lifetimes of the overall systems have had to be revised downward due to the more stringent requirements. The administrative work involved with a project, the preliminary planning and the documentation have also increased. The actual amount of installation work has not greatly changed and could be slightly rationalised due to many years of experience and process optimisation.

In the planning of projects, there is a clear tendency of clients to prefer a Total Cost of Ownership approach. A function is needed such as an optical guidance system for a fixed estimable costs and risks for a certain lifetime and the contract is then awarded to one contractor including all preliminary and maintenance work. This tendency is noticeable all over the world.



Quelle/credit: gifas.ch

9 Tunnel Entlisberg  
Entlisberg Tunnel

Handläufe sind bereits seit einigen Jahren Standardausrüstung und wurden anfangs vor allem mit herkömmlichen Schutzrohrleuchten versehen, welche als einzelne Lichtpunkte (Bild 10) die Gehwege ausleuchteten. Mit der rasanten Entwicklung der LED-Technik entstand die Möglichkeit zu einem sogenannten LED-Handlauf (Bild 11), das heisst, die Beleuchtung konnte in einen Handlauf integriert werden.

The entire international environment has developed excitingly and very informatively. Out of an originally European idea, a worldwide market has developed with constant new requirements and wishes. Optical guidance is increasingly no longer a simple light but a basis for further functions. There are developments in various directions such as safety lighting, emergency lighting concepts or detection.

## 2.2 LED Handrails in Rail Tunnels

For the purpose of safety and uniform lighting, all rail tunnels longer than 500 m in the Trans-European high speed system will have to be equipped with an escape handrail in the future.

The Technical Specification for Interoperability (TSI) prescribes handrails at handrail height to enable safe handholds and guidance for passengers to the emergency exits in case of an evacuation. These handrails have already been standard equipment for some years and were initially mostly provided with conventional protective tube luminaires, which lit the walkways as individual points of light (Fig. 10). With the rapid development of LED technology, the LED handrail became available (Fig. 11), meaning that the lighting could be integrated into the handrail.



Quelle/credit: gifas.ch

10 Einzelne Lichtpunkte  
Single light points





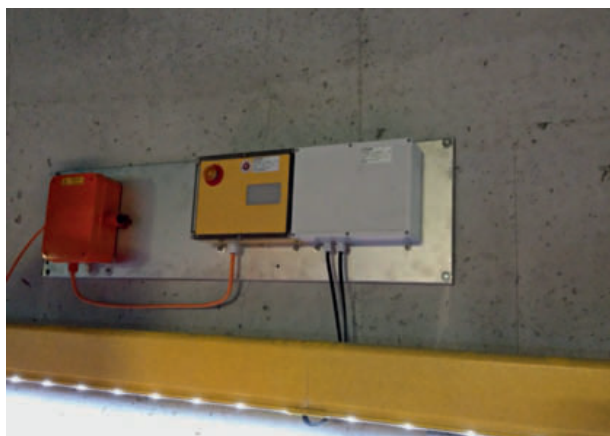
Quelle/credit: speilsberg/gifas.ch

**11** LED-Handlauf  
LED handrail

Diese LED-Handläufe sind im Idealfall nicht nur für Notfälle gedacht, sondern dienen auch zur Sicherheit und als Beleuchtung bei Unterhaltsarbeiten. Durch eine sehr gleichmässige Lichtverteilung und ein homogenes Erscheinungsbild sind sie im Vergleich zu Schutzrohrleuchten oder Punktlichtern wesentlich komfortabler fürs Auge und erlauben eine schattenfreie und durchgängige Ausleuchtung. Im Bereich der LED-Handläufe gibt es etliche Anbieter, mit unterschiedlichsten Handlauf-Materialien. Dominiert wird der Markt aber von rostfreien (Inox-)Handläufen und solchen aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

### 2.2.1 Technik und Montage

Ein LED-Handlauf beginnt im Wesentlichen bei einer Strom-Versorgungseinheit, in welcher die Einspeisung erfolgt (Bild 12). Aus dem Abgang der Versorgungseinheit werden die Kabel auf einen Handlauf geführt, der diese aufnimmt. Das eigentliche LED-Modul wird von unten in einen entsprechenden Schlitz im Handlauf eingeklickt und ist komplett steckbar ausgeführt für eine möglichst rasche Installation. Je nach Vorgabe ist die ganze Installation auch E30/E60/E90 ausgeführt, dementsprechend sind zwischen Versorgungseinheit und Handlauf entsprechende Kabelabzweigkästen eingebaut.



Quelle/credit: gifas.ch

**12** Versorgungseinheit  
Power unit

These LED handrails are ideally not only intended for emergencies but also provide safety and lighting for maintenance work. With their more uniform light distribution and homogeneous appearance, they are much easier on the eye than protective tube luminaires or point lights and enable continuous lighting without shadow formation. There are numerous suppliers of LED handrails with the most varied materials for the handrail. The market is however dominated by stainless (Inox) handrails and handrails of glass-fibre reinforced plastic.

### 2.2.1 Technology and Installation

An LED handrail starts with an electric power unit, which is supplied from the main (Fig. 12). From the output of the power unit, the cable is run to the handrail. The actual LED module is clicked from below into the appropriate slot in the handrail, a completely plugged connection for rapid installation. According to specification, the entire installation is designed according to E30/E60/E90, with the appropriate junction boxes being installed between power unit and handrail.

The entire system of an LED handrail is of modular construction, which means that the LED power and brightness can be changed as required. The complete system has been tested. There is a fire test certificate for all components from the Materialprüfungsanstalt (MPA) Dresden (Fig. 13).

Installation of an LED handrail starts with the placing of the electricity supply or the installation of the power unit. Then following any main devices, junction boxes and upstream systems. Afterwards the handrail is fixed. According to the project, anchors can be set into the wall or brackets are used. After these preliminary works, the LED modules are installed. Finally, a vandal protection is fitted over the interfaces, which provides additional safety and can also be dismantled if an LED module has to be changed.

### 2.2.2 Project Example, CCL

The CCL is part of the new Zurich underground station and has a total length of about 4,800 m (Fig. 14). The CCL connects Altstetten, Zurich main station and Oerlikon and



Quelle/credit: Brandprüfung 2012-B-2834 MPA Dresden

**13** Brandprüfung  
Fire test

Lichtprofil/Light profile	Aluminiumprofil farblos eloxiert/ Aluminium profile, anodised colourless
Gewicht/Weight	1400 g pro 2960 mm Einheit/unit
Abmessungen pro Einheit/Dimensions per unit	2960 mm x 30 mm x 26 mm (L x B x H)/(L x W x H)
Schutzart/Protection type	IP67
LaneLED Nutzungsdauer/Use lifetime	30 Jahre/years
Temperaturbereich/Temperature range	-20°C bis/to +55°C
Sog-/Druckfestigkeit/ Suction/pressure resistance	dauerstabil für Wind- und Druckwellen bis mindestens 250 km/h (Druckunterschiede ±5 kPa)/ permanently stable under wind and pressure waves of at least 250 km/h (Pressure difference ±5 kPa)
Stoßfestigkeit/Impact strength	IK7 (Festigkeit gegen Stöße mit einer Schlagenergie bis 2 J)/ IK7 (Strength against impacts with an energy of up to 2 J)
Vergussmasse/Sealing compound	2K Giessharz, hochtransparent, halogenfrei/ 2K poured resin, highly transparent, halogen-free
Einbau/Installation	MC50-LED-Handlauf – Befestigungselemente Chromstahl V4A (1.4404 oder besser)/MC50 LED handrail-fixing elements chrome steel V4A (1.4404 or better)
Sicherungsbügel/Securing strap	POM, schwarz, halogenfrei, temperaturbeständig von +50°C bis +100°C/ POM, black, halogen-free, temperature resistant from +50°C to +100°C
Stromversorgung/Electricity supply	24 V DC (21–28 V DC)
Schutzklasse/Protection class	III
Kabel/Cable	Flachbandkabel 2 x 2,5 mm <sup>2</sup> , 10A/24V DC, schwarz, halogenfrei, tempera- turbeständig von -20°C bis +55°C/Flat band cable 2 x 2.5 mm <sup>2</sup> , 10A/24V DC, black, halogen-free, temperature resistant from -20°C to +55°C
Erdung/Earthing	nicht notwendig bei LaneLED Schutzklasse III/ not necessary for LaneLED protection class III
Elektrische Ausführung/Electrical specification	gemäss den geltenden SEV/NIN Normen/ according to the valid SEV/NIN standards
LED-Anordnung/LED wiring	100% unterbruchsfrei mit Endlos-LED-Strang/ 100% uninterrupted with endless LED chain
Abstrahlwinkel/Radiation angle	120°
Leistung LaneLED 5/Power of LaneLED 5	36 LED = 12 W, 600 lm pro 2,96 m Einheit. EM 135 Lux auf dem Boden bei einer Handlaufhöhe von 1,1 m/36 LED = 12 W, 600 lm per 2.96 m unit. EM 135 Lux on the floor with a handrail height of 1.1 m
Lichtfarbe/Light colour	kaltweiss, 5000 K/cold white, 5,000 K
Farbwiedergabeindex (Ra)/ Colour rendering index (Ra)	Typ 85/type 85
Temperaturbereich/Temperature range	-25°C bis +85°C im Betrieb/-25°C to +85°C in operation
Lebensdauer LED/Lifetime of LED	>70 000 h
Längsgleichmässigkeit/Longitudinal uniformity	Bankett g <sub>2</sub> ≤ 1:1,3 (gefordert 1:200) Aufhellung Tunnelwand g <sub>2</sub> ≤ 1:1,7 (gefordert 1:2 bei LED)/ Shoulder g <sub>2</sub> ≤ 1:1.3 (required 1:200) Brightening of tunnel wall g <sub>2</sub> ≤ 1:1.7 (required 1:2 for LED)

**Table 2** Technische Details LED-Handlauf

**Table 2** Technical details LED handrail

Das gesamte System des LED-Handlaufs ist modular ausgelegt; das heisst, es können je nach Bedarf verschiedene LED-Stärken und -Helligkeiten eingebaut werden. Das komplette System ist geprüft. Es besteht für alle Komponenten eine Brandprüfung der Materialprüfungsanstalt (MPA) Dresden (Bild 13).

serves above all to relieve the main station. In spring 2013, the CCL and the associated Weinberg Tunnel were provided with an LED handrail.

The CCL project was a technical and a scheduling challenge, with only three weeks being available for the installation of

Die Montage eines LED-Handlaufs startet mit der Platzierung der Stromzuführung bzw. der Installation der Versorgungseinheit. Danach erfolgen allfällige Netzgeräte, Kabelabzweigkästen und übergeordnete Systeme. Anschliessend wird der Handlauf montiert. Hier werden je nach Projekt Anker in die Wand gesetzt, oder es wird mit Stützen gearbeitet. Nach diesen Vorarbeiten findet die Montage der LED-Module statt. Als Abschluss wird über den Schnittstellen eine Vandalensicherung montiert, welche zusätzlich für Sicherheit sorgt und bei Austausch eines LED-Moduls auch wieder demontiert werden kann.

### 2.2.2 Projektbeispiel DML

Die DML ist Bestandteil des neuen unterirdischen Bahnhofs Zürich und hat eine Gesamtlänge von ca. 4800 m (Bild 14). Die DML verbindet Altstetten, den Zürcher Hauptbahnhof sowie Oerlikon und sorgt vor allem für eine Entlastung des Hauptbahnhofs. Im Frühling 2013 wurde das Objekt DML respektive der dazugehörige Weinbergtunnel mit einem LED-Handlauf versehen.

Das Projekt DML war aus technischer sowie aus terminlicher Sicht eine Herausforderung. Für die Montage der Gesamtlänge standen nur drei Wochen zur Verfügung. Mehrere Montageteams waren parallel im Einsatz mit Support von GIFAS,

the entire system. Several installation teams worked simultaneously with support from GIFAS, whose know-how as manufacturer could be used in an optimal way.

In the CCL, the handrail was fixed on both sides of the tunnel with wall anchors. For handrail material, the material glass reinforced plastic (GRP) was selected, and for the LaneLED light modules type 4. All system components were modules with a system fire test certificate, so the entire handrail installation is tested. Appropriate replacement material like LED modules in the same light colour and handrail spare parts can be delivered with guaranteed availability for ten years.

### 2.2.3 Outlook

Similarly to optical guidance systems, the progress in LED development is still more impressive for LED handrails since it contributes to considerably more efficient handrails. In addition to the LED technology, further rationalisations have been achieved. Works which were previously undertaken on site such as the installation of a number of junction boxes, can now be preinstalled industrially on an assembly plate. This trend has grown stronger internationally since tunnel closures are associated with great effort, costs and limitations.



14 DML Zürich  
Zurich CCL

Quelle/credit: gifas.ch

welche ihr Know-how als Hersteller optimal bei der Installation weitergeben konnte.

Bei der DML wurde der LED-Handlauf auf beiden Seiten im Tunnel mittels Wandankern eingesetzt. Als Handlaufmaterial wurde das Material glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) gewählt und für LaneLED-Lichtmodul der Typ 4. Alle Systemkomponenten waren Module, welche über den Systemprüfungs-Brandtest verfügen und somit auch die ganze Handlauf-Installation geprüft ist. Entsprechendes Ersatzmaterial wie LED-Module in gleicher Lichtfarbe und Handlaufteile sind mit einer garantierten Verfügbarkeit von zehn Jahren nachlieferbar.

### 2.2.3 Ausblick

Analog zu den optischen Leiteinrichtungen ist der Fortschritt in der LED-Entwicklung bei den LED-Handläufen noch eindrücklicher, da dieser wesentlich zu effizienteren Handläufen beiträgt. Nebst LED-Technik sind weitere Rationalisierungen erzielt worden. Arbeiten, die vor Ort gemacht wurden, wie Installationen mehrerer Abzweiggästen, werden neu industriell auf einem Montageblech vormontiert. Dieser Trend hat sich gerade auch international verstärkt, da Tunnelsperrungen mit viel Aufwand, Kosten und Einschränkungen verbunden sind.

Ein weiterer Trend liegt darin, die einfachen Installationen intelligenter zu machen, wie beispielsweise Rückmeldungen, Informationsaustausch, Interaktion mit anderen Systemen oder Einbindung von anderen Funktionen im Tunnel.

## 3 Schlussbemerkungen

Wie aufgezeigt unterscheiden sich die beiden Anlagentypen zwar in Funktion und Anwendung, in Bezug auf Technik und mögliche Weiterentwicklung aber ergeben sich etliche Gemeinsamkeiten und auch Synergien. Die beiden Geschäftsfelder belegen eindrücklich, dass sich auch kleinere Schweizer Hersteller wie Betriebe mit 100 Mitarbeitern in der heutigen Zeit international ausrichten müssen und der Heimmarkt an sich nur eine Ausgangsbasis sein kann. Trends sind heute global, auch Normen und entsprechende Vorschriften werden zunehmend vereinheitlicht und homologisiert.

Interessant ist ausserdem, dass sich auch kleinere Unternehmen solchen Megatrends wie IoT oder Industrie 4.0 nicht entziehen werden, sondern diese bereits aktiv in ihre künftigen Lösungen miteinbeziehen sollten. Beeindruckend ist sicherlich auch, dass gerade Schweizer Unternehmen im Tunnelbereich in vielen Segmenten Weltspitze sind und sehr innovativ agieren. Dies umfasst auch etliche kleine und mittelständige Unternehmen, wie zum Beispiel GIFAS.



Quelle/credit: gifas.ch

15 Montage DML Zürich  
Installation at Zurich CCL

Another trend is to make simple installations more intelligent, such as for example acknowledgements, information exchange, interaction with other systems or integration of other functions in the tunnel.

## 3 Final Comments

As has been shown, these two types of system do differ in function and application but with regard to technology and possible further developments, there are several common features and also synergies. The two business fields demonstrate clearly that even smaller Swiss manufacturers like companies with 100 employees have to act internationally today and the home market can only be a starting basis. Trends are global today, and standards and appropriate regulations are also being increasingly unified and homologised.

It is also interesting that smaller companies do not intend to miss out on megatrends such as IoT or Industry 4.0, but should already actively include these in their future solutions. It is certainly also impressive that Swiss companies are world leaders in many segments of tunnelling and act very innovatively. This also includes several small and medium-sized companies such as, for example, GIFAS.

Urs Kummer, Dipl. Ing. ETH, International Fire Academy, Balsthal/CH

# Schaffen von optimalen Voraussetzungen für Rettungskräfte für den Fall eines Brandereignisses in einem Tunnel

Gemeinsam mit Feuerwehren aus ganz Europa entwickelte die International Fire Academy eine Einsatzlehre für die Bewältigung von Brandereignissen in Strassentunneln. Mit speziellen Taktiken und Techniken können die Einsatzkräfte wirksam zur Begrenzung von Personen-, Sach- und Folgeschäden beitragen. Wichtige Voraussetzung ist die Zusammenarbeit aller an Konzeption, Bau und Betrieb von Tunneln Beteiligten.

## Providing Optimal Conditions for Rescue Teams in the Case of Fire Incidents in Tunnels

In cooperation with fire services from throughout Europe, the International Fire Academy has developed a tunnel firefighting procedure for the tackling of fire incidents in road tunnels. Special tactics and techniques enable emergency forces to make an effective contribution to the limitation of harm to persons and property, and of consequential damage. An important precondition here is the cooperation of all those involved in the design, construction and operation of tunnels.

### 1 Einleitung

Unter dem Eindruck der folgenschweren Ereignisse in den Strassentunneln des Montblanc, der Tauern und des Gotthard galten Brände in Tunneln noch zu Beginn unseres Jahrhunderts als kaum beherrschbar. 2005 beauftragte daher das Bundesamt für Strassen das Interkantonale Feuerwehrausbildungszentrum in Balsthal (SO) mit der Entwicklung einer Einsatzlehre zur Bewältigung von Brandereignissen in Tunneln sowie der Konzeption und Realisierung von Tunnelübungsanlagen. In enger Zusammenarbeit mit Feuerwehren aus vielen europäischen Ländern wurden neue taktische Ansätze erarbeitet, wie Einsatzkräfte wirksam zur Rettung von Menschen aus Brandgefahren in Tunneln und zur Schadenbegrenzung beitragen können, ohne dazu selbst unkalkulierbare Risiken eingehen zu müssen. Aus der Entwicklungsarbeit heraus entstand die International Fire Academy, die jährlich über 2000 Feuerwehrangehörige auf die speziellen Herausforderungen von Bränden in Tunneln vorbereitet. Die von der International Fire Academy entwickelte Einsatzlehre für Strassentunnel [1] gilt in der Schweiz als verbindliche Ausbildungsgrundlage für alle Feuerwehren und wurde auch von vielen anderen Feuerwehrsystemen, beispielsweise den Feuerwehren des Bundeslandes Baden-Württemberg, übernommen.

Nachfolgend werden die wesentlichen Taktiken und Techniken dieser Einsatzlehre skizziert und diskutiert, durch welche

### 1 Introduction

At the beginning of the present century, in the wake of the tragic events in the Montblanc, Tauern and Gotthard road tunnels, tunnel fires were still considered to be scarcely containable. For this reason, the Federal Roads Office commissioned in 2005 the "Interkantonales Feuerwehr-Ausbildungszentrum" in Balsthal (Canton of Solothurn) with the development of a tunnel firefighting procedure for tackling fire incidents in tunnels and for the conception and implementation of tunnel training facilities. New tactical concepts to enable firefighters to make an effective contribution to the rescue of persons from fire hazards in tunnels and to limit the damage without themselves having to take incalculable risks were drafted in close cooperation with fire services from numerous European countries. This development work resulted in the creation of the International Fire Academy, which prepares each year more than 2,000 fire fighters for the special challenges presented by fires in tunnels. The tunnel firefighting procedure for road tunnels developed by the International Fire Academy [1] is seen in Switzerland as a binding basis of training for all fire services and has also been adopted by many other fire services, including, for example, the fire services of the German Federal State of Baden-Württemberg.

The essential tactics and techniques of this tunnel firefighting procedure, and the conditions which can facilitate the

### Créer des conditions optimales pour les services de sauvetage en cas d'incendie dans un tunnel

En concertation avec des instances de sapeurs-pompiers de toute l'Europe, l'International Fire Academy a conçu une méthode d'intervention pour la maîtrise des incendies dans les tunnels routiers. Les plus grands défis posés aux équipes d'intervention ne sont pas seulement les températures élevées dégagées en cas d'incendie, mais aussi les grandes distances à parcourir dans les tunnels de grande longueur. C'est la raison pour laquelle des tactiques et des techniques spéciales ont été mises en pratique grâce auxquelles les pompiers peuvent aujourd'hui contribuer efficacement à limiter les dommages humains, matériels et immatériels. L'une des conditions importantes requises en est la collaboration de toutes les personnes impliquées dans la conception, la construction et l'exploitation des tunnels.

### Realizzare le condizioni migliori per le squadre di soccorso in caso di incendio in una galleria

Insieme a pompieri di tutta Europa, la International Fire Academy ha sviluppato un modulo d'intervento per la gestione di situazioni antincendio all'interno di gallerie stradali. La sfida più grande per le forze d'intervento non sono solo le alte temperature in caso d'incendio, ma anche le grandi distanze in lunghe gallerie. A questo scopo sono stati messi in pratica metodi tattici e tecnici particolari. Grazie a questi metodi, le forze d'intervento possono contribuire a limitare efficacemente i danni indiretti a persone o cose. Un'importante condizione è la collaborazione fra tutti gli interessati alla concezione, alla costruzione e all'esercizio delle gallerie.

Bedingungen die Arbeit der Feuerwehr erleichtert und die Chance auf einen erfolgreichen Einsatz erhöht werden kann.

### 2 Die Aufgaben der Feuerwehren

Wie in allen anderen Bauwerken hat auch in Strassentunneln die Selbstrettung Vorrang. Die Feuerwehr wäre gar nicht in der Lage, sämtliche Tunnelnutzer aus den Gefahrenbereichen herauszuführen. Die Selbstrettung hat jedoch Grenzen. Verletzte und immobile Personen können sich möglicherweise nicht aus eigener Kraft in Sicherheit bringen. Zudem verhalten sich viele Tunnelnutzer bei Bränden mangels Erfahrung mit solchen Gefahrensituationen sub-optimal. [2, 3]

In Mitteleuropa ist es standardmässige Aufgabe der Feuerwehren, die Selbstrettung durch die sogenannte Fremddrettung zu ergänzen. Dazu müssen die Einsatzkräfte in den Gefahrenbereich eindringen. Dafür sind sie ausgestattet und ausgebildet. Auch bei Fahrzeugbränden in Tunnelanlagen ist die Rettung von Menschen und Tieren prioritäre Aufgabe der Feuerwehren. Weitere Aufgaben sind die Begrenzung von Umwelt-, Sach- und Folgeschäden. Je früher der Brand gelöscht wird, desto höher sind die Fremddrettungschancen und desto kürzer werden auch die Ausfallzeiten während der Sanierung sein.

### 3 Die besonderen Herausforderungen von Tunnelbränden

Obwohl allgemein von Tunnelbränden gesprochen wird, handelt es sich bei diesen Ereignissen in den meisten Fällen ursächlich um Fahrzeugbrände. Der Brand einzelner Teile von Tunnelanlagen, beispielsweise Lüftungs- oder Elektrozentralen, ist zwar ebenfalls möglich, jedoch sehr selten.

work of fire services and increase the chances of successful deployment, are outlined and discussed below.

### 2 The Tasks of Fire Services

As in all other structures, self-rescue also has priority in road tunnels. The fire service would in no way be capable of extracting all tunnel users from the danger zones. Self-rescue has its limits, however. Injured and immobilised persons may possibly not be able to get to safety without assistance. In addition, many tunnel users behave sub-optimally when fires occur, as a consequence of their lack of experience in such hazardous situations. [2, 3]

In Central Europe, the augmentation of self-rescue by means of so-called assisted rescue is a standard fire service task. It is necessary that fire fighters penetrate into the danger zone for this purpose. They are trained and equipped for this. The rescue of persons and animals is also a top priority task of fire services in case of vehicle fires in tunnel systems. Other responsibilities include the limitation of harm to the environment and to property, and of consequential damage. The more quickly the fire is extinguished, the better the chances of assisted rescue, and the shorter the closure times needed for repair.

### 3 The Special Challenges Presented by Tunnel Fires

Despite the fact that the term "tunnel fires" is widely used, such incidents are caused in most cases by vehicle fires. Fire in individual elements of tunnel facilities, such as ventilation and electrical equipment centres, is indeed also possible, but extremely rare.

Fahrzeugbrände an sich stellen aus Sicht der Feuerwehr kein besonderes Problem dar, sofern es sich bei der Ladung nicht um grosse Mengen gefährlicher Güter handelt. Die Brandlasten von Gebäudebränden sind oft sehr viel grösser. Man bedenke: Ein gewöhnlicher Supermarkt enthält ein Mehrfaches der Brandlasten eines grossen Lastwagens.

Der gravierende Unterschied zwischen Fahrzeugbränden in Strassentunneln und Gebäudebränden besteht in den ungewöhnlich langen Flucht-, Rettungs- und Angriffswegen. Das Problem der Hitze ist den Feuerwehren hingegen vertraut und bei taktisch richtiger Vorgehensweise gut zu bewältigen.

### 3.1 Grosse Eindringtiefe

Die International Fire Academy definiert als Eindringtiefe ganz allgemein die Weglänge von einem sicheren Bereich eines Bauwerkes bis zum Arbeitsbereich der Feuerwehreinsatzkräfte. Diese Strecken innerhalb von Bauwerken können verraucht sein und sind dann nur für Atemschutzgeräteträger zugänglich. Deren Ausrüstung ist rund 30 kg schwer und sie müssen gegebenenfalls gerettete Personen aus dem Gefahrenbereich zusätzlich heraustragen.

Je grösser die Eindringtiefe, desto grösser auch die physischen Belastungen für die Einsatzkräfte und (als einfache Weg-Zeit-Funktion) desto grösser auch der Zeitbedarf für die einzelnen Einsatzaufgaben, beispielsweise das Absuchen von Fahrräumen oder Fahrzeugen. In den meisten Gebäuden sind die Eindringtiefen nicht grösser als rund 30 m. In Strassentunneln, die der aktuellen Norm entsprechen, betragen sie rund 300 m; das ist die übliche Distanz zwischen zwei Notausgängen. Bei älteren Tunneln und vielen Bahntunneln können die Eindringtiefen mehrere Kilometer gross und damit von den Feuerwehren kaum mehr zu bewältigen sein. Grosse Eindringtiefen bedeuten eine zeitliche Dehnung aller Einsatzabläufe. Die Zeit aber ist bei Brandeinsätzen der kritische Faktor. In dichtem Rauch kann jeder nächste Atemzug tödlich sein. Es zählt also tatsächlich jede Sekunde. Um das Problem grosser Eindringtiefen zu bewältigen, müssen folglich alle Einsatzabläufe zeitlich optimiert werden, um den erhöhten Zeitbedarf zu kompensieren. Zudem müssen die körperlichen Belastungen für Einsatzkräfte so weit wie möglich reduziert werden.

### 3.2 Rauch und Wärmebelastung

Fahrzeugbrände in Strassentunneln sind in der Regel durch natürliche oder technische Lüftung gut ventiliert. Die Folge (Bild 1): Auf der Abströmseite des Brandes können auch für geschützte Einsatzkräfte unerträglich hohe Temperaturen herrschen und die Sicht ist infolge des schwarzen toxischen Rauches zumindest stark eingeschränkt. Auf der Anströmseite ist die Luft – wenigstens im bodennahen Bereich – nur mässig warm und die Sicht meist uneingeschränkt, weshalb die Einsatzkräfte meist nah genug an den Brand herankommen, um ihn schnell löschen zu können. [2, 3, 4]

Vehicle fires, as such, do not constitute any particular problem from the fire service viewpoint, unless the load carried consists of hazardous goods in large quantities. The fire loads encountered in structure fires are often very much larger. One example: a common supermarket eventually contains the several times multiplied fire load of a heavy goods vehicle.

The most significant difference between vehicle fires in road tunnels and structure fires can be found in the unusually long escape, rescue and fire fighting routes. The problem of heat, on the other hand, is a familiar one to fire services, and can be well controlled, given correct tactical procedure.

### 3.1 Great Depth of Penetration

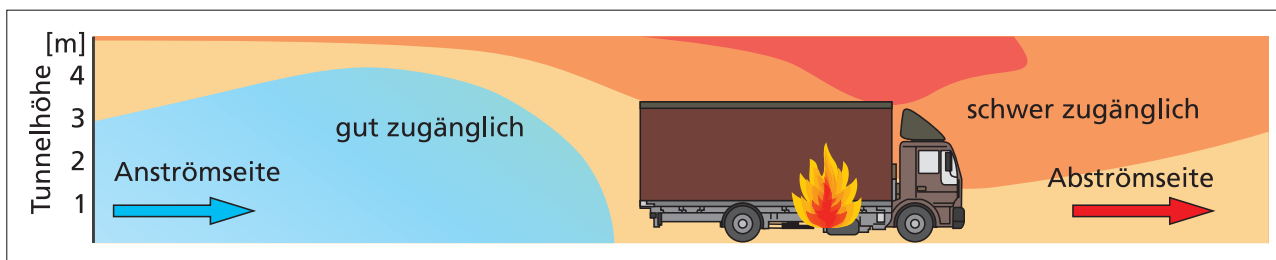
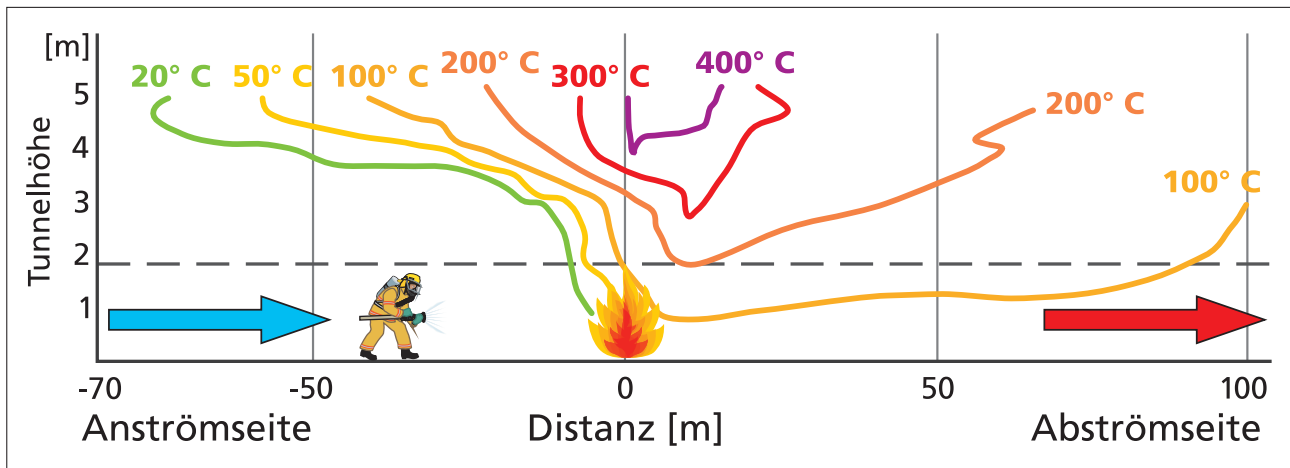
The International Fire Academy defines "penetration depth" in general terms as the route distance from a safe area in a structure to the working zone for the firefighters. These routes within structures may be smoke-affected, and are then only accessible to persons wearing breathing apparatus. The equipment they wear weighs around 30 kg, and firefighters may also be required in addition to carry rescued persons out of the danger zone.

The greater the penetration depth, the greater are the physical burdens borne by firefighters, too, and the greater (as a simple path/time function) is the time needed for individual deployment tasks, for instance searching for tunnel carriage ways or vehicles. In most buildings, penetration depths are rarely greater than around 30 m. In road tunnels which conform to the current standards, they are around 300 m, this being the normal distance between any two emergency exits. In older tunnels, and in many rail tunnels, penetration depths can amount to several kilometres, and can thus scarcely be covered by fire services. Long penetration depths mean a longer time needed for all deployment operations. Time, however, is the critical factor in fire fighting deployments. In dense smoke, every successive breath can be fatal, so every second really does count. All deployment operations must therefore be time-optimised, in order to balance out the greater time needed and overcome the problem of great penetration depths. In addition, the physical burdens on the firefighters must be reduced to the necessary minimum.

### 3.2 Exposure to Smoke and Heat

Vehicle fires in road tunnels are usually well ventilated, thanks to natural or mechanical ventilation. The consequences (Fig. 1): on the downwind side of the fire, high temperatures can prevail, which can be unbearable even for fire fighters in turnout gear, while visibility may at the very least be severely restricted as a result of black toxic smoke. On the upwind side, the air is only moderately hot, at least in the zone near ground level, and visibility is usually unrestricted, with the result that firefighters can generally get close enough to the fire to extinguish it quickly. [2, 3, 4]

The greatest hazards for fire crews are the possible collapse of tunnel ceiling elements and spalling of concrete. These



Quelle/credit: International Fire Academy www.ifa-swiss.ch

**1** Brände von Fahrzeugen in Tunneln sind in der Regel von der Anströmseite her gut zugänglich, während auf der Abströmseite bei meist unerträglich hohen Temperaturen aufgrund des schwarzen Rauchs meist keine Sicht vorhanden ist.

*Vehicle fires in tunnels are generally easily accessible from the upwind side, while on the downwind side there is generally virtually zero visibility due to the black smoke combined with unbearably high temperatures.*

Die grösste Gefahr für die Löschrupps besteht in möglichen Abstürzen von Zwischendeckenelementen oder von Betonabplatzungen. Die aber bleiben auf die Bereiche unmittelbarer Wärmebeaufschlagung begrenzt. Dagegen können sich die Feuerwehrangehörigen schützen, indem sie nicht weiter vordringen als es für das Löschen unbedingt erforderlich ist.

## 4 Der taktische Lösungsansatz

Für Gebäudebrände gilt der Grundsatz: «Erst retten, dann löschen». Eine wichtige bauliche Voraussetzung für die Umsetzung dieser taktischen Regel sind möglichst kleine Brandabschnitte, die die Ausbreitung von Feuer und Rauch verzögern. Die Fahrräume von Strassentunneln bilden jedoch einen durchgehenden Brandabschnitt, in dem sich der Rauch (bei Längslüftung) sehr schnell über hunderte oder tausende Meter ausbreiten und sehr viele Menschen gefährden kann. Deshalb propagiert die International Fire Academy den taktischen Grundsatz «Löschen, um zu retten». Je schneller der Brand gelöscht wird, desto schneller wird die Rauchproduktion gestoppt, womit die Bedingungen sowohl für die Selbstrettung als auch für alle Einsatzaufgaben gravierend verbessert werden.

Das praktische Problem besteht darin, rasch zum Brandort vorzudringen. Auf der Abströmseite kämen die Einsatzkräfte durch den sichtnehmenden Rauch nur sehr langsam – wenn

hazards are, however, restricted to areas of immediate exposure to heat. Fire fighters can protect themselves against those by not approaching nearer than absolutely necessary for fire fighting.

## 4 The Conceptual Tactical Solution

The basic principle in case of structure fires is: “First rescue, then extinguish”. The smallest possible fire compartments, which retard the spread of fire and smoke, are an important structural and design precondition for the implementation of this tactical rule. The carriageways of road tunnels, however, form a continuous fire compartment in which smoke (assuming longitudinal ventilation) can spread extremely quickly along hundreds or even thousands of metres, endangering very large numbers of people. For this reason, the International Fire Academy advocates the basic tactical principle of: “Extinguish in order to rescue!”. The quicker the fire is extinguished, the quicker smoke production is stopped, dramatically improving conditions both for escape and for all deployment tasks.

The practical problem here is that of advancing quickly to the site of the fire. On the downwind side, firefighters can only approach the fire extremely slowly since the visibility is impaired by smoke – if they can get near enough at all. On the upwind side, on the other hand, access is frequently blocked by a long tailback of vehicles. In twin-bore tunnels,



## Optimale Voraussetzungen für Rettungskräfte im Fall eines Brandereignisses

überhaupt nah genug – bis zum Brand voran. Auf der Anströmseite ist der Zugang hingegen oft durch rückstauende Fahrzeuge versperrt. Bei Zweiröhrentunneln versucht die Feuerwehr deshalb, den Brand von der nicht betroffenen Röhre oder dem Sicherheitsstollen aus über Querschläge zu erreichen. Bei Einröhrentunneln kann meist auf der freien Fahrbahn bis zum Brand vorgefahren werden, sofern keine flüchtenden Fahrzeuge entgegenkommen oder wendende Fahrzeuge die Zufahrt behindern.

Als logische Konsequenz aus dem Grundsatz der prioritären Brandbekämpfung empfiehlt die International Fire Academy, grundsätzlich einen Zweiseiten-Angriff zu fahren, also immer bereits im Ersteininsatz auf beiden Portalseiten anzurücken (Bild 2). Denn zum Zeitpunkt der Alarmierung ist meist noch unklar, wie sich der Rauch verhält und von welcher Seite am schnellsten Zugang zum Brand zu finden ist. Nur wenn auf beiden Seiten Einsatzkräfte zur Verfügung stehen, können die situativ gegebenen Möglichkeiten sofort optimal genutzt werden. Nachteilig ist der hohe Personalaufwand. Selbst für einen kleinen Tunnel sind bereits für den ersten Abmarsch über 30 Einsatzkräfte aufzubieten; bei grösseren Tunneln können über 100 Einsatzkräfte erforderlich sein.

### 5 Technik und Ausbildung

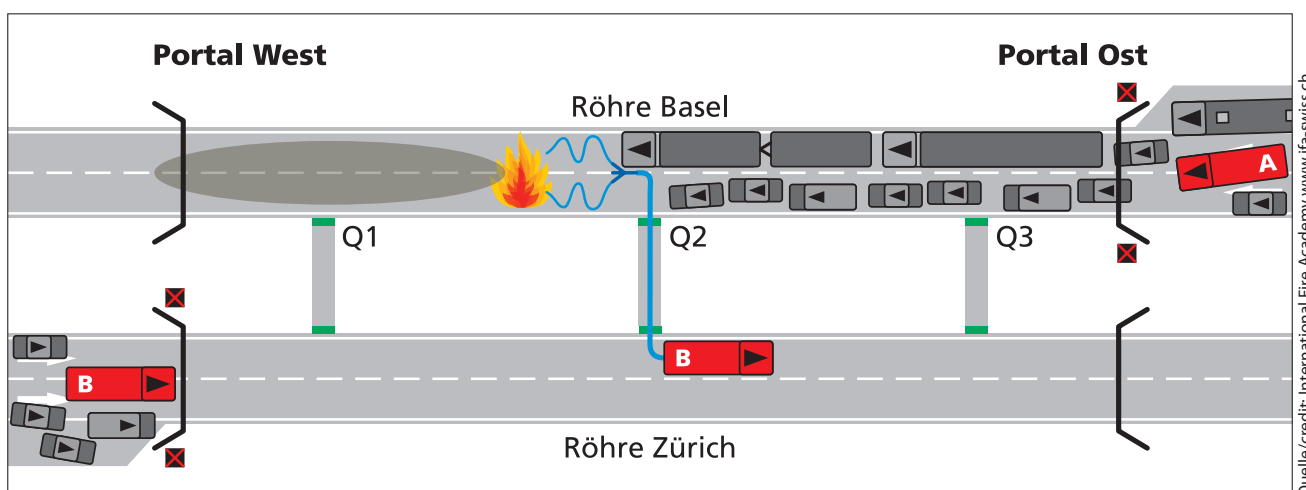
Für Brandeinsätze in Strassentunneln braucht es nur wenige spezielle technische Hilfsmittel. Die meisten Aufgaben können mit Standard-Löschfahrzeugen bewältigt werden. Unverzichtbar sind Wärmebildkameras, die auch bei dichtem Rauch eine ausreichende Sicht für das Vordringen und die Suche nach Personen liefern. Die bei Feuerwehren allgemein üblichen Pressluftatmer erlauben (in der Version als Zweiflaschengeräte) Einsatzzeiten von durchschnittlich

the fire service will therefore attempt to reach the fire from the unaffected bore or through cross-passages from the escape tunnel. In single-bore tunnels, it is generally possible to advance to the fire on the unobstructed carriageway, provided no fleeing vehicles are coming from the opposite direction, or turning vehicles are blocking the access.

As a logical consequence of the principle of fire fighting as a priority, the International Fire Academy recommends attack from two sides in all cases, i.e., advance from both portal ends at the first deployment in every case (Fig. 2). At the time the alarm is given, it is generally still unclear just how the smoke is behaving, and from which side the quickest access to the fire can be achieved. The potentials generated by the particular situation can only be exploited optimally and immediately if firefighters are available on both sides of the fire. The disadvantage here is the high deployment of firefighters. Even in a small tunnel, more than thirty firefighters should be deployed, even for the first approach; more than 100 firefighters may be needed in the case of larger tunnels.

### 5 Equipment and Training

Only a few special technical aids are needed for fire fighting deployments in road tunnels. Most tasks can be accomplished using standard fire service appliances. One indispensable item is thermal imaging cameras, which assure adequate visibility for advance and for the search for endangered persons even in conditions of dense smoke. The breathing apparatus customarily used by fire services permits (in the two-cylinder version) deployment times of an average of 40 min. Theoretical deployment times of up to two hours are possible using closed-circuit breathing apparatus, which chemically reprocesses the expired air, although in practice most breathing apparatus users reach their physi-



2 Feuerwehr A kann infolge Rückstau nicht in die betroffene Röhre einfahren und müsste sich mühsam durch die stehenden Fahrzeuge bis zum Brandherd vorarbeiten. Feuerwehr B hingegen kann in der nicht betroffenen Röhre bis zu Querschlag 2 vorgefahren und über diesen direkt das Feuer bekämpfen.

Fire brigade A is unable to enter the affected bore as a result of traffic blockage, and would have to work its way forward through the stationary vehicles with great effort to reach the seat of the fire. Fire brigade B, on the other hand, can advance up to cross-passage 2 in the unaffected bore and combat the fire directly through this passage.



Quelle/Credit: International Fire Academy [www.ifa-swiss.ch](http://www.ifa-swiss.ch)

**3** An gasbefeuerten Lastwagen-Attrappen wird die Brandbekämpfung unter einsatznahen Bedingungen trainiert.  
Fire fighting training under nearly authentic conditions is conducted using gas-fired dummy heavy goods vehicles.

40 Minuten. Bei Verwendung von Kreislaufgeräten, die die ausgeatmete Luft chemisch wiederaufbereiten, sind theoretisch Einsatzzeiten bis zu zwei Stunden möglich. In der Praxis erreichen die meisten Atemschutzgeräteträger bei schwerer körperlicher Arbeit jedoch nach etwa einer Stunde ihre Leistungsgrenzen. Längere Einsatzzeiten bedeuteten dann sehr grosse persönliche Risiken für die Einsatzkräfte. Um die Suche nach Personen zu beschleunigen, setzt die International Fire Academy sogenannte Suchstöcke (umgangssprachlich als Blindenstöcke bezeichnet) ein. Die körperliche Belastung der Einsatzkräfte wird durch spezielle Transporthilfen zur Rettung von Personen begrenzt.

Die technische Ausstattung ist jedoch nur eine Voraussetzung für sichere und erfolgreiche Brandeinsätze. Letztlich entscheidend ist die Ausbildung der Feuerwehren (Bild 3). Nur wenn sie sich in einsatznahen Übungen mit den besonderen Herausforderungen von Tunnelanlagen vertraut gemacht haben, können sie die taktischen und technischen Möglichkeiten ausschöpfen, um Menschen zu retten und Schaden zu begrenzen.

### 6 Optimale Voraussetzungen schaffen

Vorrangiges Ziel des Brandschutzes ist es immer, Brandereignisse durch vorbeugende Detektion an sich zu vermeiden. Zum Beispiel indem Lastwagen vor der Einfahrt in das Südportal des Gotthard-Strassentunnels elektro-

cal limits after around one hour when heavy physical work is necessary. Longer deployment times signify then extreme personal risks for firefighters. The International Fire Academy uses so-called search sticks (known familiarly as "blind man's sticks") to expedite the search for persons. The physical burden borne by the fire service workers is reduced by the use of special carrying aids to rescue human beings.

The necessary technical equipment is, however, only one precondition for safe and successful fire fighting deployments. The training of fire services is, ultimately, decisive (Fig. 3). Only if they have been familiarised in realistic exercises with the special challenges presented by tunnel systems, they will be able to exhaust the tactical and technical potentials available for the rescue of people and the minimisation of damage.

### 6 Assurance of Optimum Preconditions

The overriding aim of fire prevention is always that of preventing fire incidents by means of preemptive detection, by electronically monitoring heavy goods vehicles (HGVs) for overheated vehicle components prior to their entry to the south portal of the Gotthard Road Tunnel and, if necessary, preventing, for instance, their entry. If, despite all preventative measures, a fire should occur nonetheless, the creation of ideal preconditions for personnel rescue essentially consists of two radically different provisions: on the one hand, it

nisch auf heissgelaufene Fahrzeugteile kontrolliert und gegebenenfalls aus dem Verkehr gezogen werden. Wenn es trotz aller Verhütungsmassnahmen zu einem Brand kommt, besteht das Schaffen idealer Voraussetzungen für Rettungskräfte aus zwei grundverschiedenen Massnahmen: Zum einen ist zu versuchen, die Ausbreitung des Brandes und insbesondere des Rauches zu verzögern. Zum anderen sind die Rettungs- und Löschmassnahmen zu beschleunigen. Für beides bedarf es einer engen Kooperation aller Beteiligten an Konzeption, Bau und Betrieb von Tunneln.

### 6.1 Verzögerung der Feuerausbreitung

In Gebäuden wird die Ausbreitung von Feuer und Rauch baulich durch die Bildung von kleinen Brandabschnitten zu verhindern versucht. In Tunneln ist dies entlang der Längsachse kaum zu realisieren; es macht keinen Sinn, den Fahrraum in Abschnitte zu unterteilen. Einen möglichen Ansatz bieten allenfalls Rauchschrägen, die bei Brand von der Decke herunterfallen und die Rauchausbreitung verzögern. Aus Sicht der Feuerwehren besteht die beste Lösung in einer zweiten Röhre bzw. einem parallel verlaufenden Rettungstollen, die sowohl als Fluchtweg als auch für die Rettung und den Löschangriff dienen. Hier gilt: Je kürzer die Abstände zwischen den Notausgängen, desto eher wird vom Nutzer ein sicherer Bereich erreicht und desto kleiner sind die Eindringtiefen für die Feuerwehreinsetzkkräfte.

Nach den Erfahrungen der Feuerwehren, die bei der International Fire Academy ausgebildet werden, sind Distanzen zwischen den Notausgängen von bis zu 300 m gut zu bewältigen. Grössere Eindringtiefen bringen die Feuerwehren an ihre Leistungsgrenzen. [1]

Hinsichtlich der Lüftungsverfahren bietet die Rauchabsaugung aus Sicht der Feuerwehr die grösste Sicherheit. Sie begrenzt nicht nur die verrauchten Bereiche, sondern erlaubt auch einen Löschangriff innerhalb des Tunnels von beiden Seiten. Dadurch können die Bauwerkschäden erheblich verringert werden. Besonders wichtig sind aus Sicht der Feuerwehr stabile Lüftungsbedingungen, da die Unterscheidung zwischen Anström- und Abströmseite das konkrete taktische Vorgehen bestimmt. Besonders gefährlich kann für alle im Tunnel befindlichen Personen eine Rezirkulation des Brandrauchs von der betroffenen in die nicht betroffene Röhre sein. Diese kann durch eine (im Brandfall) gleichgerichtete Strömungsrichtung in beiden Tunnelröhren verhindert werden. Ersatzweise kann die Feuerwehr versuchen, am Portal austretenden Rauch mittels mobiler Lüfter vom Portal der Nachbarröhre wegzulenken.

### 6.2 Beschleunigung von Rettungs- und Löschmassnahmen

Für die Rettungs- und Löschmassnahmen gilt – einfach ausgedrückt – folgendes Ziel: Die Tunnelnutzer müssen

is necessary to retard the spread of the fire and, in particular, of smoke. And, on the other hand, rescue and fire fighting activities must be accelerated. Close cooperation between all persons involved in the design, construction and operation of tunnels are necessary for both of these.

### 6.1 Retarding the Spread of the Fire

In buildings, subdivision into small fire compartments is intended to prevent the spread of fire and smoke by design means. In tunnels, this can scarcely be achieved along the axis of the tunnel – there would be absolutely no point in subdividing the tunnel carriageway into compartments. Smoke curtains, which drop down from the tunnel roof in case of fire and retard the spread of smoke, offer, at best, a possible concept. From the fire service viewpoint, the optimum solution consists of a second bore or a parallel escape tunnel, which can serve as a route both for escape, for rescue, and for fire fighting access. The rule here is: the shorter the distances between the emergency exits, the more quickly a tunnel user can reach a safe area and the shorter the approach distances for the fire service personnel would be.

In the experience of the fire services trained at the International Fire Academy, it is possible to cope well with distances of up to 300 m between the emergency exits. Longer approach distances force fire services to the limits of their capabilities. [1]

From the fire service viewpoint, a smoke extraction system provides the greatest safety level of the various ventilation methods. This is not only restricted to the smoke-affected areas, but also permits fire fighting from both sides within the tunnel. Damage to the tunnel structure can thus be significantly reduced. Of particular importance, in the fire service view, are stable ventilation conditions, since a clear differentiation between the upwind and downwind sides determines specific tactical procedure. Recirculation of fire smoke from the affected bore into the unaffected bore can be particularly dangerous to all persons located in the tunnel. This can be prevented by ensuring the same direction of flow in both tunnel bores in case of fire. Instead, the fire service can also attempt to deflect smoke leaving a portal, in order to prevent it entering the other bore by using mobile blowers.

### 6.2 Acceleration of Rescue and Fire Fighting Activities

The following simplified aim applies to fire and rescue activities: tunnel users must leave the tunnel as quickly as possible, and firefighters should enter it as quickly as possible. It is decisive for self-rescue that the tunnel users recognise the danger in due time. It is not desirable that tunnel users leave their vehicles and flee whenever a blockage occurs, since the blockage could be merely the result of excess traffic. Nor, however, should they remain in their vehicles for too long because they are initially unable to perceive the dangers clearly. In the view of the International Fire Academy, a (if possible Europe-wide) standard evacuation signal would help, for example in the form of the sirens customarily installed in public

so schnell wie möglich aus dem Tunnel heraus, die Feuerwehreinsetzungskräfte so schnell wie möglich hinein. Für die Selbstrettung ist entscheidend, dass die Tunnelnutzer die Gefahr rechtzeitig erkennen. Weder ist wünschenswert, dass die Tunnelnutzer bei jedem Stau die Fahrzeuge verlassen und flüchten, weil es auch lediglich ein Stau infolge Verkehrsüberlastung sein könnte. Noch sollte passieren, dass sie zu lange im Fahrzeug verbleiben, weil sie Gefahren zunächst nicht eindeutig erkennen können. Hier wäre aus Sicht der International Fire Academy ein (möglichst europaweit) einheitliches Evakuationssignal hilfreich, beispielsweise die in öffentlichen Gebäuden und Industrieanlagen üblichen Signalhörner. Damit könnte Eindeutigkeit geschaffen werden. Was bleibt, ist das Problem der Auslösung.

Generell sind die Chancen einer rechtzeitigen Flucht bzw. einer rasch wirksamen Brandbekämpfung umso grösser, je früher der Brand entdeckt wird. Dabei können schon wenige Sekunden einen gravierenden Unterschied machen, weil sich die Bedingungen für alle Beteiligten mit fortschreitender Brandentwicklung immer weiter verschlechtern. Aus Sicht der Feuerwehren ist es deshalb zielführend, Detektionssysteme einzusetzen, die Wärme- und/oder Rauchentwicklungen möglichst früh erkennen und idealerweise auch den genauen Brandort lokalisieren. Dabei sind niedrige Auslöseschwellen durchaus vertretbar, besonders in Strassentunneln mit grossen Distanzen zwischen den Notausgängen. Für eine Strecke von 1000 m benötigt ein schnell laufender Mensch immerhin rund acht Minuten, und bekanntlich kann sich Rauch schneller ausbreiten, als Menschen über grosse Distanzen zu rennen vermögen.

Auch die Alarmierung der Feuerwehr sollte so früh wie möglich erfolgen, idealerweise schon beim ersten konkreten Hinweis auf eine Gefahr. Manche Feuerwehren lassen sich zum Beispiel bereits dann alarmieren, wenn ein Feuerlöscher in einer SOS-Station aus der Halterung genommen (und dies über einen Signalgeber in der Tunnelzentrale angezeigt) wird. Vielerorts bieten Feuerwehren bei jedem Unfall mindestens ein Löschfahrzeug auf, auch wenn es nicht brennt oder keine technische Hilfe zu leisten ist. Denn es kommt immer wieder vor, dass Unfallfahrzeuge während der Bergung zu brennen beginnen.

Massiv unterstützt werden die Rettungs- und Löscharbeiten durch die sofortige Vollsperrung der gesamten Tunnelanlage, auch der nicht betroffenen Parallelröhre. Je weniger Fahrzeuge im Tunnel, desto weniger Personen können gefährdet werden und desto weniger potentielle Hindernisse für Einsatzfahrzeuge sind vorhanden. Die Sperrung der nicht betroffenen Parallelröhre ist aus Sicht der Feuerwehren unverzichtbar, weil diese als Fluchtraum für Nutzer und als Zugang und Aufstellbereich für Rettungsfahrzeuge sowie gegebenenfalls als Verletzten-Sammelstelle dient.

buildings and industrial facilities. This could provide clarity. What remains is the problem of their activation.

The chances of timely escape and/or rapidly effective fire fighting are in general better, the earlier the fire is discovered. Even just a few seconds can make a dramatic difference, since the conditions for all involved will always deteriorate further, the more the fire can develop. It is therefore, in the opinion of the fire services, rational to install detection systems which detect the generation of heat and/or smoke as early as possible and also, in the ideal case, indicate the precise site of the fire. Low activation thresholds are, in this context, perfectly acceptable, particularly in road tunnels where distances between the emergency exits are long. A person running fast needs no less than around eight minutes to cover a distance of 1'000 m, and smoke, as is well known, is capable of spreading more quickly than people are able to cover great distances.

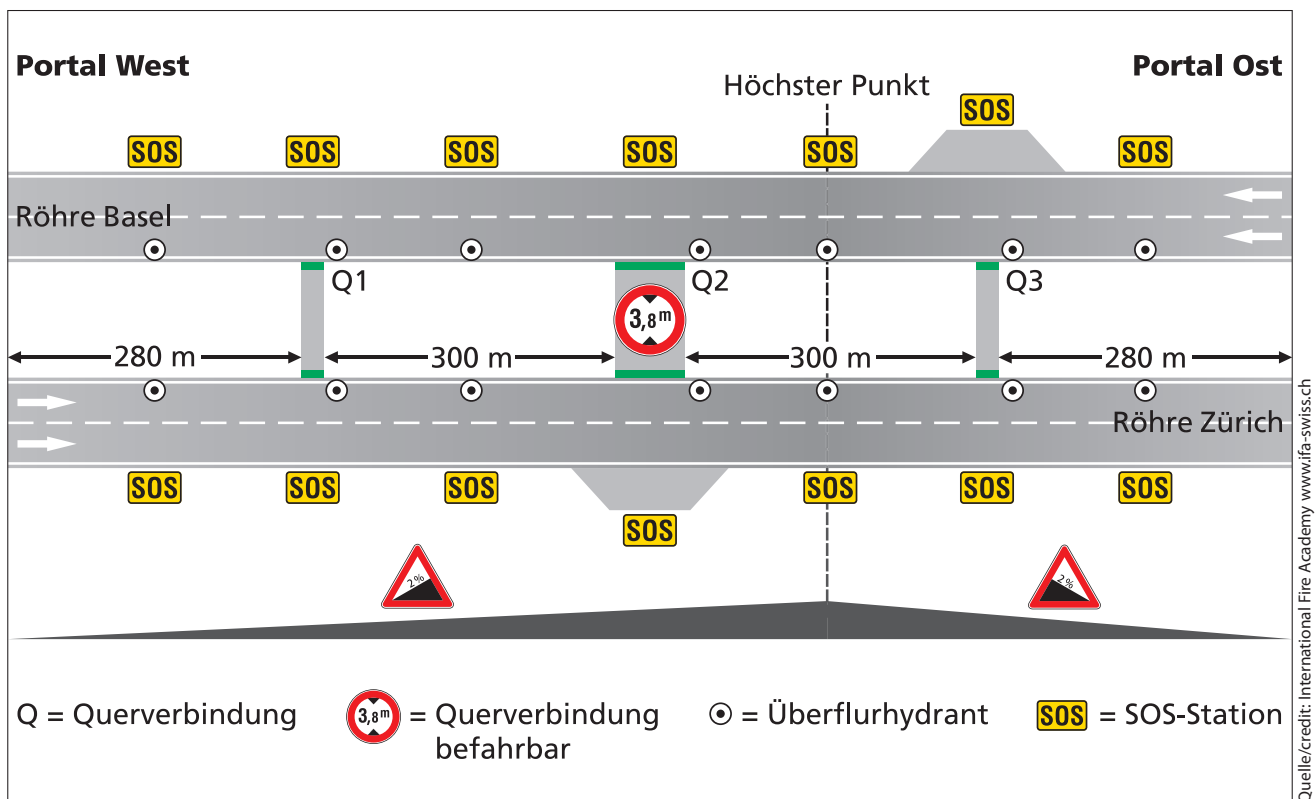
The fire service should also be alerted as early as possible, ideally immediately upon the first plausible indication of danger. Some fire services, for example, tolerate alerts even if only a fire extinguisher in a SOS station is removed from its mounting (which is displayed by means of a signal contact in the tunnel control room). In many places, fire services deploy at least one fire fighting appliance for every accident, even if there is no fire or no technical assistance is needed. The reason is that vehicles involved in accidents often catch fire during rescue and recovery operations.

Rescue and fire fighting work can be helped enormously by immediate and complete closure of the entire tunnel system, including the unaffected parallel bore. The fewer the vehicles in the tunnel, the fewer people can be endangered and the fewer potential obstructions there are for emergency service vehicles. From the point of view of the fire services, closure of the unaffected parallel bore is essential, because this bore serves as an escape space for users and also as an access route and setting-up area for rescue vehicles, and can also be used as a triage for injured persons.

### 6.3 Cooperation between Fire Service and Tunnel Operator

Scarcely any tunnel is exactly like any other, and fire services have greatly differing capacities. For this reason, specific deployment preparation, during which the operator's technical and organisational safety measures and the tactical approach of the fire service, the police and the fire and rescue services can be harmonised with one another, is needed for every tunnel. The International Fire Academy trains generally accepted fundamental principles, but there are also many detailed questions upon which can only be decided on site and only jointly by those involved, such as for example precisely when which initial deployment units of the responsible fire services should be alerted.

Practical experience of fire services demonstrates that large-scale exercises are only of little benefit, particularly when



4 Diese Zeichnung zeigt beispielhaft, welche Informationen ein einfacher Übersichtsplan enthalten sollte. Er dient primär der Orientierung der Einsatzkräfte und zur unmissverständlichen Bezeichnung der Strukturen und Einrichtungen eines Tunnels.

This drawing shows by way of example the information which a simple overview diagram should contain. It is used primarily for orientation of the emergency service workers and for unequivocal identification of the structures and facilities of the tunnel.

### 6.3 Kooperation zwischen Feuerwehr und Tunnelbetreiber

Kaum ein Tunnel gleicht dem anderen. Feuerwehren verfügen über ganz unterschiedliche Kapazitäten. Deshalb bedarf es für jeden Tunnel einer spezifischen Einsatzvorbereitung, in der die technischen und organisatorischen Sicherheitsmassnahmen des Betreibers und das taktische Vorgehen von Feuerwehr, Polizei und Rettungsdienst aufeinander abgestimmt werden müssen. Obwohl die International Fire Academy allgemein akzeptierte Grundsätze vermittelt, können doch viele Detailfragen nur vor Ort und nur gemeinsam von den Beteiligten entschieden werden, zum Beispiel wann genau welche Ersteinsatzeinheiten der zuständigen Feuerwehren alarmiert werden.

Die praktischen Erfahrungen der Feuerwehren zeigen, dass Grossübungen wenig Nutzen bringen, vor allem in Relation zum damit verbundenen meist beträchtlichen Aufwand. Empfohlen werden stattdessen häufige kurze Stabsrahmenübungen, bei denen sich die Entscheidungsträger kennenlernen, sowie möglichst häufige Begehungen der Tunnelanlagen durch die Einsatzkräfte, die dann auch mit kleinen Übungen verbunden sein können. Dazu eignen sich beispielsweise die routinemässigen Tunnelwartungen, während derer Feuerwehr und Handwerker oft sogar nebeneinander arbeiten können, ohne sich gegenseitig zu stören.

set against the generally considerable associated cost and effort. Recommended instead are frequent short command post exercises, in which the decision-makers get to know each other, and the most frequent possible inspection visits to the tunnel system by fire service workers, which can then also be combined with small-scale exercises. Suitable for this are, for example, routine tunnel maintenance periods, during which the fire service and the maintenance workers can work simultaneously without obstructing each other.

Another lesson learned from deployment practice: the generally extremely detailed tunnel deployment plans provided by tunnel operators are too detailed for the initial deployment phase. Here, the International Fire Academy recommends the drafting of simple overview diagrams (Fig. 4) which show the basic layout of the tunnel system (main bores, cross-passages, other passages, etc.) and state the correct designation of all relevant elements of the structure (designation of bores, numbering of emergency exits, etc.), safety-relevant facilities, such as SOS stations and hydrants, for example, the distances between the emergency exits and the highest point of the tunnel. Such diagrams can then be used for rapid orientation and, above all, for dependable communication between those involved in the deployment.

Of particular importance is close cooperation with the tunnel operator. The earlier the fire service and the tunnel operator

Eine weitere Erfahrung aus der Einsatzpraxis: Die meist sehr umfangreichen Tunnel-Einsatzpläne, die betreiberseitig zur Verfügung gestellt werden, sind für die Phase des Ersteinsatzes zu detailliert. Hier empfiehlt die International Fire Academy, einfache Übersichtspläne (Bild 4) zu erstellen, die den Grundriss der Tunnelanlage (Röhren, Querschläge, Stollen etc.), die korrekte Bezeichnung aller relevanten Bauwerksteile (Bezeichnung der Röhren, Nummerierung der Notausgänge etc.), sicherheitsrelevante Einrichtungen wie zum Beispiel SOS-Stationen und Hydranten, die Abstände zwischen den Notausgängen sowie den Scheitelpunkt angeben. Solche Pläne dienen dann der schnellen Orientierung und vor allem der sicheren Kommunikation zwischen den Einsatzbeteiligten.

Besonders wichtig ist die enge Zusammenarbeit mit dem Tunnelbetreiber. Je früher sich Feuerwehr und Tunnelbetreiber miteinander abstimmen, desto bessere Voraussetzungen können für spätere Einsätze geschaffen werden und desto eher kann es auch gelingen, unnötige Kosten zu vermeiden.

Erfahrungen der Feuerwehren zeigen, dass diese mindestens zwei Jahre vor Baubeginn in das Projekt eingebunden werden sollten. Es ist daher unabdingbar, dass der Bauherr in einer frühen Planungsphase bereits Kontakt zu den später zuständigen Feuerwehren sucht, damit diese sich frühzeitig mit der geplanten Anlage auseinandersetzen können, in den Planungsprozess dauerhaft involviert werden und letztendlich dadurch die baulichen Voraussetzungen für eine optimale Brandbekämpfung verwirklicht werden.

### 7 Fazit

Tunnelsicherheit ist ein gemeinsames Produkt vieler ganz unterschiedlicher Disziplinen. Deshalb spielt die Kommunikation zwischen Bauherrn, Betreibern, Ereignisdiensten und auch den Tunnelnutzern selbst eine entscheidende Rolle. Die International Fire Academy unterstützt die Feuerwehren deshalb moderierend und ausbildend in allen Phasen von Tunnelprojekten.

coordinate with one another, the better the conditions that can be created for subsequent deployments and the earlier will it also be possible to avoid unnecessary costs.

Fire service experience shows that this should be integrated into the project not less than two years prior to the start of construction. It is therefore essential that the project client should make contact with the fire service who will later be responsible at an early stage of planning, in order for these organisations to become familiar, at an early juncture, with the planned system, to be permanently involved in the planning process, so that, ultimately, the design and structural preconditions for optimum fire fighting might be implemented.

### 7 Conclusion

Tunnel safety is the joint concern of many greatly differing disciplines. Communication between the project client, operators, emergency services, and also tunnel users themselves therefore plays a decisive role. For this reason, the International Fire Academy provides fire services with facilitating and training services for all phases of tunnel projects.

### Literatur/References

- [1] International Fire Academy (Hg.): Brandeinsätze in Strassentunneln. Taktik – Technik – Hintergrund, 1. Aufl. Kehl Verlag, Saulheim, 2014
- [2] Frantzych, Hakan; Nilsson, Daniel (2006): Human Behaviour in Tunnel Fires – Reality and Modelling. In: INTEVIA Technical Institute of Traffic and Transportation (Hg.): 2<sup>nd</sup> International Symposium on Tunnel Safety & Security. S. 135–163, Madrid, 2006
- [3] Martens, M. H.: Modelling human behaviour in tunnels – Expectations and reality. In: Peter J. Sturm (Hg.): New developments in tunnel safety, 4<sup>th</sup> International Conference Tunnel Safety and Ventilation, 21.–23. April 2008, S. 67–73. Verlag der Technischen Universität Graz, 2008
- [4] Schneider, Ulrich/Horvath, Johannes: Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Brandverhalten, Brandschutzmassnahmen, Sanierung mit Projektbeispielen. Bauwerk-Verlag, 1. Aufl., Berlin, 2006
- [5] Pless, Georg/Seliger, Ursula: Forschungsbericht Nr. 158. Untersuchung der Bedingungen für die Feuerwehren bei der Bekämpfung von Bränden in Verkehrstunneln unter Berücksichtigung der in den Risikoanalysen der OECD-PIARC zugrundeliegenden Brandszenarien für verschiedene Unfälle. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2009
- [6] Guigas, Xavier et al.: Water Mist Tests for the A86 East Tunnel. In: INTEVIA Technical Institute of Traffic and Transportation (Hg.): 2<sup>nd</sup> International Symposium on Tunnel Safety & Security. S. 233–241, Madrid, 2006

Beat Walther, Schadenwehr Gotthard, Göschenen/CH

# Brand im Gotthard-Strassentunnel

## Die Schadenwehr Gotthard im Einsatz

Der Gong zur Alarmierung hallt etwa 600-mal pro Jahr durch die Räumlichkeiten der Berufsfeuerwehr Schadenwehr Gotthard (SWG). Nach dem Alarmierungssignal erfolgt immer die Informationsmeldung, und wenn die Frauenstimme «Brand im Gotthard-Strassentunnel» verkündet, schiesst den Feuerwehrleuten, die an beiden Portalen Nord und Süd stationiert sind, das Adrenalin durch den ganzen Körper.

Nach dem Grossereignis am Gotthard vom 24. Oktober 2001 wurden in der Schweiz alle Tunnel auf der Nationalstrasse < 600 m in Bezug auf Signalisation, Leiteinrichtungen und Beleuchtung überprüft und bei Handlungsbedarf auch entsprechend saniert. Weiterhin werden laufend die Lüftungsanlagen auf den neuesten Stand gebracht und Sicherheitsstollen gebaut, die einen Fluchtweg ins Freie garantieren. Die Selbstrettung bildet die Grundlage für die Sicherheit der Personen in den unterirdischen Verkehrsanlagen (UVA). Die Organisationen, welche die Hilfeleistung in den UVA garantieren, können die Vorbereitungen auf den Ernstfall in Balsthal und Lungern realitätsnah üben und die grundlegenden Techniken vertiefen.

# Fire in the Gotthard Road Tunnel

## The Gotthard Fire and Rescue Service in Action

The gong sounds roughly 600 times a year in the fire station occupied by professional firefighters – the Gotthard Fire and Rescue Service (SWG). The signal is always followed by a voice announcement, and when the female voice declares: “Fire in the Gotthard Road Tunnel”, needless to say, adrenaline shoots through the veins of the firefighters at the north and south portals.

After the serious incident at the Gotthard of 24 October 2001, the signalisation, control systems and lighting of all tunnels on national roads in Switzerland less than 600 m long were checked and appropriately upgraded where necessary. Ventilation plant was also continuously upgraded to the latest standards and safety tunnels were built to guarantee escape routes into the open air. Escape is the foundation of safety of people in underground traffic facilities. The emergency service organisations, which provide rescue services in tunnels, can practice their preparations for incidents under realistic conditions in Balsthal and Lungern and learn the basic techniques.

### 1 Einleitung

Der Gotthard-Strassentunnel ist eine unterirdische Verkehrsanlage mit einer Länge von 16,9 km und wird im Gegenverkehr betrieben. Im Jahr fahren etwa 6 bis 7 Mio. Fahrzeuge durch das Nadelöhr am Gotthard. Davon sind etwa 1,4 Mio. Lastwagen einschliesslich Lieferwagen und Autobussen. Mit den durchschnittlich 17 000 Fahrzeugen pro Tag steht der Gotthard an zweiter Stelle der gefahrenen Tunnelkilometer in der Schweiz. Nur im Gubrist mit täglich über 100 000 Fahrzeugen zählt man mehr Tunnelkilometer pro Tag. Innerhalb eines Jahres rückt die SWG ca. 20 Mal aus, um einen Brand im Gotthard-Strassentunnel zu löschen.

### 2 Schadenwehr Gotthard

Die Schadenwehr Gotthard (SWG) ist eine Berufsfeuerwehr (Bild 1) und Mitglied im Verband der schweizerischen Be-

### 1 Introduction

The Gotthard Road Tunnel is an underground transport link with a length of 16.9 km and operates with two-way traffic. About 6 to 7 million vehicles pass through the bottleneck at the Gotthard each year. This total includes around 1.4 million trucks and buses. With an average of 17,000 vehicles per day, the Gotthard ranks second for driven tunnel kilometres in Switzerland. More driven tunnel kilometres are only recorded at Gubrist with over 100,000 vehicles per day. In the course of a typical year, the SWG is dispatched roughly 20 times to combat a fire in the Gotthard Road Tunnel.

### 2 Gotthard Fire and Rescue Service

The Gotthard Fire and Rescue Service (SWG) is a professional fire brigade (Fig. 1) and a member of the Swiss Federation of Professional Fire Services (VSBF). The SWG is a division of

## Incendie dans le tunnel routier du Saint-Gothard

### Mobilisation du centre d'intervention du Gotthard

Après l'évènement tragique survenu dans le Saint-Gothard le 24 octobre 2001, tous les tunnels suisses de moins de 600 m se trouvant sur la route nationale ont fait l'objet d'une révision en matière de signalisation, de balisage et d'éclairage et ont été rénovés en conséquence en cas de besoin. D'autre part, les systèmes de ventilation sont continuellement remis aux dernières normes et des galeries de sécurité sont construites pour garantir un moyen d'évacuation vers l'extérieur. L'autosauvetage est décisif pour la sécurité des personnes dans les ouvrages souterrains de circulation. Les organisations responsables de l'assistance dans ces ouvrages peuvent s'entraîner aux services d'urgence et à leurs préparatifs à Balsthal et Lungern et y approfondir leurs techniques de base. Le tout dernier équipement est un portail thermique, installé aux entrées nord et sud du tunnel routier du Saint-Gothard. Il détecte les véhicules en surchauffe susceptibles de déclencher des incendies dans le tunnel. En 2014, 24 véhicules en surchauffe ont été évacués grâce au portail thermique sud.

## Incendio nella galleria stradale del San Gottardo

### Il centro d'intervento del San Gottardo in azione

Dopo la catastrofe nella galleria stradale del San Gottardo il 24 ottobre 2001 sono stati controllati lungo la strada nazionale i segnali stradali, i dispositivi di delimitazione e l'illuminazione di tutte le gallerie < 600 m e se necessario, questi sono stati anche adeguatamente riparati. Inoltre vengono continuamente aggiornati gli impianti di areazione e vengono anche costruiti cunicoli di sicurezza che assicurano una via di fuga all'aperto. L'autosalvataggio costituisce il fondamento per la sicurezza delle persone presenti nelle infrastrutture del traffico sotterraneo (UVA). Negli impianti di esercitazione di Balsthal e Lungern, le organizzazioni che garantiscono il soccorso nelle UVA possono prepararsi concretamente a casi di emergenza e approfondire le tecniche fondamentali. Il più recente sistema operativo, il portale termico, è installato al portale nord e sud della galleria autostradale del San Gottardo. Consente di individuare i mezzi che presentano temperature troppo elevate che possono causare incendi in galleria. Nel 2014, grazie al portale termico sud, è stato possibile selezionare 24 mezzi surriscaldati.

rufsfeuerwehren (VSBF). Die SWG ist eine Abteilung des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) im Bereich der Logistikbasis der Armee (LBA). Im Auftrag vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) ist die SWG mit 59 Berufsfeuerwehrleuten auf zwei Portalen in Göschenen und Ariolo verteilt für die Hilfeleistung von Amsteg bis Faïdo einschliesslich Gotthardpass, total 77 km Nationalstrasse, verantwortlich. Die SWG ist verpflichtet, mit neun Mitarbeitern innerhalb von zwei Minuten auszurücken und innerhalb von maximal zwölf Minuten im Tunnel und von 20 Minuten auf offener Strecke zu intervenieren – durchgehend 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr. Neben den Aufgaben der Feuerwehr führt die SWG First Response für den Sanitätsdienst durch, für ca. 20 bis 30 Ersthelfer-Einsätze im Jahr. Dazu kommt der Entspannungsdienst im Tunnel, wo etwa 300 Fahrzeuge pro Jahr mit einer Panne stehen bleiben (bis 3,5 Tonnen). Neben den Aufgaben der Feuerwehr bewirtschaftet die SWG für das ASTRA die Sonderbewilligungen für Sonderfahrzeuge und -transporte für die gesamte Schweiz. Diese betreffen etwa 30 000 Abklärungen und entsprechende Bewilligungen pro Jahr.

Die neueste Einrichtung steht aber an den Portalen Nord und Süd beim Gotthard Strassentunnel (Bild 2). Das Thermoportal erkennt überhitzte Fahrzeuge, welche im Tunnel zu Bränden führen könnten. Im 2014 konnten mit dem Thermoportal Süd 24 überhitzte Fahrzeuge aussortiert werden, welche im Tunnel auch einen Brand hätten auslösen können (Bild 3).

the Swiss Department of Defence, Civil Protection and Sport (VBS) within the scope of the Armed Forces Logistics Organization (LBA). On behalf of the Federal Roads Office (FEDRO/ASTRA) the SWG with its 59 professional firefighters is split up to man two portals in Göschenen and Ariolo providing aid from Amsteg to Faïdo, including the Gotthard Pass, a total of 77 km of national highway. The SWG is obliged to deploy with nine officers within two minutes and intervene within a maximum of 12 minutes in the tunnel and 20 minutes on the open road – 24 hours per day, 365 days per year. In addition to firefighting duties, the SWG undertakes first response for the paramedical service with some 20 to 30 first



1 Logo der Schadenwehr Gotthard (SWG)  
The Gotthard Fire and Rescue Service (SWG) logo

Quelle/credit: Schadenwehr Gotthard





Quelle/credit: IUB Engineering AG

2 Sicht auf das neue Thermoportal in Göschenen  
View of the new thermo portal at Göschenen

### 3 Einsatzphasen

#### 3.1 Ereignis

Neben den Standorten der Pannenfahrzeuge, Verkehrsunfällen und Sanitätsnotfällen werden natürlich auch Brandalarmierungen über SOS-Säulen, Linearsensoren, Bodenschlaufen, Video und Verkehrsüberwachungen auf die Alarmzentrale übertragen. Das Personal der Alarmzentrale benachrichtigt nach Beurteilung der Situation die SWG.

#### 3.2 Alarmierung

Beide Portalfeuerwehren Nord und Süd werden immer gleichzeitig aufgeboten. Bei jeder Intervention im Tunnel mit einer Brandmeldung wird der standardisierte Prozess ausgelöst, und beide Pikette fahren mit je zwei Löschfahrzeugen zum Brandereignis. Die Einsatzleiter erkundigen sich über die genaue Situation bei der Tunnelzentrale oder

aid assignments every year. A vehicle rescue service is also operated in the tunnel, with roughly 300 vehicles breaking down per annum (up to 3.5 tonnes). Apart from firefighting activities, the SWG is responsible on behalf of FEDRO for special permits for special vehicles and loads for the whole of Switzerland. These concern about 30,000 evaluations and the corresponding permits per annum.

The latest system, however, stands at the north and south portals of the Gotthard road tunnel (Fig. 2). The Thermoportal detects overheated vehicles, which could cause a fire in the tunnel. In 2014, the Thermoportal South was used to sort out 24 overheated vehicles, which could have been the cause of a fire in the tunnel (Fig. 3).

### 3 Operational Phases

#### 3.1 Incident

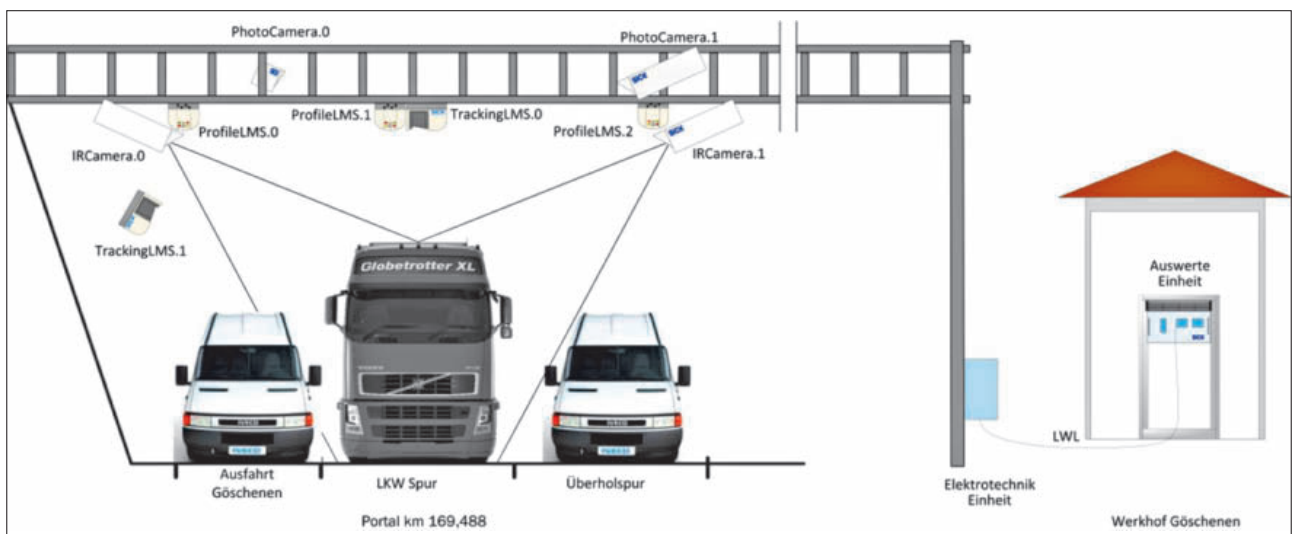
Apart from the location of breakdown vehicles, traffic accidents and paramedical emergencies, fire alarms are also passed on to the control centre by means of SOS niches, linear sensors, contact loops, video and traffic monitoring systems. The control centre staff alert the SWG after assessing the situation.

#### 3.2 Alarm

Both portal fire services, North and South, are always alerted at the same time. Every intervention in the tunnel triggered by a fire alert starts a standardized process and both detachments travel to the fire incident in two firefighting vehicles. The commanders find out about the actual situation from the control centre or contact the appropriate dispatchers.

#### 3.3 Access

When the alarm for a fire incident is given in the Gotthard Road Tunnel, the firefighters do not have a moment to waste, since every second counts until they intervene. They can-



Quelle/credit: IUB Engineering AG

3 Schematische Darstellung: Kontrolle der Lastwagen  
Schematic presentation: checking trucks

setzen sich über Funk mit dem entsprechenden Zentralisten in Verbindung.

### 3.3 Anfahrt

Bei Alarmierung wegen eines Brandereignisses im Gotthard-Strassentunnel ist für die Einsatzkräfte höchste Eile geboten, denn jede Sekunde bis zur Intervention zählt. Es kann daher nicht vor dem Portal gewartet werden, bis der Tunnel leer ist, sondern die Einsatzfahrzeuge müssen sogar die Gegenspurnutzen. Die Fahrzeuge in der Richtung des Anfahrtsweges stehen in der Regel in Blöcken von acht bis zwölf Autos, unterteilt von Ampeln, welche in 250-m-Abständen an der Tunnelwand angebracht sind. So ist es für die Einsatzkräfte möglich, die Fahrzeug-Kolonnen dann auf der Gegenfahrbahn zu überholen. Auf jeden Fall ist der Anfahrtsweg für die Feuerwehrleute recht anstrengend und stellt eine grosse Herausforderung dar. Müssen die Einsatzfahrzeuge auf einen Rauchgasstrom zufahren, rüsten sich die Teams zusätzlich mit Atemschutzmasken aus.

### 3.4 Einsatz

Das erste Team mit einem Sonderlöschfahrzeug (SLF) macht sich ein Bild vor Ort. Eine wesentliche Rolle spielt die Branddynamik; ist der Brand noch im Entstehen, kann er mit Schnellangriffen rasch unter Kontrolle gebracht werden. Hat er jedoch bereits die Tunneldecke erhitzt und der Rauch-

not just wait at the portal until the tunnel is empty, instead their vehicles might even have to use the opposite lane. The vehicles directed towards the approach route usually stand in columns of eight to 12 cars, divided by traffic-lights, which are mounted on the tunnel wall at 250 m intervals. This makes it possible for the firefighters to overtake columns of vehicles in the other lane. Whatever happens, the access route is exhausting for the firefighters and represents a major challenge. If their vehicles encounter a smoke gas flow, the teams must also put on breathing apparatus.

### 3.4 Deployment

The first team with a special fire engine gains an impression on the spot. The dynamics of the fire play an essential role; if the fire is still developing, it can be brought under control quickly with rapid intervention. However, if the tunnel ceiling has already been heated up and smoke gas flow is in motion, the initial attempt to extinguish the blaze is started with the front monitor. In this respect, the rule is adhered to: two-thirds for the structure and one-third for putting out the fire. The firefighters generally use the Compressed Air Foam System (CAFS) so that the cannon operator can quickly gain an impression of the temperature at the tunnel ceiling. If the CAFS sticks to the ceiling, the temperature is to less than 100 °C. If the CAFS does not stick, the structure has to be cooled down.



Quelle/credit: Schadenwehr Gotthard

4 Sonderlöschfahrzeug bei der Brandbekämpfung mit dem Front-Monitor  
Special fire engine combating a fire with the front monitor

gasstrom bewegt sich, wird mit dem Front-Wasserwerfer der erste Löschangriff gestartet. Dabei gilt die Regel: 2/3 der Löschmittel für die Kühlung der Struktur und 1/3 für die Brandbekämpfung verwenden. Normalerweise arbeiten die Brandbekämpfer mit dem Compressed Air Foam System (CAFS), anhand dessen sich der Rohrführer schnell ein Bild von der Temperatur der Tunneldecke machen kann. Klebt das CAFS an der Decke, beträgt die Temperatur unter 100°C. Falls das CAFS nicht haften bleibt, muss die Struktur weiter gekühlt werden.

### 4 Lastwagenbrand im Tunnel

Am 25. Oktober 2012 blieb im Abschnitt 16 (ca. 3 km nach dem Nordportal) ein rauchender Lastwagen auf der Fahrbahn stehen (Bild 5 und Bild 6). Schon nach dem ersten Kilometer war die Rauchentwicklung so stark, dass die Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn kontaminiert wurden. Die SWG wurde umgehend alarmiert und war bereits fünf Minuten später zur Stelle. Schon während der kurzen Anfahrt entwickelte sich der LKW-Brand zu einem Vollbrand in Kabine und Motor. Die Tunneldecke erwärmte sich schnell auf über 400°C, und der Rauchgasstrom bewegte sich bereits in Richtung Norden.

### 4 Truck Fire in the Tunnel

On Oct. 25, 2012, a smoking truck was left stranded on the carriageway in Section 16 (approx. 3 km from the north portal) (Fig. 5 and Fig. 6). Smoke emission was so strong that vehicles on the opposite lane were already contaminated after the first kilometre. The SWG was alerted immediately and arrived at the location only five minutes later. During this short time, the truck fire had developed into a total conflagration in the cab and engine. The tunnel ceiling soon heated up to more than 400°C and the smoke gas began moving northwards.

Until this occurred, the SWG believed that a fire would have to last some ten to 15 minutes before the cab was fully engulfed, but this assumption had to be revised. In this case, the cab had completely caught fire after only two minutes. A further problem complex: trucks are increasingly being built to save weight, the vehicle parts weigh less and also catch fire more quickly and melt more easily. The firefighters also experienced the same situation here. In fire simulations, the cab doors always opened more easily and the cab fire could be more efficiently extinguished through the open door. During this real fire, the door handles melted so that the doors had



5 Lastwagenbrand 25. Oktober 2012 mit Schäden an der Infrastruktur  
Truck fire on Oct. 25, 2012 with damage to the infrastructure

Quelle/Credit: Kantonspolizei Uri

Bis zu diesem Ereignis ging die SWG davon aus, dass die Entwicklung des Brandes etwa zehn bis 15 Minuten Zeit benötigt, bevor von einem Vollbrand der Kabine gesprochen werden kann. Diese Annahme musste revidiert werden, denn in diesem Fall brannte die Kabine bereits nach zwei Minuten vollständig. Eine weitere Problematik: Bei Lastwagen etabliert sich immer stärker eine Leichtbauweise; die Fahrzeugteile wiegen nicht nur weniger, sondern geraten auch schneller in Brand und schmelzen leichter. Diese Erfahrung mussten auch die Feuerwehrleute machen. Bei den Brandsimulatoren liessen sich die Kabinentüren immer leicht öffnen, und der Kabinenbrand konnte durch die offene Tür viel effizienter gelöscht werden. Bei diesem realen Brand schmolzen die Griffe der Türen jedoch, sodass diese mit entsprechenden Spreizwerkzeugen aufgedrückt werden mussten. Die Brandermittler konnten später bei diesem Lastwagen einen Kurzschluss in der Stromversorgung als Brandursache ausfindig machen.

### 5 Löschen, um zu retten

Sobald der Brand unter Kontrolle ist, beginnt das systematische Vorgehen im Tunnel. Zuerst wird die verrauchte Fahrbahn mit frischer Luft durchmischt. Theoretisch könnte die Luft im Tunnel innerhalb von zwölf Minuten ausgewechselt sein, jedoch kann die Sichttrübung nicht in einem Block abgesogen werden, sondern der Fahrraum wird mit frischer Luft angereichert und so die Sichttrübung minimiert. Durch die künstliche Belüftung werden auch die stabilen Rauchschichten vermischt. So ist der Rauch nicht nur entlang der Tunneldecke, sondern im ganzen Fahrraum verteilt (Bild 7 und Bild 8). Je nach Standort der Verrauchung kann der Fahrraum nach ca. 20 Minuten wieder befahren werden, und zu diesem Zeitpunkt sollte mit der Leerung des Tunnels begonnen werden. Je nach Verhalten der Tunnelbenutzer müssen die Personen aus den Schutzräumen begleitet und zur Weiterfahrt gebracht werden. Die Einsatzkräfte kontrollieren alle Schutzräume, deren Türen geöffnet wurden, was beim Gotthard-Strassentunnel mit 64 Schutzräumen entsprechend Zeit benötigt. Da sich bei Weitem nicht alle Benutzer korrekt verhalten und im Fahrzeug statt im Sicherheitsraum warten, muss die Information zur Weiterfahrt zusätzlich an diese weitergegeben werden. Es gibt auch Fahrer, die das Licht am Fahrzeug brennen lassen und nach einer Stunde den Motor nicht mehr starten können. So müssen die Feuerwehrleute nach einem Einsatz öfters Starthilfe leisten, damit der Tunnel auch wirklich geleert werden kann.

### 6 Menschen und Fahrzeuge im Tunnel

Im Gotthard-Strassentunnel befinden sich bei normalem Verkehrsaufkommen etwa 600 Fahrzeuge gleichzeitig auf der Fahrbahn. Bei einem Brand fahren 300 Fahrzeuge, welche sich vor dem Brand befinden, normalerweise aus dem Tunnel, ohne mit dem Rauch in Konflikt zu kommen. Die verbleibenden Fahrzeuge hinter dem Brand werden nicht gefährdet, sofern sich die Insassen richtig verhalten und bei entsprechender Aufforderung den Schutzraum aufsuchen.



Quelle/credit: Kantonspolizei Uri

6 Lastwagenbrand 25. Oktober 2012 mit zerstörter Kabine  
Truck fire on Oct. 25, 2015 with destroyed cab

to be opened using special spreading tools. The fire investigators later discovered that a short circuit in the power supply had caused the fire in the case of this truck.

### 5 Firefighting to Save Lives

As soon as the fire is under control, a systemic approach is taken in the tunnel. Firstly, the smoke-affected carriageway is exposed to fresh air. Theoretically the air in the tunnel can be replaced within 12 minutes, although visibility cannot be perfect at once. Instead, fresh air is admitted to the road space to enhance the visibility. Thanks to the artificial ventilation, the stable smoke layers are also mixed so that the smoke is not just confined to the tunnel ceiling but is also distributed throughout the entire road space (Fig. 7 and Fig. 8). Depending on where the smoke is located, the road space can be ready for use again after roughly 20 minutes, and at this point in time work can commence to clear the tunnel. Depending on the behaviour of the tunnel users, people may have to be accompanied out of protective rooms and enabled to continue their journeys. The firefighters check all safe rooms whose doors have been opened, which in the case of the Gotthard Road Tunnel with 64 safe rooms takes a corresponding amount of time. As by no means all users conduct themselves correctly and wait in their vehicles rather than in safe rooms, they also have to be informed that they can drive on. There are also motorists who keep their car lights on so that the engine might not restart after about

Hier ist auf die Gegenfahrbahn zu achten; sie ist normal in Betrieb, und die Personen sollten die Fahrbahn überqueren, um in den Schutzraum zu gelangen. Das birgt natürlich ein recht grosses Risiko; Fahrer, die einen Brand vor sich sehen, versuchen normalerweise zu wenden, ganz Mutige überholen sogar brennende Fahrzeuge durch den Rauch. Kaum auszudenken, was passiert, wenn ein Fahrer auf der Gegenfahrbahn die gleiche Idee hat: Die Situation kann schnell eskalieren. Auch sind Fahrer betroffen, die sich weit entfernt vom Brand befinden und plötzlich vom Rauchgasstrom überrascht werden. Diese versuchen ganz schnell zu wenden und verlassen panikartig den Tunnel mit dem Ziel, an die frische Luft bzw. in Sicherheit zu gelangen. Hier gilt für die Einsatzkräfte höchste Vorsicht.

### 7 Schlüsselstellen bei Brand im Tunnel

Die Selbstrettung der Tunnelbenützer ist bei einem Brand ein wesentlicher Punkt, für den die besten Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Markierung und Beleuchtung der Schutzräume sind von grosser Wichtigkeit. Durch die Überdruckbelüftung in den Fluchtwegen trifft man meistens auf Schiebetüren. Eine wichtige Frage ist, ob diese auch in Paniksituationen schnell und zuverlässig geöffnet werden können. Müssen hier eventuell Alternativen entwickelt werden?

Weiterhin muss man sich bewusst sein, dass Autobusse mit bis zu 90 Sitzplätzen keine Seltenheit mehr sind. Die ordentliche Entladung eines solchen Busses dauert im Normalbetrieb wahrscheinlich zehn Minuten, bei einer aufkommenden Panik eher länger. Ein pflichtbewusster Fahrer, der sich mit eventuell auftretenden Situationen im Tunnel schon beschäftigt hat und sich daher korrekt verhält, hat gute Möglichkeiten, seine Passagiere auch im Brandfall in Sicherheit zu bringen. Wie aber stehen die Chancen, wenn sich ein solcher Bus plötzlich im Rauchgasstrom befindet?



Quelle/credit: Kantonspolizei Uri

8 Lastwagenbrand 14. November 2014. Kühlung zum Schutz der Infrastruktur  
Truck fire on Nov. 14, 2014. Cooling to protect the infrastructure



Quelle/credit: Kantonspolizei Uri

7 Lastwagenbrand 14. November 2014 mit Rauchgasstrom  
Truck fire on Nov. 14, 2013 with smoke gas flow

an hour. As a result, the firefighters often have to help get cars to start after fulfilling their assignment so that the tunnel can really be emptied.

### 6 Persons and Vehicles in the Tunnel

Around 600 vehicles are on the road in the Gotthard Road Tunnel at the same time under normal traffic conditions. In the event of fire, 300 vehicles positioned ahead of the fire normally drive out of the tunnel without coming into contact with the smoke. The remaining vehicles behind the fire are not endangered providing their occupants conduct themselves properly and move into a safe room once given the command to do so. In such cases, attention has to be paid to the opposite lane, which usually still has traffic running on it, and persons are supposed to cross it to access the safe room. This of course, entails a major risk; motorists seeing a fire in front of them, usually attempt to turn, and very brave ones actually overtake burning vehicles by driving through the smoke. Thinking out hardly what could happen if a driver in the opposite lane had the same idea: the situation can escalate quickly. Motorists who are far away from the fire and suddenly find themselves confronted with the smoke gas flow are also affected. They quickly attempt to turn and vacate the tunnel in a panic with the objective of escaping into the fresh air and safety. The firefighters have to observe utmost caution in such cases.

### 7 Key Points Regarding Fire in the Tunnel

Escape by tunnel users is an important matter, for which the best possible conditions have to be created in advance.

Marking and lighting for the safe rooms are of great importance. Sliding doors are mostly encountered, given the positive-pressure ventilation in the escape routes. An important issue is whether these doors can be opened quickly and reliably in the event of panic breaking out. Should possible alternatives be developed here?

Furthermore, one must be aware that buses with up to 90 seats are quite common. Under normal circumstances, it takes around ten minutes to get all the passengers out of a

Viele Details gilt es für die Erleichterung von Selbstrettung zu beachten: Sind die Fluchtwege und Schutzräume auch rollstuhlgängig? Welche Möglichkeiten hat ein Bus, der 20 Fahrgäste im Rollstuhl transportiert? Die Hebevorrichtung benötigt mindestens 1,5 m Platz auf der Beifahrerseite, damit die Personen den Bus verlassen können. Wie verhält sich das auf Strassen mit 3 m breiten Pannestreifen und anschließender Leitplanke? Funktioniert das alles in einem Tunnel mit Gegenverkehr? Und last but not least: Haben die Bewirtschafter der Strassen ihre Aufgaben erfüllt?

### Literatur/References

[1] [www.vbs.admin.ch/internet/vbs/de/home/aktuell/mitteilung/050112a.html](http://www.vbs.admin.ch/internet/vbs/de/home/aktuell/mitteilung/050112a.html)

bus properly, and somewhat longer in the event of panic. A conscientious driver, who has given some thought to situations which might occur in a tunnel and who thus responds correctly, has good chances of getting his passengers to safety even if there is a fire. But what are the chances if a bus is suddenly enveloped in a smoke gas flow?

Many details must be observed in order to facilitate escape. Are the escape routes and safe rooms accessible for wheelchairs? What are the possibilities accorded a bus with 20 passengers and wheelchairs on board? The hoisting device requires at least 1.5 m of space on the passenger side to allow people to vacate the bus. What is the driver to do on a road with a 3 m wide hard shoulder bordered by a crash barrier? Does all this work in a tunnel with two-way traffic? And last but not least: have those operating the roads fulfilled their obligations?

# **Hauptsponsoren • Main Sponsors**

# DIE AMBERG GRUPPE

Führend in unterirdischen Infrastruktur- und Logistiklösungen



Schweizer Fachkompetenz – weltweit für Sie im Einsatz

✉ info@amberg.ch

☎ +41 44 870 91 11

🌐 www.amberg.ch

## ARGE TRANSCO - Sedrun





# ARGE TUNNEL VISP



**IMBODEN**

LURCH IMBODEN AG - HOCH UND TIEFBAU

**PRADER  
LOSINGER**



**EVEQUOZ**



**Arma**  
**Spez Schweiz** AG  
*Swiss Power Team*



**Arma**  
**Spez Schweiz** AG  
*Swiss Power Team*

Wir entwickeln für den Tunnelbau optimale Bewehrungslösungen nach den Vorgaben der Kunden, zeit- und kostensparend.

Das beherrschen wir.

Termingerechte Produktion und Lieferung mit den geeigneten Transportmitteln, per Camion oder per Bahn.

Der Unterschied zwischen Mittel-mass und Perfektion liegt im Detail. Wir wissen das.

*„Einen Vorsprung im Leben hat,  
wer da anpackt,  
wo andere erst einmal reden.“*

*John F. Kennedy*

**... hier beginnt der Tunnelbau**

Schnell ans Ziel ...



## Sandvik i-Jumbo – Das intelligente Tunnelbohrgerät

Sandvik Tunnel- u. Felsbohrgeräte werden auf Grund Ihrer bewährten Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit weltweit von Bohr- und Bergbauunternehmen sowohl in Übertage- als auch in Untertageprojekten eingesetzt.

SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION CENTRAL EUROPE GMBH  
HAFENSTRASSE 280 D-45356 ESSEN DEUTSCHLAND TEL +49 (0) 201-1785-300  
[www.construction.sandvik.com](http://www.construction.sandvik.com)

AVESCO AG HASENMATTSTRASSE 2 CH-4900 LANGENTHAL SCHWEIZ TEL +41 (0) 848 832 832  
[www.avesco.ch](http://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](http://www.avesco-tec.at)



**MASTER®**  
**BUILDERS**  
SOLUTIONS



### Mein zuverlässiger Partner für einen effizienten Tunnelbau

Starke Lösungen für die Transportbeton-, Fertigteile-  
und Betonwarenindustrie sowie für den Untertagebau.

BASF Construction Chemicals Europe AG ▪ Geschäftsbereich Admixture Systems Schweiz  
Hardmattstrasse 434 ▪ 5082 Kaisten ▪ T +41 (0)62 868 99 33 ▪ F +41 (0)62 868 99 50  
[www.master-builders-solutions.basf.ch](http://www.master-builders-solutions.basf.ch)

**BASF**  
We create chemistry



## 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](http://www.baslerhofmann.ch)

**Basler & Hofmann**

**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

- Diesel- und E-Loks, Plattformwagen, Personenwagen, Schutterwagen, Nachmischer usw.
- Schienen und Schwellen, Weichen, Californian-Weichen
- Dumper
- Ventilationslatten, Ventilatoren
- Selbstbohranker, Reibbohranker, SN-Anker usw.
- Mikropfähle
- Mörtel- und Hochdruck-Pumpen
- Einbaubogen, Gitterträger, TH-Profile
- Pipelines

## SICHERN IST UNSER BUSINESS





**BG**

COLLECTIVE  
INTELLIGENCE AS  
OUR STRENGTH,  
NATURE AS  
OUR GUIDE.

[www.bg-21.com](http://www.bg-21.com)

BG Consulting Engineers

INGENIOUS SOLUTIONS

BEI UNS STEHT  
DER MENSCH  
IM VORDERGRUND

Intelligente Ingenieurlösungen für eine lebenswerte Zukunft.  
Dafür setze ich mich persönlich ein, mit Herz, Verstand und Leidenschaft.

[www.bs-ing.ch](http://www.bs-ing.ch)

**B+S**  
INGENIEURE UND PLANER

**condotte cossi**

GALLERIA DI BASE DEL GENERI

**Galleria di base del Generi**

**Lotto 852**

società italiana per condotte d'acqua S.p.A.  
*Fondata il 7 aprile 1880*

**cossi costruzioni S.p.A.**

**LGIV** BAUUNTERNEHMUNG AG  
IMPRESA COSTRUZIONI SA

[www.condotte.com](http://www.condotte.com)

**Consorzio TAT**

Tunnel AlpTransit Ticino – Bodio Lotto 554 / Faido Lotto 452

**Implenia**

**HEITKAMP**  
Construction Swiss GmbH

**CSC**

**HOCHTIEF**

**salini impregilo**



IMPRESA COSTRUZIONI SA  
BAUUNTERNEHMUNG AG  
ENTREPRISE DE CONSTRUCTIONS SA

# QUALITÄT, TERMINE UND UMWELT



csc@csc-sa.ch  
www.csc-sa.ch



EDY TOSCANO  
ENGINEERING  
& CONSULTING

# KOMPLEXES BAUEN

alltäglich

Brunnen Castione Chur Domdidier Fribourg Genève Lausanne Lugano Mesocco  
Pontresina Poschiavo Rivera Schwyz St.Moritz Winterthur Zuoz Zürich

toscano.ch



Emch+  
Berger

# Bahnbrechend innovativ.

Als eines der führenden Ingenieur-, Planungs- und Beratungsunternehmen sind wir mit rund 600 Mitarbeitenden an über 20 Standorten in der Schweiz präsent. [www.emchberger.ch](http://www.emchberger.ch)

**Gesamtlösungen sind unser Plus.**



## 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](http://frutiger.com)



Frutiger



**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

**Schachtbau ALIMAK | Stollen- und Tunnelbau | Profilaufweitungen**





**INSPIRIEREND  
FÜR HERAUSRAGENDE  
LEISTUNGEN.**

**INNOVATIV  
FÜR DIE WELT VON MORGEN.**

Tunnelbau – Weitsichtiges und gesamtheitliches Denken,  
fundierte Spezialkenntnisse und grosse Erfahrung für Ihren Projekterfolg.

An 34 Standorten – weltweit.  
[www.gruner.ch](http://www.gruner.ch)

**gruner** >



**HEITKAMP**  
Construction Swiss GmbH



**Heitkamp Construction Swiss  
Kompetenz aus Tradition – Zukunft durch Innovation**



# Teamwork

Achieving greatness together: In more than **3,100 projects** globally, high-class infrastructure has been built, using Herrenknecht tunnelling technology.

## Pioneering Underground Technologies

› [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)



 A member of  
LafargeHolcim

## Holcim gratuliert zur Eröffnung des Gotthard-Basistunnels!

Strength. Performance. Passion.





ENGINEERING EXCELLENCE

### ILF Beratende Ingenieure AG

Badenerstrasse 816  
8048 Zürich, Schweiz  
Telefon: +41 44 435 37 50  
Telefax: +41 44 435 37 51  
Email: info.zrh@ilf.com



ILF unterstützt ihre Kunden bei der erfolgreichen Realisierung bedeutender Infrastrukturprojekte und bietet gesamthafte Ingenieur- und Beratungsleistungen an.

## IHR ZUVERLÄSSIGER PARTNER

Bewährt bei:

- Gotthard- und Ceneri-Basistunnel
- Kraftwerke Berschnerbach und Cotlan
- Pumpspeicherwerk Atdorf
- Belchentunnel 3. Röhre
- Eppenbergtunnel Realisierung
- Studie Geologische Tiefenlager, Nagra
- Nordumfahrung Zürich (BSA)
- Riyadh Metro Linien 4, 5, 6, Projektsteuerung
- N9 Simplon, Sanierung Tunnel u. Galerien
- Erneuerungen Eisenbahnlinie in Azerbaijan

ILF Zürich ist Mitglied der ILF Gruppe mit weltweit mehr als 2.000 Mitarbeitern.



N8 Sicherheitsstollen Giessbach

## 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 AG · via Stefano Franscini 5 · 6600 Locarno · Tel. +41 91 756 68 11 · info@im-maggia.ch · www.im-maggia.ch  
IUB Engineering AG · Belpstrasse 48 · 3007 Bern · Tel. +41 31 357 11 11 · info@iub-ag.ch · www.iub-ag.ch

# **Implenia**® Die Weltrekordhalterin



Der längste Tunnel der Welt. – Der Gotthard-Basistunnel hält mit 57 km Länge und 2500 m Überlagerung gleich zwei Weltrekorde.

**Implenia** denkt und baut fürs Leben. Gern.



Die steilste Standseilbahn der Welt. – Die neue Standseilbahn Schwyz-Stoos setzt mit 110% Steigungswinkel neue Massstäbe.

[www.implenia.com](http://www.implenia.com)



## **INFRA** TUNNEL



CEVA, Tunnel de Pinchat (GE)



N05, Tunnel de Ligerz (BE)



CFF, Ligne TGV Daillens Vallorbe (VD)



Emosson, Galerie de Corbes (VS)



CFF, Tunnels de Sierre Gobet (VS)



A16, Tunnel RC6 (JU)

**Infra Tunnel SA** - Rue de la Gare 15c - 2074 Marin, Switzerland - [www.infratunnel.ch](http://www.infratunnel.ch)



**Lombardi**

## Lombardi verbindet

Lombardi steht seinen Kunden über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks mit Kompetenz zur Seite. Unsere Dienstleistungen umfassen die Erstellung von Vorstudien über die Planung und Erstellung bis zum Betrieb.



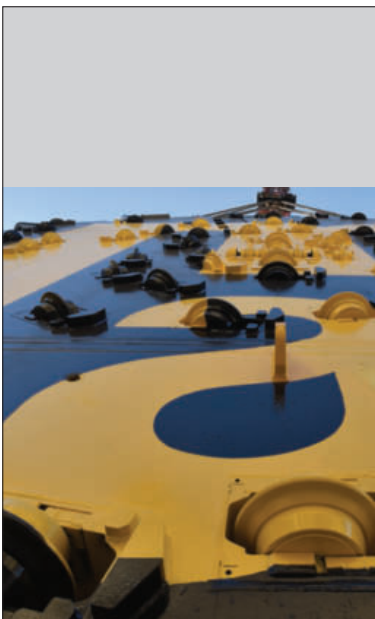
Seit 60 Jahren bauen unsere Kunden auf unsere technische und wirtschaftliche Kompetenz für Verkehrsanlagen unter Tage. Ihre Ansprüche sind unsere Herausforderung.

**Lombardi SA Ingegneri Consulenti** | Via R. Simen 19, 6648 Minusio

**Lombardi AG Beratende Ingenieure** | Winkelriedstrasse 37, 6003 Luzern

**Lombardi SA Ingénieurs Conseils** | Rte de Chantemerle 1, 1763 Granges-Paccot

[www.lombardi.ch](http://www.lombardi.ch)



**Marti Bauunternehmungen**



## 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.

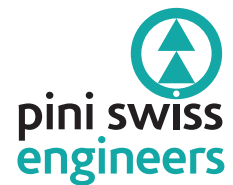
**Marti Holding AG** Bauunternehmungen Seedorfeldstrasse 21 CH-3302 Moosseedorf  
Tel. +41 31 388 75 75 Fax +41 31 388 75 01 [info@martiag.ch](mailto:info@martiag.ch) [www.martiag.ch](http://www.martiag.ch)



Willst Du "tunneln" wie ein Maulwurf... Komm zu Pini Swiss Engineers !

Unsere Grossprojekte

- AlpTransit Ceneri-Basistunnel (15.4 km)
- BLS AlpTransit Lötschberg-Basistunnel (34.6 km)
- AXPO Wasserkraftwerk Linth-Limmern (1'480 MW)
- SBB Erneuerung Tunnel 4mK (4m Korridor Basel-Chiasso)
- ASTRA Autobahnerhaltungsprojekte (40.5 km)
- BBT Brenner-Basistunnel (55 km)



[www.piniswiss.com](http://www.piniswiss.com)

Zürich – Lugano – Sion – Chur – Sargans – Innsbruck (A) – Lomazzo (I)

Think and do.

# Wir bauen Gewissheit. **Gemeinsam**

für die Gemeinschaft

für das öffentliche Unternehmen

für Privatkunden

Innovation und Fachkompetenz in den Bereichen **Verkehrswegebau** **Industrieller-Hochbau** **Fertigbetonteile**



Impresa Costruzioni SA · Bauunternehmung AG · Entreprise de Construction SA  
Geschäftsleitung und Büros

Via C. Molo 21 · CH-6500 Bellinzona · Tel. +41 (0)91 821 10 20 · Fax +41 (0)91 821 10 21 · info@pizzarotti.ch · www.pizzarotti.ch

# Das ist PORR!

www.porr-group.com



Ob im Hoch- oder Tiefbau – bei jedem Projekt beweist die PORR kreative Planung und Entwicklung ebenso wie bautechnisch perfekte Ausführung. So schreibt sie seit mehr als 145 Jahren heimische und internationale Baugeschichte. Mit ihrem Auftragsbestand von rund EUR 4,4 Mrd. ist die PORR auch für die kommenden Jahre bestens aufgestellt. Der Konzern bietet damit erfreuliche Perspektiven – für Mitarbeiter, Kunden und Partner und natürlich auch Aktionäre. **Denn mit ihrer Strategie des intelligenten Wachstums ist die PORR im In- und Ausland nachhaltig erfolgreich.**

Intelligentes Bauen  
bringt den Durchbruch

powered by



## Ingenieurdienstleistungen

$$\int \begin{matrix} \text{Qualität} \\ \text{Real Estate} \end{matrix} \frac{\text{Verkehr}^{\text{Umwelt}} + \text{Energie}^{\text{Wasserkraft}}}{\log(\text{Gebäudetechnik}) \cdot \xi + 1} d\xi$$

$$= \sum_{N=\text{Engineering}}^{\text{Consulting}} \underline{\underline{\text{Pöyry} \cdot N^1}} \left\{ \text{Ihre Formel für Erfolg} \right\}$$



Aus Elektrowatt wurde Pöyry – Ein starkes Ingenieurunternehmen mit Tradition, schweizerischer Ingenieurskunst und der Kraft der weltweit tätigen finnischen Pöyry-Gruppe mit 6000 Mitarbeitenden.



www.poyry.ch

Tunnelling Logistics

Services

Equipment

**rowa**

**Schneller, sicherer und wirtschaftlicher bauen**

[www.rowa-ag.ch](http://www.rowa-ag.ch)



**fischer Injektions-System FIS EM**

- Spart Zeit und Geld dank reduzierter Verankerungstiefe
- Höchste Sicherheit dank ETA-Zulassungen
- Lange Verarbeitungszeit erleichtert Serienmontagen
- Anwendbar im gerissenen und ungerissenen Beton



**fischer**   
innovative solutions

SFS unimarket AG  
Befestigungstechnik  
Blegi 14  
6343 Rotkreuz  
T 0848 80 40 30  
F 0848 80 40 15  
[anwendungstechnik@sfsunimarket.biz](mailto:anwendungstechnik@sfsunimarket.biz)  
[www.sfsunimarket.biz](http://www.sfsunimarket.biz)

**Mit Sicherheit richtig befestigt:**  
Flexible und zugzonentaugliche Verankerungen  
mit fischer FIS EM

**SFS unimarket**



# GOTTHARD-BASISTUNNEL



Foto: AlpTransit Gotthard AG

## MIT SIKA ZUG UM ZUG SICHER INS NÄCHSTE JAHRHUNDERT

ABDICHTUNG | BETONHERSTELLUNG | BETONSCHUTZ | BRANDSCHUTZ | MASCHINEN | SPRITZBETON

[www.sika.ch](http://www.sika.ch)

BUILDING TRUST



## Walo Bertschinger - Ihr Partner für alle Bauwerke.

Walo Bertschinger AG  
Untertagbau  
Postfach 1155, CH-8021 Zürich  
Telefon +41 44 745 23 11  
[untertagbau@walo.ch](mailto:untertagbau@walo.ch) - [www.walo.ch](http://www.walo.ch)

Tunnel de Pinchat

