

---

# Vorwort zum vierundvierzigsten Jahrgang

---

In den aktuellen Klimadebatten erhofft man sich durch verstärkte Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und der Eisenbahn anstelle von individuellem Autoverkehr und Kurzflügen erheblich geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dazu müssen ÖPNV und Bahn aber leistungsfähiger, zuverlässiger, komfortabler und sicherer werden als sie heute sind. Die bestehenden Systeme arbeiten an ihren Kapazitätsgrenzen; höhere Transportkapazitäten lassen sich nicht allein durch Digitalisierung erreichen, sondern erfordern einen massiven Ausbau der Infrastruktur. Aus Platz-, Umwelt- und Lärmschutz- sowie Akzeptanzgründen wird der Anteil der unterirdisch geführten Strecken dabei zunehmen. Das führt den Tunnelbau jedoch nicht automatisch in eine rosige Zukunft. Erstens müssen solche Großprojekte finanzierbar sein und zweitens werden die Anforderungen an die Tunnelbauer steigen. Es werden schnellere Planung und Ausführungen bei möglichst reduziertem Ressourceneinsatz erwartet und sicher auch belastbare Kostenprognosen gefordert. Zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen müssen daher die Optimierungspotenziale in allen Bereichen erkannt und genutzt werden.

Das Taschenbuch für den Tunnelbau greift seit vielen Jahren die aktuellen Entwicklungen und Problemstellungen auf und dokumentiert den erreichten Stand der Technik. In bewährter Weise haben Herausgeberbeirat und Verlag für die vorliegende Ausgabe einen interessanten Themenmix zusammengestellt. Die diesjährige Ausgabe umfasst Beiträge aus den Bereichen geotechnische Untersuchungen, konventioneller bergmännischer Tunnelbau, Digitalisierung im Tunnelbau, Maschinen und Geräte, Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte, Forschung und Entwicklung sowie Praxisbeispiele.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre und freuen uns über Rückmeldungen und Beitragsvorschläge für zukünftige Ausgaben. Wenden Sie sich dazu bitte an den Verlag Ernst & Sohn.

---

# Inhalt

---

## Vorwort

## Autorenverzeichnis

## Geotechnische Untersuchungen

- I. **Tunnelausbruch mit veränderlichen Abfalleigenschaften – Umgang mit pyrihaltigen Erdmassen im Projekt Stuttgart–Ulm** 1  
*Jörg-Rainer Müller, Thomas Mußotter, Katrin Schumacher*
- 1 Die TVM-Tunnel der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm 2
  - 2 Herausforderung der Verwertung bzw. Beseitigung chemisch veränderlicher Tunnelausbruchmassen 4
  - 3 Sulfatentstehung und Freisetzung durch Pyritoxidation 6
  - 4 Verwertungsmöglichkeiten des veränderlichen Tunnelausbruchmaterials 8
  - 5 Der Pyriterlass 8
  - 6 Verwertung in Verwertungsstellen nach Pyriterlass 17
  - 7 Verwertung direkt im Projektgebiet nach Pyriterlass 19
  - 8 Verwertung in der keramischen Industrie 21
  - 9 Vor dem Pyriterlass verwertetes pyrihaltiges Tunnelausbruchmaterial 22
  - 10 Zusammenfassung 22

## Konventioneller bergmännischer Tunnelbau

- I. **Injektionen zur Abdichtung von klüftigem Fels in der Umgebung der Tunnelröhren für das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm** ..... 25  
*Martin Wittke, Walter Wittke, Dieter Schmitt, Günter Osthoff*
- 1 Aufgabenstellung 26
  - 2 Unausgelaugter Gipskeuper 28
  - 3 Planerische Vorgaben für die Injektionen im Anhydrit 36
  - 4 Wahl des Injektionsmittels 40
  - 5 Bauausführung und -überwachung 43

- 6 Ergebnisse der Injektionen 46
- 7 Zusammenfassung 51

## **Digitalisierung im Tunnelbau**

- I. BIM im Untertagebau – Gedanken zur DAUB-Empfehlung** ..... 57  
*Stefan Franz, Heinz Ehrbar, Thorsten Weiner, Markus Scheffer*
  - 1 Einleitung 57
  - 2 Struktur der DAUB-Empfehlung 58
  - 3 Anwendungsfälle im Detail 74
  - 4 Fazit 76

## **Maschinen und Geräte**

- I. Schnecken- und Bandförderung beim maschinellen Tunnelvortrieb** ..... 77  
*Gerhard Wehrmeyer, Daniela Garroux G. de Oliveira*
  - 1 Einleitung 78
  - 2 Allgemeine Entwurfskriterien 80
  - 3 Hauptkomponenten von Förderschnecke und -band 89
  - 4 Aushubkontrolle 99
  - 5 Zusammenfassung 102

## **Forschung und Entwicklung**

- I. Petersberg Tunnel: Tunnel-im-Tunnel-Methode – Pilotprojekt erstmalig mit Oberleitung** ..... 105  
*Dietmar Mähner, Bodo Tauch, Christine Schardt*
  - 1 Einsatz der Tunnel-im-Tunnel-Methode bei der Deutschen Bahn 106
  - 2 Projektvorstellung Petersberg Tunnel 106
  - 3 Bauphasen 109
  - 4 Konzeption Tunnelaufweitungssystem (TAS) 114
  - 5 Konzeption Schutzeinhausung 117
  - 6 Vortriebsklassen 119
  - 7 Tunnelinnenschale 121

<b>II. Qualitätssicherung für den Einsatz von PP-Faserbeton zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens von Straßentunnelschalen</b> .....	124
<i>Marko Orgass, Frank Dehn, Mike Rammelt, Wolf-Dieter Friebel</i>	
1 Einleitung	125
2 Herstellung von PP-Faserbeton	126
3 Dauerhaftigkeitsaspekte von PP-Faserbeton	134
4 Alterungsverhalten von PP-Fasern im alkalischen Milieu des Betons	145
5 Zusammenfassung	151
<b>III. Zeitabhängiges Materialverhalten von Spritzbeton – Neues empirisches Modell für die Festigkeitsentwicklung und experimentelle Grundlagenuntersuchungen</b> .....	155
<i>Anna-Lena Hammer, Markus Thewes, Robert Galler</i>	
1 Einleitung	156
2 Ansätze zur Beschreibung des zeitabhängigen Spritzbetonmaterialverhaltens	158
3 Entwicklung eines neuen empirischen Modells für die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton	163
4 Experimentelle Untersuchungen zum zeitabhängigen Materialverhalten von Spritzbeton	168
5 Zusammenfassung und Ausblick	179

## **Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte**

<b>I. Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 2</b> .....	183
<i>Markus Thewes, Peter Hoffmann, Götz Vollmann, Wolf-Dieter Friebel, Ingo Kaundinya, Anne Lehan, Andreas Wuttig, Werner Riepe</i>	
1 Einleitung	184
2 Entwicklung von Kostenstrukturen	185
3 Auswertung und Analyse der Praxisdaten	192
4 Weitere Hilfsmittel zur Kostenprognose einschließlich Validierung der betriebstechnischen Ausstattung	195
5 Zusammenfassung	201

## Praxisbeispiele

<b>I. Tunnelbau im Schwarzjura – Besondere Herausforderungen beim Vortrieb des Albvorlandtunnels</b> .....	<b>203</b>
<i>Jens Hallfeldt, Michael Frahm, Dieter Kirschke, Andreas Groten</i>	
1 Einführung	203
2 Geologische Formation Schwarzjura	206
3 Vortriebe in Spritzbetonbauweise	208
4 Vortriebe in maschineller Bauweise	216
5 Verwertung und Entsorgung des Tunnelausbruchmaterials	231
<b>II. Tunnel Feuerbach – Bergmännische Teilunterfahrung eines zweigeschossigen Überwerfungsbauwerks bei laufendem Bahnbetrieb</b> .....	<b>235</b>
<i>Dagmar Rombach, Reinhard Huber, Matthias Florax, Michael Eckl, Niklas Hirche</i>	
1 Einleitung	236
2 Geologie	239
3 Statische Untersuchung für Bestand und Vortrieb	241
4 Vortriebsablauf und Bestandssicherung	243
5 Monitoring	253
6 Fazit	264
<b>Tunnelbaubedarf</b> .....	<b>267</b>
<b>Inserentenverzeichnis</b> .....	<b>281</b>

---

# Geotechnische Untersuchungen

---

## I. Tunnelausbruch mit veränderlichen Abfalleigenschaften – Umgang mit pyrithaltigen Erdmassen im Projekt Stuttgart–Ulm

Jörg-Rainer Müller, Thomas Mußotter, Katrin Schumacher

*Die Neubaustrecke Wendlingen–Ulm mit einer Streckenlänge von ca. 60 km wird rund zur Hälfte in Tunneln geführt und zu einem Großteil mit der Tunnelvortriebsmaschine (TVM) aufgeföhren. Während der Bauausführung wurde festgestellt, dass der Sulfatgehalt des Tunnelausbruchmaterials zwischen Ausbruch und Ablagerung durch Pyrit-Oxidation zunimmt. Daher wurden mit den Behörden und allen anderen Beteiligten für die Entsorgung des Tunnelausbruchmaterials verschiedene Lösungen wie die Verwertung im Projektgebiet sowie in der keramischen Industrie entwickelt. Mit dem Ziel, trotz der zeitlichen Veränderlichkeit des Sulfatgehalts eine Ablagerung der Tunnelausbruchmassen auf Verwertungsstellen gemäß Erstdeklaration zu ermöglichen, wurde zusätzlich vom Umweltministerium von Baden-Württemberg am 7. April 2017 der sogenannte Pyriterlass veröffentlicht. Damit wurde in Abstimmung mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg ein Weg für die fachlich und rechtlich sinnvolle und sichere Bewertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial mit veränderlichen Eigenschaften (Sulfat) geschaffen. Beim Bau des Boßlertunnels sowie des Albvorlandtunnels konnten umfangreiche Erfahrungen bei der Umsetzung des Pyriterlasses und der Ausweitung auf andere veränderliche Parameter sowie bei der Verwertung im Projektgebiet gesammelt werden.*

### **Tunnel spoil with changeable waste properties – dealing with earth masses containing pyrite on the Stuttgart–Ulm project**

*About half of the new line from Wendlingen to Ulm with a length of about 60 km will run in tunnels, which are mostly being bored with tunnel boring machines (TBM). During construction, it was discovered that the sulphate content of the material excavated from the tunnel increases between excavation and deposition due to pyrite oxidation. Therefore, various solutions were developed with the authorities and all other involved parties for the disposal*

*of the tunnel spoil like reuse in the project area and in the ceramics industry. Furthermore, the so-called pyrite decree was published by the environment ministry of Baden-Württemberg on 7 April 2017 with the objective of enabling the deposition of tunnel spoil at reuse sites in accordance with an initial declaration despite the temporal changeability of the sulphate content. Thus, a way was found in agreement with the environment ministry of Baden-Württemberg for the proper and legally sensible and safe recycling of the soil material classified as waste with changeable properties (sulphate content). For the construction of the Boßler Tunnel and the Albvorland Tunnel, extensive experience could be gained with the implementation of the pyrite decree and its extension to other changeable parameters as well as reuse within the project area.*

## **1 Die TVM-Tunnel der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm**

Das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm gliedert sich in zwei Teilprojekte:

- Das Projekt Stuttgart 21 mit insgesamt acht Planfeststellungsabschnitten (PFA),
- Die Neubaustrecke Wendlingen–Ulm mit insgesamt fünf PFA [1].

Die Hälfte der 60 km langen Neubaustrecke führt durch neun Tunnel, ansonsten folgt sie in enger Bündelung der parallelen Bundesautobahn (BAB) A8.

An der Neckarbrücke bei Wendlingen beginnt der erste PFA der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm, der PFA 2.1 a/b (Bild 1). Die beiden eingleisigen Tunnelröhren des 8,2 km langen Albvorlandtunnels werden von zwei parallel bohrenden Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) aufgefahen und unterqueren die BAB A8. Anschließend folgt der 5 km lange Planfeststellungsabschnitt PFA 2.1c.

Im darauffolgenden 15 km langen PFA 2.2 (Bild 2) erklimmt die Neubaustrecke die Schwäbische Alb. Zunächst erfolgt der Anstieg im 8,8 km langen Boßlertunnel, anschließend im 4,8 km langen Steinbühlentunnel. Zwischen den beiden Tunneln quert die Strecke bei Mühlhausen im Täle das Filstal. Der Boßlertunnel wurde mit einer TVM aufgefahen, die beide Röhren nacheinander hergestellt hat.

---

# Konventioneller bergmännischer Tunnelbau

---

## I. Injektionen zur Abdichtung von klüftigem Fels in der Umgebung der Tunnelröhren für das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm

Martin Wittke, Walter Wittke, Dieter Schmitt, Günter Osthoff

*Etwa 17 km der für das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm im Stadtgebiet von Stuttgart aufgefahrenen Tunnel liegen im Einflussbereich des anhydritführenden Gebirges. Die Tunnel werden sowohl in Spritzbetonbauweise als auch mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) mit einem einschaligen Tübbingausbau aufgefahren. Die Planung und Ausführung der Tunnelbauten werden von der WBI GmbH durchgeführt. Ein wesentliches Element für den erfolgreichen Bau der Tunnel bilden Abdichtungsinjektionen, mit denen die durch die Vortriebsarbeiten entstandene Auflockerungszone abgedichtet werden soll. Der Beitrag beinhaltet eine kurze Baugrundbeschreibung sowie Erläuterungen zu Planungsvorgaben und die Wahl des Injektionsguts für die Abdichtungsinjektionen. Weiterhin wird über die Bauausführung, die Bauüberwachung und die Ergebnisse der Injektionen berichtet. Mit der Maßnahme konnte das für die Tunnel nach Ober- und Untertürkheim erforderliche Abdichtungsziel von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  m/s erreicht werden.*

### **Grouting for sealing of jointed rocks in the vicinity of the tunnels of the railway project Stuttgart–Ulm**

*Approx. 17 km of the tunnels for the large-scale railway project Stuttgart – Ulm are located in the area of influence of anhydrite bearing rocks. The tunnels are constructed by drill and blast as well as by a TBM with a segmental lining. Design and construction of the tunnel sections in the swelling rocks are and have been carried out on the basis of long-term research and development works conducted by WBI. Of special importance for successful tunneling in swelling rocks are grouting works in order to seal the loosened zone around the tunnels resulting from heading works. In the given paper the project and the relevant*



*ground conditions are outlined. On this basis the design of the grouting works and the background for the selection of the adequate materials for grouting are explained. Furthermore, the execution and supervision of the works as well as the results of grouting are described. The grouting works have been successful and the target value for the permeability of  $10^{-8}$  to  $10^{-9}$  m/s, relevant for the tunnels to Ober- and Untertürkheim has been achieved.*

## **1 Aufgabenstellung**

Für das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm müssen 58,8 km Tunnel im Stadtgebiet von Stuttgart aufgeföhren werden. Über eine Länge von etwa 17 km liegen diese Tunnel im Einflussbereich des anhydritführenden Gipskeupers (Bild 1). Die Tunnel vom neuen Hauptbahnhof nach Feuerbach, Bad Cannstatt und nach Ober- und Untertürkheim werden in Spritzbetonbauweise errichtet. Die Vortriebsarbeiten in den anhydritführenden Bereichen sind in all diesen Tunneln erfolgreich abgeschlossen. Derzeit erfolgt der Einbau der Innenschalen. Der Fildertunnel wird sowohl konventionell in Spritzbetonbauweise als auch mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) mit einschaligem Tübbingausbau aufgeföhren. Auch hier sind die konventionellen Vortriebe im Anhydrit beendet und der Einbau der Innenschalen hat begonnen. Derzeit erfolgt die vierte Schildfahrt, die im Jahr 2019 abgeschlossen werden wird [1–4].

Die Planung und Ausführung der Tunnelbauten im Anhydrit erfolgen auf der Grundlage langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die von der WBI GmbH durchgeführt und in einschlägigen Veröffentlichungen publiziert wurde [3, 5–11].

Ein wesentliches Element für den erfolgreichen Bau der Tunnel bilden Abdichtungsinjektionen, mit denen die durch die Vortriebsarbeiten entstandene Auflockerungszone in der Umgebung der Tunnelröhren abgedichtet werden soll, um Wasserzutritte in das anhydritführende Gebirge langfristig zu unterbinden oder zumindest zu verringern.

Im vorliegenden Beitrag werden die aus der Planung resultierenden Vorgaben für die Injektionen erläutert. Außerdem werden die Gründe für die Wahl des Injektionsmittels vorgestellt und über die Bauausführung, -überwachung und die Überprüfung des Injektionserfolgs berichtet.

---

# Digitalisierung im Tunnelbau

---

## I. BIM im Untertagebau – Gedanken zur DAUB-Empfehlung

Stefan Franz, Heinz Ehrbar, Thorsten Weiner, Markus Scheffer

*Dieser Beitrag will Hintergrundinformationen zur Entstehung und zu den Intentionen der DAUB-Empfehlung „Digitales Planen, Bauen und Betreiben von Untertagebauten – BIM im Untertagebau“ liefern. Es wird ein Überblick über Struktur und Inhalte gegeben, ohne den Anspruch einer Kurzfassung zu verfolgen. Schwerpunkte werden bei Kernaussagen gesetzt, die aus Sicht der Autoren Leitgedanken für die weitere Entwicklung sein sollten.*

### BIM in tunneling – Thoughts on the DAUB-Recommendation

*This article aims to provide background information on the origin and intentions of the DAUB-Recommendation “Digital Design, Building and Operation of Underground Structures – BIM in Tunneling”. An overview of the structure and the contents is given without pursuing the claim of a short version. The focus is on core statements, which from the authors’ point of view should be guiding principles for further development.*

## 1 Einleitung

Schon der lange und geteilte Titel der DAUB-Empfehlung [1] deutet an, dass der Umfang des behandelten Themas keineswegs leicht in eine lesbare und übersichtliche Empfehlung zu fassen ist. Die Entscheidung fiel in dem Spannungsfeld, einerseits die Spanne der berührten Themenkreise über den gesamten Lebenszyklus unserer langlebigen Bausubstanz anzudeuten und andererseits einen griffigen Bezug zu dem hier in den Fokus genommenen Bausektor, dem Untertagebau, zu bieten.

Der Begriff BIM (Building Information Modelling), der sich im Sprachgebrauch etabliert hat, steht heute als Synonym für die Digi-

---

# Maschinen und Geräte

---

## I. Schnecken- und Bandförderung beim maschinellen Tunnelvortrieb

Gerhard Wehrmeyer, Daniela Garroux G. de Oliveira

*Erddruckschilde (EPB-Schilde) sind der am häufigsten verwendete Schildtyp zum Auffahren von Tunneln im maschinellen Tunnelbau. Sie ermöglichen den Vortrieb von instabilem Boden auch unter dem Grundwasserspiegel, indem der Stützdruck mit dem Aushubmaterial erzeugt wird. Oft werden diesem Aushubmaterial Additive beigemischt, um die idealen Stütz- und Förderbedingungen zu erreichen. Bei diesem Abbauprozess spielt der Fluss des Aushubmaterials entlang der Förderschnecke und der Transport mit dem Förderband eine wichtige Rolle. Da die Aushubmaterialien von Natur aus heterogen sind, kann das Erreichen einer idealen Aushublogistik bezüglich der Stützdruckregulierung mit dem Schneckenförderer und dem Materialtransport eine große Herausforderung darstellen. In diesem Beitrag werden die beiden Komponenten Schneckenförderer und Förderband unter Berücksichtigung des Entwurfskonzepts und der Betriebslogistik beschrieben.*

### **Screw and belt conveying in mechanized tunnelling**

*Earth pressure balance (EPB) shields are the most frequently used shield type to excavate tunnels in mechanized tunnelling. It allows the excavation of unstable ground even under the groundwater table by means of holding the face pressure with the own excavated material. Often, additives are mixed with this excavated material in order to achieve the ideal support/transportation conditions. In this tunnelling process, the flow of the support material along the screw conveyor, in addition to the transport through the conveyor belt play key role in the tunnel manufacturing logistics. As the excavated materials are intrinsically heterogeneous, the achievement of ideal excavation logistics, both by holding the pressure ahead of the shield and the material transport can be rather challenging. Having their importance in mind, this article describes and discusses these both components, screw conveyor and*

*conveyor belt, considering main aspects such as the design concept and operation logistics.*

## **1 Einleitung**

Erddruckschilde (EPB-Schilde) verwenden den abgebauten Boden zur Stützung der Ortsbrust. Mit dem Vorschub des Schilds fällt das Aushubmaterial in die Abbaukammer, von wo aus das Material in die Förderschnecke gelangt. Die Förderschnecke steuert nach Art eines Auslassventils den Materialfluss und sorgt für den erforderlichen Druck in der Abbaukammer. Die Reibung entlang der Förderschnecke ist für das Druckgefälle zwischen der Abbaukammer und dem Schneckenabwurf verantwortlich [1]. Idealerweise entsteht ein sogenannter Bodestopfen, der zur Aufrechterhaltung des Stützdrucks notwendig ist.

In einem weiteren Schritt wird das Aushubmaterial über ein Förderband aus dem Tunnel transportiert. Danach kann das Material, je nach Beschaffenheit, entsorgt oder recycelt und wiederverwendet werden.

Um den Stützdruck vor der Maschine aufrechterhalten und das Material effizient transportieren zu können, muss es bestimmte Eigenschaften aufweisen. Fehlen diese Eigenschaften, wird das ursprüngliche Material mit Additiven wie Wasser, Feinstoffen, Schaum und Polymeren gemischt, wobei stets eine optimale Konsistenz des Aushubs, d.h. des abgebauten Materials plus Additive, angestrebt wird. Die Eigenschaften des Aushubs haben einen direkten Einfluss auf die Effizienz des Abtransports durch die Förderschnecke und das Förderband.

Die Vorgehensweise beim Lösen des Bodens an der Ortsbrust, beim Abfördern durch die Förderschnecke unter Aufrechterhaltung des Stützdrucks und beim späteren Bandtransport ist ein Schlüsselement beim maschinellen Vortrieb. Verzögerungen können auftreten, wenn das Fördersystem nicht ebenso effizient arbeitet wie das Abbausystem. Wird dann der Transport des Aushubs nicht optimiert, ist der Produktionsfortschritt beeinträchtigt.

---

# Forschung und Entwicklung

---

## I. Petersberg Tunnel: Tunnel-im-Tunnel-Methode – Pilotprojekt erstmalig mit Oberleitung

Dietmar Mähner, Bodo Tauch, Christine Schardt

*Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Erneuerung des Petersberg Tunnels. Dabei wurde im Rahmen eines Pilotprojekts erstmalig die Tunnel-im-Tunnel-Methode auf einer elektrifizierten Strecke der Bahn angewendet. Das Tunnelprofil wurde im Rahmen des Vortriebs aufgeweitet. Diese Arbeiten wurden mithilfe eines Tunnelaufweitungssystems (TAS) durchgeführt. Dabei musste die bestehende Oberleitung für die Elektrifizierung der Strecke in den Tunnelvortrieb integriert werden. Nach Ende der Vortriebsarbeiten wurde die Tunnelinnenschale aus Stahlbeton hergestellt. Mit diesem Projekt wurde das Spektrum der Tunnelerneuerung erheblich erweitert und kann somit auch bei anderen Projekten im elektrifizierten Streckennetz eingesetzt werden.*

### **Petersberg Tunnel: Tunnel-in-tunnel-method – Pilot project including overhead line for the first time**

*This article deals with the renewal of the Petersberg Tunnel. Within the framework of a pilot project, the tunnel-in-tunnel method was applied for the first time on an electrified railway line of the Deutsche Bahn. The tunnel profile was widened in the course of the excavation. This work was carried out with the help of a tunnel widening system (TAS). The existing overhead line for the electrification of the line had to be integrated into the tunnel excavation procedure. After completion of the tunnelling work, the inner lining of the tunnel was constructed with reinforced concrete. With this project, the range of tunnel renewal methods was significantly extended and can therefore also be used for other projects in the electrified railway network.*

---

## **II. Qualitätssicherung für den Einsatz von PP-Faserbeton zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens von Straßentunnelschalen**

**Marko Orgass, Frank Dehn, Mike Rammelt, Wolf-Dieter Friebe**

*Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) sowie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) veranlassten Forschungsvorhabens erfolgte die Beurteilung der Einflussgrößen zur qualitätsgerechten Sicherstellung von PP-Faserbetoneigenschaften zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens für die Anwendung in Straßentunneln. Der Beitrag fasst u. a. Aspekte zur Herstellung und Überprüfung der Frischbetoneigenschaften von PP-Faserbeton zusammen und gibt Hinweise zur Verifizierung mechanischer und dauerhaftigkeitsrelevanter Kennwerte bis hin zur Erforschung der Langzeitbeständigkeit der PP-Fasern im Beton. Er erläutert eingehend die Anforderungen, die für die Bereitstellung gleichmäßiger Eigenschaften von PP-Faserbeton zur Herstellung von Straßentunneln erforderlich sind.*

### **Quality control for the use of PP-fibre concrete for enhancing the fire and spalling behaviour of road tunnel linings**

*In the frame of a research project, which was induced by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) and the Federal Highway Research Institute (BASt), the evaluation of influencing parameters for a quality controlled assurance of PP-fibre concrete properties was made when an enhancement of the fire and spalling behaviour of road tunnel linings is intended. The contribution summarizes aspects of PP-fibre concrete production as well as of the control of fresh PP-fibre concrete properties, gives advice on the verification of mechanical and durability-related characteristics – including research about the long-term resistance of PP-fibres in concrete – and intensively illustrates the requirements necessary for the supply of uniform properties of PP-fibre concrete for the production of road tunnels.*

---

### **III. Zeitabhängiges Materialverhalten von Spritzbeton – Neues empirisches Modell für die Festigkeitsentwicklung und experimentelle Grundlagenuntersuchungen**

**Anna-Lena Hammer, Markus Thewes, Robert Galler**

*Im konventionellen Tunnelbau wird der Spritzbetonausbau bereits zu Beginn belastet, daher ist die Zeitabhängigkeit von Materialeigenschaften während der Bauausführung elementar zu berücksichtigen. Die mechanischen Eigenschaften des Spritzbetons ändern sich kontinuierlich während des Hydratationsprozesses. Die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons ist für Gebirgsverformungen entscheidend, da der Gebirgsdruck und der Ausbauwiderstand beeinflusst werden. Das mechanische Materialverhalten wird in mathematischen Modellen beschrieben, die mit Daten von Trockenspritzbetonen oder älteren Spritzbetonrezepturen validiert wurden. Kontinuierliche Weiterentwicklungen in der Zusatzmitteltechnologie haben die Spritzbetonleistung in den letzten Jahren deutlich verbessert. Deshalb werden in diesem Beitrag Festigkeitsentwicklungen aus aktuellen Versuchsreihen sowie aus Daten von Praxisprojekten ausgewertet und ein Spritzbetonversuch zur Bestimmung der zeitabhängigen Materialeigenschaften mit einer Referenzmischung vorgestellt. Aufbauend auf den Festigkeitsverläufen wird ein empirisches Prognosemodell entwickelt, das zur qualitativen Abschätzung von Spritzbetonentwicklungen dienen soll. Basierend auf diesen experimentellen Untersuchungen wird eine erste Grundlage für vertiefende Untersuchungen des zeitabhängigen Materialverhaltens von Spritzbeton geschaffen.*

#### **Time-dependent material behaviour of shotcrete – New empirical model for the strength development and experimental basic investigations**

*In conventional tunnelling, the shotcrete lining is loaded at an early stage, so the consideration of the time dependency of material properties during construction is vital. An important property of shotcrete in regard to rock deformation is its early strength, which can influence the development of rock pressure and support resistance. The mechanical properties of the shotcrete change continuously during the hydration process. Mathematical models exist to describe the mechanical behaviour, but these were mostly validated with dry shotcrete or older shotcrete mix designs. Continual improvements in*

*admixture technology have improved the performance of shotcrete though. Therefore, strength developments of a test series and practical projects are evaluated and a shotcrete test to determine the time-dependent material properties is carried out with a reference mix design. An empirical prediction model, which serves as a qualitative estimation of shotcrete strength processes, is designed based on the results of the evaluated strength developments. Based on the experimental investigations, a first basis for in-depth investigations of the time-dependent material behaviour of shotcrete is created.*

## **1 Einleitung**

Spritzbeton ist ein Hauptbestandteil des konventionellen Tunnelausbaukonzepts. Dabei schützt der Spritzbeton den ausgebrochenen Querschnitt durch die Ausbildung einer biegeweichen Sicherung, die eine Spannungsumlagerung im Gebirge und die Bildung eines natürlichen Gebirgstragrings ermöglicht. Spritzbeton nimmt sofort Spannungen auf und verformt sich während des Hydratationsprozesses, weshalb die Materialeigenschaften Festigkeitsentwicklung und Kriecheffekte von entscheidender Bedeutung sind [1].

Die Frühfestigkeitsentwicklung von wenigen Minuten bis zu 24 h bestimmt die Arbeitsleistung bei der Applikation. Entscheidend dabei sind die Klebkraft des Materials und die Auftragsstärke in Abhängigkeit der Klebkraft sowie die Zug- und Resttragfähigkeit des Spritzbetons. Die Frühfestigkeit ist für Gebirgsverformungen maßgebend, da sie den zeitlichen Aufbau der Gebirgsdruckbildung und den Ausbauwiderstand beeinflusst. Deshalb werden junge Spritzbetone hinsichtlich ihrer Festigkeitsentwicklung in die drei Klassen J1, J2 und J3 eingeteilt (Bild 1). Der Spritzbeton der Klasse J2, in Bild 1 grau hinterlegt, wird standardgemäß im Tunnelbau eingesetzt. [2] und [3] sehen die Anforderung J2 als gegeben bei „*rasch auftretenden Einwirkungen aus Gebirgsdruck, Erddruck oder nachdrängenden Lasten*“.

Die Steifigkeit und Festigkeit von Spritzbeton nimmt in den ersten Stunden nach dem Einbau deutlich zu, während die Duktilität und die Kriecheffekte in der Schale abnehmen. Überschreitet die Belastung bzw. Dehnung die maximale Steifigkeit, zeigt der Spritzbeton plastisches Verhalten und entfestigt sich. Bei einem Auslastungsgrad von



---

# Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte

---

## I. Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten von Tunnelbauwerken – Teil 2

Markus Thewes, Peter Hoffmann, Götz Vollmann, Wolf-Dieter Friebe, Ingo Kaundinya, Anne Lehan, Andreas Wuttig, Werner Riepe

*In Teil 1 dieses Beitrags in der Ausgabe 2019 des Taschenbuchs für den Tunnelbau wurde die Entwicklung eines Kostenmodells zur exakteren Abschätzung der Herstellkosten eines Tunnelbauwerks für die geschlossene Bauweise dargestellt [1]. Entsprechende Analysen, wie die Entwicklung von Basisvarianten und Kostenstrukturen, der Vergleich der Kosten in den Bauphasen, die Berücksichtigung von Preisschwankungen und Unsicherheiten sowie die Überprüfung der Genauigkeit der Entwicklungen anhand einer Validierung, wurden erläutert.*

*In Ergänzung hierzu zeigt Teil 2 ausgewählte Ergebnisse für die offene Bauweise und die betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln. Der Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum, unterstützt durch die Ingenieurbüros Schüssler-Plan und BUNG, beauftragt durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), analysierten dazu Daten von Tunnelbauprojekten der jüngeren Zeit und entwickelten nach entsprechenden Analysen im Anschluss dynamische, softwaregestützte Rechenmodelle.*

### **Developing a cost-model to better estimate cost of construction of tunnel structures – Part 2**

*Part 1 of this publication in the 2019 edition of the Taschenbuch für den Tunnelbau presented the development of a cost model for a more exact estimation of the construction costs of tunnels built with the conventional method [1]. The corresponding analyses such as the development of basic variants and cost structures, the comparison of costs in the construction phases, the con-*

*sideration of price variations and uncertainties as well as the verification of the accuracy of the developments on the basis of a validation were explained.*

*In addition, Part 2 shows selected results for the cut and cover method and the operational equipment of road tunnels. The Institute for Tunnelling and Construction Management of the Ruhr-University Bochum, supported by the engineering consultants Schüssler-Plan and BUNG, commissioned by the BMVI and the BAST, analysed data from recent tunnel construction projects and developed dynamic, software-supported calculation models following corresponding analyses.*

## **1 Einleitung**

In Teil 1 dieser Veröffentlichung wurde im Taschenbuch für den Tunnelbau 2019 ein Modell zur Kostenschätzung am Beispiel der geschlossenen Bauweise von Straßentunneln vorgestellt, das anhand einer Analyse der Daten aus der Planungs- und Vergabephase bis hin zur Schlussrechnung einschließlich der Nachträge von insgesamt 17 Tunnelbauprojekten der jüngeren Zeit entwickelt wurde. Das so entstandene Modell reduziert die zwischen der Planungs- und Vergabephase entstehende mögliche Kostensteigerung bzw. eliminiert diese weitestgehend. Im Rahmen der Untersuchungen wurde diese Differenz festgestellt und als  $\Delta 1$  definiert. Zudem konnte mittels Analyse der Ursachen für die Kostensteigerung in der Ausführungsphase ein  $\Delta 2$  zwischen dem Kostenanschlag und der Schlussrechnung erarbeitet werden.

Die für das Modell erforderlichen Arbeiten, u. a. die Strukturentwicklung für das Kostenmodell sowie Bandbreiten- und Differenzanalysen, bis hin zur Überführung in ein auf stochastischen Methoden der Datenverarbeitung basierendes dynamisches Kosten-Tool, werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Dabei werden die zu Teil 1 dieser Veröffentlichung [1] ergänzenden Entwicklungen für die offene Bauweise und die betriebstechnische Ausstattung dargestellt.

Für das Verständnis dieses Beitrags ist die Kenntnis des ersten Teils im Taschenbuch für den Tunnelbau 2019 zu empfehlen, da in Teil 2 aus Platzgründen auf die Darstellung grundlegender theoretischer Überlegungen verzichtet wurde.

---

# Praxisbeispiele

---

## I. Tunnelbau im Schwarzwald – Besondere Herausforderungen beim Vortrieb des Albvorlandtunnels

Jens Hallfeldt, Michael Frahm, Dieter Kirschke, Andreas Groten

*Nachstehender Beitrag gibt einen Einblick in die herausfordernden Spritzbeton- als auch maschinellen Vortriebe am Albvorlandtunnel. Es wird sowohl auf den Baubetrieb als auch auf das Ausbruch- und Verformungsverhalten der Vortriebe eingegangen. Konditionierung und Verklebung, Unterfahrung der Bundesautobahn (BAB) A8, Tunnelvortriebsmaschinen-Logistik als auch die Herstellung der Verbindungsbauwerke werden beim maschinellen Vortrieb besonders beleuchtet. Auch der komplizierten Entsorgung des pyrithaltigen Ausbruchmaterials ist ein Abschnitt gewidmet.*

### Tunnelling the Black Jura – Special challenges in heading the Albvorlandtunnel

*The following article gives a deep insight into the challenging shotcrete and mechanical tunnelling of the Albvorlandtunnel. It deals with the construction operation as well as the excavation and deformation behaviour of the tunnelling. Conditioning and adhesion, heading of the federal motorway A8, TVM logistics, as well as the construction of the cross cuts are particularly highlighted during mechanical tunnelling. A chapter is also dedicated to the complicated disposal of the excavated material containing pyrite.*

## 1 Einführung

Die Neubaustrecke (NBS) Wendlingen–Ulm ist Teil des Bahnprojekts Stuttgart–Ulm. Die rund 60 km lange NBS verläuft zwischen Neckar und Donau etwa zur Hälfte in Tunneln. Um den Flächenverbrauch so gering wie möglich zu halten, wird die Schnellfahrstrecke weitestgehend in paralleler Lage zur Autobahn A8 gebaut [1]. Der

---

## **II. Tunnel Feuerbach – Bergmännische Teilunterfahrung eines zweigeschossigen Überwerfungsbauwerks bei laufendem Bahnbetrieb**

**Dagmar Rombach, Reinhard Huber, Matthias Florax, Michael Eckl, Niklas Hirche**

*Die Zuführung zum Stuttgarter Hauptbahnhof wird in Zukunft durch den Tunnel Feuerbach erfolgen. Kurz vor dem Haltepunkt Feuerbach vereinen sich die zwei Streckenröhren zu einem Verzweigungsbauwerk mit großem Querschnitt. Dieses Bauwerk nähert sich bei geringer Überlagerung schleifend dem Überwerfungsbauwerk des bestehenden Pragtunnels an, bis es schließlich in die Fundamente der Seitenwand des Bauwerks eingreift. Das Überwerfungsbauwerk dient dabei den DB-Gleisen als Einhausung, während auf seinem Deckel zusätzlich zwei Gleise der Stuttgarter Stadtbahn verlaufen. Ein Tunnelvortrieb mit minimalen Senkungen war zur Aufrechterhaltung des Bahnbetriebs erforderlich, obwohl wenig tragfähige Schichten des ausgelaugten Gipskeupers anstehen. Intensive statische Berechnungen, vorausschauende Planung, ein Hebungs-konzept für den Deckel des Bestandsbauwerks und ein Monitoring-Konzept sicherten den Erfolg der Maßnahme.*

### **Tunnel Feuerbach – Conventional tunneling underneath a two-stage fly-over junction structure while ongoing railway operations**

*In future, Stuttgart main station will be supplied through the tunnel Feuerbach. Shortly before the breakpoint Feuerbach, the two mining railway tubes unite to form a branch structure with a large cross-section. This structure approaches the fly-over junction of the existing Pragtunnel with a slight overburden until it finally even intervenes into the foundations of the side wall of the building. The fly-over junction serves the DB tracks as an enclosure structure, with two tracks of the Stuttgart Stadtbahn running on its cover. Tunneling with minimal deformation at grade was required to maintain rail operation, although poorly stable layers of the leached Gipskeuper are present. Intensive static calculations, anticipatory planning, a lifting concept for the cover of the existing building and a monitoring concept ensured the success of the measure.*