

Stuttgart 21 – 17 Kilometres Tunnelling in Anhydrite: Lessons Learned

Stuttgart 21 – 17 Kilometer Tunnel im Anhydrit: Lessons learned

Within the framework of the Stuttgart 21 project, the tunnelling work for the approximately 17 km of tunnels in anhydrite has been successfully completed. The present article is intended to provide a brief overview of the findings from these tunnelling operations and to contribute to reducing the risk of damages and inadmissible heave in future tunnel construction projects in swelling anhydrite-bearing rocks.

Im Rahmen des Projekts Stuttgart 21 sind die Vortriebsarbeiten für die insgesamt rund 17 km Tunnel im Anhydrit mittlerweile erfolgreich abgeschlossen worden. Der vorliegende Beitrag soll einen kurzen Überblick über die Erkenntnisse aus diesen Vortriebsarbeiten geben und einen Beitrag dazu leisten, das Risiko von Schäden und großen Hebungen bei zukünftigen Tunnelbauprojekten im quellfähigen anhydritführenden Gebirge zu reduzieren.

Dr.-Ing. MARTIN WITTKKE, Managing partner/Geschäftsführender Gesellschafter, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

1 Introduction

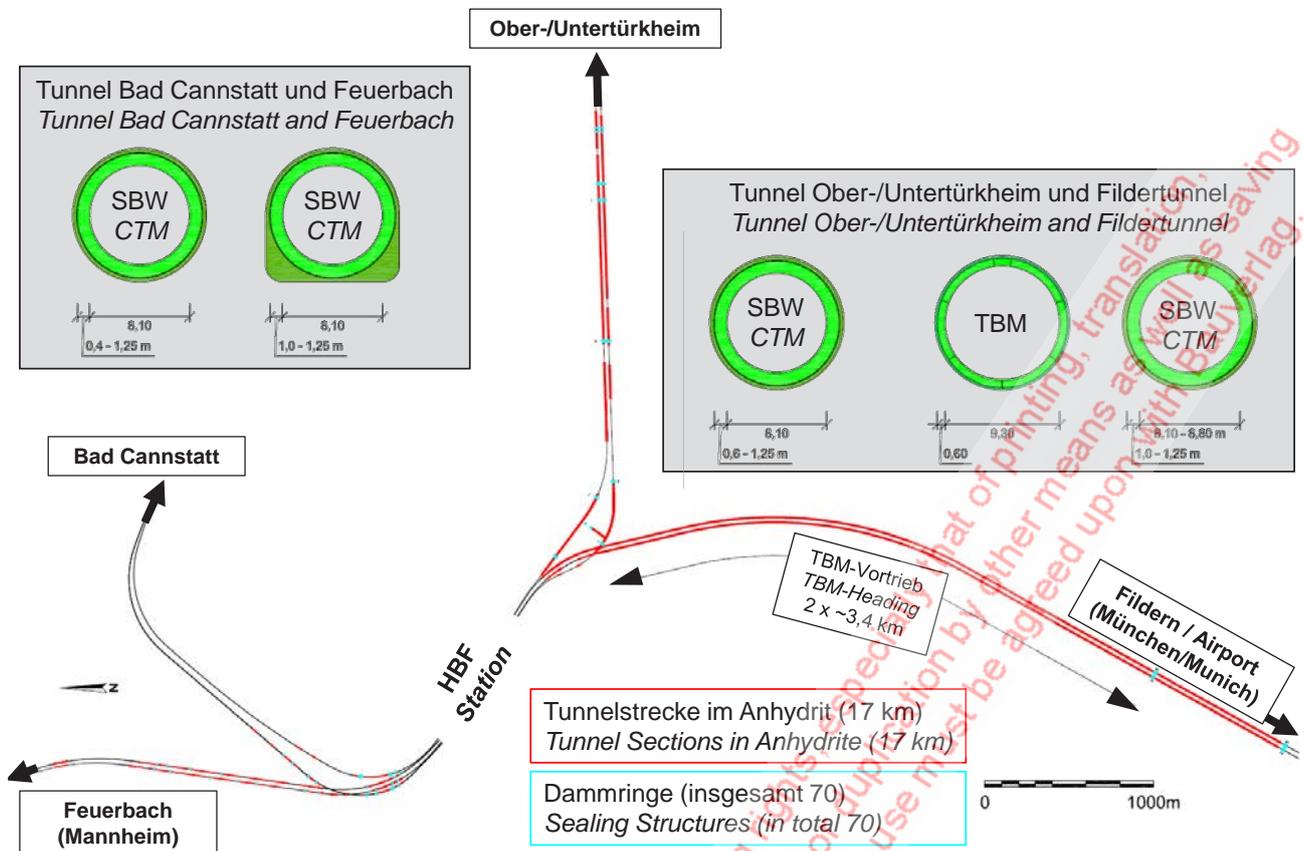
Tunnelling in swelling anhydrite-containing rocks has been within the focus of the work of WBI since we started our engineering company in the year 1980. We were deeply involved in the design and construction of the Hasenberg tunnel of the suburban railway line in Stuttgart, Germany, as ground and tunnelling expert and as review engineer. This tunnel has been operational since its completion in 1984 without damages and heave. Already before WBI was founded, Prof. Dr. Walter Wittke was ground and tunnelling expert as well as review engineer for the successful construction of the turning-loop of the suburban railway line of Stuttgart. This tunnel is in operation without damages and heave since 1977. In the 1980s we were furthermore involved in the design and construction of the road tunnel Heschach II, which is in operation without damages since 1988.

In connection with these projects and with the design and construction of the railway tunnels for the project Stuttgart 21, which are the subject of the given article, we have intensively worked on the theoretical background for tunnelling in swelling rocks, have developed and calibrated our own numerical models and have elaborated adequate engineering solutions for successful tunnelling in swelling rocks. In this context, it was of great help for us, that the German Railways had provided to us the results of monitoring and observations obtained in the test gallery U1 of the Freudensteintunnel. In addition, information on the long-term laboratory swelling tests that were carried out for this project were made available to us. Furthermore, in 2014, we received the contract from the federal government of Germany to investigate the

1 Einleitung

Der Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge ist bereits seit der Gründung des Büros WBI im Jahr 1980 ein Schwerpunkt unserer Arbeit. So haben wir bei Planung und Bau des Hasenbergtunnels der S-Bahn Stuttgart, der seit der Fertigstellung im Jahr 1984 ohne Schäden und Hebungen in Betrieb ist, als Baugrund- und Tunnelbautechnischer Gutachter sowie als Prüfermaßgeblich mitgewirkt. Noch davor hat der Gründer unseres Büros, Prof. Dr. Walter Wittke, den erfolgreichen Bau der Wendeschleife der S-Bahn-Stuttgart als Baugrund- und Tunnelbautechnischer Gutachter sowie Prüfer begleitet. Auch dieser Tunnel ist seit der Fertigstellung im Jahr 1977 ohne Schäden und Hebungen geblieben. In den 1980er Jahren waren wir darüber hinaus an der Planung und am Bau des Straßentunnels Heschach II beteiligt, der seit 1988 ohne Schäden betrieben wird.

Im Zusammenhang mit diesen Projekten und natürlich auch für die Planung und den Bau des in diesem Artikel behandelten Bahnprojekts Stuttgart 21 haben wir uns intensiv mit den theoretischen Grundlagen für den Tunnelbau im Anhydrit, der Entwicklung von Berechnungs- und Bemessungsverfahren sowie mit der Ausarbeitung von sachgerechten, ingenieurwissenschaftlichen Lösungen auseinandergesetzt. In diesem Zusammenhang war es für uns sehr wertvoll, dass wir von der Deutschen Bahn die Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen zur Verfügung gestellt bekommen haben, die im Untersuchungsstollen U1 des Freudensteintunnels und aus den begleitenden Laborversuchen gewonnen wurden. Außerdem hatten wir im Auftrag des Bundes die Möglichkeit, im Jahr 2014 die beim Engelbergbasistunnel aufgetretenen Hebungen und Schäden mit unseren Modellen und Berechnungsverfahren nachzuvollziehen.



Credit/Quelle: WBI

1 Stuttgart 21 – Sections in anhydrite, plan and cross sections
 Stuttgart 21 – Strecken im Anhydrit, Lageplan und Querschnitte

heave and damages to the inner lining of the road tunnel Engelbergbasistunnel by means of our models and numerical analyses.

Since the excavation and support works for the 17 km of tunnels that were constructed in anhydrite for the project Stuttgart 21 are successfully completed as well, we subsequently intend to give an overview on the lessons learned in connection with our works in recent years. We hope that by these means we can contribute to reduce the risks of damages and inadmissible heave in connection with future tunnelling projects in anhydritic rocks

2 Project

For the project Stuttgart 21 more than 50 km of tunnels are constructed within the city of Stuttgart, Germany. Coming from Mannheim, the trains in future will run through the approx. 2 x 2.7 km long tunnel Feuerbach to reach the new central station (Fig. 1). From there the trains can continue their journey through the approx. 2 x 9.5 km long Fildertunnel towards the Stuttgart airport and Munich respectively. Other options are the approx. 2 x 6.5 km long tunnels to Ober- and Untertürkheim, which connect the main station to the existing railway line on the eastern side of the Neckar river. The approx. 2 x 3.8 km long tunnel to Bad Cannstatt will also provide a connection to the existing railway network on the eastern side of the Neckar.

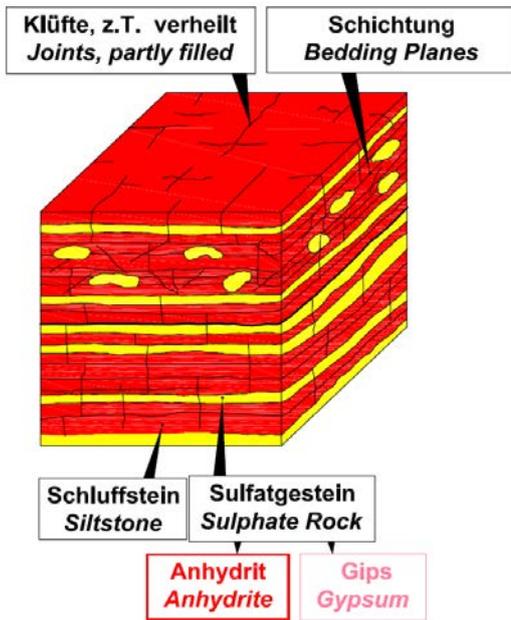
Except for the launching areas and the underground bifurcation structures the tunnels are all constructed as single-track tunnels, which are connected approximately every 500 m by means of cross passages. The inner diameter of the tunnels to Bad Cannstatt, Feuerbach and Ober-/

Nachdem die Vortriebsarbeiten für die insgesamt ca. 17 km Tunnel im Anhydrit, die für das Projekt Stuttgart 21 aufzufahren waren, ebenfalls erfolgreich abgeschlossen worden sind, möchten wir im vorliegenden Beitrag einen kurzen Überblick über die Erkenntnisse geben, die wir in den letzten Jahren gewonnen haben. Wir hoffen, damit einen Beitrag dafür zu leisten, das Risiko von Schäden und großen Hebungen bei zukünftigen Tunnelbauprojekten im Anhydrit zu reduzieren.

2 Projekt

Für das Projekt Stuttgart 21 werden im Stadtgebiet von Stuttgart deutlich mehr als 50 km Tunnel gebaut. Von Mannheim kommend wird man in Zukunft über den ca. 2 x 2,7 km langen Tunnel nach Feuerbach in den neuen Hauptbahnhof fahren (Bild 1). Von dort können die Züge dann entweder über den ca. 2 x 9,5 km langen Fildertunnel zum Stuttgarter Flughafen bzw. nach München oder durch die ca. 2 x 6,5 km langen Tunnel nach Ober- und Untertürkheim auf die Bestandsstrecke auf der Ostseite des Neckars fahren. Auch der ca. 2 x 3,8 km lange Tunnel nach Bad Cannstatt stellt eine Verbindung zur Bestandsstrecke auf der Ostseite des Neckars her.

Mit Ausnahme der Anfahrbereiche am Hauptbahnhof und der unterirdischen Verzweigungsbauwerke werden für alle Tunnel einglisige Streckenröhren hergestellt, die ca. alle 500 m durch Querschläge miteinander verbunden werden. Der Innendurchmesser der Streckenröhren der Tunnel nach Bad Cannstatt, nach Feuerbach und nach Ober-/Untertürkheim beträgt 8,1 m. Der Innendurchmesser im Fildertunnel beträgt in den in Spritzbetonbauweise (SBW) aufgefahrenen Abschnitten zwischen 8,1 und 8,8 m. Für die Tunnelstrecke im Anhydrit, die mit einer TBM aufgefahren wurde, wurde ein Innendurchmesser von 9,3 m hergestellt. Die Tübbinge haben



Elastisch-Viskoplastisch (elastic-viscoplastic):

$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
 $E = 4.000 \text{ MN/m}^2$
 $\nu = 0,25$
 $\sigma_{1ax} = 20 - 30 \text{ MN/m}^2$
 -> Gestein elastisch (intact rock elastic)

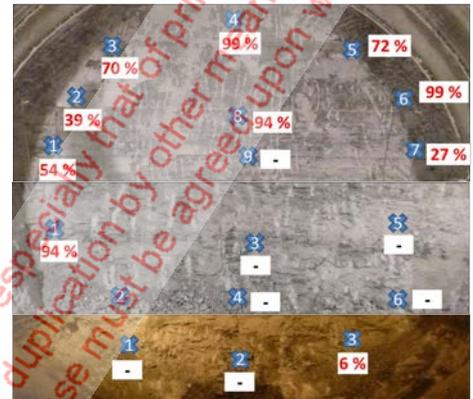
$c_{k/j} = 50 - 500 \text{ kN/m}^2$
 $\varphi_{k/j} = 35^\circ$
 $c_{s/b} = 0 - 200 \text{ kN/m}^2$
 $\varphi_{s/b} = 30^\circ$

Wasserzufuhr (Seepage/Water Uptake):

$k_{f,h} = 10^{-8} \text{ m/s}$
 $k_{f,v} = 10^{-10} \text{ m/s}$
 (ohne Bochinger Horizont und Bleiglanzbank excluding marker horizons)
 $d_k = 1,0 \text{ m}$
 $d_s = 0,1 \text{ m}$
 $D = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Quellen (Swelling):

$K_q = 0,2$
 $\sigma_{q0} (\omega=1) = 9 \text{ MN/m}^2$
 (abhängig vom Anhydritanteil / depending on anhydrite content)



Ortsbrustfoto und Anhydritgehalte Beispiel Tunnel Bad Cannstatt
Photo of Temporary Face and Anhydrite Content Example Tunnel Bad Cannstatt

Credit/Quelle: WBI

- 2 Unleached Gypsum Keuper, rock mechanical model
 Unausgelaugter Gipskeuper, felsmechanisches Modell

Untertürkheim amounts to 8.1 m. The inner diameter of the Fildertunnel in the sections that have been constructed by conventional tunnelling (CTM) varies from 8.1 to 8.8 m. The tunnel section in anhydrite that was constructed with a TBM has an internal diameter of 9.3 m and a segmental lining with a thickness of 60 cm. The thickness of the circular inner linings of the tunnel sections in anhydrite constructed by CTM varies from 40 cm to 1.25 m (Fig. 1).

3 Ground Conditions

The tunnels to Feuerbach, Bad Cannstatt and Ober-/Untertürkheim are located in the Gypsum Keuper formation almost over their entire lengths. The Fildertunnel is located in the Gypsum Keuper formation for approx. half of its length. The second half is located in the other layers of the Keuper formation and the lowest part of the black Jurassic. The unleached Gypsum Keuper is a silt/claystone that contains sulfate. The sulfate content in the different layers of this formation is rather variable. The highest content of sulfate can be found in the so-called Grundgipsschichten. The lowest content of sulfate prevails in the marker horizons "Bochinger Horizont", "Bleiglanzbank" and "Engelhofer Platte". In the original state the sulfate within the rock mass mainly consists of anhydrite (CaSO₄), which in geological times as a consequence of water penetration by means of seepage, capillary suction and diffusion is transformed into gypsum (CaSO₄ · 2H₂O). The gypsum again is dissolved in groundwater and is transported to the recipient. The remainder is the so-called leached Gypsum Keuper, a sulfate-free residual rock.

hier eine Dicke von 60 cm. Die Dicke der kreisförmigen Innenschalen in den konventionell im Anhydrit aufgefahrenen Tunnelstrecken variiert von 40 cm bis 1,25 m (Bild 1).

3 Baugrundverhältnisse

Die Tunnel nach Feuerbach, Bad Cannstatt und Ober-/Untertürkheim liegen nahezu über die komplette Länge in den Schichten des Gipskeupers. Der Fildertunnel liegt etwa zur Hälfte in den Gipskeuperschichten. Im weiteren Verlauf des Tunnels in Richtung Flughafen durchfährt er darüber hinaus die Schilfsandsteinformation, die Unteren Bunten Mergel, den Kiesel sandstein, die Oberen Bunten Mergel, den Stubensandstein, den Knollenmergel, das Rät und den Lias α.

Der unausgelaugte Gipskeuper ist ein sulfatführendes Tongestein. Der Sulfatanteil in den einzelnen Schichtgliedern dieser Formation ist sehr unterschiedlich. Den größten Sulfatgehalt findet man in den unmittelbar oberhalb des Lettenkeupers anstehenden Grundgipsschichten. Die geringsten Sulfatanteile finden sich in den Leithorizonten „Bochinger Horizont“, „Bleiglanzbank“ und „Engelhofer Platte“. Im Ausgangszustand steht das Sulfat in Form von Anhydrit (CaSO₄) an. Dieser wird in geologischen Zeiträumen infolge Wasserzutritt aufgrund von Sickerströmung, Kapillarität und Diffusion in der Natur in Gips (CaSO₄ · 2H₂O) umgewandelt. Im Grundwasser geht wiederum der Gips in Lösung und wird in die Vorfluter abgeleitet. Übrig bleibt mit dem ausgelaugten Gipskeuper ein sulfatfreies Residualgestein.

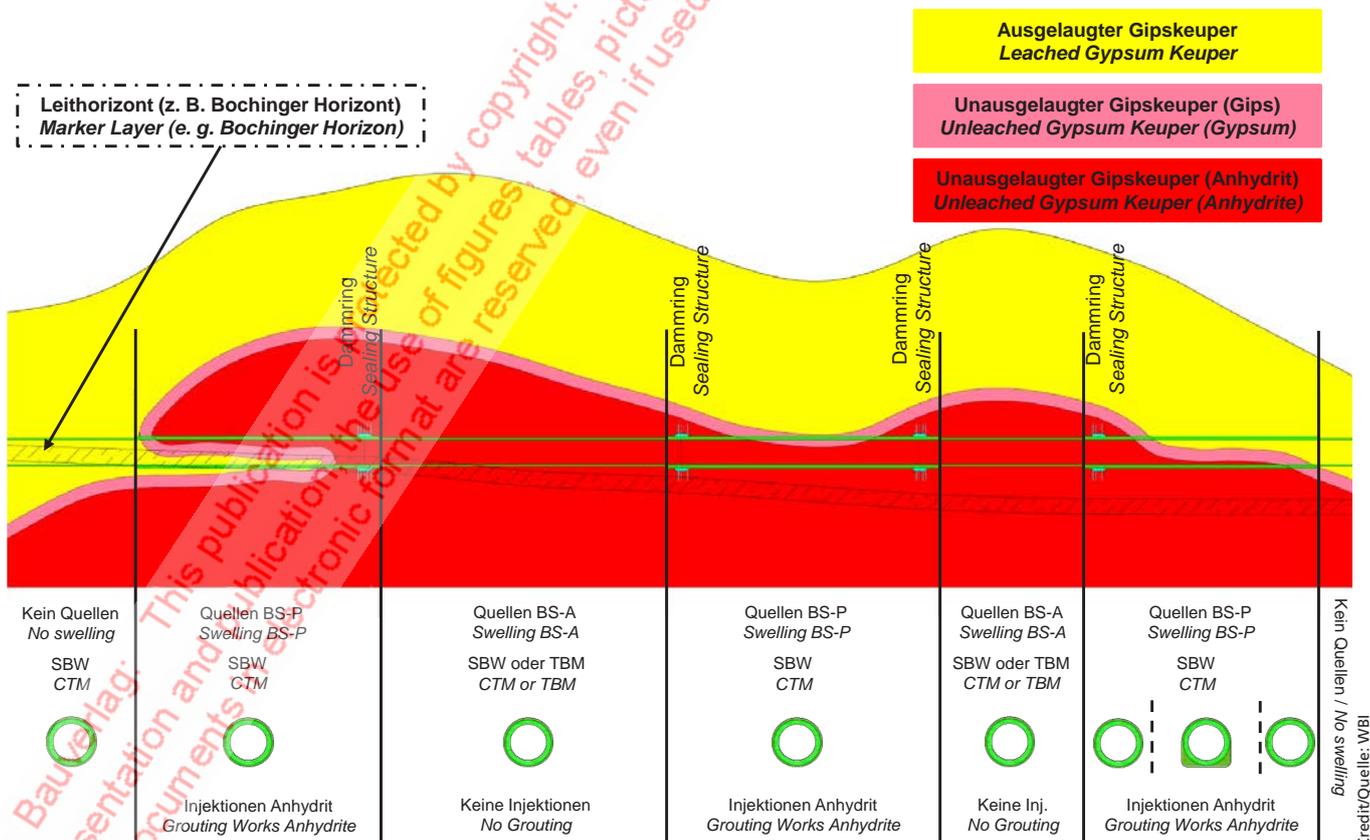
Die Durchlässigkeit des unausgelaugten Gipskeupers wird im Wesentlichen durch die Trennflächen bestimmt. Auf der Grundlage zahlreicher Feldversuche und Rückrechnungen

The rock mass of the unleached Gypsum Keuper in the area of southwest Germany is more or less horizontally bedded. The permeability of the unleached Gypsum Keuper is mainly determined by the discontinuities. On the basis of numerous field tests and back-analyses it can be shown that the permeability of the rock mass is much higher parallel to than perpendicular to the bedding (Fig. 2). Furthermore, the permeability of the rock mass of the marker horizons is higher than that of the over- and underlying layers. Consequently, it was observed during construction of the tunnels that the leaching front in the marker horizons in many cases reaches further into the rock mass than in the over- and underlying layers (Figs. 3 and 4). Also in areas of faults local zones in which the leaching front reached further into the rock mass were observed.

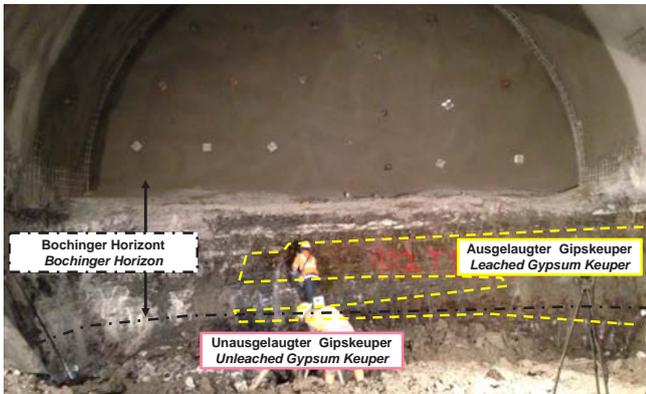
During the excavation approx. 29 000 rock samples were taken from the temporary faces and from core drillings executed from inside the tunnel. The samples were tested to determine the content of anhydrite in the sulfate. The evaluation of the test results has shown that the anhydrite level, i.e. the area of transition from the gypsum-area to the anhydrite-area within the Gypsum Keuper, in general is not a clear boundary (see photo in Fig. 2). In many cases a several meters thick transition

kann gezeigt werden, dass die Durchlässigkeit entlang der Schichtfugen, die im südwestdeutschen Raum näherungsweise horizontal sind, deutlich größer ist als senkrecht dazu (Bild 2). Außerdem ist die Durchlässigkeit in den oben genannten Leithorizonten größer als in den darüber- und darunterliegenden Schichten. Dementsprechend zeigte sich im Zuge des Baus der Stuttgart-21-Tunnel, dass die Auslaugung entlang der Leithorizonte zum Teil deutlich tiefer in das Gebirge reichte als in den darüber- und darunterliegenden Schichten (Bilder 3 und 4). Auch in Bereichen von Störzonen konnten örtlich begrenzte tiefere Auslaugungserscheinungen beobachtet werden.

Im Zuge der Vortriebsarbeiten wurden bei allen Tunneln des Projekts aus der Ortsbrust und aus den Kernen der nachlaufend nach oben und unten durchgeführten Erkundungsbohrungen ca. 29 000 Gesteinsproben zur Bestimmung des Anhydritanteils im Sulfat entnommen. Dabei zeigte sich, dass der Anhydritspiegel, d. h. der Übergang vom gipsführenden zum anhydritführenden unausgelaugten Gipskeuper in der Regel keine scharfe Grenze ist (s. Foto in Bild 2). Vielmehr konnten mehrere Meter mächtige Übergangsbereiche festgestellt werden, in denen der Anhydritanteil am Sulfatgehalt mit zunehmendem Abstand zur Auslaugungsfront zunimmt. Dementsprechend wurde bei der Bemessung der Innenschale



3 Tunnels in Gypsum Keuper, longitudinal section, principle
Tunnel im Gipskeuper, Längsschnitt, Prinzip



Credit/Quelle: WBI

4 Horizontal leaching through marker layers (Ober-/Untertürkheim)
Horizontale Auslaugung über Leithorizonte (Ober-/Untertürkheim)

zone was observed, in which the content of anhydrite within the sulfate increases with increasing distance from the leaching front and the water-bearing rock respectively. For the dimensioning of the internal lining in this zone a reduced max. swelling pressure for complete transformation of anhydrite into gypsum, which for 100% anhydrite within the sulfate would amount to approx. 9 to 10 MN/m², can be taken into account. Furthermore, the rock mechanical parameters listed in Fig. 2 are of importance for the design of the inner lining and the prediction of the displacements. These parameters were determined on the basis of the results of laboratory and field tests as well as back-analyses for executed projects.

4 Tunnel Driving Works

The tunnels to Feuerbach, Bad Cannstatt and Ober-/Untertürkheim were excavated by means of the conventional

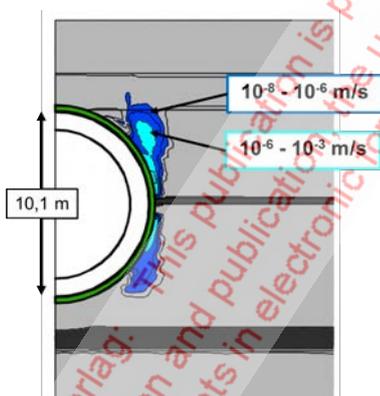
auch davon ausgegangen, dass der bei vollständiger Umwandlung von Anhydrit in Gips maximal mögliche Quelldruck – der ca. 9 bis 10 MN/m² beträgt, wenn das Sulfat vollständig aus Anhydrit besteht – in der Nähe der Auslaugungsfront – bei kleineren Anhydritanteilen – geringer ist.

Für die Bemessung der Innenschalen und die Hebungsprognosen sind außerdem die im felsmechanischen Modell in Bild 2 zusammengestellten Kennwerte von Bedeutung. Sie wurden auf der Grundlage von Labor- und Feldversuchen sowie durch Rückrechnungen ausgeführter Tunnel ermittelt.

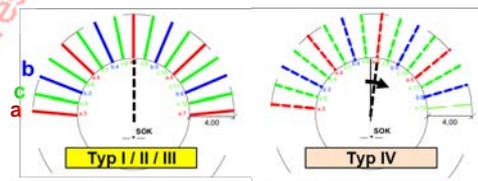
4 Vortrieb

Die Tunnel nach Feuerbach, Bad Cannstatt und nach Ober-/Untertürkheim wurden in Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Auch die Übergangsbereiche zwischen wasserföhrendem Gebirge und dem quellfähigen Gipskeuper im Fildertunnel wurden in Spritzbetonbauweise hergestellt. Nur die sogenannten trockenen Bereiche, in denen das wasserföhrende Gebirge einen ausreichend großen Abstand zum Tunnel besitzt und die in Längsrichtung durch Abdichtungsbauwerke bzw. Dammringe von wasserföhrenden Tunnelabschnitten abgeschottet wurden, wurden mit einer TBM mit einschaligem Tübbingausbau aufgeföhren (Bilder 1 und 3). Dabei wurde ein spezieller phosphatbasierter Ringspaltmörtel verwendet.

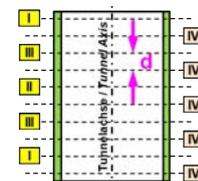
Selbstverständlich wurden die Vortriebsarbeiten in den quellfähigen Abschnitten vollständig trocken ausgeföhrt. Diese Vorgabe erforderte erhebliche Aufwendungen zur Beherrschung des Staubes. Beispielsweise wurde die Bohrwagen mit Absaugeinrichtungen am Bohrlochmund ausgestattet. Zudem wurde fallweise eine Kombination aus einer saugenden und einer drückenden Bewetterung angewendet. Zur Staubbindung wurde die temporäre Fahrbahnsohle zudem mit Salzen bestreut.



Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit infolge Ausbruch und Sicherung
Increase of vertical permeability due to excavation and support



Bohren und Injizieren im Pilgerschrittverfahren
Drilling and Grouting acc. to the pilgrim method



Anordnung der Injektionsbohrungen, Beispiel Felder III, IV und V im Tunnel nach Obertürkheim
Drillings for Grouting, Example for Fields III, IV and V in the Tunnels to Obertürkheim

- Ziel:** Abdichtung auf 10⁻⁷ bis 10⁻⁹ m/s
- Abdichten von Trennflächen mit Öffnungsweiten von ≤ 0,05 mm.
 - Verpressmittel Acrylatgel mit η = 2-3 mPa*s

- Target:** Permeability of Rock Mass after Grouting 10⁻⁷ to 10⁻⁹ m/s
- Sealing of discontinuities with opening width ≤ 0,05 mm.
 - Acrylate gel with η = 2-3 mPa*s to be used as grout

5 Sealing of loosened zone around the tunnel, sealing structures and grouting works anhydrite
Abdichtung der Auflockerungszone, Dammringe und Injektionen Anhydrit

Credit/Quelle: WBI

tunneling method. The transition zones from the water-bearing rocks to the swelling rocks in the Fildertunnel were constructed by CTM as well. Only the so-called dry zones, where the water-bearing rocks have a sufficiently large distance to the tunnel and which are protected in longitudinal direction against wet areas by means of sealing structures, were constructed by TBM with a single-shell segmental lining (Figs. 1 and 3). The annular gap was filled with a special phosphate-based gap grout. It goes without saying that the construction works in the areas of the swelling rock were conducted completely dry. This requirement yielded in large efforts for dust prevention. E.g. the dust resulting from dry drilling of holes was collected immediately at the borehole by vacuum suction. In addition, in certain areas a combination of blowing ventilation and exhaust ventilation was applied. To limit formation of dust because of movement of equipment, salts were applied to the temporary roads. In order to limit water penetration from the surrounding rocks during the excavation, the leaching front was sealed by means of advanced grouting with polyurethane.

Um Wasserzutritte aus dem Gebirge in die quellfähigen Bereiche im Zuge der Vortriebsarbeiten weitestgehend zu vermeiden, wurde die Auslaugungsfront über vorausseilende Bohrungen mit Polyurethan abgedichtet. Außerdem kamen Vakuumlanzen zum Einsatz, und es wurde auf die Verwendung von radialen Ankern weitestgehend verzichtet. Mit den angewendeten Maßnahmen konnten die Vortriebsarbeiten in den anhydritführenden Abschnitten mit Ende der Schildfahrt 4 im Fildertunnel im August 2019 erfolgreich abgeschlossen werden. Es wurden mittlere Vortriebsleistungen von ca. 2 m/d bis ca. 5 m/d in den konventionellen Vortrieben und im Mittel ca. 14 bis 15 m/d beim TBM-Vortrieb erzielt.

5 Maßnahmen gegen Wasserzutritte nach Beendigung der Vortriebsarbeiten

Wie erläutert, besitzt der unausgelaugte Gipskeuper im ungestörten Zustand eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit. Infolge des Tunnelbaus kommt es jedoch zu Spannungsumlagerungen im Gebirge und somit zu einer Scherbeanspruchung auf den horizontalen und vertikalen Trennflächen. Diese führt zu dilatanten Verschiebungen, d. h. zu einer Vergrößerung der

WE'RE NOW SERVING EUROPE

MINING EQUIPMENT ACQUIRES MÜHLHÄUSER

With the acquisition, Mining Equipment aims to build solid relationships in the European market by providing durable, high-quality machinery and support to contractors. The new office in Breuberg, Germany will allow the company to provide equipment to the European market.

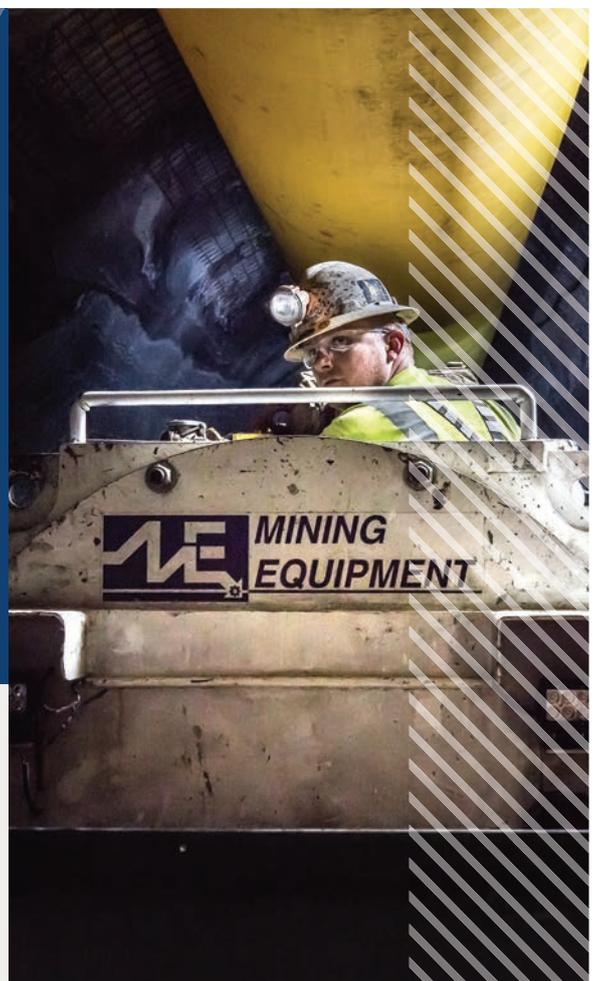


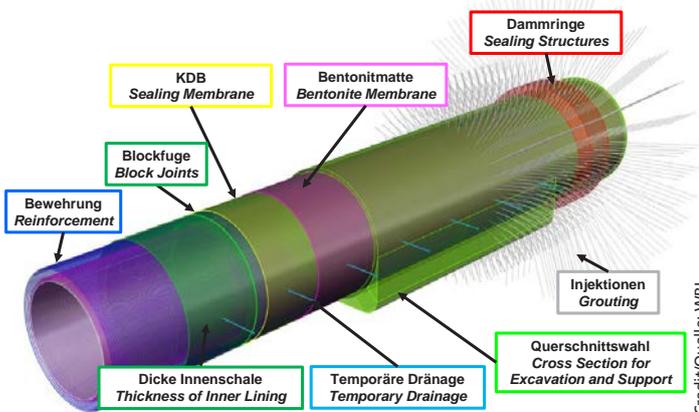
+



+1.970.259.0412 | +49 (6165).42683.70

MININGEQUIPMENTLTD.COM





Credit/Quelle: WBI

6 Design measures for tunnel sections in anhydritic rock

Bautechnische Maßnahmen für den Ausbau im anhydritführenden Gebirge

In addition, the remaining seepage was collected by means of vacuum lances. Radial anchors were omitted wherever possible.

By means of the applied measures, the driving works in the 17 km of tunnels located in swelling rocks were successfully completed when the TBM in the Fildertunnel ended its fourth drive in August 2019. For the conventional tunnel sections mean rates of advance from 2 m/d up to 5 m/d were achieved. The TBM-drives were conducted with an average rate of advance of approx. 14 to 15 m/d.

5 Measures to Prevent Penetration of Water After Completion of Tunnelling

As outlined above, the unleached Gypsum Keuper under natural conditions reveals a very low permeability. As a consequence of tunnelling, however, the stresses within the ground are redistributed, which leads to a shear loading along the horizontal bedding planes and the vertical joints. This loading leads to dilatancy and thus to an opening of the discontinuities. Due to the fact that the permeability of a rock mass is proportional to the cube of the opening width of the discontinuities, only small displacements can lead to a considerable increase of the permeability of the rock mass. Locally the effect of tensile stresses can lead to an additional opening of the discontinuities. In addition, the disturbed rock zone resulting from excavation works, e.g. due to blasting, must be considered.

The extent of the loosened rock zone and the order of magnitude of the joint opening can be analyzed by numerical means by the WBI-owned computer program system FEST03. They depend on the ground conditions, the size and shape of the tunnel and to a large extent on the round length, the time of closing of the invert and the thickness of the shotcrete lining. The loosened zone in the rock mass, which results from stress-redistribution,



Credit/Quelle: WBI

7 Excavation works for the construction of a sealing structure

Ausbruch für einen Dammring

Öffnungsweite der Trennflächen. Da die Durchlässigkeit eines klüftigen Felses in der dritten Potenz von der Trennflächenöffnungsweite abhängt, reichen bereits geringe Verschiebungen, um eine deutliche Erhöhung der Durchlässigkeit zu bewirken. Örtlich kann dieser Effekt auch durch Zugspannungen verstärkt werden. Zusätzlich sind vortriebsbedingte Auflockerungen z. B. durch Sprengungen zu berücksichtigen.

Die Ausdehnung der Auflockerungszone und das Maß der Vergrößerung der Trennflächenöffnungsweite können mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 numerisch ermittelt werden. Sie hängen außer von den Baugrundverhältnissen und der Größe und Gestaltung des Tunnelquerschnitts wesentlich von der Abschlaglänge, dem Zeitpunkt des Sohlenschlusses und der Dicke der Spritzbetonschale ab. Die durch die Spannungsumlagerungen bedingte Auflockerungszone im Gebirge ist bei einem TBM-Vortrieb ohne Stützung im Bereich des Schildes größer als bei einem Spritzbetonvortrieb im Vollausbruch mit frühem Ringschluss.

Beispielhaft zeigt das **Bild 5** die mit dem Programmsystem FEST03 errechnete Erhöhung der Durchlässigkeit in vertikaler Richtung für einen Vollausbruch in Spritzbetonbauweise. Im Vergleich zum Ausgangszustand hat sich die Durchlässigkeit in diesem Fall im Nahbereich des Tunnels von ca. 10^{-10} m/s auf max. 10^{-3} m/s erhöht.

In Bereichen, in denen die Auflockerungszone im Gebirge nicht bis in die Nähe des wasserführenden Gebirges reicht, kann Wasser nur in Längsrichtung des Tunnels in das quellfähige Gebirge eindringen. Um das zu verhindern, wurden beim Projekt Stuttgart 21 insgesamt 70 Dammringe errichtet (**Bilder 1, 3, 6 und 7**). Dazu wurde nach Abschluss der Vortriebsarbeiten im entsprechenden Bereich ein 5 m langer und 1 m dicker umlaufender Ring aus dem Gebirge herausgefräst. Im Anschluss wurde der so entstandene Hohlraum lagenweise mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton ausgefüllt. In einem letzten Schritt wurden der Spritzbeton, die Kontaktfläche zwischen Dammring und Fels sowie das Gebirge bis in Tiefen von

Tunnel ^{*)}	d ^{**) [m]}	Σ n [Stck] [pc]	Σ l [m]	Σ q / Σ l			
				[l/m]			
	Total	a-Serie	b-Serie	c-Serie			
Bad Cannstatt	1,0	47 926	157 435	6,1	8,0	6,8	4,6
Feuerbach	1,0	135 140	304 520	7,5	10,0	7,6	5,8
Obertürkheim	0,75	464 85	101 972	4,2	7,5	4,8	1,7

Credit/Quelle: WBI

^{*)} Injektionen im Fildertunnel noch nicht abgeschlossen
Grouting Works in Fildertunnel not completed yet

<sup>**) d = Abstand der Querschnitte in Längsrichtung
d = Spacing between Cross Sections in Longitudinal Direction</sup>

is considerably larger for a TBM-heading in open mode than for a full-face conventional heading with an early closure of the shotcrete membrane at the invert. This is because the full support of the tunnel circumference in case of TBM excavation only exists at the end of the shield, when the annular gap is filled with mortar.

As an example Fig. 5 shows the increase of the vertical permeability resulting from the analyses for a CTM-heading with full face excavation. The permeability of the rock mass in the vicinity of the tunnel due to tunnelling has increased from 10^{-10} m/s in the original state to max. 10^{-3} m/s.

In areas where this loosened zone does not reach the vicinity of water-bearing strata, water can only reach the swelling rocks along the tunnel in longitudinal direction. In order to prevent seepage in longitudinal direction in total 70 sealing structures were constructed for the tunnels of the project Stuttgart 21 (Figs. 1, 3, 6 and 7). For this purpose a 5 m long and 1 m thick ring was excavated by means of rotary cutters after completion of driving works in the area. The resulting opening was backfilled by steel-fiber reinforced shotcrete, which was applied in layers of 10 cm to 15 cm. After placing the shotcrete, the

8 Results of grouting works anhydrite Ergebnisse Injektionen Anhydrit

max. 10 m über radiale Bohrungen durch Acrylatgelinjektionen abgedichtet (Bild 6).

Auf der sogenannten Wasserseite der Dammringe wurde der Fels darüber hinaus über radiale Bohrungen abgedichtet (Bilder 5 und 6). Die Länge und die Verteilung der Injektionsbohrungen werden bzw. wurden in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen gewählt. Für das hier dargestellte Beispiel aus den Tunneln nach Ober- und Untertürkheim wurden 4 m lange Bohrungen in der oberen Querschnittshälfte ausgeführt.

Nach Möglichkeit sind mit Hilfe der Injektionen Durchlässigkeitsbeiwerte zu erzielen, die denen des ungestörten Gebirges (10^{-8} m/s bis 10^{-10} m/s) entsprechen. Somit müssen Trennflächen mit Öffnungsweiten von $\leq 0,05$ mm bis 0,01 mm abgedichtet werden. Der Abdichtungserfolg kann über den Einpressdruck p, den Abstand der Bohrlöcher d, die Einpressdauer t und die dynamische Viskosität η des Einpressguts gesteuert werden.

Der Einpressdruck muss begrenzt werden, um ein unkontrolliertes Aufreißen des Gebirges, das zu ungewollten zusätzlichen Fließwegen führen kann, zu vermeiden. Der max. effektive Verpressdruck wurde daher auf 5 bar begrenzt. Aus Gründen der Bauzeit und Kosten muss die Einpressdauer

Mit innovativen Lösungen für die Zukunft bauen



Stuttgart 21 Los 1b



Düsseldorf Wehrhahnlinie

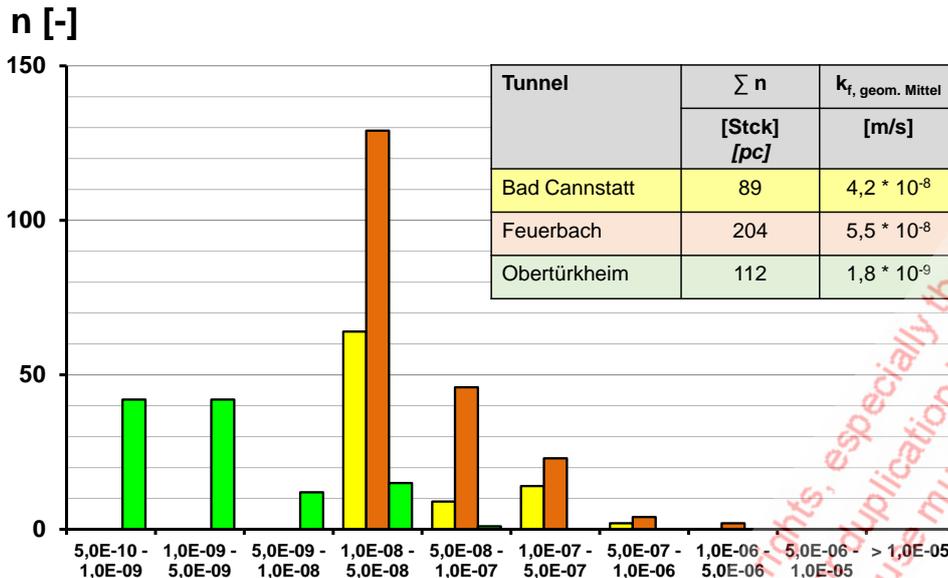


Berlin U5



Doha Green Line

- Bauwerks- und Baugrubenabdichtung
- Injektionen im Tunnelbau
- Kraftwerks- und Talsperreninjektionen
- Spritzbetonarbeiten
- Bohrungen für Injektionen, Anker und Vereisungen
- Hebungsinjektionen
- Bodenverfestigungen



Credit/Quelle: WBI

9 Results of Lugeon-tests carried out in grouted rock

Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche zur Überprüfung des Abdichtungserfolgs im Fels

contact zone between support and rock as well as the rock mass were grouted with acrylate gels via up to 10 m long drillings (Fig. 6).

On the so-called wet side of these sealing rings the rock mass in addition was grouted through radial drillings (Figs. 5 and 6). The length and the location of the drillings for grouting were and are defined on the basis of the rock mechanical conditions in the different areas. For the example taken from the tunnels to Ober-/Untertürkheim shown here, 4 m long drillings were carried out in the upper part of the cross section.

The aim of the grouting works is to reduce the permeability of the rock mass as much as possible. If possible, the permeability of the undisturbed rock mass, which amounts to approx. 10^{-8} m/s to 10^{-10} m/s should be achieved. This means that discontinuities with openings widths of ≤ 0.05 mm to 0.01 mm have to be sealed. The efficiency of the grouting works can be influenced by the grouting pressure p , the spacing between the drillings d , the time of grouting t and the dynamic viscosity η of the grout.

The grouting pressure must be limited in order to avoid uncontrolled opening of the rock mass (fracking), which would lead to undesirable additional flow paths for seepage. In view of this, the maximum effective grouting pressure was limited to 5 bar. In view of the time and costs for construction, the duration of grouting must be as small as possible and the spacing between the drillings should be as large as possible. In order to be able to successfully grout the rock mass in spite of these economic requirements, the viscosity of the grout must be as small as possible. The surface tension of the grouts available on the market (acrylate gels and polyurethane) are within the same order of magnitude. Thus, capillary suction is only of minor importance for the selection of the adequate grout.

möglichst gering und der Abstand der Bohrlöcher möglichst groß gewählt werden. Um dessen ungeachtet den erforderlichen Verpresserfolg erreichen zu können, muss das gewählte Einpressgut eine möglichst geringe Viskosität besitzen. Da die Oberflächenspannungen der erhältlichen Injektionsmittel (PU und Acrylatgele) in einer ähnlichen Größenordnung liegen, spielen Kapillarkräfte für die Wahl des Injektionsmittels keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

Auf dem Markt erhältliche Acrylatgele besitzen bei Temperaturen von ca. 20 °C dynamische Viskositäten von $\eta = 1$ bis 3 mPa*s, während von den Herstellern von niedrigviskosen Polyurethanen Werte von $\eta \geq 40$ mPa*s angegeben werden. Da die Viskosität des Verpressmittels wie erwähnt der maßgebende Parameter für das Eindringverhalten des Baustoffs während einer Injektion ist, sind bei der Verpressung von PU-Harzen somit deutlich längere Injektionszeiten bzw. deutlich kleinere Bohrlochabstände erforderlich als bei Verwendung von sehr niedrig-viskosen Acrylatgelen. Dieser Effekt konnte anhand von theoretischen Überlegungen, in Laborversuchen bei WBI sowie durch einen In-Situ-Großversuch in den Tunneln nach Obertürkheim nachgewiesen werden. Dementsprechend sind Acrylatgele für die Abdichtung von Trennflächen mit sehr geringen Öffnungsweiten deutlich besser geeignet als Polyurethane. Sie wurden bzw. werden daher für die Injektionen im Anhydrit beim Projekt Stuttgart 21 eingesetzt. Vor dem Hintergrund der Dauerhaftigkeit und der günstigeren Eigenschaften bei Austrocknung und Wiederbefeuchtung werden Methacrylatgele und keine Magnesiumacrylatgele verwendet.

Für den Fall, dass stärker durchlässige Zonen bzw. wasserführende Bereiche abgedichtet werden müssen, kommen jedoch auch für die Injektionen im Anhydrit Polyurethane zur Anwendung. Dabei werden sowohl „hoch-viskose“ Polyurethane ($\eta = 150$ mPa*s) als auch „niedrig-viskose“ Polyurethane ($\eta = 40$ mPa*s) verwendet.

Acrylate gels available on the market reveal dynamic viscosities of $\eta = 1$ to $3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ at temperatures of $20 \text{ }^\circ\text{C}$. For polyurethane with low viscosity the suppliers provide values of $\eta \geq 40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Since the viscosity is the decisive parameter for the penetration of the grout, the grouting times required for PU would be much higher than for low-viscous acrylate gels. In view of the increase of the viscosity with time also the spacing of the drillings for PU-grouting would have to be much smaller than for acrylate gels. These conclusions were proven on the basis of theoretical evaluations as well as the results of laboratory and large-scale field tests in the tunnels to Obertürkheim.

Consequently, acrylate gels are to be preferred for sealing of discontinuities with very small opening widths. Thus, they have been and are stilling being applied for the grouting works in the anhydrite for the tunnels of the project Stuttgart 21. In view of the durability and the better behavior during drying-out and re-wetting, methacrylate gels are and were used respectively. Acrylate gels based on Magnesium were found to be not adequate.

For grouting of highly permeable zones and in case water-bearing strata had to be grouted, however, also polyurethane was applied. For corresponding grouting works high-viscous polyurethane ($\eta = 150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) and low-viscous polyurethane ($\eta = 40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) were used.

The grouting works both within each cross section and in longitudinal direction were carried out step-wise according to the pilgrim method. Within one cross section at first the drillings of the so-called a-series are drilled and grouted, followed by the b-series and finally by the c-series (**Fig. 5**). In longitudinal direction the grouting works start with cross sections I and II, followed by III and finally IV.

For the tunnels to Feuerbach and Bad Cannstatt the spacing between the cross sections in longitudinal direction was selected to 1 m . For the tunnels to Ober-/Untertürkheim the corresponding spacing was reduced to 0.75 m (**Fig. 8**). In total 230 000 drillings with a total length of more than 560 km were drilled and grouted in the three tunnels. The grouting works in the Fildertunnel are still ongoing and thus are not considered within the given paper.

On the average the grout take of the rock mass in the tunnels to Ober-/Untertürkheim amounted to $4.2 \text{ liter per meter drilling}$. The reduction of the grout take from the a- to the c-series from 7.5 l/m to 1.7 l/m clearly shows the success of the measure. Also the works in the tunnels to Feuerbach and Bad Cannstatt based on the reduction of the grout take from the a- to the c-series can be considered successful. However, the grout take

Die Injektionen im Anhydrit werden sowohl innerhalb eines Querschnitts als auch in Tunnellängsrichtung nach dem Pilgerschrittverfahren ausgeführt. Innerhalb eines Querschnitts werden zunächst die Bohrungen der a-Serie, dann die Bohrungen der b-Serie und schließlich die Bohrungen der c-Serie hergestellt und verpresst (**Bild 5**). Außerdem werden in Tunnellängsrichtung zunächst die Querschnitte I und II, dann die Querschnitte III und abschließend die Querschnitte IV ausgeführt.

In den Tunneln nach Feuerbach und Bad Cannstatt beträgt der Abstand d der Querschnitte in Tunnellängsrichtung nach Abschluss der Injektionen 1 m . In den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim wurde der Abstand der Querschnitte am Ende der Injektionen auf $0,75 \text{ m}$ verringert (**Bild 8**). Insgesamt wurden in den drei Tunneln ca. 230 000 Bohrungen mit einer Gesamtlänge von mehr als 560 km verpresst. Die Injektionsarbeiten im Fildertunnel sind noch nicht abgeschlossen und werden daher im vorliegenden Beitrag nicht behandelt.

Im Mittel wurden in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim $4,2 \text{ l}$ Injektionsgut je Bohrmeter in das Gebirge eingebracht. Die Abnahme der Aufnahmemenge von der a- zur c-Serie von $7,5 \text{ l/m}$ auf $1,7 \text{ l/m}$ zeigt den Injektionserfolg. Auch in den Tunneln nach Feuerbach bzw. Bad Cannstatt konnte von der a- zur c-Serie eine deutliche Abnahme der Injektionsgutaufnahme beobachtet werden. Allerdings waren die Aufnahmemengen in der c-Serie in diesen Tunneln deutlich höher als in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim. Dieses Ergebnis ist auf den größeren Abstand der Querschnitte in Tunnellängsrichtung zurückzuführen ($1,0 \text{ m}$ anstelle von $0,75 \text{ m}$).

Der Injektionserfolg wurde außer durch die Abnahme der Injektionsgutaufnahme von der a- zur c-Serie auch durch in Bohrungen ausgeführte Lugeonversuche nachgewiesen. Die Versuche wurden mit Acrylatgel mit einer verlängerten Topfzeit durchgeführt. Im Tunnel nach Feuerbach, bei dem die Injektionsgutaufnahme in der c-Serie im Mittel $5,8 \text{ l/m}$ betrug, ergibt sich das geometrische Mittel des Durchlässigkeitsbeiwertes aus 204 Versuchen zu $5,5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ (**Bild 9**). Im Tunnel nach Bad Cannstatt wurde bei einer etwas geringeren Injektionsgutaufnahme in der c-Serie in 89 Versuchen ein etwas geringerer Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt als im Tunnel nach Feuerbach. Deutlich bessere Ergebnisse konnten für die injizierten Bereiche in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim erzielt werden. Durch die Verringerung des Abstands der Querschnitte in Tunnellängsrichtung auf 75 cm , ergab sich in 112 Versuchen ein geometrischer Mittelwert des Durchlässigkeitsbeiwertes von nur noch $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ (**Bild 9**). Es ist somit durch die Injektionsarbeiten in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim gelungen, nahezu die Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges wiederherzustellen. Um diese geringen Durchlässigkeiten in den Lugeonversuchen nachweisen zu können, wurden spezielle Durchflusssensoren verwendet, die einen Messbereich von $0,005$ bis 3 l/min aufweisen.

in the c-series for these tunnels has been higher than in the tunnels to Ober-/Untertürkheim, which is due to the larger spacing of the grouting sections (1.0 m in comparison to 0.75 m).

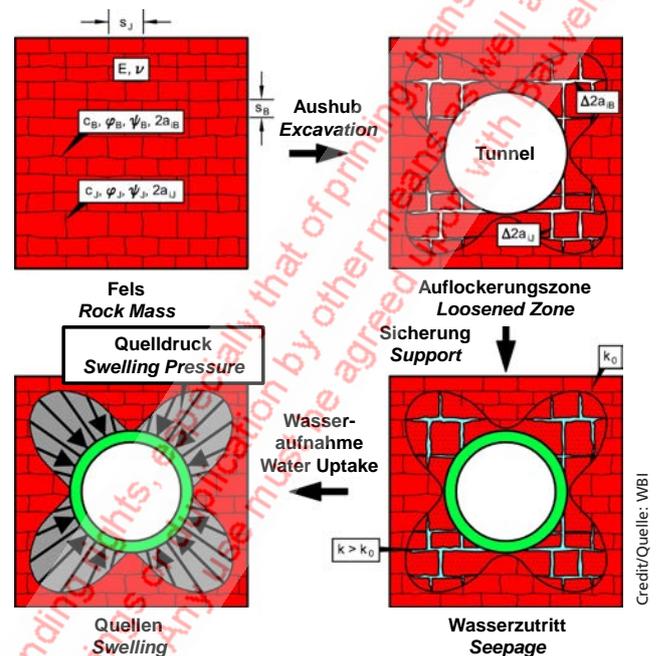
The success of the grouting works in addition was tested by means of Lugeon-tests, which were carried out with acrylate gels with a longer pot time. For the tunnel Feuerbach the geometrical mean value of the permeability coefficient resulting for 204 tests amounts to $5.5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Fig. 9). For this tunnel the mean grout take in the c-series amounted to 5.8 l/m. The corresponding mean grout take in the tunnels to Bad Cannstatt was slightly smaller. Here also a slightly smaller permeability resulted from the 89 Lugeon-tests. Remarkably better results were obtained for the tunnels to Ober-/Untertürkheim. As a consequence of the smaller spacing of the cross sections in longitudinal direction, the geometrical mean permeability for 112 Lugeon-tests resulted to $1.8 \cdot 10^{-9}$ m/s only (Fig. 9). For these tunnels, the permeability of the loosened zone by grouting was approx. reduced to the level of the undisturbed rock mass. In order to be able to tests such small permeability values in Lugeon-tests a special flow meter with a measurement range of 0.005 to 3 l/min was applied.

An additional measure to prevent and limit respectively the inflow of water into the swelling rock, the fleece between the sealing membrane and the shotcrete in the tunnels to Feuerbach and Bad Cannstatt was locally replaced by bentonite mats (Fig. 6).

6 Internal Lining

The design for the internal lining was carried out on the basis of Finite Element analyses using the module SWELL of the program system FESTO3. The analyses consider the elastic-viscoplastic behavior, the transient seepage through discontinuities, the water uptake of the intact rock and the swelling (Fig. 10). The parameters applied in the analyses for the unleached Gypsum Keuper are summarized in Fig. 2. By means of a large number of parametric studies it was shown that the anhydrite content and the maximum possible swelling pressure respectively, the height of the anhydrite level related to the tunnel cross section, the distance to water-bearing layers and the level of the groundwater table have a decisive impact on the order of magnitude and the distribution of the swelling pressures acting on the inner lining. The development of the swelling pressures with time is determined by the transient seepage and the water uptake of the intact rock. The positive effect of the grouting works described in chapter 5, is taken into account in the analyses.

As an example for the swelling pressures resulting from the various analyses conducted for dimensioning the



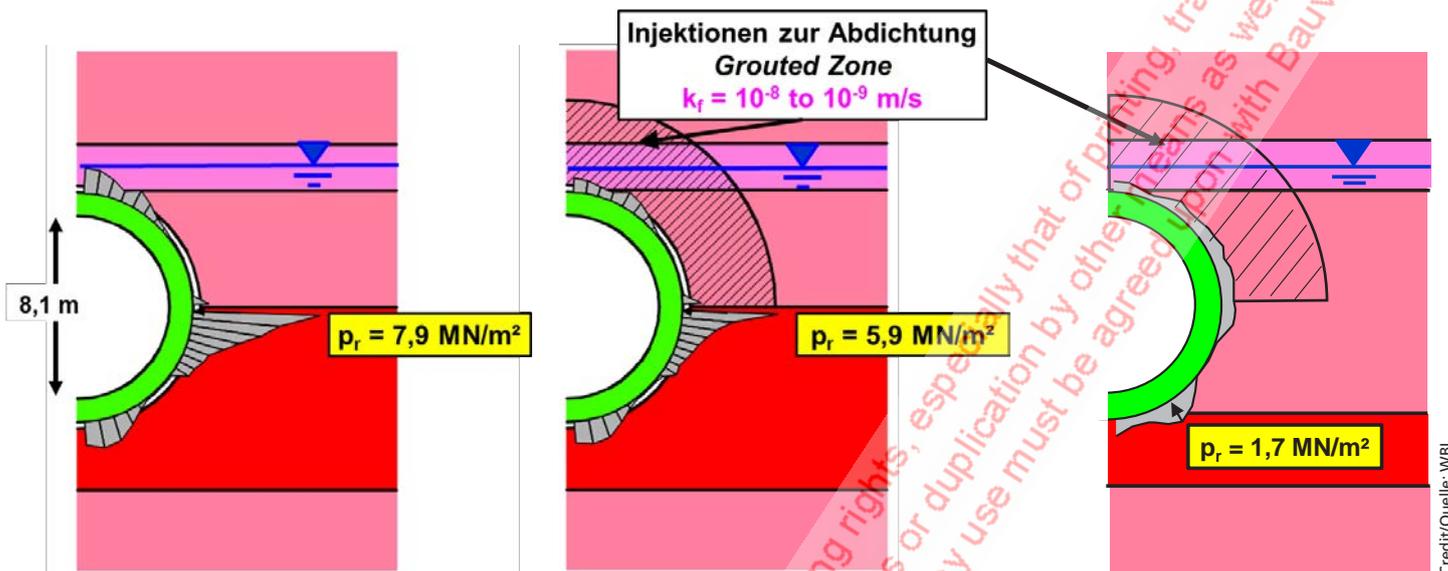
10 Design of internal lining, sequence of FE-analyses
Bemessung der Innenschale, Ablauf FE-Berechnungen

Als zusätzliche Maßnahme zur Ver- bzw. Behinderung von Wasserzutritten in das quellfähige Gebirge wurde in ausgewählten Abschnitten der Tunnel nach Bad Cannstatt und Feuerbach anstelle des Vlieses zwischen der KDB und dem Abdichtungsträger eine Bentonitmatte angeordnet (Bild 6).

6 Innenschale

Die Bemessung der Innenschalen erfolgte mit Hilfe von numerischen Berechnungen mit dem Modul SWELL des Programmsystems FESTO3. In den Berechnungen werden das elastisch-viskoplastische Verhalten, die instationäre Sickerströmung, die Wasseraufnahme des Gesteins und das Quellgesetz berücksichtigt (Bild 10). Die in den Berechnungen für den unausgelaugten Gipskeuper angesetzten Kennwerte sind in Bild 2 zusammengestellt. In umfangreichen Parameterstudien konnte gezeigt werden, dass der Anhydritgehalt bzw. der maximal mögliche Quelldruck, die Höhenlage des Anhydritspiegels sowie der Abstand zum wasserführenden Gebirge und die Höhenlage des Grundwasserspiegels einen entscheidenden Einfluss auf die Größe und Verteilung der Quelldruckbeanspruchung besitzen. Die zeitliche Entwicklung der Quelldruckbeanspruchung wird durch die instationäre Sickerströmung in den Trennflächen und die Wasseraufnahme bzw. die Diffusion im Gestein bestimmt. Auch die Wirkung der Abdichtungsinjektionen wird bzw. wurde in den Berechnungen berücksichtigt.

Beispielhaft sind in Bild 11 für drei Berechnungsfälle die nach 100 Jahren Quellen für die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim errechneten Radialdrücke auf die Innenschale dargestellt. Für den Fall, dass der Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte



11 Calculated radial pressures on internal lining after 100 years of swelling, examples
Errechnete Radialdrücke nach 100 Jahren Quellen, Beispiele

inner lining, the radial pressures acting on the inner lining after 100 years of swelling, which resulted for 3 cases from the tunnel to Ober-/Untertürkheim are shown in **Fig. 11**. When the anhydrite level is located at the elevation of the centerline of the tunnel and the water-bearing marker horizon "Bleiglanzbank" is located immediately above to roof, the analyses lead to a maximum radial pressure on the lining of 7.9 MN/m². By means of the grouting works, which were carried out in the considered tunnel section, the maximum radial pressure after 100 years swelling in this case can be reduced to 5.9 MN/m². In case the anhydrite level – with the same assumptions – is located in the area of the invert of the tunnel, the resulting max. pressure amounts to only 1.7 MN/m² (**Fig. 11**, right).

The results clearly show that the highest radial pressures occur, when the anhydrite level is located at the elevation of or slightly above and below the centerline of the tunnel. The swelling pressures furthermore act on a comparatively small area of the circumference. Thus, in spite of the favorable circular cross section and the comparatively stiff inner lining with a thickness of 1 m, a large amount of bending and shear reinforcement is required. An impression of the reinforcement can be obtained from the photo taken in the tunnels to Feuerbach (**Fig. 12**).

The analyses carried out by WBI in connection with the Engelbergbasistunnel have shown that corresponding swelling pressures acting along the sidewall caused the damages that occurred in this tunnel. For such a loading

und die wasserführende Bleiglanzbank unmittelbar oberhalb der Firste anstehen, ergeben die Berechnungen einen max. Radialdruck von 7,9 MN/m². Die im Gültigkeitsbereich der hier gezeigten Berechnungen ausgeführten Abdichtungsinjektionen führen zu einer deutlichen Verringerung der Wasserzufuhr und damit auch des nach 100 Jahren auftretenden Radialdrucks, der sich in diesem Fall auf max. 5,9 MN/m² verringert. Steht bei sonst gleichen Annahmen der Anhydritspiegel in Höhe der Tunnelsohle an, ergeben sich im hier vorgestellten Fall mit max. 1,7 MN/m² deutlich geringere Quelldrücke (**Bild 11**, rechts).

Die Ergebnisse zeigen, dass die max. Quelldrücke auftreten, wenn der Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte bzw. geringfügig darüber oder darunter ansteht. Die Quelldrücke treten zudem im Wesentlichen örtlich begrenzt auf. Dementsprechend ist – trotz des statisch günstigen Kreisquerschnitts und einer Innenschalendicke von 1 m – eine sehr große Biegebewehrung und sehr große Schubbewehrungen erforderlich. Einen Eindruck der erforderlichen Bewehrungsgehalte vermittelt das im Tunnel nach Feuerbach aufgenommene **Bild 12**.

Die von WBI im Zusammenhang mit dem Engelbergbasistunnel durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Schäden in diesem Tunnel auf entsprechende seitlich auf die Tunnelschale wirkende Radialdrücke zurückzuführen sind. Für eine solche Beanspruchung ist eine unterhalb der Tunnelsohle angeordnete Knautschzone, wie sie beispielsweise beim Engelbergbasistunnel und beim Freudensteintunnel ausgeführt wurde sehr ungünstig. Auch Hebungen der Tunnelröhre können durch die Anordnung einer Knautschzone nicht bzw. wenn überhaupt nur in einem sehr begrenzten Umfang vermieden werden. Für

a yielding zone located underneath the invert, as applied for the Engelbergbasistunnel and the Freudensteintunnel has a detrimental effect on the stability. Also heaving of the tunnel cannot or if at all only to a minor extent be avoided by means of such a yielding zone. For the tunnels of the project Stuttgart 21 it was thus decided to construct a shotcrete support with a so-called U-Profile in areas where the anhydrite level was located in the lower part of the cross-section and the water-bearing



12 Reinforcement in the sidewall, example Feuerbach Tunnel
Bewehrung in der Ulme, Beispiel Tunnel Feuerbach

leaching front was located in the area of the roof of the tunnel (Figs. 3 and 6). Furthermore, the joints between the different blocks of the inner lining in areas where certain heave cannot be ruled out were constructed with a thickness of 4 cm. As an additional measure in certain tunnel sections so-called temporary drainage holes were constructed, for the purpose to limit the amount of seepage penetrating into the underlying swelling rock after the groundwater table has risen to its original state. On the so-called dry side of the sealing structures, the inner lining and the segmental lining respectively are designed for swelling pressures only for the extraordinary situation (BS-A). Here the inner lining and the segmental lining were designed with a thickness of 60 cm only. On the wet side of the sealing structures swelling had to be considered as a permanent regular loading (BS-P; Fig. 3).

7 Summary

For the railway project Stuttgart 21 approx. 17 km tunnels have been constructed in the anhydrite-containing, swelling Gypsum Keuper. The given paper gives an overview about the project and the measures that were designed and applied respectively for successful completion of the heading works and for the internal lining. Also during the operation phase, the tunnels will be monitored by means of measurements of displacements and stresses. The author, also on behalf of all co-workers of WBI, wishes to thank the German Railway as the client, the contractors (JV ATCOST21, JV Tunnel Bad Cannstatt and JV Tunnel Feuerbach) as well as all other parties involved in the project for the good and fruitful cooperation.

das Projekt Stuttgart 21 wurden daher in Tunnelabschnitten, in denen der Anhydritspiegel in der unteren Querschnittshälfte ansteht und in denen das wasserführende und ausgelaugte Gebirge in Höhe der Firste ansteht, die Spritzbetonauskleidung in Form eines U-Profiles ausgeführt (Bilder 3 und 6). Außerdem wurden die Blockfugen in Bereichen, in denen mit gewissen Hebungen gerechnet werden muss, mit einer Breite von 4 cm ausgeführt. Als zusätzliche Maßnahme wurden in bestimmten Tunnelabschnitten sogenannte temporäre Dränagen vorgesehen, die den Wasserzutritt in das unterhalb liegende quellfähige Gebirge nach dem Wiederanstieg des Grundwasserspiegels begrenzen.

Auf der sogenannten trockenen Seite der Dammringe wird die Auskleidung der Tunnel nur für die außergewöhnliche Bemessungssituation BS-A gegen Quelldruck bemessen. Hier konnten Schalendicken von 60 cm sowohl für die Innenschale als auch für die Tübbing gewählt werden. Auf der Wasserseite der Dammringe erfolgt die Bemessung der Innenschale mit den Sicherheiten der Bemessungssituation BS-P (Bild 3).

7 Zusammenfassung

Für das Projekt Stuttgart 21 wurden ca. 17 km Tunnel im anhydritführenden, quellfähigen Gipskeuper gebaut. Im vorliegenden Beitrag werden das Projekt und die Maßnahmen, die für die erfolgreich abgeschlossenen Vortriebsarbeiten und den endgültigen Ausbau ergriffen wurden, in kurzer Form vorgestellt. Die Tunnel werden auch in der Betriebsphase messtechnisch überwacht. Der Autor möchte sich im Namen aller Mitarbeiter von WBI beim Bauherrn, der DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, den Baufirmen (Arge ATCOST21, Arge Tunnel Bad Cannstatt und Arge Tunnel Feuerbach) und allen übrigen Projektbeteiligten für die gute und konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. WBI-PRINT 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2003.
- [2] Wittke-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunneln in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1998.
- [3] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014. ISBN-Nr.: 978-3-433-03079-0.
- [4] Wittke, M.: Knautschzone versus U-Profil im quellfähigen Gipskeuper. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.
- [5] Wittke, W.: Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.
- [6] Wittke, W.: Baugrundverhältnisse des Bahnprojekts Stuttgart-Ulm. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.
- [7] Wittke, W.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Erichsen, C.: Stoffgesetz, Berechnungsverfahren, felsmechanische Kennwerte und Ausführungsstatik für Tunnel im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.
- [8] Priß, S.; Kicherer, M.; Hirche, N.: Großprojekt Stuttgart 21, Tunnel Feuerbach: Bautechnische und baubetriebliche Lösungen beim Tunnelbau in anhydritführendem Gebirge - Vorauseilende und nachlaufende Injektionen, trockener Vortrieb, hochgradig bewehrte Innenschale. Veröffentlichung anlässlich der STUVA-Tagung 2019 in Frankfurt a. M. vom 26. - 28.11.2019, Köln, 2019.
- [9] Bayer, L.; Berner, T.; Wittke, M.: Anwendung eines phosphatbasierten Ringspaltmörtels beim Bau des Fildertunnels im anhydritführenden Gebirge. Taschenbuch für den Tunnelbau 2019, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2019.
- [10] Wittke, M.; Schmitt, D.; Osthoff, G.: Einpressungen von Acrylatgel und Polyurethan zur Abdichtung des anhydritführenden Gipskeupers im Bereich der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-PRINT 22, Weinheim, 2019.
- [11] Müller, T.; Schaab, A.: Entwicklung eines stahlfaserarmierten Spritzbetons für den Bau von Dammringen. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.
- [12] Erichsen, C.: Entwurfskonzepte für die Tunnel des Projekts. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.