

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

# Taschenbuch für den Tunnelbau 2025

- **stets wechselnde Themen zu hochaktuellen Branchenthemen**
- **Hilfestellung und Lösungen für viele Herausforderungen im Tunnelbau**
- **große Praxisnähe**

Das Taschenbuch für den Tunnelbau ist seit vielen Jahren ein praxisnaher Ratgeber für Auftraggeber, Planer und Bauausführende. Die Beiträge in der Ausgabe 2025 behandeln die Themenbereiche Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise, konventioneller Tunnelbau, Digitalisierung im Tunnelbau, Forschung und Entwicklung, Baustoffe und Bauteile, Nachhaltigkeit und Praxisbeispiele.

vorl. Abb.



10 / 2024 · ca. 400 Seiten · 25 Tabellen

Hardcover

**ISBN 978-3-433-03448-4 ca. € 44,90\***

**Bereits vorbestellbar.**

## **BESTELLEN**

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3448](http://www.ernst-und-sohn.de/3448)

# Taschenbuch für den **Tunnelbau** **2025**

---

**Kompodium der Tunnelbautechnologie  
Planungshilfe für den Tunnelbau**

---

Herausgegeben von der DGGT ·  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.

Unter Mitwirkung von Prof. Dr.-Ing. H. Balthaus  
Dipl.-Ing. M. Breidenstein  
Dr.-Ing. C. Camós-Andreu  
Dr.-Ing. S. Franz  
Prof. Dr.-Ing. A. Hettler  
Dipl.-Ing. A. Hillebrenner  
Dipl.-Ing. K. Kruschinski-Wüst  
Prof. Dr.-Ing. D. Mähner  
Prof. Dr.-Ing. B. Maidl  
MR Prof. Dr.-Ing. G. Marzahn  
Dipl.-Ing. M. Meissner  
Dipl.-Ing. S. Schwaiger  
Prof. Dr.-Ing. M. Thewes  
Dr.-Ing. G. Wehrmeyer  
Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt

49. Jahrgang

---

# Vorwort zum neunundvierzigsten Jahrgang

---

Bei der Herstellung von leistungsfähiger Infrastruktur hat der Tunnelbau eine nicht zu unterschätzende Bedeutung. Die Komplexität der Bauwerke, auch in anspruchsvollen Baugrundverhältnissen und in eng besiedeltem Raum stellt uns vor Herausforderungen – genauso wie der Anspruch, die Bauwerke nachhaltig zu realisieren: technisch einwandfrei unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen, sozialen und Umwelt-Aspekte – nachhaltig für uns und für zukünftige Generationen. Wir müssen gemeinsam innovative Lösungen finden!

Themen, die uns in der Fachwelt derzeit beschäftigen, sind z.B.: Digitalisierung der Planungs- und Bauprozesse, Weiterentwicklung der Maschinentechnik, Beiträge zum nachhaltigen Tunnelbau, auch durch innovative Baustoffe. Das Taschenbuch für den Tunnelbau begleitet neue Entwicklungen seit fast fünf Jahrzehnten, zeigt Lösungen für Problemstellungen und dokumentiert so den erreichten Stand der Technik.

Das Taschenbuch für den Tunnelbau dient Auftraggebern, Planern, Bauausführenden und Zulieferern als praxisnaher Ratgeber. Für die diesjährige Ausgabe haben Herausgeberbeirat und Verlag aus einer größeren Anzahl von Beitragsvorschlägen eine Auswahl getroffen und eine interessante Mischung zusammengestellt. Die Beiträge behandeln Themen aus den Bereichen Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise, Konventioneller bergmännischer Tunnelbau, Digitalisierung im Tunnelbau, Baustoffe und Bauteile, Forschung und Entwicklung, Nachhaltigkeit sowie Praxisbeispiele. Ein Einkaufsführer für den Tunnelbaubedarf ergänzt den redaktionellen Teil.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und freue mich über Rückmeldungen sowie Themenanregungen und Beitragsvorschläge für zukünftige Ausgaben aus Ihren Reihen. Wenden Sie sich dazu bitte an die Mitglieder des Herausgeberbeirats oder an die Redaktion des Verlags Ernst & Sohn.

*Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt*

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort zum neunundvierzigsten Jahrgang .....	V
Autorenverzeichnis .....	XIV

## Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise

I. Gesteuertes Bohren für das Düsenstrahlverfahren .....	1
<i>Nikolaus Schneider, Silke Appel</i>	
1 Grundsätzliche Verbesserungen der Düsenstrahltechnik	2
2 Das Richtungsgestänge	11
3 Körperschallmessungen	23
4 Qualitätsüberwachung von zusammengesetzten Düsenstrahlkörpern	29
5 Ausblick	36

## Konventioneller bergmännischer Tunnelbau

I. 2. S-Bahn-Stammstrecke München – Tunnelabschnitte in der Spritzbetonbauweise unter Druckluft, Planung und geotechnische Grundlagen .....	39
<i>Wolfgang Rieken, Fritz Grübl</i>	
1 Einleitung	40
2 Spritzbetonvortriebe mit Druckluftbeaufschlagung	42
3 Projektüberblick	49
4 Vortriebsabschnitte in der Spritzbetonbauweise unter Druckluft	54
5 Vortriebe für den Verbindungsstollen am RS 3	61
6 Zusammenfassung	71

## **Digitalisierung im Tunnelbau**

- I. Umsetzung von BIM-Anforderungen bei einem großen Tunnelbauprojekt: Fallstudie HS2 ..... 74**  
*Mikel Bastida Molinillo, Hussein Hissawi, Thomas von Schmettow*
- 1 Einleitung **76**
  - 2 BIM-Anforderungen **78**
  - 3 SCS JV BIM-Strategie **82**
  - 4 CDE und Informationsmanagement **89**
  - 5 Modellkomplexität **98**
  - 6 BIM-Workflows **108**
  - 7 Fazit **111**
  - Danksagung **114**

## **Forschung und Entwicklung**

- I. Erschütterungen beim Sprengvortrieb – Messungen und Einfluss auf jungen Beton ..... 115**  
*Felix Wenker, Dietmar Mähner, Oliver Fischer*
- 1 Einleitung **116**
  - 2 Grundlagen **117**
  - 3 Stand der Technik **126**
  - 4 Untersuchungen an der FH Münster **133**
  - 5 Weitere Untersuchungen **146**
  - 6 Feldversuche am Tunnel Alberberg **154**
  - 7 Zusammenfassung **159**
- II. Nachhaltiger Betonbau für Eisenbahntunnel in Deutschland: betontechnologische Potenziale und Herausforderungen der Umsetzung ..... 165**  
*Anna-Lena Hammer, Carles Camós-Andreu, David Alós-Shepherd, Tim Schneider, Maureen Denu, Yara Maria Grander, Matthias Rosa, Carsten Peter, Hendrik Schällicke, Frank Dehn*
- 1 Einleitung **168**

- 2 Klima- und Ressourcenschonung im deutschen Tunnelbau **173**
- 3 Betonzusammensetzung gemäß dem Stand der Technik **181**
- 4 Normative Grundlagen zur Betontechnologie und bauweisenspezifische Merkmale von Eisenbahntunneln **185**
- 5 Optimierungspotenzial im Betonbau mit dem Ziel der Umweltschonung **203**
- 6 Abweichende Eigenschaften umweltfreundlicher Betone **220**
- 7 Optimierungsansätze für einen umweltfreundlichen Betonbau in Eisenbahntunneln **229**
- 8 Umsetzbarkeit bei zukünftigen Projekten **252**
- 9 Zusammenfassung und Ausblick **255**

**III. Verwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau durch Calcinierung von tonhaltigen Böden – Ergebnisse des Forschungsvorhabens TOFFEE .....270**

*Christoph Budach, Pierre Müller, Björn Siebert, Christian Thienert, Frank Leismann, Stephan Uebachs, Thomas Heiermann, Simon Liepins, Dirk Uhlmann*

- 1 Einleitung **271**
- 2 Ausgewählte Böden und deren Aufbereitung **272**
- 3 Bestimmung der Reaktivität **280**
- 4 Alkalische Aktivierung als Geopolymer **287**
- 5 Anwendungstechnisches Konzept **294**
- 6 Zusammenfassung und Ausblick **301**

## **Nachhaltigkeit**

**I. TBM-Remanufacturing für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Untertagebau .....306**

*Gerhard Wehrmeyer, Olaf Kortz, Dominic Schultze, Michael Euler, Valerie Isabel Lewen*

- 1 Einleitung **307**

- 2 Prozess Remanufacturing **307**
- 3 TBM Remanufacturing für Kreislaufwirtschaft und nachhaltiges Bauen **321**

## **Praxisbeispiele**

- I. Deep Tunnel Sewerage System Phase 2 (DTSS2) in Singapur – Herausforderungen bei der Planung und Ausführung .....323**  
*Sven Burger, Michael Schmaus*
  - 1 Projektvorstellung **324**
  - 2 Geologische Bedingungen **333**
  - 3 Erfahrungen aus dem maschinellen Tunnelbau **339**
  - 4 Planung und Ausführung der Tunnelinnenschale **353**
  - 5 Planung und Ausführung der Abwasserbauwerke **368**
  - 6 Zusammenfassung **375**
  
- II. Brenner Basistunnel– Injektionsmaßnahmen im Zuge der Durchörterung der Hochstegenzone .....377**  
*Walter Fahrnberger, Matthias Hofmann, Philip Stadler*
  - 1 Einleitung **378**
  - 2 Injektionskonzept **387**
  - 3 Ausführung der Injektionsmaßnahmen **390**
  - 4 Injektionserfolg **413**
  - 5 Zusammenfassung **419**
  
- Tunnelbaubedarf .....421**
  
- Inserentenverzeichnis .....431**

---

# Autorenverzeichnis

---

**Dr.-Ing. David Alós-Shepherd**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Baustoffe und Betonbau, MPA Karlsruhe, CMM Karlsruhe, Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe 165

**Dr.-Ing. Silke Appel**, GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Darwinstr. 13, 10589 Berlin 1

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Budach**, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und Tunnelbau 270

**Dr. Carles Camós-Andreu**, PROF. DR.-ING. KIRSCHKE GmbH & Co. KG, Riesstraße 16, 80992 München 165

**Dipl.-Ing. Sven Burger**, Techn. Bereichsleiter, Projekt Direktor, Ed. Züblin AG, Albstadtweg 5, 70567 Stuttgart 323

**Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Baustoffe und Betonbau, MPA Karlsruhe, CMM Karlsruhe, Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe 165

**M. Sc. Maureen Denu**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Baustoffe und Betonbau, MPA Karlsruhe, CMM Karlsruhe, Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe 165

**Michael Euler**, Herrenknecht AG, Schlehenweg 2, 77963 Schwanau-Allmannsweier 306

**Dipl. Geol. Walter Fahrberger**, Projektleiter Geotechnik Bauabschnitt Österreich, Planungsgemeinschaft BBT-N, Grabenweg 64, A-6020 Innsbruck 377

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Fischer**, Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Massivbau – MPA BAU | LKI, Theresienstraße 90, 80333 München 115

**B. Sc. Yara Maria Grander**, PROF. DR.-ING. KIRSCHKE GmbH & Co. KG, Riesstraße 16, 80992 München 165

- Prof. Dipl.-Ing. Fritz Grübl**, ZPP Ingenieure AG, Pilgersheimer Straße 38,  
81543 München 39
- Dr.-Ing. Anna-Lena Hammer**, BUNG-PEB Tunnelbau-Ingenieure GmbH,  
Stockumer Straße 475, 44227 Dortmund 165
- Thomas Heiermann**, M. Sc., Brameshuber + Uebachs INGENIEURE  
GmbH, Jakobstraße 12, 52064 Aachen 270
- Hussein Hissawi**, (ex STRABAG AG), Mace, 155 Moorgate, London,  
EC2M 6XB, GB 74
- Dr. Dipl. Ing. Matthias Hofmann**, Projektleiter Bauabschnitt Hochstegen,  
Brenner Basistunnel BBT-SE, Amraser Straße 8, A-6020 Innsbruck 377
- Olaf Kortz**, Herrenknecht Rebuild Services, Weststraße 22,  
77694 Kehl 306
- Dipl.-Ing. Frank Leismann**, STUVA e. V., Mathias-Brügggen-Straße 41,  
50827 Köln 270
- Valerie Isabel Lewen**, Herrenknecht AG, Schlehenweg 2, 77963 Schwanau-  
Allmannsweier 306
- Dipl.-Ing., Dipl.-Umweltwiss. Simon Liepins**, IMM Maidl & Maidl Beratende  
Ingenieure GmbH & Co. KG, Konrad-Zuse-Straße 18,  
44801 Bochum 270
- Prof. Dr.-Ing. Dietmar Mähner**, FH Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen,  
Institut für unterirdisches Bauen (IuB), Correnstraße 25,  
48149 Münster 115
- Mikel Bastida Molinillo**, STRABAG AG, Donau-City-Str. 9,  
A- 1220 Wien, AT 74
- Dr. Pierre Müller**, Technische Hochschule Köln, Fakultät für  
Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe,  
Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet  
Geotechnik und Tunnelbau 270
- Dr.-Ing. Carsten Peter**, BUNG-PEB Tunnelbau-Ingenieure GmbH,  
Stockumer Straße 475, 44227 Dortmund 165
- Dr.-Ing. Wolfgang Rieken**, DB Netz AG, Großprojekt 2. S-Bahn-  
Stammstrecke München, Technisches Projektmanagement (TPM),  
I.IIM 55, Arnulfstraße 25–27, 80335 München 39

**M. Sc. Matthias Rosa**, PROF. DR.-ING. KIRSCHKE GmbH & Co. KG,  
Riesstraße 16, 80992 München 165

**Dipl.-Ing. Hendrik Schälicke**, PROF. DR.-ING. KIRSCHKE GmbH & Co. KG,  
Gutenbergstraße 9, 76275 Ettlingen 165

**Dipl.-Ing. Michael Schmaus (P. Eng.)**, Technischer Leiter, Strabag International  
GmbH, Siegburger Straße 241, 50679 Köln 323

**Dr.-Ing. Thomas von Schmettow**, Ed. Züblin AG, Albstadtweg 3, 70567  
Stuttgart, DE 74

**Dipl.-Ing. Univ. Nikolaus Schneider**, GuD Geotechnik und Dynamik Consult  
GmbH, Darwinstr. 13, 10589 Berlin 1

**M. Sc. Tim Schneider**, BUNG-PEB Tunnelbau-Ingenieure GmbH,  
Stockumer Straße 475, 44227 Dortmund 165

**Dominic Schultze**, Herrenknecht AG, Schlehenweg 2, 77963 Schwanau-  
Allmannsweier 306

**Prof. Dr.-Ing. Björn Siebert**, Technische Hochschule Köln, Fakultät für  
Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe,  
Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet  
Baustoffe 270

**Ing. Philip Stadler**, Stellvertretender Leiter der Örtlichen Bauaufsicht,  
Ingenieurgemeinschaft ÖBA-Brenner, Wolf 30, A-6150 Steinach am  
Brenner 377

**Dr.-Ing. Christian Thienert**, Bereichsleiter Tunnelbau und Bautechnik,  
STUVA e. V., Mathias-Brüggen-Straße 41, 50827 Köln 270

**Dr.-Ing. Stephan Uebachs**, Brameshuber + Uebachs INGENIEURE GmbH,  
Jakobstraße 12, 52064 Aachen 270

**Dirk Uhlmann**, MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Am Kruppwald  
1-8, 46238 Bottrop 270

**Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer**, Herrenknecht AG, Schlehenweg 2,  
77963 Schwanau-Allmannsweier 306

**Felix Wenker**, M. Sc., FH Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen,  
Institut für unterirdisches Bauen (IuB), Corrensstraße 25,  
48149 Münster 115

---

# Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise

---

## I. Gesteuertes Bohren für das Düsenstrahlverfahren

Nikolaus Schneider, Silke Appel

*Die Düsenstrahltechnik hat durch den Einbau von Neigungssensoren in das Düsenstrahlgestänge eine grundsätzliche Verbesserung erfahren, die die Ausführungssicherheit, insbesondere beim Einsatz des Verfahrens zu Abdichtungszwecken, deutlich erhöht und in Kombination mit Körperschallmessungen neue Möglichkeiten der Qualitätssicherung eröffnet. Die Einleitung von elektrischer Spannung in das Bohrgestänge ermöglicht eine Datenauslesung aus den Neigungssensoren in Echtzeit und damit eine gezielte Steuerung der Bohrung. Aus den digitalisierten Signalen von Körperschallmessungen in ausgehärteten Säulen sind darüber hinaus Rückschlüsse auf die Überschneidung der Düsenstrahlsäulen nach objektiven Kriterien möglich. Dies bringt eine erhebliche Vergrößerung der Ausführungssicherheit für Dichtsohlen mit sich.*

### **Controlled drilling for jet grouting technology**

*Jet grouting technology has experienced fundamental improvements through the installation of inclination sensors in the jetting rod, which significantly increases the reliability of construction work, especially when constructing water tight sealing layers. Reading structure borne noise in jet grouted structures opens new possibilities for quality assurance. Inducing electrical voltage into the jetting rod enables data to be read from the inclination sensors in real time and thus measuring the drilling direction while drilling. Evaluating the digitized signals from structure-borne sound measurements in hardened columns, conclusions can also be drawn in regard to the overlap of the jet grouted columns according to objective criteria, which significantly increases the reliability of the execution of sealing layers.*

---

# Konventioneller bergmännischer Tunnelbau

---

## I. 2. S-Bahn-Stammstrecke München – Tunnelabschnitte in der Spritzbetonbauweise unter Druckluft, Planung und geotechnische Grundlagen

Wolfgang Rieken, Fritz Grübl

*Zur Entlastung der S-Bahn-Stammstrecke in München wird auf einer Länge von 10 km zwischen den Haltepunkten Leuchtenbergring im Osten und Laim im Westen von München eine zweite Stammstrecke mit ca. 7 km Tunnelstrecke und mit drei neuen unterirdischen Haltepunkten gebaut. Die beiden eingleisigen Tunnelröhren werden mit Schild-Tunnelbohrmaschinen mit aktiver Ortsbruststützung aufgefahren. Zwischen den Tunnelröhren verläuft ein ebenfalls mit einer TBM aufgefahrener Erkundungs- und Rettungsstollen (ERS), der über Verbindungsbauwerke im Abstand von weniger als 400 m mit den Tunnelröhren verbunden ist. Der Erkundungs- und Rettungsstollen kann außer über die Haltepunkte noch über vier Ausstiegsbauwerke (Rettungsschächte) entlang der Strecke zur Oberfläche hin verlassen werden. Neben den maschinell vorgetriebenen Tunneln sind zahlreiche Abschnitte in der Spritzbetonbauweise unter Druckluft aufzufahren. Insbesondere wird diese Bauweise bei Bauwerken mit besonders großen Ausbruchsquerschnitten angewendet, deren Herstellung wegen fehlender Zugänglichkeit nicht in einer Baugrube möglich ist. Im Beitrag wird ein Überblick über die aktuelle Planung der Druckluftvortriebe gegeben. Besonders berücksichtigt werden die Fragestellungen, die sich am Rettungsschacht 3 beim Auffahren des Verbindungstunnels zwischen dem Ausstiegsschacht und dem Erkundungs- und Rettungsstollen ergeben.*

## **Second Core S-Bahn Route in Munich - Tunnel sections to be excavated with the shotcrete method under compressed air, design and geotechnical principles**

*To relieve the existing core line of the Munich Suburban Railway system a second core line will be built between the stations of Laim in the West of the city and Leuchtenbergring in the East, covering a total of about 10 km. Part of it is a 7 km tunnel with three new underground stations. Two single-track tunnels will be driven by tunnel boring machines (TBM) with active tunnel face support. A parallel Exploration and Rescue Tunnel (ERT) runs between the railway tunnels and is also driven by tunnel boring machines. There will be connecting structures between the ERT and the railway tunnels with a spacing of less than 400 m. Exits of the ERT will be situated in the underground stations and in four rescue shafts along the line. Besides the tunnel sections driven by tunnel boring machines, numerous structures will be executed by the shotcrete method under compressed air. This construction method will be particularly applied for tunnels with large cross-sections, which due to inaccessibility cannot be constructed by an open or cut-and-cover method. This article provides an overview of planning of the compressed air drives. Extra consideration is given to technical issues concerning rescue shaft 3 and the connecting tunnel between the rescue shaft and the exploration and rescue tunnel.*

### **1 Einleitung**

Zur Entlastung der S-Bahn-Stammstrecke in München wird auf einer Länge von 10 km zwischen den Haltepunkten Leuchtenbergring im Osten und Laim im Westen von München eine zweite Stammstrecke mit ca. 7 km Tunnelstrecke und mit drei neuen unterirdischen Haltepunkten gebaut. Die beiden eingleisigen Tunnelröhren werden mit Tunnelbohrmaschinen (Schild-TBMs mit aktiver Ortsbruststützung) aufgeföhren. Zwischen den Tunnelröhren verläuft parallel ein ebenfalls mit einer TBM aufgeföhrener Erkundungs- und Rettungsstollen, der über Verbindungsbauwerke im Abstand von weniger als 400 m mit den Tunnelröhren verbunden ist.

Neben den Strecken mit maschinellen Vortrieben werden verschiedene Tunnelabschnitte in der Spritzbetonbauweise unter Druckluft aufgeföhren. Es handelt sich dabei um den Verbindungsstollen am Rettungsschacht 3 (RS 3), die Bahnsteigtunnel an den Stationen Hauptbahnhof und Marienhof, einen Verbindungsstollen zur U-Bahnlinie U3/U6 an der Station Marienhof, einen Aufweitungstunnel

---

# Digitalisierung im Tunnelbau

---

## I. Umsetzung von BIM-Anforderungen bei einem großen Tunnelbauprojekt: Fallstudie HS2

Mikel Bastida Molinillo, Hussein Hissawi, Thomas von Schmettow

*Für die Planung und den Bau der beiden südlichsten Lose S1 und S2 des Mega-projekts „High Speed 2“ (HS2) wurden umfangreiche BIM-Anforderungen erfüllt. Die beiden Lose werden gegenwärtig von einer ARGE bestehend aus Skanska, Costain und STRABAG gebaut und umfassen neben einer Reihe von Schächten, Brücken und anderen Bauwerken zwei rund 22 km lange Tunnelröhren mit variierender Größe, die vom Londoner Zentrum bis zur westlichen Stadtgrenze bei West Ruislip reichen. Vergleichbare Anforderungen (BIM Level 2), wie sie als Neuerung bei Projektbeginn im Jahr 2013 vom Auftraggeber (Projektgesellschaft HS2 Ltd.) gefordert wurden, sind jetzt für alle zukünftigen, großen Infrastrukturprojekte im Vereinigten Königreich vorgesehen. Die Umsetzung dieser Anforderungen bei den beiden in London gelegenen Losen von HS2 stellte eine große Herausforderung dar. Der vorliegende Bericht beschreibt die Umsetzung der BIM-Anforderungen und erläutert den Mehrwert für das Projekt, den die neu entwickelten Prozesse im Vergleich zu früheren Arbeitsweisen brachten.*

### **Applying BIM requirements to a large-scale tunnelling project: A Case Study of HS2**

*The design and construction of the two southerly Lots S1 and S2 of the mega project “High Speed 2” (HS2) had to meet ambitious BIM requirement goals. Both lots are currently being built by a construction JV consisting of Skanska, Costain and STRABAG. Besides several shafts and other structures, they comprise two almost 22 km long tunnels connecting the centre of London with the western outskirts of the city at West Ruislip. Similar requirements (BIM level 2) as they were then requested by the client (HS2 Ltd.) at the start of the project are now mandatory for large infrastructure projects in the UK. Applying these requirements to a large scale TBM tunnelling project like the two southern lots of HS2 imposes a great challenge. This article explores how the design and construction joint venture for Lots S1 and S2 approached the implementation of the BIM*

*requirements, overcame some of the challenges, and how the adopted workflow added value to the project in comparison to previous ways of working.*

## 1 Einleitung

Der Bedarf an großen Tunnelbauten steigt stetig, da insbesondere der öffentliche Nahverkehr in Ballungsräumen in den kommenden Jahrzehnten aus Gründen des Umweltschutzes und der begrenzten Steigerungsfähigkeit des Individualverkehrs kontinuierlich weiter ausgebaut werden muss. Der Umfang und die technische Komplexität dieser oft außergewöhnlich großen Bauvorhaben (Megaprojekte) sowie die Anforderungen an den anschließenden Betrieb und die Instandhaltung haben in Verbindung mit der zunehmenden Digitalisierung zur beschleunigten Einführung von Building Information Modelling (BIM) geführt.

Ein jüngeres Beispiel für ein solches, aus zahlreichen Losen bestehendes Megaprojekt ist das HighSpeed 2-Projekt (HS2), das in mehreren Phasen verwirklicht werden soll. Phase 1 besteht aus sieben Losen und umfasst den Bau und die Inbetriebnahme einer neuen Eisenbahnverbindung zwischen London und Birmingham (Bild 1). Dazu werden



**Bild 1.** Projekt HS2, Ausbaustufe in Phase 1

---

# Forschung und Entwicklung

---

## I. Erschütterungen beim Sprengvortrieb – Messungen und Einfluss auf jungen Beton

Felix Wenker, Dietmar Mähner, Oliver Fischer

*Erschütterungen beim Sprengvortrieb wirken unmittelbar auf die Spritzbeton-außenschale sowie bei Herstellung einer Tunnelinnenschale und gleichzeitigem Sprengvortrieb in der parallelen Tunnelröhre ein. Doch wie sich Erschütterungen auf den jungen Beton auswirken und ob bzw. wie diese das Gefüge des Betons verändern, ist bisher noch nicht vollständig geklärt. Aufgrund dessen wurden systematische Untersuchungen mit variierenden Schwingungsparametern durchgeführt, in denen der Einfluss von Erschütterungen auf das Betongefüge in Form von veränderten Festigkeiten sowie Wassereindringtiefen untersucht wurde. Des Weiteren fanden zusätzliche Untersuchungen statt, um die Ursache von möglichen Gefügeveränderungen zu erforschen. Die Übertragbarkeit dieser Versuchsergebnisse in die Praxis wurde anhand von Feldversuchen am Tunnel Alberberg verifiziert. Hier wurden Schwingungsmessungen durchgeführt und Beton hergestellt, der den Erschütterungen beim Sprengvortrieb ausgesetzt und anschließend untersucht wurde.*

### **Vibrations during blasting – Measurements and influence on young concrete**

*Vibrations during blasting have a direct effect on the outer lining as well as during the construction of an inner lining and simultaneous blasting in the parallel tunnel tube. However, how vibrations affect the young concrete and whether or how they change the structure of the concrete has not yet been fully clarified. For this reason, systematic investigations were carried out with varying vibration parameters in which the influence of vibrations on the concrete structure in the form of altered strengths and water penetration depths was investigated. Additional tests were also carried out to investigate the cause of possible structural changes. The transferability of these test results into practice was verified by means of field tests at the Alberberg Tunnel. Vibration measurements were*

*carried out there and concrete was produced on site, which was exposed to vibrations during blasting and examined afterwards.*

## 1 Einleitung

Obwohl der Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton seit mehr als 100 Jahren erforscht wird, ist dieser in Deutschland bislang noch nicht normativ geregelt. Eine Zusammenfassung von normativen Vorgaben, die in anderen Ländern (z. B. China oder USA) gelten, ist in [1] enthalten. Dort zeigt sich, dass keine einheitlichen Regelungen für Erschütterungen von jungem Beton vorhanden sind. So sind die maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeiten z. T. von der Frequenz, Entfernung oder der Betonfestigkeit abhängig und innerhalb der ersten drei Tage sind u. a. keine Schwingungen oder maximale Schwinggeschwindigkeiten von bis zu  $90 \text{ mms}^{-1}$  zulässig [1].

Nach DIN 1045-3 [2] muss junger Beton vor schädlichen Erschütterungen, Stößen oder Beschädigungen geschützt werden. Eine Definition von schädigenden Erschütterungen erfolgt in [2] nicht. Für die Beurteilung von Erschütterungen auf bauliche Anlagen wie z. B. Tunnel sind in DIN 4150-3 [3] Anhaltswerte für maximale Schwinggeschwindigkeiten angegeben, die bei kurzzeitigen Erschütterungen nicht überschritten werden sollten. Hier sind jedoch ebenfalls keine quantitativen Regelungen für jungen Beton vorhanden.

Inwiefern sich Schwingungen auf das Betongefüge auswirken, wurde bisher nicht detailliert untersucht. Solange sich der junge Beton plastisch verformen kann, wird das Betongefüge nicht geschädigt und es findet i. d. R. eine Nachverdichtung statt. Bei dem weiteren Erhärten des Betons können durch Schwingungen Zug- und Scherbeanspruchungen hervorgerufen werden, die Risse und Lockerungen des Betongefüges erzeugen. Diese Phase wird kritischer Zeitraum genannt [4]. Somit könnten in dieser Phase die Festigkeit und die Wasserundurchlässigkeit des Betons beeinflusst werden.

## II. Nachhaltiger Betonbau für Eisenbahntunnel in Deutschland: betontechnologische Potenziale und Herausforderungen der Umsetzung

Anna-Lena Hammer, Carles Camós-Andreu, David Alós-Shepherd, Tim Schneider, Maureen Denu, Yara Maria Grander, Matthias Rosa, Carsten Peter, Hendrik Schällicke, Frank Dehn

*Die Deutsche Bahn AG verfolgt mit der Dachstrategie „Starke Schiene“ das Ziel, die Schieneninfrastruktur zu stärken und den Schienenverkehr zu intensivieren. Dies erfordert zahlreiche Infrastrukturprojekte (Neubau) und Instandhaltungsmaßnahmen (inkl. Erneuerung), was zu einem Anstieg der Anzahl an Tunnelbauwerken in der Eisenbahninfrastruktur führt. Die Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene soll eine bedeutende Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) bewirken. Jedoch erfordert der Bau von Eisenbahntunneln große Mengen an Stahlbeton, was wiederum den Bedarf an Zement als Bindemittel erhöht. Die CO<sub>2</sub>-intensive Herstellung von Zement, insbesondere des darin enthaltenen Portlandzementklinkers, beeinträchtigt die Ökobilanz von Tunnelbauwerken erheblich. Vor dem Hintergrund der Klimaziele ist es daher entscheidend, eine ausgewogene Abstimmung zwischen der Schaffung langlebiger, leistungsfähiger Schieneninfrastruktur und der Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen. Zudem steht die deutsche Betonindustrie in den nächsten Jahren vor einer zunehmenden Verknappung der bisher genutzten weiteren Zementhauptbestandteile und Betonzusatzstoffe zur Reduzierung des Portlandzementklinkeranteils in Zementen, wie Flugasche und Hüttensand, sowie der zur Verfügung stehenden natürlichen Gesteinskörnung. Daher sind Optimierungsansätze erforderlich, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Betonbau zu verringern und die Ressourceneffizienz bei künftigen Tunnelprojekten zu steigern. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Möglichkeiten zur Verwendung von klinkerreduzierten Zementen. Die DIN 1045-2:2023 sieht bereits den Einsatz dieser neuen Zementarten vor; bis zum Jahr 2050 soll ihr Anteil an der in Deutschland verwendeten Zementmenge ca. 60 % betragen. Der vorliegende Beitrag beleuchtet das Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasen beim Einsatz von Beton in Eisenbahntunneln, wobei die gewonnenen Erkenntnisse*

größtenteils auch auf andere Arten von Verkehrstunneln übertragbar sind. Der Fokus liegt auf der Identifizierung von Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich der Betontechnologie. Dabei werden verschiedene Optimierungsansätze für umweltfreundliche Betone im Tunnelbau vorgestellt und ihre Eignung für die unterschiedlichen Tunnelbauweisen analysiert. Abschließend werden die Anforderungen an die Umsetzbarkeit dieser Ansätze in zukünftigen Projekten diskutiert und entsprechende Empfehlungen gegeben.

### **Sustainable concrete construction for railway tunnels in Germany: Concrete technology potentials and challenges of implementation**

*Deutsche Bahn AG is pursuing the "Strong Rail" strategy to strengthen railway infrastructure and intensify rail transport. This requires numerous new infrastructure projects as well as maintenance activities, leading to an increase in tunnel structures in the railway network. Shifting road traffic towards rail traffic aims to significantly reduce greenhouse gas emissions (GHG emissions). However, the construction of railway tunnels requires large amounts of reinforced concrete, in turn increasing the demand for cement as a binder. The CO<sub>2</sub>-intensive production of cement, particularly Portland cement clinker, substantially impacts the life cycle assessment of tunnel structures. In light of climate goals, achieving a balance between creating durable, efficient rail infrastructure and minimizing CO<sub>2</sub> emissions is crucial. Additionally, the German concrete industry faces growing shortages of alternative cement constituents and SCMs, such as fly ash and slag, as well as natural aggregates. Therefore, optimization approaches are necessary to reduce CO<sub>2</sub> emissions in concrete construction and enhance resource efficiency in future tunnel projects. Special attention is given to the potential use of clinker-reduced cements. The DIN 1045-2:2023 standard already permits these new cement types, and their proportion of cement used in Germany is expected to reach approximately 60 % by 2050. This paper explores the potential for GHG emission savings in the use of concrete for railway tunnels, although the conclusions are applicable to other types of traffic tunnels. The paper focusses on identifying ways to increase resource efficiency and reduce CO<sub>2</sub> emissions in concrete technology. Various optimization approaches for eco-friendly concrete in tunnel construction are presented, and their suitability for different tunnel construction methods is analysed. Finally, the paper*

*discusses the feasibility of these approaches in future projects and provides recommendations for their implementation.*

## **1 Einleitung**

### **1.1 Der Schienenverkehr als wichtiger Baustein der Klimaneutralität**

Die Deutsche Bahn (DB) verfolgt mit ihrer Dachstrategie „Starke Schiene“ das Ziel, die Schieneninfrastruktur zu stärken und den Schienenverkehr zu intensivieren. Hierbei strebt sie u. a. an, die Passagierzahlen bzw. die Anzahl der Personenkilometer (Pkm, als Produkt aus der Anzahl beförderter Passagiere und der dabei zurückgelegten Wegstrecke in km) im Schienenpersonenfernverkehr zu verdoppeln und den Marktanteil des Schienenverkehrs am gesamten Güterverkehr von 18 % auf 25 % zu erhöhen. Bis 2030 soll somit eine Steigerung um 70 % erreicht werden, um mehr Güter auf die Schiene zu bringen.

Im Durchschnitt verursacht jeder Einwohner Deutschlands einen kumulierten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) von etwa 9 t/a, inklusive der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel [1]. Die DB beabsichtigt, durch die Verlagerung von Verkehr auf die Schiene eine erhebliche jährliche Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) um 10,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent zu erreichen, was etwa 1–2 % der Gesamtemissionen der deutschen Bevölkerung entspricht [2]. (Zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Äquivalents von Treibhausgasen wird untersucht, welchen Beitrag ein THG im Vergleich zur gleichen Menge CO<sub>2</sub> über einen Zeitraum von 100 Jahren zum Treibhauseffekt (THP) leistet [3]. Im Folgenden werden die Bezeichnungen CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>-Äquivalent bzw. CO<sub>2</sub>e synonym verwendet.) Im Rahmen dieser Strategie strebt die DB bis 2040 die Klimaneutralität an, indem sie u. a. Ökostrom nutzt und eine vollständige Kreislaufwirtschaft implementiert [4, 5].

Diese Ziele stehen im Einklang mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) [6], das Deutschland verpflichtet, die THG-Emissionen im Vergleich zu 1990 sukzessiv zu reduzieren. Bis 2030 soll eine

### **III. Verwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau durch Calcinierung von tonhaltigen Böden – Ergebnisse des Forschungsvorhabens TOFFEE**

**Christoph Budach, Pierre Müller, Björn Siebert, Christian Thienert, Frank Leismann, Stephan Uebachs, Thomas Heiermann, Simon Liepins, Dirk Uhlmann**

*Das Thema der Verwertung von Bodenaushub und Tunnelausbruchmaterial hat in den letzten Jahren im Rahmen der Kreislaufwirtschaft und aufgrund der Verknappung von verfügbaren Deponiekapazitäten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Tunnelbauprojekte stellen dabei eine Besonderheit dar, da über einen kurzen Zeitraum lokal große Mengen von Material anfallen. Nicht selten erfolgen Vortriebe in heterogenen Baugrundverhältnissen, in denen tonhaltige Böden anzutreffen sind. Während grobkörnige Aushubmaterialien vielfach bauseits für geotechnische Zwecke verwertet werden können, gibt es für feinkörnige Böden häufig keine geeignete bzw. ökologisch hochwertige Verwertung. Aus diesem Grund wurde das Forschungsvorhaben „Aufbereitung und Aktivierung von Tonböden für ressourceneffiziente Geopolymer-Baustoffe“, kurz TOFFEE, seitens des BMBF gefördert. Dabei steht die Calcinierung, d. h. die thermische Behandlung von Tonen und tonhaltigen Böden im Fokus bzw. deren Verwertung als Ausgangsstoff in Beton und Mörtel im Vordergrund. Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden präsentiert.*

#### **Reuse of soils excavated by tunnel boring machines by calcination of clayey soils – results from the research project TOFFEE**

*In recent years, the topic reusing excavated material of tunnelling projects has increasingly gained importance in the context of circular economy principles and the steadily decreasing availability of landfill sites. Tunneling projects are special, because large volumes of excavated soil are generated over a short period of time. In general, the tunnel drives take place in heterogeneous subsurface conditions that comprise clayey soils. Whilst coarse-grained excavated soils can be reused for geotechnical purposes, there are no suitable and ecologically efficient reuse applications for fine-grained soils. For this reason, the research*

*project about the preparation and activation of clayey soils for resource-efficient geopolymers building materials (acronym: TOFFEE) has been funded by the BMBF. The focus of the project is on the calcination (i.e. thermal treatment) of clays and clay-rich soils, and their reuse as basis for concrete and mortar. Selected results of the research project are presented.*

## **1 Einleitung**

Die Verwertung von Bodenaushub und Tunnelausbruchmaterial im Rahmen der Kreislaufwirtschaft und aufgrund der Verknappung von verfügbaren Deponiekapazitäten hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen [1]. Tunnelbauprojekte haben dabei einen besonderen Status, da über einen kurzen Zeitraum lokal große Mengen Material anfallen. Aus diesem Grund erstellt der Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen (DAUB) eine Empfehlung zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial [2].

Im Lockergestein werden Tunnel üblicherweise mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) mit flüssigkeits- oder erddruckgestützter Ortsbrust hergestellt. Nicht selten erfolgen Vortriebe in heterogenen Baugrundverhältnissen, in denen tonhaltige Böden anzutreffen sind. Der natürlich anstehende Boden wird hierbei verfahrensbedingt verändert, z. B. mit Bentonit aus der Stützflüssigkeit oder durch Zugabe von Konditionierungsmitteln. Dies hat zur Folge, dass das Ausbruchmaterial möglicherweise aufbereitet werden muss, bevor es verwertet oder beseitigt werden kann. Während grobkörnige Lockergesteine z. B. als Rezyklat in der Industrie oder als Material für den Erd- und Straßenbau genutzt werden können, ist die Verwertung von bindigen Materialien häufig schwieriger [3].

Zu den Zielen des nachhaltigen Bauens gehört – neben der Ressourceneffizienz – auch die Entwicklung von Baustoffen, bei deren Herstellung oder Verarbeitung wenig CO<sub>2</sub> entsteht. Zement als wichtiges Baumaterial für Infrastrukturbauwerke ist dabei nicht „CO<sub>2</sub>-arm“, da z. B. bei der Herstellung von Portlandzementen ca. 5–7 % der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt werden [4]. Um eine Dekarbonisierung im Bereich zementgebundener Baustoffe zu erreichen, werden geeignete und möglichst festigkeitswirksame

---

# Nachhaltigkeit

---

## I. TBM-Remanufacturing für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Untertagebau

Gerhard Wehrmeyer, Olaf Kortz, Dominic Schultze, Michael Euler,  
Valerie Isabel Lewen

*Die Aufarbeitung und Wiederverwendung von Komponenten und Baugruppen bis hin zu kompletten Tunnelbohrmaschinen (TBMs) hat bei Herrenknecht eine lange Tradition. Der Remanufacturing-Prozess hat dabei einen hohen Reifegrad erreicht und zählt direkt auf die Transformationsziele Kreislaufwirtschaft und nachhaltiges Bauen ein. Der vorliegende Beitrag beschreibt zunächst die Chancen und den erreichten Umsetzungsgrad des Remanufacturing anhand konkreter Projektreferenzen. Anschließend werden diese hinsichtlich der Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Basis zertifizierter Messergebnisse bewertet. Der Beitrag unterstreicht eindrucksvoll, dass ein professionelles Remanufacturing von TBMs bei der Entwicklung moderner Tunnelsysteme integraler Bestandteil eines Projekts sein kann. Dabei schließen sich Remanufacturing und maßgeschneidertes Design nicht aus. Sie ergänzen sich vielmehr auf Basis von Modularisierung, Standardisierung und Individualisierung, um Anforderungen des jeweiligen Projekts wie der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen.*

### **TBM remanufacturing for sustainability and circular economy in underground mining**

*Herrenknecht has a long tradition of remanufacturing and reusing components, assemblies and even complete TBMs. The remanufacturing process has reached a high level of maturity and contributes directly to the transformation goals of the circular economy and sustainable construction. This article first describes the opportunities and the degree of implementation achieved by remanufacturing using specific project references and evaluates these in terms of CO<sub>2</sub> emission savings based on certified measurement results. The article impressively underlines that professional remanufacturing of tunnel boring machines can be an integral part of a project when developing modern tunnel systems. Remanufacturing and tailored individual design are not mutually exclusive but*

*complement each other in the design based on modularization, standardization and individualization in order to meet the requirements of the respective project and the circular economy.*

## **1 Einleitung**

Die Wiederverwendung von Tunnelbohrmaschinen (TBMs) hat bei Herrenknecht eine lange Tradition. Aufgrund des Rückkaufswerts einer TBM und der nicht ausgeschöpften Lebensdauer bietet die Sanierung oder Wiederaufbereitung von Komponenten und Baugruppen bis hin zu kompletten TBMs ein enormes Potenzial, diesen Gerätschaften zu einem erneuten Einsatz zu verhelfen.

In der Vergangenheit mussten bei TBM-Neuausschreibungen eher Vorbehalte gegenüber wiederverwendeten Komponenten ausgeräumt werden. Diese wurden damit begründet, dass die Projektanforderungen den aktuellen Stand der Maschinenteknik verlangten. Zudem wollten die Auftraggeber verständlicherweise keine Abstriche bei Sicherheit, Lebensdauer und projektspezifischer Anpassung hinnehmen, die fälschlicherweise mit dem Einsatz einer gebrauchten TBM in Verbindung gebracht wurden.

Das Darstellen und Leben des jeweiligen Remanufacturing-Prozesses, die Überwachung und Dokumentation sowie die Sanierung zum Status „wie neu“ bzw. „gemäß Stand der Technik“ bilden wesentliche Bausteine, die auf Kunden- und Bauherrenseite die Vorbehalte gegen eine Verwendung von wiederaufbereiten oder erneuerten Bauteilen und Baugruppen in ihren TBMs ausräumen.

Neben ökonomischen Aspekten kommen in den letzten Jahren verstärkt Aspekte der Forderung nach einer CO<sub>2</sub>-Einsparung und der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft dazu.

## **2 Prozess Remanufacturing**

### **2.1 Definition und Abgrenzung**

Bis heute gibt es keine spezifischen Leitlinien für die Tunnelbauindustrie zur Festlegung von Mindestqualitätsanforderungen für die

---

# Praxisbeispiele

---

## I. Deep Tunnel Sewerage System Phase 2 (DTSS2) in Singapur – Herausforderungen bei der Planung und Ausführung

Sven Burger, Michael Schmaus

*Das Deep Tunnel Sewerage System (DTSS) in Singapur spiegelt die Möglichkeiten wider, wie fortschrittliche Technologien und innovative Ansätze genutzt werden können, um den zunehmenden Herausforderungen der Wasser- und Abwasserwirtschaft bei einer wachsenden Bevölkerung im dicht besiedelten urbanen Raum erfolgreich zu begegnen. Das DTSS besteht aus einem Netzwerk von tiefliegenden Tunneln, die als Transportsammler fungieren, und etwas höher gelegenen Hauptsammlern, die die Abwässer aus den Nebensammlern abfassen und über hydraulische Absturzbauwerke den Transportsammlern zuführen. An den Enden der Transportsammler befinden sich rund 80 m tiefe Pumpschächte, die das Abwasser in drei zentralisierte Klär- und Wasseraufbereitungsanlagen einleiten. Bei der Planung der Phase 2 wurden technische Lösungen in die Tunnel integriert, die eine Lebensdauer von 100 Jahren gewährleisten. Zusätzlich zur üblichen PE-HD-Betonschutzplatte wurde die Innenschale mit einer Betonrezeptur hergestellt, die einen hohen Widerstand gegen biogene Schwefelsäurekorrosion aufweist. Durch die sorgfältige Planung der Arbeitsabläufe konnte eine hohe Produktivität und eine sehr gute Qualität der korrosionsbeständigen Innenschale erreicht werden.*

### **Deep Tunnel Sewerage System Phase 2 (DTSS2) in Singapore – Challenges in design and construction**

*The Deep Tunnel Sewerage System (DTSS) of Singapore is a showcase project that demonstrates how technological solutions and innovative approaches can be successfully implemented to tackle and resolve the increasing challenges of water supply and wastewater management in a densely populated and growing city. The DTSS consists of a network of deep tunnels that is*

*designed to receive the flows from a higher link sewer network. The link sewers intercept the residential sewers and channel the wastewater at few defined locations into the deep tunnels via hydraulic drop structures. Large pumping stations with depths of about 80 m are installed at the ends of the deep tunnels to pump the wastewater into three centralized water reclamation plants. To ensure that the required 100-year service life of the tunnels is achieved, special technical solutions were implemented. In addition to the typical internal PE-HD lining, a microbial induced corrosion (MIC) resistant concrete mix design was used to construct the tunnel's inner lining. Detailed work preparation and sequencing resulted in high productivity and very good quality during the execution of the deep tunnels.*

## **1 Projektvorstellung**

### **1.1 Geschichtlicher Abriss**

Die Geschichte der Abwassersysteme in Singapur ist geprägt von einem kontinuierlichen Wandel und einer fortschreitenden Modernisierung, um den steigenden Anforderungen einer wachsenden Bevölkerung und Urbanisierung gerecht zu werden.

Singapur war ab 1824 eine britische Kolonie, bis es sich 1959 selbst zu verwalten begann. Im Jahr 1963 fusionierten Malaya, Sabah, Sarawak und Singapur zur Föderation Malaysia. Der Zusammenschluss mit Singapur währte jedoch nicht lange. Weniger als zwei Jahre später, am 9. August 1965, wurde Singapur aus der Föderation herausgelöst und etablierte sich als ein unabhängiger Nationalstaat.

Trotz des tropischen Klimas und einer ausgiebigen mittleren Niederschlagsmenge von über 2200 mm pro Jahr gehört Singapur zu den Ländern, die einen akuten Mangel an Frischwasser aufweisen.

Singapur verfügt über eine Fläche von nur 735 km<sup>2</sup>, was etwa der Größe von Hamburg entspricht. Daher können größere Regenwasserspeicher und Stauseen nur begrenzt und an wenigen Stellen errichtet werden. Außerdem hat Singapur kaum eigene nutzbare Grundwasservorkommen. Meerwasserentsalzung zur Frischwassererzeugung ist Teil der nationalen Wasserstrategie, wird aber wegen der hohen Energiekosten nicht im großen Umfang angewendet.

## II. Brenner Basistunnel– Injektionsmaßnahmen im Zuge der Durchörterung der Hochstegenzone

Walter Fahrnberger, Matthias Hofmann, Philip Stadler

*Während der Herstellung des Brennerbasistunnels war im Projektabschnitt Wolf auf einer Strecke von insgesamt 460 m die sogenannte Hochstegenzone zu durchörtern. Bereits aus der Vorerkundung waren im lokal anstehenden Hochstegenmarmor Zonen mit durch Karsterscheinungen erweiterten Klüften und Durchlässigkeiten von  $10^{-6}$ – $10^{-4}$   $\text{ms}^{-1}$  bekannt. Anhand der geomorphologischen Situation war innerhalb der zu durchörternden Hochstegenzone zudem mit einem hydraulischen Formationspotenzial bis 750 m und dementsprechenden Wasserdrücken zu rechnen. Die während der Vortriebsarbeiten zu erwartenden Wasserzutritte wurden in der geologisch-hydrologischen Prognose auf Basis der im Rahmen der Vorerkundung durchgeführten Feldversuche und Modellierungen auf bis zu 150 l/s bestimmt. Bedingt durch behördliche Auflagen zum Schutz mehrerer FFH-Gebiete sowie Quellen und Brunnen im Einzugsgebiet des Hochstegen-Aquifers war auch eine temporäre Absenkung des Bergwasserspiegels während der Vortriebsarbeiten grundsätzlich ausgeschlossen. Zur Durchörterung der verkarsteten Abschnitte der Hochstegenzone wurde deshalb in Abstimmung mit der zuständigen Behörde ein umfangreiches Erkundungs- und Injektionskonzept erarbeitet, mit dem die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins bzw. der vortriebsbedingte Wasserzufluss auf ein ökologisch und wasserwirtschaftlich unkritisches Niveau reduziert werden sollte. Das gemeinsam erarbeitete Injektionskonzept sah dabei grundsätzlich sowohl dem Vortrieb vorausseilende Injektionsschirme als auch im Nachgang zum Vortrieb zu erstellende radial angeordnete Injektionsmaßnahmen vor. Erstere dienten dabei grundsätzlich der Schaffung einer primären Abdichtung des Gebirges, um einen sicheren Vortrieb mit kontrollierbaren Wasserzutritten gewährleisten zu können. Letztere waren primär als Zusatzmaßnahme zur endgültigen Abdichtung des Gebirges gedacht. Die im Zuge der Durchörterung der Hochstegenzone ausgeführten Injektionsmaßnahmen sind Gegenstand des vorliegenden Beitrags.*

## **Brenner Basetunnel – Rock grouting measures during tunnel excavation within the Hochstegen Zone**

*Tunnel excavation works at construction Lot Wolf of the Brenner Basetunnel included a nearly 460 m long section within the so called Hochstegen-Zone. Exploratory drillings and geological investigations which have been done in advance already indicated Karst phenomena and severe ground permeability ranging from  $10^{-6}$ – $10^{-4}$   $\text{ms}^{-1}$  within in the local Hochstegen marbles. Based on geomorphological conditions and hydrogeological modelling water ingresses up to 150 l/s at proposed pressures close to 75 bar were to be expected during the excavation works. Due to legal restrictions and in order to protect environmentally sensitive areas within the vicinity of the project even temporary groundwater lowering during the excavation stage was not an option. In order to continue tunnel excavation at the Hochstegen Zone a complex investigation and grouting concept to at least reduce ground permeability to an environmentally non-critical stage was designed in close collaboration with the responsible authorities. The established grouting concept thereby was mainly based on pre-grouting measures done in advance to the tunnel excavation, but also included post-excavation measures for potential further improvements after tunnel excavation was finished. The summary of the grouting measures executed during tunnel excavation within the Hochstegen Zone is discussed in this article.*

### **1 Einleitung**

#### **1.1 Bauabschnitt Hochstegen**

Der Bauabschnitt Hochstegen ist Teil des auf österreichischer Seite liegenden Projektabschnitts Wolf. Er liegt kurz vor der Landesgrenze am Brennerpass [1], [2]. Im Bauabschnitt Hochstegen waren ein etwa 1200 m langer Abschnitt des Erkundungsstollen (EKS) sowie zwei in Abhängigkeit von der tatsächlichen Erstreckung der Karstzone zwischen 100–200 m lange Abschnitte der beiden Haupttunnelröhren (HTO, HTW) zu errichten. Um vom vorausgehend hergestellten Erkundungsstollen auf das Niveau der beiden darüberliegenden Haupttunnelröhren zu gelangen, waren zudem eine ca. 150 m lange Zufahrtsrampe aus dem Erkundungsstollen und ein ca. 60 m langer Querschlag als Verbindung zu den beiden Haupttunnelröhren aufzufahren („Hilfsangriff Hochstegen“).