

Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt des Projekts Stuttgart 21

## Injektionen zur Begrenzung von Wasserzutritten in anhydritführendes Gebirge

Mehr als 15 km der im Stadtgebiet von Stuttgart liegenden Tunnel des Bahnprojekts Stuttgart–Ulm liegen im anhydritführenden Gipskeuper, der bei Wasserzutritt quillt. Aufgrund der dabei entstehenden Quelldrücke und der quellbedingten Verschiebungen ist es in der Vergangenheit bei vielen Tunneln zu großen Schäden gekommen. Deshalb werden die entsprechenden Abschnitte der Tunnel im Stadtgebiet von Stuttgart absolut trocken aufgefahren.

Tunnels to Feuerbach and Bad Cannstatt for the Stuttgart 21 Project

## Injections to restrict ingressing Water in Rock containing Anhydrite

More than 15 km of the tunnels for the Stuttgart–Ulm rail project located in the Stuttgart urban area lie in gypsum keuper containing anhydrite, which swells in contact with water. Owing to the swelling pressures that occur and the displacements caused by swelling, major damage has resulted in the case of many tunnels in the past. As a consequence, the corresponding sections of the tunnels in the Stuttgart urban area are driven absolutely dry.

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Martin Wittke, Dr.-Ing. Claus Erichsen, Dipl.-Ing. Dieter Schmitt,

WBI Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH Worldwide Engineering, Weinheim, Deutschland/Germany

Christoph Lienhart, DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH, Stuttgart, Deutschland/Germany

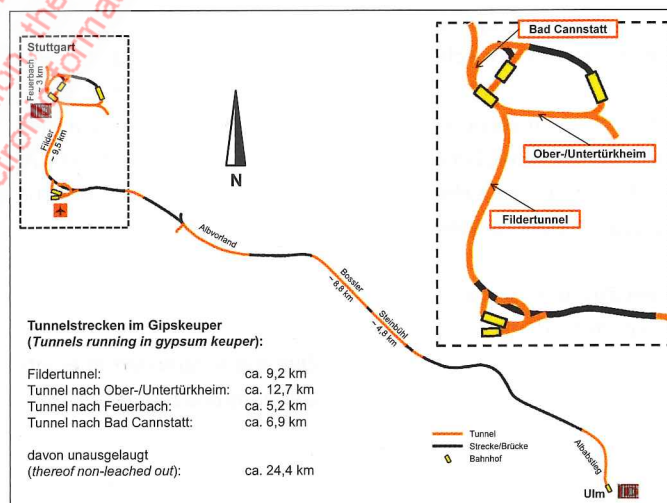
Die wasserführende Auslaugungsfront wird über dem Vortrieb vorausseilenden Bohrungen durch Einpressungen von Polyurethan abgedichtet, damit kein Grundwasser an das anhydritführende Gebirge gelangen kann. Aus demselben Grund wird die Längsläufigkeit von Wasser durch die den Tunnel umgebende Auflockerungszone mit Hilfe von Abdichtungsbauwerken unterbunden. In der Umgebung der Abdichtungsbauwerke wird das Gebirge über radiale Bohrungen mittels Acrylatgelenjektionen abgedichtet. Zusätzlich wird die ausbruchbedingte Auflockerungszone in der Umgebung der Tunnel in anhydritführenden Tunnelabschnitten bereichsweise durch Acrylatgelenjektionen abgedichtet.

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse eines Injektionsversuchs beschrieben, der im Tunnel Feuerbach durchgeführt wurde; ferner wird über laufende Acrylatgelenjektionen im Cannstatter Tunnel berichtet.

The water-bearing leaching front is sealed by means of drilling in advance of the excavation by grouting polyurethane so that no groundwater can come into contact with the anhydrite-bearing rock. For the same reason the longitudinal path of water is hindered from passing through the loosening zone surrounding the tunnel with the aid of waterproofing wall structures. Around these waterproofing wall

structures the rock is sealed using acrylate gels injections via radial drilling. In addition, the loosening zone resulting from the excavation in the proximity of the tunnel in anhydrite-bearing tunnel sections is sealed area by area using acrylate gel injections.

This article examines the results of a grouting test, which was carried out in the Feuerbach Tunnel; in addition ongoing acrylate gel injections in the Cannstatt Tunnel are dealt with.

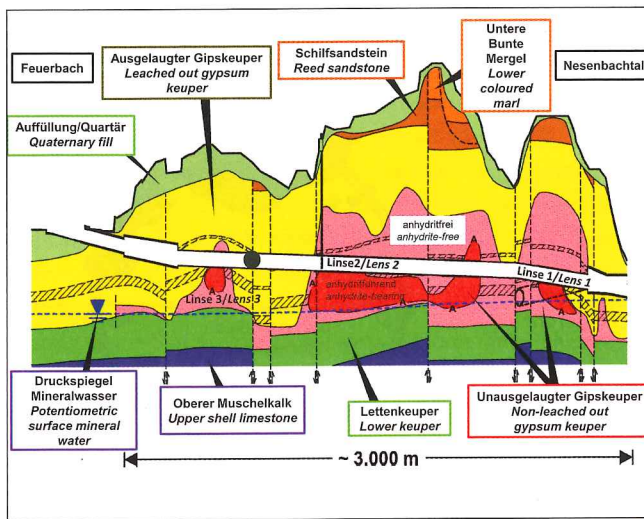


1 Bahnprojekt Stuttgart–Ulm, Übersicht  
Stuttgart–Ulm rail project, overview

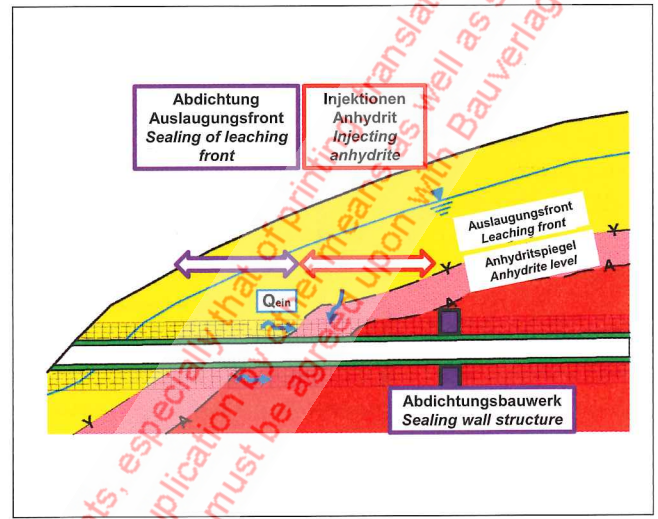
Quelle/credit (3): WBI

### 1 Project

The route of the Stuttgart–Ulm rail project (Fig. 1) leads from the



2 Tunnel nach Feuerbach, Längsschnitt  
Tunnel to Feuerbach, longitudinal section



3 Abdichtungsmaßnahmen  
Sealing measures

## 1 Projekt

Die Trasse des Bahnprojekts Stuttgart–Ulm (**Bild 1**) führt vom neuen Hauptbahnhof über den 9,5 km langen Fildertunnel auf die Filderebene, von dort über die Alaubstiegtunnel (Boßler- und Steinbühlentunnel) auf die Schwäbische Alb und über den Alaubstiegtunnel in den Hauptbahnhof Ulm. Die Tunnel bestehen jeweils aus zwei eingleisigen Tunnelröhren. Der Flughafen wird über den Flughafentunnel an die Hochgeschwindigkeitsstrecke angebunden, und die Strecke nach Zürich über die sogenannte Flughafenkurve.

Die Anbindung des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs an die Schnellfahrstrecke von Mannheim nach Stuttgart erfolgt über zwei eingleisige Tunnelröhren nach Stuttgart-Feuerbach. Die bestehende Strecke durch das Neckartal wird über die Tunnel nach Bad Cannstatt und Ober-/Untertürkheim an den neuen Hauptbahnhof angeschlossen (**Bild 1**, Ausschnitt).

Die beiden Röhren des Fildertunnels werden in einem mittleren Abschnitt mit einer TBM aufgeföhrt. Die anderen Abschnitte dieses Tunnels werden, wie alle anderen Tunnel im Stadtgebiet von Stuttgart, konventionell vorgetrieben.

## 2 Baugrund

Ein geologischer Längsschnitt für den Tunnel nach Feuerbach findet sich im **Bild 2**. Danach liegen die Tunnelröhren vollständig in den Schichten des Gipskeupers. Unterhalb des Gipskeupers stehen der Lettenkeuper und der obere Muschelkalk an. Oberhalb des Gipskeupers wurden im Rahmen der Voruntersuchungen bereichsweise der Schiffsandstein und die Unteren Bunten Mergel erbohrt.

Der Gipskeuper steht in drei Erscheinungsformen an, die auf den Sulfatgehalt der Ton schluffsteine dieser Formation zurückzuführen sind. Die in **Bild 2 und 3** in roter Farbe dargestellten Schichten enthalten Sulfat in Form von Anhydrit. Dieses geht bei Wasserzutritt in Lösung und kristallisiert an Ort und Stelle wieder als Gips aus, falls die Lösung nicht mit dem Grundwasser

new Central Station via the 9.5 km long Filder Tunnel on to the Filder plain, from which it runs via the Alaubstiegtunnel (Boßler and Steinbühl Tunnels) on to the Swabian Alb and then through the Alaubstiegtunnel to Ulm Central Station. Each of the tunnels consists of two single-track tubes. The Airport is linked to the high-speed line by means of the Airport Tunnel, and the connection to Zurich via the so-called Airport Curve (Flughafenkurve).

The new Stuttgart Central Station is connected to the high-speed route from Mannheim to Stuttgart via two single-track tunnel tubes leading to Stuttgart Feuerbach. The existing line through the Neckar Valley is linked up with the new Central Station via the tunnels to Bad Canstatt and Ober-/Untertürkheim (**Fig. 1**, excerpt).

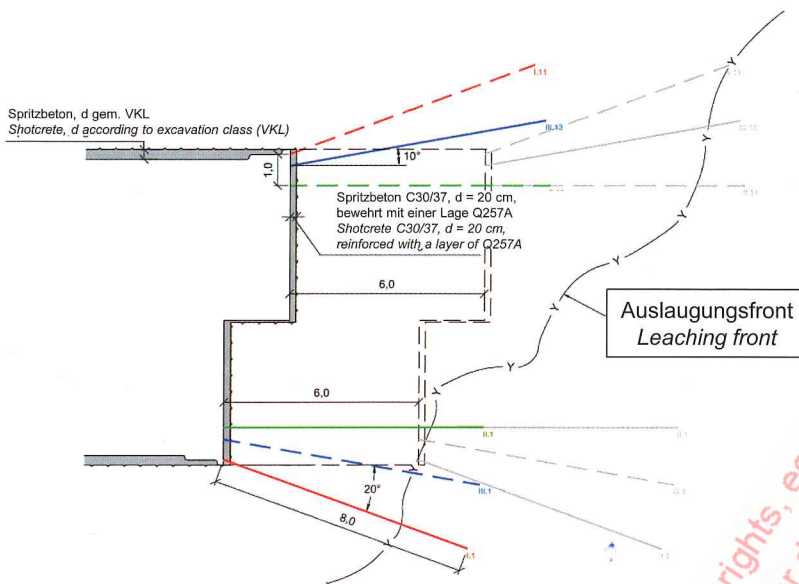
The central section of the two Filder Tunnel tubes is driven by means of a TBM. The other sections of this tunnel are excavated by conventional means like all the other tunnels in the Stuttgart urban area.

## 2 Subsoil

A geological longitudinal section for the tunnel leading to Feuerbach is displayed in **Fig. 2**. It reveals that the tunnel tubes are located entirely in layers of gypsum keuper. Lower keuper and upper shell limestone are to be found below the gypsum keuper. Above the gypsum keuper, reed sandstone and lower coloured marl were located in certain sections within the scope of preliminary tests.

The gypsum keuper occurs in three forms, attributable to the sulphate content of the clay siltstones of this formation. The layers shown in red in **Figs. 2 + 3** contain sulphate in the form of anhydrite. This dissolves in contact with water and recrystallises immediately as gypsum unless the solution is removed by the groundwater; in nature this process occurs in geological periods.

Above, the sulphate content in the layers shown in pink consists of gypsum. This still relates to solid rock, which, however, is no longer swellable. At the surface of this layer, the so-called leaching front, the gypsum dissolves upon contact with water and is removed with the groundwater. The leached gypsum shown in yellow remains – what is known as residual rock (see **Figs. 2 + 3**). This layer possesses



Beispiel für Aufnahmemengen  
 Example for intake quantities:  
 Vortrieb/Drive 258H, TM 340:  
 $\Sigma Q \approx 2300 \text{ l}$

#### 4 Vorauseilende Injektionen mit Polyurethan Advance injections with polyurethane

abtransportiert wird; dieser Vorgang findet in der Natur in geologischen Zeiträumen statt.

Oberhalb besteht der Sulfatanteil in den rosa gekennzeichneten Schichten aus Gips. Es handelt sich aber auch dann noch um einen festen Fels, der allerdings nicht mehr quellfähig ist. An der Oberfläche dieser Schicht, der sogenannten Auslaugungsfront, wird bei Zutritt von Wasser der Gips gelöst und mit dem Grundwasser abtransportiert. Übrig bleibt der in Gelb gekennzeichnete, ausgelaugte Gipskeuper – ein sogenanntes Residualgestein (siehe Bild 2 und 3). Diese Schicht besitzt Lockergesteineigenschaften. Sie verhält sich hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit wie ein Schluff und im Hinblick auf die Verformbarkeit wie ein Kiessand. Die Umwandlung von Anhydrit in Gips wird auch beim Tunnelbau kurzfristig ausgelöst, wenn es nicht gelingt, größere Auflockerungen zu vermeiden und das Grundwasser oder Brauchwasser vom anhydritführenden Gestein fernzuhalten. Dieser Vorgang ist mit großen Volumenzunahmen, dem sogenannten Quellen verbunden. Wenn man die quellbedingten Verformungen verhindert oder behindert, entstehen große Quelldrücke [1]. Dadurch ist es bei vielen Tunneln zu Schäden und auch zu Hebungen gekommen, die selbst bei tiefliegenden Tunneln bis zur Geländeoberfläche reichen [2], [3].

Im Tunnel nach Feuerbach wird anhydritführender Gipskeuper in drei Bereichen, den sogenannten Linsen 1 bis 3, angetroffen (siehe Bild 2). Die Tunnel nach Bad Cannstatt durchfahren die Linsen 1 und 2.

### 3 Abdichtungsmaßnahmen

#### 3.1 Vorauseilende Abdichtung der Auslaugungsfront

Das Entwurfskonzept für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21 geht davon aus, dass Wasserzutritte beim Bau vermieden und nach dem Bau minimiert werden müssen.

soft ground properties. It behaves like silt with respect to water permeability and like gravel sand with regard to its deformability.

The transformation from anhydrite to gypsum is also quickly triggered during tunnelling unless major loosening is avoided and the groundwater or industrial water is kept apart from anhydrite-bearing rock. This process is associated with major increases in volume, commonly known as swelling. If one prevents or obstructs such deformations caused by swelling, large swelling pressures ensue [1]. This has resulted in damage being caused to many tunnels as well as heaving, which can extend to the surface of the terrain even in the case of deep-lying tunnels [2], [3].

Anhydrite-bearing gypsum keuper is encountered in three areas in the tunnel to Feuerbach; the so-called lenses 1 to 3 (please see Fig. 2). The tunnels leading to Bad Canstatt penetrate lenses 1 and 2.

### 3 Sealing Measures

#### 3.1 Sealing the Leaching Front in Advance

The design concept for the Stuttgart 21 project's tunnels is based on the fact that ingressing water must be minimised during and following construction. The production of the tunnels in the anhydrite-bearing layers is thus executed in an absolutely dry manner. Dry drilling, blasting and mucking are associated with pronounced dust development calling for extensive dedusting measures [4]. Furthermore, ingressing water from the groundwater must be prevented. The risk that seepage water comes into contact with the anhydrite-bearing rock exists primarily in sections of tunnel in which the water-bearing leaching front has to be penetrated or is located in the immediate surroundings of the tunnel (see Fig. 3). Advance injections with polyurethane to seal the leaching front are carried out successfully in these areas. In the process, generally very high intake quantities via drill holes result, by means of which the extremely permeable leaching front is penetrated (Fig. 4).

Der Bau der Tunnel in den anhydritführenden Schichten erfolgt deshalb absolut trocken. Das trockene Bohren, Sprengen und Schüttern ist mit einer starken Staubeentwicklung verbunden und erfordert umfangreiche Entstaubungsmaßnahmen [4].

Außerdem müssen Wasserzutritte aus dem Grundwasser vermieden werden. Das Risiko, dass Sickerwasser mit dem anhydritführenden Gestein in Kontakt kommt, besteht vor allem in Tunnelabschnitten, in denen die wasserführende Auslaugungsfront durchörtert wird bzw. in der unmittelbaren Umgebung des Tunnels ansteht (siehe Bild 3). Vorauseilende Injektionen mit Polyurethan zur Abdichtung der Auslaugungsfront werden in diesen Bereichen erfolgreich durchgeführt. Dabei ergeben sich in der Regel sehr hohe Aufnahmemengen über Bohrungen, mit denen die stark durchlässige Auslaugungsfront durchörtert wird (Bild 4).

### 3.2 Injektionen im anhydritführenden Gestein

Ein weiterer Fließweg, auf dem das Grundwasser auch nach dem Bau in anhydritführendes Gestein gelangen kann, ist die vortriebsbedingte Auflockerungszone, die sich als Folge der Sprengungen und der vortriebsbedingten Spannungsumlagerungen im Gebirge ausbildet. Die durch die Spannungsumlagerungen entstehenden Schub- und Zugspannungen, vor allem auf den vertikalen Klüften, erstrecken sich in Abhängigkeit von der anstehenden Schichtenfolge bis zu einigen Metern in den an den Tunnel angrenzenden Fels (Bild 3 und Bild 5) [5], [6].

Dabei bewirken bereits geringe Vergrößerungen der Öffnungsweite der Trennflächen im Bereich von Bruchteilen von mm Zunahmen der Wasserdurchlässigkeit im Bereich von Zehnerpotenzen [1]. Um derartige Auflockerungen neben dem „unteren Teil“ des Tunnelquerschnitts zu vermeiden, wurde das sogenannte U-Profil entwickelt. Hierfür ergibt sich im Unterschied zum kreisförmigen Ausbruchquerschnitt nur im Bereich der Firste eine durch Spannungsumlagerungen bedingte Auflockerung des Felses [7]. Die vortriebsbedingt aufgelockerten Bereiche werden nachlaufend abgedichtet (siehe „Injektionen Anhydrit“, Bild 3). Für diese Injektionen wird Acrylatgel verwendet (nähere Erläuterung dazu folgen

### 3.2 Injections in anhydrite-bearing Rock

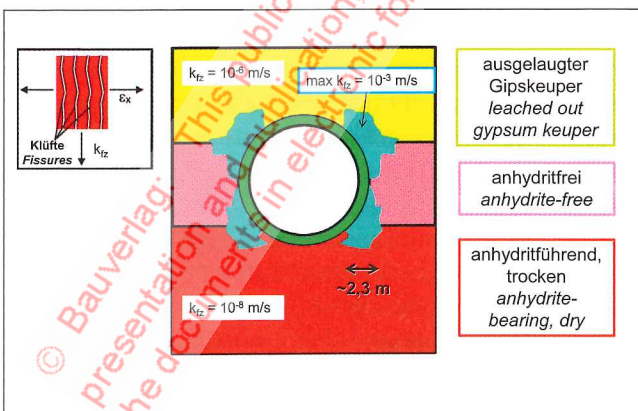
A further flow path, by means of which the groundwater can access the anhydrite-bearing rock after construction, is the loosening zone resulting from the drive, which forms owing to blasting and the redistribution of forces in the rock after the excavation. The shear and tensile stresses resulting from the redistribution of forces, above all affecting the vertical fissures, extend up to several metres into the rock bordering the tunnel depending on the prevailing layer sequence (Fig. 3 and Fig. 5) [5], [6].

In this connection, even enlarging the opening width of the division planes slightly by only a few fractions of a mm results in increasing the water permeability by the range of powers of ten [1]. In order to avoid such loosening next to the “lower part” of the tunnel cross-section, the so-called U-profile was developed. In this case in contrast to the circular excavated cross-section, loosening of the rock caused by force redistributions only occurs in the roof zone [7].

The areas loosened as a result of the excavation are subsequently sealed (see “Injecting Anhydrite”, Fig. 3). Acrylate gel is applied for these injections (Section 4 provides further details in this respect). Acrylate gel is a grouting agent that penetrates the finest pores on account of its viscosity and by means of which extremely low water permeability values can be attained [8], [9], [10].

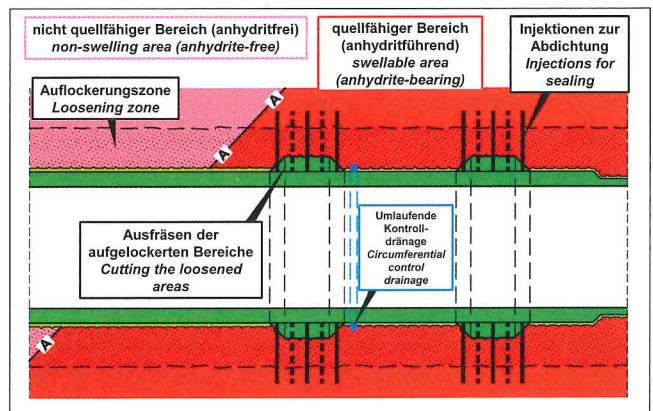
### 3.3 Sealing Wall Structures

In addition to the anhydrite injections, sealing wall structures (Fig. 6) are produced to prevent water passing through the transition area between the gypsum-bearing and anhydrite-bearing rock. Towards this end, the rock is hollowed out up to a depth of roughly 1 m and replaced by steel fibre shotcrete via a 5 m long tunnel section – or via two 5 m long tunnel sections lying alongside one another – depending on the prevailing conditions. Subsequently the rock located outside the ring of concrete is sealed by means of acrylate gel via radial drill holes. A circulating control drainage system on the “dry side” of the first sealing ring serves to determine the success of the injections.



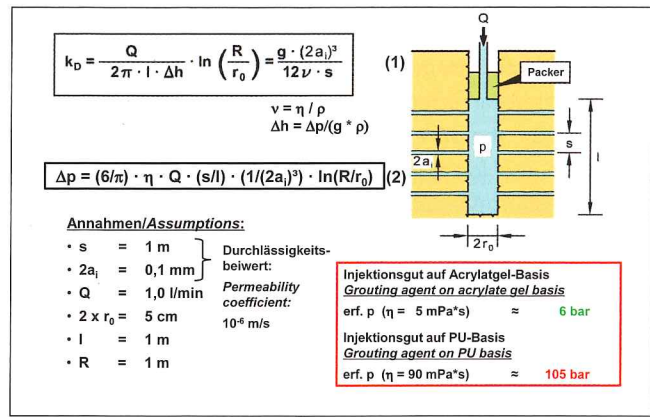
5 Auflockerungszonen infolge Spannungsumlagerungen durch den Tunnelbau

Loosening zones owing to stress redistributions caused by tunneling



6 Abdichtungsbauwerk

Sealing wall structure



7 Injektionsdruck in Abhängigkeit der Spaltweite  
Grouting pressure depending on the gap width

in Abschnitt 4). Acrylatgel ist ein Injektionsmittel, das aufgrund seiner geringen Viskosität in feinste Spalten eindringt und mit dem man sehr geringe Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte erzielen kann [8], [9], [10].

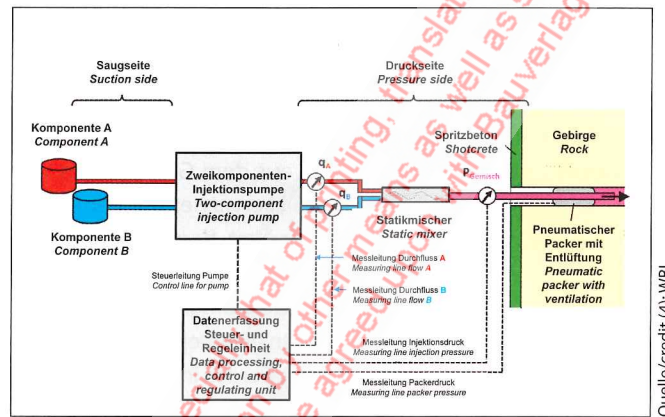
### 3.3 Abdichtungsbauwerke

Zusätzlich zu den Injektionen Anhydrit werden zur Vermeidung der Längsläufigkeit im Bereich des Übergangs vom gipsführenden zum anhydritführenden Gebirge schließlich Abdichtungsbauwerke hergestellt (Bild 6). Hierzu wird das Gebirge in Abhängigkeit von den vorliegenden Verhältnissen über einen 5 m langen Tunnelabschnitt – oder über zwei nebeneinander liegende, 5 m lange Tunnelabschnitte – bis in eine Tiefe von ca. 1 m herausgefräst und durch Stahlfaserspritzbeton ersetzt. Danach erfolgt eine Abdichtung des außerhalb des Betonrings liegenden Felses durch Acrylatgel über radiale Bohrungen. Eine umlaufende Kontrolldrainage auf der „trockenen Seite“ des ersten Abdichtungsringes dient der Überprüfung des Injektionserfolgs.

## 4 Injektion Anhydrit

### 4.1 Wahl des Verpressmittels

In Bild 7 ist die Anordnung eines Wasserdurchlässigkeitsversuchs bzw. Lugeon-Versuchs in einem Fels mit einer horizontalen Trennflächenschar mit einem Trennflächenabstand s und einer konstanten Öffnungsweite der Trennfläche von 2a<sub>i</sub> skizziert. Der Bohrlochdurchmesser ist mit 2r<sub>0</sub> gekennzeichnet, und es wird eine Wassermenge Q in einen Verpressabschnitt der Länge l mit dem Druck p eingepresst. Der Durchlässigkeitsbeiwert der Trennflächen oder des Felses k<sub>p</sub> lässt sich nach [1] in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (2a<sub>i</sub>) und dem Abstand (s) der Trennflächen sowie der kinematischen Zähigkeit des Wassers angeben (Bild 7, Gleichung 1). Aus den im Lugeon-Versuch gemessenen Wasserdrücken (p) und der verpressten Menge (Q) lässt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k<sub>p</sub> versuchstechnisch ermitteln. Löst man diese Gleichung nach dem Einpressdruck p auf und ersetzt die dynamische Viskosität des Wassers durch den entsprechenden Wert einer anderen Newton'schen Flüssigkeit, so erhält man Gleichung 2 (Bild 7). Aus dieser Gleichung kann man dann den Injektionsdruck errechnen,



8 Systemskizze Verpresseinrichtung  
System sketch of grouting unit

## 4 Injecting Anhydrite

### 4.1 Choice of Grouting Agent

Fig. 7 displays the setup of a water permeability test or Lugeon test in a rock with a horizontal interface with a division plane gap s and a constant opening width of the division plane of 2a<sub>i</sub>. The drill hole diameter is indicated with 2r<sub>0</sub> and a quantity of water Q is injected into a grouting section with a length of l with the pressure p. The permeability coefficient of the division planes or the rock k<sub>p</sub> can be obtained in accordance with [1] depending on the opening width (2a<sub>i</sub>) and the distance (s) of the division planes as well as the kinematic viscosity of the water (Fig. 7, equation 1).

The water pressures (p) measured in the Lugeon test and the grouted quantity (Q) enable the permeability coefficient k<sub>p</sub> to be determined by technical means. If this equation is resolved for the grouting pressure p and the dynamic viscosity of the water is replaced by the corresponding value of another Newtonian liquid this results in equation 2 (Fig. 7). This equation then enables the grouting pressure to be obtained, which is required to inject a grouting agent with Newtonian flow behaviour over a range R.

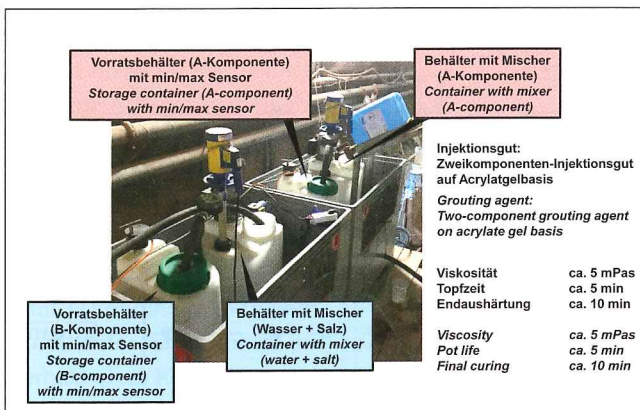
In Fig. 7 this was executed for a rock with a permeability coefficient of 10<sup>-6</sup> m/s in a numerical example. It is shown that acrylate gel with a viscosity of η = 5 mPa\*s (corresponding to five times the viscosity of the water) with a pressure of erf. p = 6 bar can be grouted over a range of 1 m. However, for grouting polyurethane in a corresponding fashion a grouting pressure of 105 bar is needed. However, that pressure would lead to the undesired "fracking" of the rock.

As rock with low water permeability must also be sealed by injecting anhydrite this means that only acrylate gel can be applied as the grouting agent in this particular case. Other chemical grouting agents with low viscosity cannot be contemplated for environmental technical reasons.

### 4.2 Grouting Technology

The acrylate gel that is applied comprises the components A and B, which are fed via a twin-piston pump to a static mixer and then injected into the rock via a delivery line and the drill hole (Figs. 8–10). The grouting section in the drill hole is closed off by means of a vented packer. The flow is measured by magnetic-inductive means

Quelle/Credit: (4): WBI



9 Vorbereitung A- und B-Komponente  
Preparing A and B components

der erforderlich ist, um ein Injektionsgut mit Newton'schem Fließverhalten über eine Reichweite  $R$  zu verpressen.

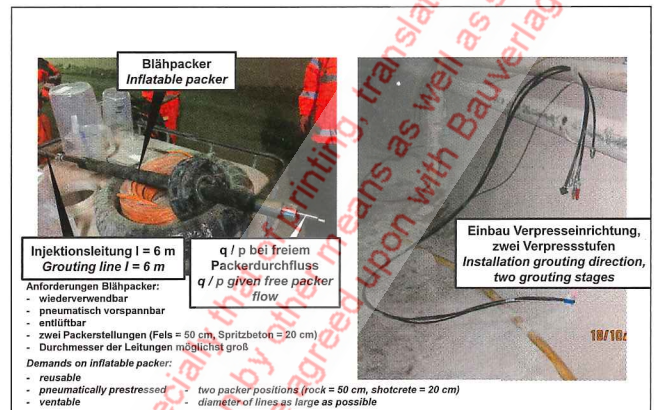
In Bild 7 wurde dies für einen Fels mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $10^{-6}$  m/s in einem Zahlenbeispiel durchgeführt. Es ergibt sich, dass sich Acrylatgel mit einer Viskosität von  $\eta = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (die dem fünffachen Wert der Viskosität des Wassers entspricht) mit einem Druck von erf.  $p = 6 \text{ bar}$  über eine Reichweite von 1 m einpressen lässt. Für eine entsprechende Einpressung von Polyurethan wird man dagegen einen Verpressdruck von 105 bar benötigen. Das ist jedoch ein Druck, der zu einem unerwünschten Aufreißen („Fracking“) des Felses führen würde.

Da mit den Injektionen Anhydrit auch Fels mit geringer Wasserdurchlässigkeit abgedichtet werden muss, kommt als Einpressmittel im vorliegenden Fall somit nur Acrylatgel in Betracht. Andere chemische Verpressmittel mit geringer Viskosität kommen aus umwelttechnischen Gründen nicht in Frage.

#### 4.2 Verpresstechnik

Das verwendete Acrylatgel besteht aus den Komponenten A und B, die über eine Doppelkolbenpumpe einem Statikmischer zugeführt und von dort über eine Zuleitung und das Bohrloch in den Fels eingepresst werden (Bilder 8 bis 10). Der Verpressabschnitt im Bohrloch wird mit einem entlüftbaren Packer abgesperrt. Die Durchflussmessung erfolgt magnetisch-induktiv und zur Kontrolle durch Hubzählung an der Doppelkolbenpumpe (Bild 8). Der Verpressdruck wird hinter dem Statikmischer und vor Eintritt in das Bohrloch gemessen (Bilder 8 bis 10). Druckverluste in der Zuleitung und im Packer müssen gering gehalten werden und werden in getrennten Vorversuchen am offenen System gemessen (Bilder 8 bis 10).

In dem im Abschnitt 4.3 erläuterten Versuch wurde ein Acrylatgel mit einer Topfzeit, nach der die Gelbildung beginnt, von 5 Minuten verwendet. Nach 10 Minuten war die Endaushärtung abgeschlossen. Für die Abdichtungsinjektionen ist ein Acrylatgel mit einer Topfzeit von bis zu 30 Minuten vorgesehen.



10 Blähpacker mit Zuleitung  
Inflatable packers with delivery line

and controlled by stroke counting at the twin-piston pump (Fig. 8). The grouting pressure is measured behind the static mixer and prior to accessing the drill hole (Figs. 8–10). Pressure losses in the delivery line and the packer must be kept low and are measured in separate preliminary tests on the open system (Figs. 8 to 10).

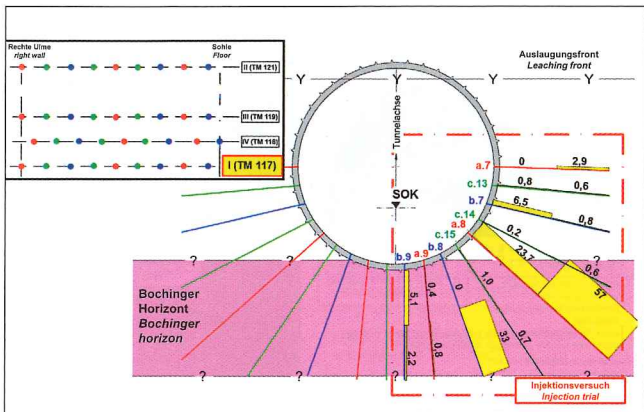
In the test referred to in Section 4.3 an acrylate gel with a 5 minute pot life, after which the gel starts forming, was applied. After 10 minutes it was completely cured. For the sealing injections an acrylate gel with a pot life of up to 30 minutes is foreseen.

#### 4.3 Injection Trial Feuerbach

Prior to commencing the grouting operations in the Feuerbach Tunnel a grouting test was undertaken at lens 3 of the tunnel (see Fig. 2). The test served to try out the injection technology, determine the necessary gaps and depths for the drill holes as well as to establish the required grouting pressures and quantities.

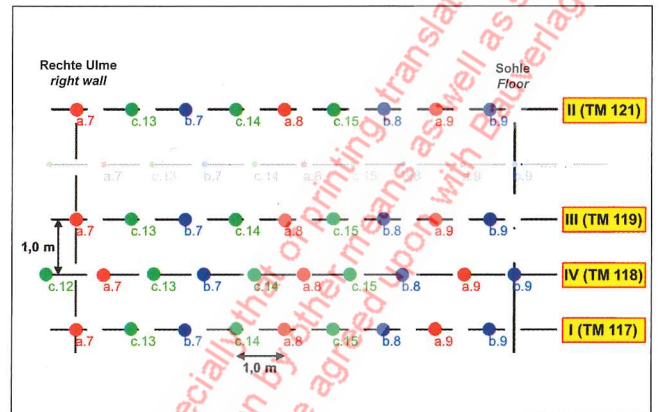
Where the test field is located the tunnel lies in dark-red marl. At roof level there is leached gypsum keuper (Y-Y in Fig. 11). The Bochsinger Horizon, which is far more permeable, is to be found beneath the floor. Here the intention is to seal the rock laterally and below the tunnel. The test field extends over half of the area to be grouted, to the right of the tunnel axis (Fig. 11) and over four cross-sections with a total of 37 drill holes, with a gap of 1 m for the application points within a ring (Figs. 11 and 12). The lengths of the drill holes vary from 6 to 10 m, the drill hole diameter is 51 mm. The gaps between the four cross-sections, which were grouted in the sequence I to IV, amount to 1 m or 2 m between cross-sections II and III.

The injections were executed in accordance with the so-called back-step method in three series a to c. In the process, the gap between the application points for the drill holes was gradually reduced from 4 m (series a) to 1 m (series c) (Figs. 11 and 12). The maximum effective grouting pressure was selected at 5 bar. In Fig. 11 the quantities grouted into the rock in cross-section I for the two grouting sections for each drill hole are shown in litres per metre of hole length (l/m). It can be seen that the greatest amounts were injected via the drill holes of series a and in the Bochsinger Horizon. Furthermore it is evident that the grouted quantities decrease from the drill holes of series a to series c.



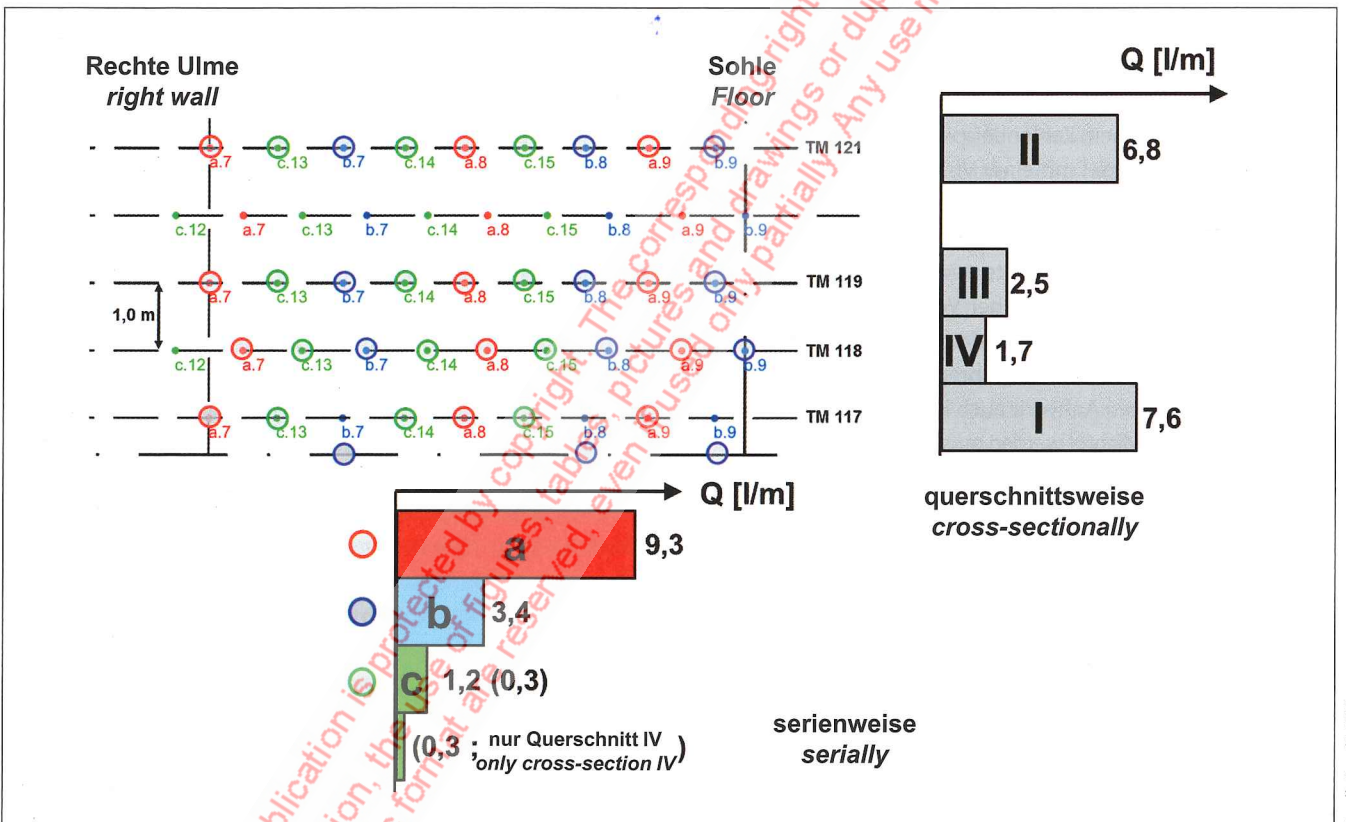
Quelle/credit: WBI

11 Injektionsversuch Tunnel nach Feuerbach, Ergebnis Querschnitt I  
Injection test for tunnel to Feuerbach, result for cross-section I



Quelle/credit: WBI

12 Abwicklung Innenkontur Spritzbeton mit Bohransatzpunkten  
Processing inner contour shotcrete with drill application points



Quelle/credit: WBI

13 Injektionsversuch Tunnel nach Feuerbach, Aufnahmemengen  
Injection test for tunnel to Feuerbach, intake quantities

4.3 Injektionsversuch Feuerbach

Vor Beginn der Verpressarbeiten im Tunnel Feuerbach wurde im Bereich der Linse 3 des Tunnels ein Injektionsversuch durchgeführt (siehe Bild 2). Der Versuch diente der Erprobung der Verpresstechnik, der Ermittlung der erforderlichen Abstände und Tiefen der Bohrungen sowie der Festlegung der erforderlichen Verpressdrücke und Mengen.

Der Tunnel liegt im Bereich des Versuchsfeldes in den Dunkelroten Mergeln. In Höhe der Firne steht ausgelaugter Gipskeuper an (Y-Y in Bild 11). Unterhalb der Sohle liegt der stärker durchlässige

Fig. 13 displays the average intake quantities shown individually for cross-sections I to IV. It can be seen that the amounts decrease from cross-sections I and II, which were grouted first, by way of cross-section III in between to cross-section IV, the last to be grouted. It can be discerned as well from the presentation of the average grouted quantities from each series also shown in Fig. 13 that the amounts accepted by the rock substantially decrease from series a to series c as well. The intake quantities accepted by series c in cross-section IV, which was grouted last, are the smallest. Thus the chosen procedure in keeping with the back-step method was a success.

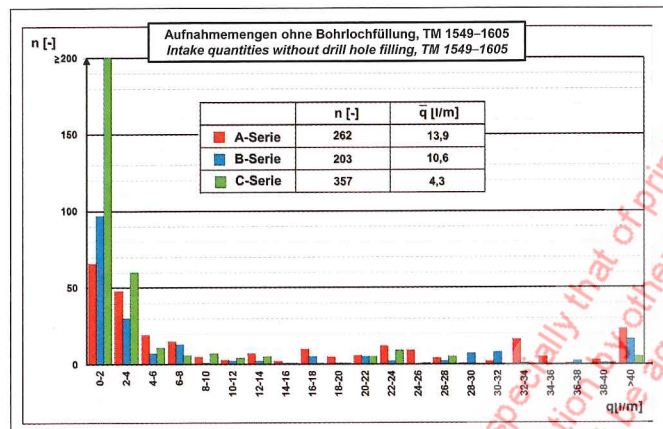
Bochinger Horizont. Vorgesehen ist hier, den Fels seitlich und unterhalb des Tunnels abzudichten. Das Versuchsfeld erstreckt sich auf den halben zu verpressenden Bereich, rechts der Tunnelachse (Bild 11) und auf vier Querschnitte mit insgesamt 37 Bohrungen, mit einem Abstand der Ansatzpunkte innerhalb eines Ringes von 1 m (Bild 11 und 12). Die Längen der Bohrungen betragen 6–10 m, die Bohrl Lochdurchmesser 51 mm. Die Abstände der vier Querschnitte, die in der Reihenfolge I bis IV verpresst wurden, betragen 1 m bzw. 2 m zwischen den Querschnitten II und III.

Die Injektionen wurden nach dem sogenannten Pilgerschrittverfahren in den drei Serien a bis c durchgeführt. Dabei wurde der Abstand der Ansatzpunkte der Bohrungen von 4 m (a-Serie) schrittweise auf 1 m (c-Serie) verringert (Bild 11 und 12). Der maximale effektive Verpressdruck wurde zu 5 bar gewählt. In Bild 11 sind die im Querschnitt I in den Fels verpressten Mengen getrennt für die beiden Verpressabschnitte jedes Bohrlochs in Litern je Meter Bohrlochlänge (l/m) dargestellt. Man erkennt, dass die größten Mengen über die Bohrlöcher der a-Serie und in den Bochinger Horizont verpresst wurden. Außerdem wird deutlich, dass die verpressten Mengen von den Bohrlochern der a-Serie bis zur c-Serie abnehmen.

In Bild 13 wurden die mittleren Aufnahmemengen getrennt für die Querschnitte I bis IV dargestellt. Man erkennt, dass die Mengen von den zuerst verpressten Querschnitten I und II über den dazwischenliegenden Querschnitt III zu dem als letztes verpressten Querschnitt IV abnehmen. Aus der ebenfalls in Bild 13 enthaltenen Darstellung der mittleren Verpressmengen jeder Serie erkennt man, dass die vom Fels aufgenommenen Mengen von der Serie a bis zur Serie c ebenfalls deutlich geringer werden. Am geringsten sind die Aufnahmemengen für die Serie c in dem zuletzt verpressten Querschnitt IV. Somit war die gewählte Vorgehensweise nach dem Pilgerschrittverfahren erfolgreich.

#### 4.4 Injektionen Bad Cannstatt

Zur Zeit laufen die „Injektionen Anhydrit“ in dem bereits aufgeführten Vortrieb 3B der Tunnel nach Bad Cannstatt. Die Acrylatgelinjektionen erfolgen hier in gleicher Weise, wie für den Tunnel nach Feuerbach beschrieben. Beispielhaft sind in Bild 14 die für den Abschnitt von Tunnelmeter 1549 bis 1605 über die a-, b- und c-Serie verpressten Mengen in Form eines Histogramms dargestellt. Man erkennt auch hier eine deutliche Abnahme der verpressten Menge von Serie zu Serie. Allerdings sind die vom Fels aufgenommene Mengen hier größer als im Versuchsfeld des Tunnels nach Feuerbach.



14 Injektionen Anhydrit, Tunnel nach Bad Cannstatt, Vortrieb 3B, TM 1549–1605, Aufnahmemengen  
Injected anhydrite, tunnel to Bad Cannstatt, drive 3B, TM 1549–1605, intake quantities

#### 4.4 Injektionen Bad Cannstatt

Currently the “Injecting Anhydrite” process is ongoing in excavation 3B for the tunnels to Bad Cannstatt, which has already been driven. The acrylate gel injections were carried out here in the same manner as described for the tunnel leading to Feuerbach. As an example, in Fig. 14 the quantities grouted in the section tunnel metre 1549 to 1605 for series a, b and c are shown in the form of a histogram. Here too, it is evident that the grouted amount clearly decreases from series to series. However, here the

quantity accommodated by the rock is greater than in the test field for the tunnel to Feuerbach.

#### Literatur/References

- [1] 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.
- [2] Wittke, W.: Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.
- [3] Frenzl, R.: BAB 81 Engelbergstunnel. Bautechnische Instandsetzung und Erdtütigung. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.
- [4] Wittke, W.; Wittke, M.; Osthoff, G.; Lienhart, C.: Stuttgart 21 – Mehr als 15 km Tunnel im Anhydrit. Besondere Maßnahmen zur Beherrschung der Quellproblematik und Erfahrungen aus der Umsetzung. Veröffentlichung anlässlich der STUVA-Tagung 2017 in Stuttgart vom 06. bis 08.12.2017, Köln, 2017.
- [5] Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. WBI-PRINT 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2003.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Reinhardt, A.; Schmitt, D.: Ergebnisse eines Feldversuches zur Abdichtung gering durchlässigen Felses mit Acrylatgel. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.
- [9] Wittke, W.; Wittke, M.; Tintelnot, G.: Kunstharzinjektionen zur Abdichtung beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge. Taschenbuch für den Tunnelbau 2014, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2013.