

## Fildertunnel und Tunnel nach Ober- und Untertürkheim

Der Fildertunnel (Planfeststellungsabschnitt/PFA 1.2) und die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim (PFA 1.6a) des Bahnprojekts Stuttgart-Ulm werden im Auftrag der DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH durch die Arbeitsgemeinschaft ATCOST21 gebaut. Die zwei Röhren des Fildertunnels werden den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof mit der Filderebene südlich von Stuttgart verbinden. Die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim stellen die Verbindung vom Hauptbahnhof zur bestehenden Strecke im Neckartal und zum neuen Abstellbahnhof in Untertürkheim her (Bild 1). Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über den Stand der Arbeiten sowie einen Ausblick auf die folgenden Baumaßnahmen.

## Filder Tunnel and Tunnels to Ober- and Untertürkheim

The Filder Tunnel (Plan Approval Section/PFA 1.2) and the tunnels running to Ober-/Untertürkheim (PFA 1.6a) for the Stuttgart-Ulm rail project are being built by the ATCOST21 JV on behalf of the DB Stuttgart-Ulm GmbH. The Filder Tunnel's two tubes will link Stuttgart's new Central Station with the Filder Plain to the south of Stuttgart. The tunnels leading to Ober-/Untertürkheim connect the Central Station with the existing rail line in the Neckar Valley and the new railway yard at Untertürkheim (Fig. 1). This article provides an overview of the status of the works as well as a preview of forthcoming construction measures.

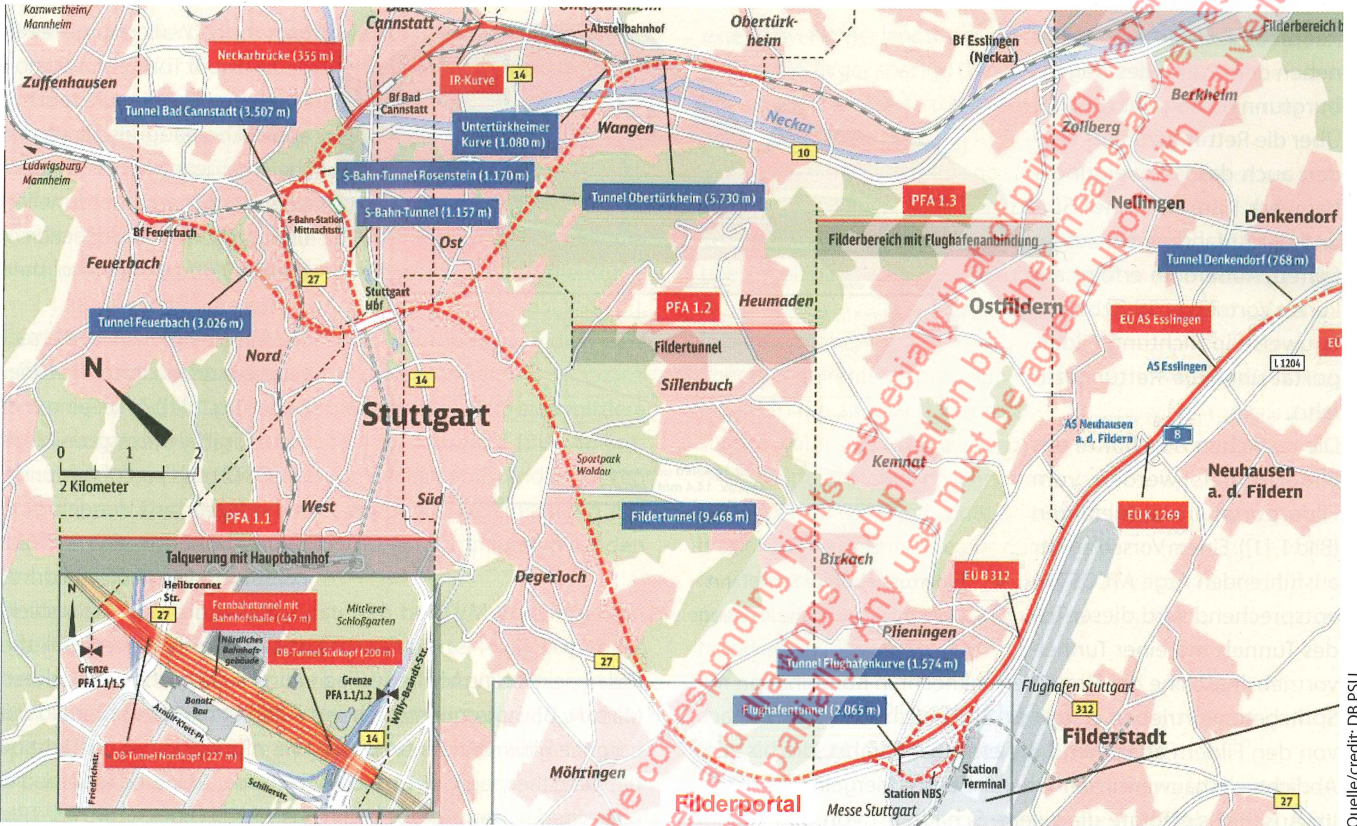
**Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Martin Wittke**, Geschäftsführer/managing directors, WBI GmbH, Weinheim, Deutschland/Germany  
**Dipl.-Ing. Günter Osthoff**, Projektleiter Technik/technical project manager PFA 1.2 Fildertunnel & PFA 1.6 Zuführung Ober-/Untertürkheim, Bahnprojekt Stuttgart-Ulm/ Stuttgart-Ulm Railway Project, Stuttgart; Germany

### 1 Projekt

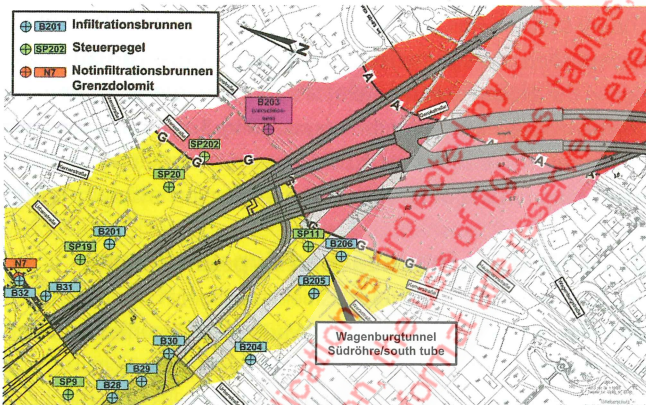
Mit einer Länge von ca. 9,5 km ist der Fildertunnel der längste Tunnel des Projekts Stuttgart-Ulm. Ausgehend vom Hauptbahnhof überwindet der Tunnel mit einer mittleren Steigung von 16 % vom Talkessel bis zum Flughafen einen Höhenunterschied von ca. 155 m [1]. Mit Ausnahme des ca. 200 m langen Anfahrbereichs am Hauptbahnhof werden zwei eingleisige Röhren hergestellt, die ca. alle 500 m durch Querschläge miteinander verbunden werden. Im zweigleisigen Anfahrbereich wird der Fildertunnel bis zum Verzweigungsbauwerk, wo die Tunnelröhren nach Obertürkheim abzweigen, mit einer Geschwindigkeit von max. 100 km/h befahren werden. Vom Verzweigungsbauwerk bis ca. zur Mitte des Fildertunnels werden die kreisförmigen Tunnel für eine Entwurfsgeschwindigkeit von 160 km/h ausgelegt. Im oberen Teil des Tunnels beträgt die Entwurfsgeschwindigkeit 250 km/h [1]. Die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim werden für eine Geschwindigkeit von 160 km/h ausgelegt. Die westliche bzw. südliche Tunnelröhre unterquert im Anschluss an das Verzweigungsbauwerk die beiden Röhren des Fildertunnels in einem schleifenden Schnitt (**Bild 2**). Im Anschluss verlaufen die Röhren in östlicher

### 1 Projekt

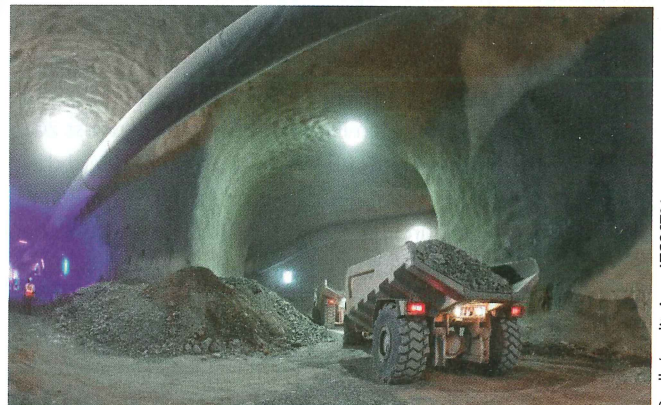
The roughly 9.5 km long Filder Tunnel is the longest tunnel of the Stuttgart-Ulm project. Running from the Central Station, the tunnel with an average gradient of 16‰ overcomes a difference in height of approx. 155 m from the valley basin to the airport [1]. With the exception of the roughly 200 m long approach area at the Central Station, two single-track tubes are being constructed, which are connected by cross-passages at roughly 500 m intervals. In the two-track approach area, the Filder Tunnel will feature trains running at a maximum speed of 100 km/h up to the branch structure, where the tunnel tubes to Obertürkheim branch-off. From the branch structure until roughly the middle of the Filder Tunnel, the circular tunnels are designed for a speed of 160 km/h. The design speed in the upper section of the tunnel amounts to 250 km/h [1]. The tunnels leading to Ober-/Untertürkheim are designed for a speed of 160 km/h. After the branch structure, the western/southern tunnel tube passes beneath the two Filder Tunnel tubes at an acute angle (**Fig. 2**). Then the tubes run eastwards beneath the Gablenberg district towards the Neckar Valley. Directly at the western bank of the Neckar the tunnels branch off in two tubes



1 Fildertunnel und Tunnel nach Ober- und Untertürkheim, Lageplan  
 Filder Tunnel and the tunnels leading to Ober-/Untertürkheim, layout



2 Lageplan Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd  
 Layout of the Central Station South access area



3 Wendekaverne  
 Turning cavern

Richtung unter dem Gablenberg bis ins Neckartal. Unmittelbar am westlichen Neckarufer verzweigen sich die Tunnel in zwei Röhren in Richtung Obertürkheim und zwei Röhren in Richtung Untertürkheim (Bild 1).

Insgesamt sind für den Fildertunnel ca.  $2 \times 9,5 \text{ km} = 19 \text{ km}$  Tunnel aufzufahren. Die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim haben eine Gesamtlänge von ca.  $2 \times 6,10 \text{ km} + 2 \times 0,725 \text{ km} = 13,65 \text{ km}$ . Die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim werden in Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Der Vortrieb erfolgt im Wesentlichen über den Schacht am Zwischenangriff Ulmer Str. in Stuttgart-Wangen [2]. Teile des Vortriebs erfolgten über die Rettungszufahrt am

towards Obertürkheim and two tubes in the direction of Untertürkheim (Fig. 1).

Altogether, some  $2 \times 9.5 \text{ km} = 19 \text{ km}$  of tunnel must be driven to build the Filder Tunnel. The tunnels towards Ober-/Untertürkheim possess a total length of roughly  $2 \times 6.10 \text{ km} + 2 \times 0.725 \text{ km} = 13.65 \text{ km}$ .

The tunnels leading to Ober-/Untertürkheim are driven by the conventional tunnelling method (CTM). Tunnelling is largely carried out via the shaft at the Ulmer Str. intermediate point of attack in Stuttgart-Wangen [2]. Parts of the excavation were undertaken via the emergency access at the Central Station, which starts immediately

Quelle/credit: DB PSU

Quelle/credit: Arge ATCOSTZ1

Hauptbahnhof, die unmittelbar neben dem Portal des Wagenburgtunnels beginnt (Bild 2). Über die Rettungszufahrt werden auch das Verzweigungsbauwerk Hauptbahnhof Süd und der Anfahrbereich aufgeföhren. Außerdem erfolgt ein kurzer Vortrieb in Spritzbetonbauweise in Richtung Filderportal über die Rettungszufahrt.

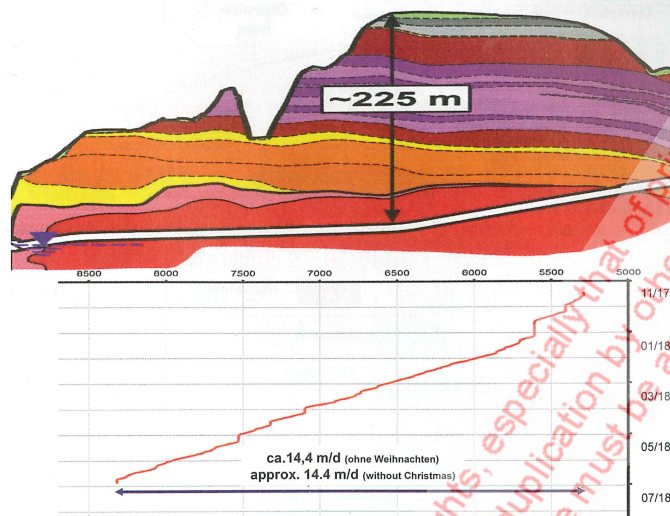
Die restlichen Abschnitte des Fildertunnels werden vom Filderportal aus aufgeföhren (Bild 1, [1]). Einem Vorschlag der ausföhrenden Arge ATCOST21 entsprechend wird dieser Teil des Tunnels mit einer Tunnel-

vortriebsmaschine der Firma Herrenknecht in Kombination mit Spritzbetonvortrieben erstellt [1, 3]. Zunächst erfolgte danach von den Fildern ausgehend die erste Schildfahrt, die bis zum Abdichtungsbauwerk in den Oberen Bunten Mergeln reicht [1, 3]. Im Anschluss erfolgte die zweite Schildfahrt von den Fildern aus. Zeitgleich wurde der mittlere Fildertunnel zwischen den Abdichtungsbauwerken in den Oberen Bunten Mergeln und im unausgelaugten Gipskeuper in Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Die Tunnelvortriebsmaschine wurde nach Beendigung der zweiten Schildfahrt durch den konventionell hergestellten mittleren Fildertunnel durchgeschoben. Danach erfolgte die dritte Schildfahrt im unteren Fildertunnel, die im August 2018 abgeschlossen wurde. Die Tunnelvortriebsmaschine wird dann durch den konventionell hergestellten Tunnelabschnitt im Bereich des Hauptbahnhofs durchgeschoben und in einer bauzeitlichen Wendekaverne schrittweise gedreht (Bild 3, [3]). Abschließend erfolgt im Herbst die vierte Schildfahrt im unausgelaugten Gipskeuper zwischen den Abdichtungsbauwerken in aufsteigender Richtung.

## 2 TVM-Vortrieb im unausgelaugten Gipskeuper

Im unteren Fildertunnel erfolgen die TVM-Vortriebe (dritte und vierte Schildfahrt) im anhydritföhrenden, unausgelaugten Gipskeuper. Der Ausbruchsdurchmesser betröhgt 10,83 m. Es werden links- und rechtskonische Ringe mit einer 6+1 Teilung eingesetzt. Die maschinell aufgeföhrenen Tunnelabschnitte liegen zwischen Abdichtungsbauwerken, die die trockenen Bereiche des Tunnels gegen wasserföhrende Abschnitte abdichten.

Im Regelfall kann somit davon ausgegangen werden, dass das Gebirge im Bereich der dritten und vierten Schildfahrt trocken ist. Eine Beanspruchung der Tübbingauskleidung infolge Quellen ist unter diesen Voraussetzungen nicht zu erwarten. Die Bemessung der Tübbingröhre erfolgt daher im Regellastfall nur für einen Mindestquelldruck von  $0,5 \text{ MN/m}^2$ . Eine Bemessung für höhere



4 Fildertunnel, dritte Schildfahrt  
Filder Tunnel, third shield passage

next to the Wagenburg Tunnel portal (Fig. 2). The Central Station South branch structure and the approach area are also driven via the emergency access. In addition, a short section tunnelled using the CTM in the direction of the Filder portal is accomplished via the emergency access.

The remaining Filder Tunnel sections are driven from the Filder portal (Fig. 1, [1]). In keeping with a proposal by the responsible JV ATCOST21 this part of the tunnel is produced by a Herrenknecht tunnel boring machine (TBM) combined with shotcrete drives [1, 3]. First of all, the initial shield passage took place from the

Fildern, extending to the sealing structure in the Upper Coloured Marls [1, 3]. Subsequently the second shield drive was carried out from the Fildern. At the same time, the middle Filder Tunnel section between the sealing structures in the Upper Coloured Marls and in unleached gypsum keuper was constructed by the CTM. The TBM was pushed through the central Filder Tunnel section completed by conventional means following the second shield passage. Subsequently, the third shield drive was undertaken in the lower Filder Tunnel section. This was completed in August 2018. The TBM is now pushed through the conventionally constructed tunnel section in the proximity of the Central Station and turned around in a chamber specially built for this purpose (Fig. 3, [3]). This is followed by the fourth shield passage in unleached gypsum keuper between the sealing structures rising upwards, beginning in autumn 2018.

## 2 TBM Drive in unleached Gypsum Keuper

The TBM drives (third and fourth shield passage) in the lower Filder Tunnel section are carried out in anhydrite-bearing, unleached gypsum keuper. The excavated diameter amounts to 10.83 m. Left and right conical rings with 6+1 distribution are installed. The mechanically driven tunnel sections are located between the sealing structures, which separate the dry tunnel sections from water-bearing strata.

Thus, normally it can be assumed that the rock in the vicinity of the third and fourth shield drives is dry. As a result, it is unlikely that the segmental lining will be affected by swelling. Consequently, dimensioning of the segmental lining is carried out for a minimum swelling pressure of only  $0.5 \text{ MN/m}^2$  for a standard load case. Dimensioning for higher swelling pressures, which could occur in the event of unexpected inflow of water, is carried out for reduced safety factors for load case 3. A 60 cm thick segmental lining is applied.

As shown e.g. in [6], the unleached gypsum keuper in the southwest part of Germany is normally horizontally bedded and vertically jointed. Whereas the bedding planes are often closely-spaced and

Quelldrücke, die bei unerwarteten Wasserzutritten auftreten könnten, wird für reduzierte Sicherheiten des Lastfalls 3 durchgeführt. Für diese Beanspruchung ist eine 60 cm dicke Tübbingsschale als endgültiger Ausbau ausreichend.

Wie z. B. in [6] ausgeführt, ist der unausgelaugte Gipskeuper im südwestdeutschen Raum in der Regel horizontal geschichtet und vertikal geklüftet. Während die Schichtfugen häufig engständig sind und eine große Erstreckung aufweisen, setzen die Klüfte meist an den Schichtfugen ab und haben größere Abstände [7]. Eine Ortsbruststützung ist hier nicht erforderlich, so dass eine offene Vortriebsmaschine eingesetzt werden kann.

In der dritten Schildfahrt wurde bis Ende Juni 2018 eine mittlere Vortriebsgeschwindigkeit von 14,4 m/d erreicht (**Bild 4**). Entsprechend den Erwartungen wurde der Fels vollständig trocken aufgeföhrt. Dessen ungeachtet wurden in regelmäßigen Abständen Felsproben aus der Ortsbrust entnommen und auf den Anhydritgehalt untersucht.

Besondere Anforderungen bestehen bei TVM-Vortrieben im quellfähigen Gebirge für den Ringspaltmörtel [4, 5]. Die Abgabe von Überschusswasser ist nach Möglichkeit zu vermeiden bzw. zumindest zu begrenzen. Vor diesem Hintergrund wird ein speziell für den Einsatz im anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper entwickelter Ringspaltmörtel auf Phosphatbasis eingesetzt. Dieser Mörtel weist nur eine sehr geringe Wasserabgabe auf. Zudem wird durch das Phosphat das Quellen von Anhydrit inhibiert. Informationen über diesen Sachverhalt finden sich z. B. in [4] und [5].

### 3 Tunnel nach Obertürkheim, konventionelle Vortriebe im Anhydrit

Die beiden eingleisigen Röhren der Tunnel nach Ober-/Untertürkheim werden, wie erwähnt, in Spritzbetonbauweise aufgeföhrt (**Bild 5**). Der überwiegende Teil der Tunnel wird bzw. wurde vom westlich des Neckars gelegenen Zwischenangriff an der Ulmer Str. in Stuttgart-Wangen aufgeföhrt. In Richtung Hauptbahnhof liegen die Tunnel von hier aus vollständig in den Schichten des unausgelaugten Gipskeupers, der sowohl gipsführend

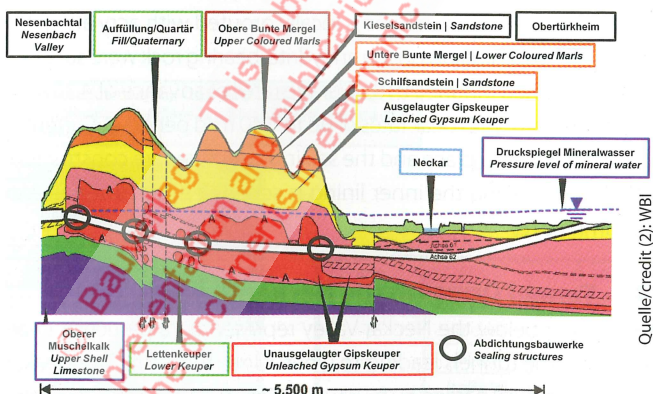
extend over larger lengths, the joints usually end at bedding planes and have a larger spacing [7]. No support is required for the working face in this case so that it is possible to apply an open tunnel boring machine.

During the third shield passage an average rate of advance amounting to 14.4 m/d was achieved up to the end of June 2018 (**Fig. 4**). The rock remained completely dry during the excavation as had been anticipated. Nonetheless, rock samples were taken from the working face at regular intervals and tested to determine their anhydrite content.

Special requirements prevail for TBM drives in swelling rock with regard to the annular gap mortar [4, 5]. If possible, the release of surplus water should be avoided or at least restricted. Against this background, an annular gap mortar on a phosphate basis specially developed for use in anhydrite-bearing, unleached gypsum keuper is applied. This mortar releases only a very slight amount of water. In addition, the anhydrite's tendency to swell is inhibited by the presence of the phosphates. Details relating to this issue can be found e.g. in [4] and [5].

### 3 Tunnel to Obertürkheim, conventional Drives in Anhydrite

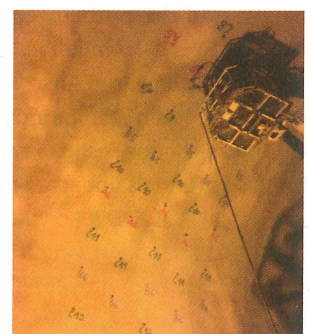
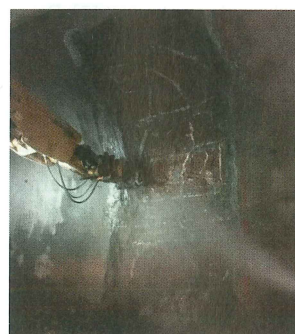
The two single-track tubes of the tunnels leading to Ober-/Untertürkheim are driven, as mentioned, by the CTM (**Fig. 5**). The major portion of the tunnels is or has been driven from the Ulmer Str. intermediate point of attack in Stuttgart-Wangen lying to the west of the River Neckar. Towards the Central Station from this point the tunnels are located completely in layers of unleached gypsum keuper, which can be both gypsum-bearing (pink shading in Fig. 5) as well as anhydrite-bearing (red shading in Fig. 5). It was anticipated on the basis of the results of the explorations obtained during preliminary studies that two major anhydrite lenses have to be penetrated and that the water-bearing leaching front (transition between the pink and yellow shading in Fig. 5) in the section between the Neckar and the Central Station is located substantially above the tunnel tubes. This expectation was mostly confirmed as driving operations continued. However, local water inflow occurred in certain tunnel sections,



Quelle/credit (2): WBI

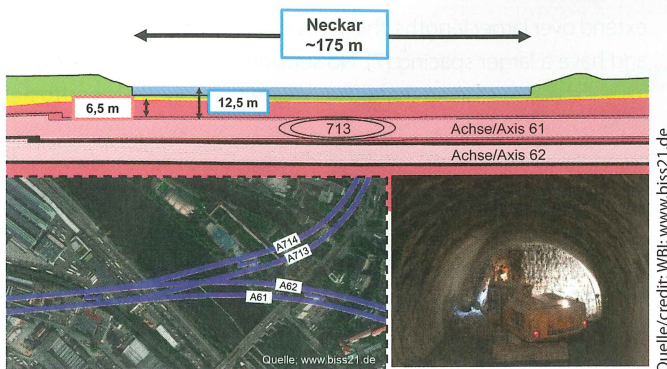
### 5 Tunnel nach Ober- und Untertürkheim, Längsschnitt

Tunnels leading to Ober-/Untertürkheim, longitudinal section



### 6 Abdichtungsbauelement; links: Fräsen eines Dammrings, rechts: Bohrungen für Acrylatgelinjektionen

Sealing structures; on the left: cutting of rock for shotcrete ring installation, on the right: drill holes for acrylate gel injections



7 Untertunnelung des Neckars mit vier eingleisigen Tunnelröhren  
Undertunnelling the Neckar with four single-track tubes

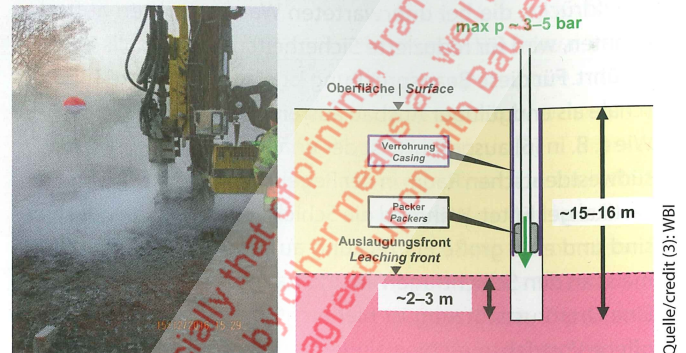
(rosa Schraffur in Bild 5) als auch anhydritführend (rote Schraffur in Bild 5) sein kann. Nach den Ergebnissen der Vorerkundungen wurde erwartet, dass zwei größere Anhydritlinsen durchfahren werden müssen und dass die wasserführende Auslaugungsfront (Übergang zwischen der rosafarbenen zur gelben Schraffur in Bild 5) im Abschnitt zwischen dem Neckar und dem Hauptbahnhof deutlich oberhalb der Tunnelröhren zu liegen kommt.

Diese Erwartung hat sich im Zuge der Vortriebsarbeiten grundsätzlich bestätigt. Allerdings ist es örtlich über die Bleiglanzbank und den Bochinger Horizont zu Wasserzutritten gekommen.

Im Einflussbereich des anhydritführenden Gipskeupers sowie in Bereichen, in denen Wasserzutritte über die Lebensdauer des Bauwerks nicht ausgeschlossen werden können, werden die Tunnel mit einer 1 m dicken Innenschale aus Stahlbeton ausgekleidet, die einen vergleichsweise hohen Bewehrungsgehalt besitzt (siehe auch [8]). In Bereichen, in denen beim Vortrieb trockene Verhältnisse angetroffen wurden und in denen – unter anderem auf der Grundlage der Erkundungen aus der Vorprojektphase sowie der Ergebnisse der dem Vortrieb nachlaufenden Erkundungen – auch über die Lebensdauer des Bauwerks nicht mit nennenswerten Wasserzutritten zu rechnen ist, erfolgt die Auskleidung mit einer nur 60 cm dicken Innenschale aus Stahlbeton. Zwischen der Innen- und der Außenschale wird eine KDB vorgesehen.

Die „nassen“ und die trockenen Bereiche werden über sogenannte Abdichtungsbauwerke voneinander getrennt [9]. Dazu werden zwei ca. 5 m lange und 1 m tiefe Schlitze in den Fels gefräst (Bild 6), die im Anschluss mit Stahlfaserspritzbeton ausgespritzt werden (Dammringe). Nachdem die Spritzbetonschale eine ausreichende Festigkeit aufweist, wird der Fels in der Umgebung des Tunnels über ca. 4 m lange Bohrungen mit Acrylatgel verpresst [11, 12]. Die Acrylatgelinjektionen umfassen auch die Fuge zwischen dem Dammring und dem Fels. Der Spritzbeton selbst wird in einem zweiten Schritt mit einem niedrigviskosen Polyurethan verpresst. Zusätzlich wird der Fels auf der Wasserseite der Abdichtungsbauwerke örtlich über Injektionen mit Acrylatgel abgedichtet.

Die Vortriebsarbeiten im anhydritführenden Gebirge konnten im Juni 2018 erfolgreich abgeschlossen werden. Es wurden mittlere



8 Abdichtung der Auslaugungsfront  
Sealing the leaching front

where the Bochinger Horizon and the Bleiglanzbank layers were located in the close vicinity of the tunnels.

In the sphere of influence of the anhydrite-bearing gypsum keuper as well as in areas, in which water inflow cannot be outruled during the structure's service life, the tunnels will be lined with a 1 m thick inner lining of reinforced concrete, possessing a relatively high reinforcement content (please also see [8]). In areas, in which dry conditions were encountered during tunnelling and in which – also in view of investigations undertaken during the preliminary project stage as well as the results of explorations following from the tunnel construction – no water inflow has to be expected during the structure's life cycle, the lining of reinforced concrete will only be 60 cm thick. A plastic sealing membrane is intended to be installed between the inner lining and the shotcrete support throughout the considered tunnel section.

The "wet" and dry areas are separated from each other by means of so-called sealing structures [9]. For this purpose, two roughly 5 m long and 1 m deep slots are cut into the rock along the complete circumference of the tunnel (Fig. 6), which are subsequently sprayed with steel fibre shotcrete. Once the shotcrete ring possesses sufficient strength, the rock in the proximity of the tunnel is grouted with acrylate gel by means of approx. 4 m long drill holes [11, 12]. The acrylate gel injections also cover the joint between the shotcrete and the rock. The shotcrete for its part is grouted with a low-viscous polyurethane in a second step. Additionally, the rock on the water side of the sealing structures is locally grouted with acrylate gel. The tunnelling headings in the anhydrite-bearing rock were successfully concluded in June 2018. Average rates of advance of 4.30 m/d were achieved, with peak rates of up to 6.40 m/d per drive. Currently, grouting is taking place and the sealing structures are constructed. Work on installing the inner lining is scheduled to commence in autumn 2018.

#### 4 Tunnel Drives in the Neckar Valley

Tunnelling below the Neckar Valley represented a particular challenge for the tunnels leading to Ober-/Untertürkheim. The Neckar was successfully passed by four tubes (Fig. 7) following on from the Wangen branch structures, which are located directly below the west bank of the Neckar [13]. In the case of the elevated tubes of

Vortriebsleistungen von 4,30 m/d und Spitzenleistungen von bis zu 6,40 m/d je Vortrieb erzielt. Derzeit laufen die Injektionen, und es wird der Abdichtungsträger hergestellt. Mit den Arbeiten für den Einbau der Innenschalen soll im Herbst 2018 begonnen werden.

#### 4 Tunnelvortriebe im Neckartal

Eine besondere Herausforderung der Tunnel nach Ober-/Untertürkheim hat die Neckarunterfahrung dargestellt. Im Anschluss an die Verzweigungsbauwerke Wangen, die unmittelbar unterhalb des westlichen Neckarufers liegen [13], wurde der Neckar mit vier Röhren erfolgreich unterfahren (Bild 7). Bei den hochliegenden Röhren der Achsen 61 und 713 betrug die Felsüberdeckung nur 6,5 m. Der Abstand zwischen dem Neckarspiegel und der Tunnelfirste beträgt 12,5 m.

Um feststellen zu können, ob die Überdeckung aus gering durchlässigem Fels eine ausreichende Mächtigkeit hat, wurden im Zuge der Vortriebsarbeiten aus der Ortsbrust heraus vorausschiebende MWD-Bohrungen durchgeführt (MWD = Measurement While Drilling). Im Zuge der Bohrarbeiten wurden der Andruck, das Drehmoment, die Vorschubkraft, die Umdrehungsgeschwindigkeit und der Vorschub kontinuierlich aufgezeichnet. Aus diesen Messergebnissen wurde über empirische Formeln die Druckfestigkeit des Felses abgeleitet [14]. Außerdem wurden aus der Ortsbrust Proben genommen und auf ihren Wassergehalt untersucht. Durch diese Maßnahmen konnte gezeigt werden, dass der Felsriegel bei allen vier Tunnelröhren eine ausreichende Dicke hatte. Die letzte der insgesamt vier Neckarunterfahrungen wurde im Mai 2018 erfolgreich abgeschlossen.

Eine besondere Herausforderung hat sich jedoch im weiteren Verlauf der Vortriebsarbeiten in Richtung Obertürkheim ergeben. Hier tauchen die Röhren langsam auf, so dass die im Bereich des Neckartals stark wasserführende Auslaugungsfront zunächst unmittelbar oberhalb der Firste zu liegen kommt und schließlich im schleifenden Schnitt durchörtert wird (Bild 5). Diese Verhältnisse machten es erforderlich, dem Tunnelvortrieb vorausschiebende Abdichtungsinjektionen auszuführen.

Diese können grundsätzlich aus der Ortsbrust über vorausschiebende Bohrungen durchgeführt werden. Als Verpressmittel kam

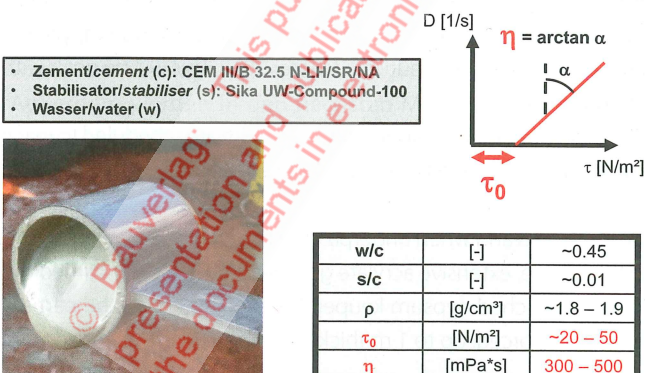
axes 61 and 713 the rock overburden amounted to only 6.5 m. The gap between the river level and the tunnel roof is 12.5 m.

In order to assure that the overburden of low permeable rock was sufficiently thick, advance MWD (Measurement While Drilling) holes were executed during tunnelling. During the course of these drilling activities, the contact pressure, the torque, the thrust force, the speed of rotation and the advance rate were continuously recorded. Based on these measurement results the compressive strength of the rock was derived by means of empirical formulas [14]. In addition, samples were taken from the working face and examined to determine their water content, which provides a suitable aid for an assessment of the strength and deformability of the rock mass. Thanks to these measures it could be shown that the rock layer was sufficiently thick in the case of all four tunnel tubes. The last of the total of four Neckar undertunnelling measures was completed successfully in May 2018.

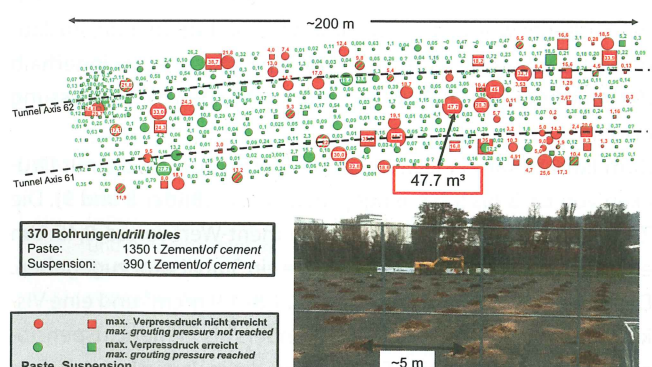
However, a special challenge emerged as tunnelling progressed in the direction of Obertürkheim. The tubes gradually start to emerge so that the pronouncedly water-bearing leaching front in the proximity of the Neckar Valley initially finds itself situated above the roof and ultimately has to be intersected by an acute angle (Fig. 5). These conditions necessitated advance sealing injections to be undertaken for the tunnel drive.

These can essentially be carried out from the working face via advance drilling. In such cases, generally speaking polyurethane can be applied for grouting purposes. However, at a football ground and tennis facility, it was possible to execute the injections from the surface [15]. This meant that the time-consuming sealing injections could be undertaken in advance independent of the driving operations, something which resulted in considerable advantages with regard to the overall construction time.

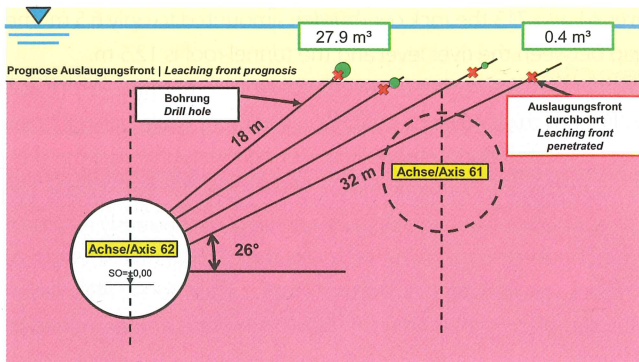
Sealing the leaching front from the ground surface was executed by means of some 15 to 16 m deep drill holes, which were sunk through the quaternary and the leached gypsum keuper into the unleached gypsum keuper (Fig. 8). Once the final depth was reached, the casing was placed roughly 1 m above the leaching front, and a simple packer was installed within the casing. Subsequently, grouting was accomplished via head packers.



9 Zementpaste  
Cement paste



10 Injektionen von der Geländeoberfläche  
Injections from the ground surface



11 Abdichtungen Auslaugungsfront oberhalb der Achse 61 über Bohrungen aus der Achse 62

Sealing the leaching front above axis 61 via drill holes from axis 62



12 Bohren und Injizieren mit Preventer

Drilling and injecting with preventer

in diesen Fällen in der Regel Polyurethan zur Anwendung. Im Bereich eines Fußballplatzes und einer Tennisanlage konnten die Injektionen dagegen von Obertage durchgeführt werden [15]. Das hat es ermöglicht, die zeitaufwändigen Abdichtungsinjektionen, unabhängig von den Vortriebsarbeiten, vorausseilend durchzuführen, was im Hinblick auf die Gesamtbauzeit deutliche Vorteile mit sich brachte.

Die Abdichtung der Auslaugungsfront von der Geländeoberfläche erfolgte über rund 15 bis 16 m tiefe Bohrungen, die durch das Quartär und den ausgelaugten Gipskeuper bis in den unausgelaugten Gipskeuper abgeteufelt wurden (Bild 8). Nach Erreichen der Endteufe wurde die Verrohrung bis ca. 1 m über die Auslaugungsfront gezogen, und es wurde ein Einfachpacker innerhalb der Verrohrung des Bohrlochs gesetzt, über den die Verpressung erfolgte.

Zum Einsatz kam eine wasserarme Zementpaste, die mit Drücken von ca. 3 bis 5 bar eingepresst wurde (Bilder 8 und 9). Die Zementpaste besitzt einen Wasser-Zement-Wert von ca. 0,45. Um eine stabile Paste zu erzeugen, wurde ein Stabilisator zugegeben. Die Paste besitzt eine Dichte von ca. 1,8–1,9 g/cm<sup>3</sup> und eine Viskosität von ca. 300 bis 500 MPa\*s. Anders als Zementsuspensionen besitzt die Paste eine Fließgrenze, die in Versuchen mit dem Rotationsviskosimeter zu ca. 20 bis 50 N/m<sup>2</sup> ermittelt wurde. Versuche, die in der Vergangenheit im Zusammenhang mit

A cement paste with low water content, which was grouted at pressures of roughly 3 to 5 bar (Figs. 8 + 9), was applied. The cement paste possesses a water-cement value of approx. 0.45. In order to obtain a stable paste, a stabiliser was added. The paste has a density of roughly 1.8–1.9 g/cm<sup>3</sup> and a viscosity of approx. 300 to 500 MPa\*s. In contrast to cement suspensions, the paste possesses a yield strength, which was determined to be approx. 20 to 50 N/m<sup>2</sup> by means of tests with the rotary viscometer. Tests, which were carried out in the past in conjunction with grouting operations for the Hessigheim Lock, have revealed that a paste of this nature is also stable in flowing groundwater, even when grouted into larger cavities [16].

The injections from the surface were executed over a distance of approx. 200 m (Fig. 10). Drilling and grouting were first of all undertaken in a large grid amounting to approx. 20 x 20 m. The grid was densified to roughly 5 by 5 m as the work progressed. During the final phases, also cement suspensions were grouted in keeping with the results of the previous phases so that smaller cavities or gaps could be sealed as well. Altogether, around 1350 t of cement as paste and approx. 390 t of cement in the form of suspension were grouted in 370 drill holes.

The tunnel drives were able to subsequently pass through the area treated with injections from the ground surface without any further need for grouting. Consequently, these measures can be regarded as being successful.

In areas, which were inaccessible from the ground surface but where one of the tubes had been built somewhat in advance, the water-bearing leaching front was also sealed using cement paste or cement suspension from the neighbouring tube by means of holes drilled at an angle (Fig. 11). As in this case the holes had to be produced from below from the dry rock into the water-bearing leaching front, preventers were applied here (Fig. 12).

## 5 Outlook

Work in the Filder Tunnel and in the tunnels leading to Ober-/Untertürkheim is progressing successfully. The third shield passage in the lower portion of the Filder Tunnel was completed in August 2018 so that the TBM could then be turned around, prior to the fourth shield passage from the Central Station to the middle part of the Filder Tunnel being undertaken. In addition, the driving operations for the large cross-sections for the Central Station South approach area will commence in autumn/winter 2018. This will be dealt with in another article.

The tunnels leading to Ober-/Untertürkheim are scheduled to reach the portals on the east bank of the Neckar in 2019. Special challenges are anticipated here when the existing DB-railway line has to be undertunnelled and when underpassing the Bruckwiesenweg Bridge. Furthermore, extensive acrylate gel injections are to be carried out in the unleached gypsum keuper. The work to create the partially highly-reinforced, up to 1 m thick inner lining also lies ahead. ◻

Einpressarbeiten an der Schleuse Helligheim durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass eine solche Paste auch in fließendem Grundwasser stabil ist, selbst wenn sie in größere Hohlräume verpresst wird [16].


Die Injektionen von der Geländeoberfläche wurden über eine Länge von ca. 200 m ausgeführt (**Bild 10**). Die Bohrungen wurden zunächst in einem groben Raster von ca. 20 m x 20 m hergestellt und verpresst. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurde das Raster bis auf ca. 5 m x 5 m verdichtet. In den letzten Phasen wurden in Abhängigkeit von den Ergebnissen der vorherigen Phasen auch wasserreiche Zementsuspension verpresst, um kleinere Hohlräume bzw. Spalten ebenfalls abdichten zu können. Insgesamt wurden in 370 Bohrungen ca. 1350 t Zement als Paste und ca. 390 t Zement als Suspension verpresst.

Die Vortriebe beider Röhren konnten im Anschluss den durch die Injektionen von der Geländeoberfläche aus behandelten Bereich ohne weitere Injektionsmaßnahmen unterfahren. Die Maßnahme kann somit als erfolgreich angesehen werden.

In Bereichen, die keinen Zugang von der Geländeoberfläche aus boten, in denen aber eine der beiden Röhren mit einem gewissen Vorlauf hergestellt worden war, wurde die wasserführende Auslaugungsfront von der Nachbarröhre aus über Schrägbohrungen ebenfalls mit Zementpaste bzw. Zementsuspensionen abgedichtet (**Bild 11**). Da die Bohrungen in diesem Fall von unten aus dem trockenen Fels in die wasserführende Auslaugungsfront abgeteufelt werden mussten, wurden hier Preventer eingesetzt (**Bild 12**).

## 5 Ausblick

Die Arbeiten im Fildertunnel und in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim laufen erfolgreich. Die dritte Schildfahrt im unteren Fildertunnel wurde im August 2018 abgeschlossen, so dass im Anschluss der Wendevorgang der Tunnelvortriebsmaschine erfolgen konnte, damit die vierte Schildfahrt vom Hauptbahnhof bis zum mittleren Fildertunnel in Angriff genommen werden kann. Im Herbst/Winter 2018 werden außerdem die Vortriebsarbeiten für die Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd begonnen. Hierüber wird an anderer Stelle berichtet werden. Die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim werden voraussichtlich im Jahr 2019 die Portale auf der Ostseite des Neckars erreichen. Besondere Herausforderungen sind hier bei der Unterfahrung der DB-Bestandsstrecke und im Zuge der Unterfahrung der Bruckwiesenwegbrücke zu erwarten.

Außerdem werden in den nächsten Monaten umfangreiche Acrylatinjektionen im unausgelaugten Gipskeuper durchgeführt. Die Arbeiten zur Herstellung der zum Teil hochbewehrten, bis zu 1 m dicken Innenschalen stehen ebenfalls bevor. 

## Literatur/References

- [1] Breidenstein, M.; Wittke, M.: Großprojekt Stuttgart-Ulm: Der Fildertunnel – Erfahrungen und Ausblick mit der kombinierten Bauweise mittels Spritzbeton und Tunnelvortriebsmaschine. STUVA-Tagung 2015, Dortmund.
- [2] Wittke, M.; Druffel, R.; Hochgürtel, T.: Zugangsstollen Ulmer Straße, Beherrschung von Wasserzutritten im Bereich der Auslaugungsfront. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.
- [3] Osthoff, G.; Rath, A.: Bau einer Wendekaverne für die TBM des Fildertunnels. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim.
- [4] Bayer, L.; Berner, T.; Wittke, M.: Anwendung eines phosphatbasierten Ringspaltmörtels beim Bau des Fildertunnels im anhydritführenden Gebirge. Taschenbuch für den Tunnelbau 2019. In Vorbereitung. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin.
- [5] Bayer, L.; Berner, T.: Verwendung eines phosphathaltigen Mörtels im anhydritführenden Gebirge im Fildertunnel. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim.
- [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.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014.
- [8] Wittke, W.; Wittke-Gattermann, P.; Boettcher, A.: Bemessung und Bewehrung der Stahlbetoninnenschalen im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim.
- [9] Erichsen, C.: Entwurfskonzepte für die im anhydritführenden Gebirge liegenden Tunnel des Projekts. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.
- [10] 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.
- [11] Lienhart, C.; Schmitt, D.; Wittke, M.: Planung und Ausführung von Injektionen im anhydritführenden Gipskeuper. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim.
- [12] Wittke, M.; Strangfeld, W.: Stuttgart 21 – Injektionen zur Abdichtung von gering durchlässigem, anhydritführenden Fels. Forum Injektionstechnik, Bauwerke und Baugrund sicher abdichten, 10.11.2016.
- [13] Keuser, W.: Wirtschaftliche Methoden beim Auffahren eines Verzweigungsbauwerkes nach Unter- und Obertürkheim. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.
- [14] Wittke, W.; Druffel, R.; Erichsen, C.; Gattermann, J.; Kiehl, J.; Schmitt, D.; Tegelkamp, M.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe. WBI-Print 6. Verlag Glückauf, Essen, 2006.
- [15] Hamann, J.; Lechelmair, S.: Injektion einer Zementpaste zur Abdichtung und Verfestigung der Auslaugungsfront des Gipskeupers im Neckartal. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim.
- [16] Wittke, W.; Hermening, H.: Grouting of cavernous gypsum rock underneath the foundation of the weir, locks and powerhouse at helligheim on the river neckar. International Commission on Large Dams (ICOLD) 19th Congress, Florenz, Italien. Sonderdruck. 1997.