

# Requirements for Annular Gap Mortar for TBM Driven Tunnels With Single Segmental Lining

## Anforderungen an Ringspalzmörtel für einschalige Tübbingtunnel

*The complete backfilling of the annular gap between the excavation contour and the outer contour of the segmental ring with a suitable material is an essential element for supporting the rock mass, for ensuring the load-bearing capacity of the segmental ring and thus also the stability of the tunnel, as well as for avoiding water flow in longitudinal direction along the tunnel. In this article, essential aspects of annular gap grouting are explained on the basis of exemplary projects. For the selection of the material as well as the method of backfilling, the various influencing factors such as subsoil, TBM, segment lining, construction aspects, durability of the material as well as any special conditions must be considered in a realistic manner. Three-dimensional stability and seepage flow analyses are suitable for this purpose, if they take into account the areas of the temporary face, the shield and the segmental ring as well as the surrounding rock mass. Due to the complexity as well as the importance of this issue, investigations and selection of a suitable annular gap filling material should already be carried out in the planning phase.*

*Die vollständige Verfüllung des Ringspalts zwischen Ausbruchskontur und Außenkontur des Tübbingrings mit einem geeigneten Material ist ein wesentliches Element zur Stützung des Gebirges, zur Gewährleistung der Tragfähigkeit des Tübbingrings und damit auch der Standsicherheit des Tunnels sowie zur Vermeidung von Längsläufigkeiten entlang des Tunnels. Im vorliegenden Beitrag werden wesentliche Aspekte der Ringspaltverfüllung anhand von Projektbeispielen erläutert. Bei der Auswahl des Materials sowie der Art seiner Verfüllung müssen die verschiedenen Einflüsse wie Baugrund, TBM, Tübbingauskleidung, baubetriebliche Aspekte, Langlebigkeit des Materials sowie etwaige Besonderheiten wirklichkeitsnah erfasst werden. Hierfür eignen sich dreidimensionale Standsicherheitsnachweise und Sickerströmungsberechnungen, die den Bereich der Ortsbrust, des Vortriebsschildes und des Tübbingrings sowie des umgebenden Gebirges berücksichtigen müssen. Aufgrund der Komplexität sowie der Bedeutung dieser Fragestellung sollten Untersuchungen und Auswahl eines geeigneten Ringspaltverfüllmaterials bereits in der Planungsphase erfolgen.*

Dr.-Ing. BETTINA WITTKÉ-SCHMITT, Dr.-Ing. MARTIN WITTKÉ, Dr.-Ing. PATRICIA WITTKÉ-GATTERMANN, Prof. Dr.-Ing. WALTER WITTKÉ, Managing Directors/Geschäftsführer, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

### 1 Introduction

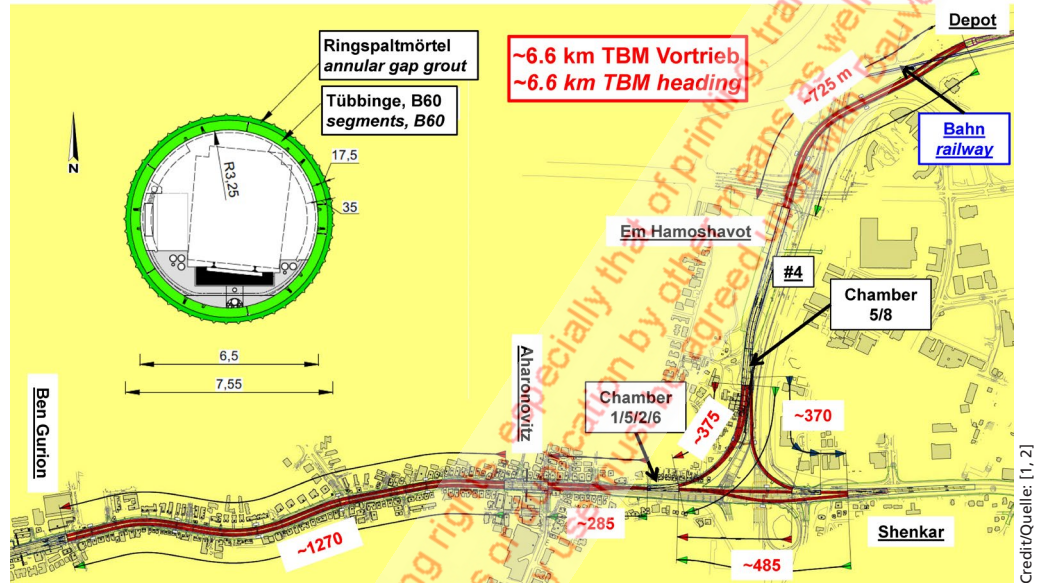
In TBM driven tunnels, the segmental lining is installed inside the shield. With the aid of the jacks, the finalized segmental ring is pressed against the already installed rings and held in place via vertical frictional forces. In this state, driving continues, the segmental ring leaves the shield, and an annular gap in the order of one to three decimeters is created between the excavation contour and the outer contour of the segmental ring. This annular gap must be backfilled with a suitable material to ensure an adequate support of the rock mass, the load-bearing capacity of the segmental ring without the aid of the jacks, and thus also the stability of the tunnel. The annular gap is usually filled with mortar via pilaster strips arranged in the shield tail. In some cases, pea gravel is used for annular gap filling. It is blown into the annular gap via radial drillings through the segments. The suitability of the available annular gap backfill materials depends on a number of criteria. First and fore-

### 1 Einleitung

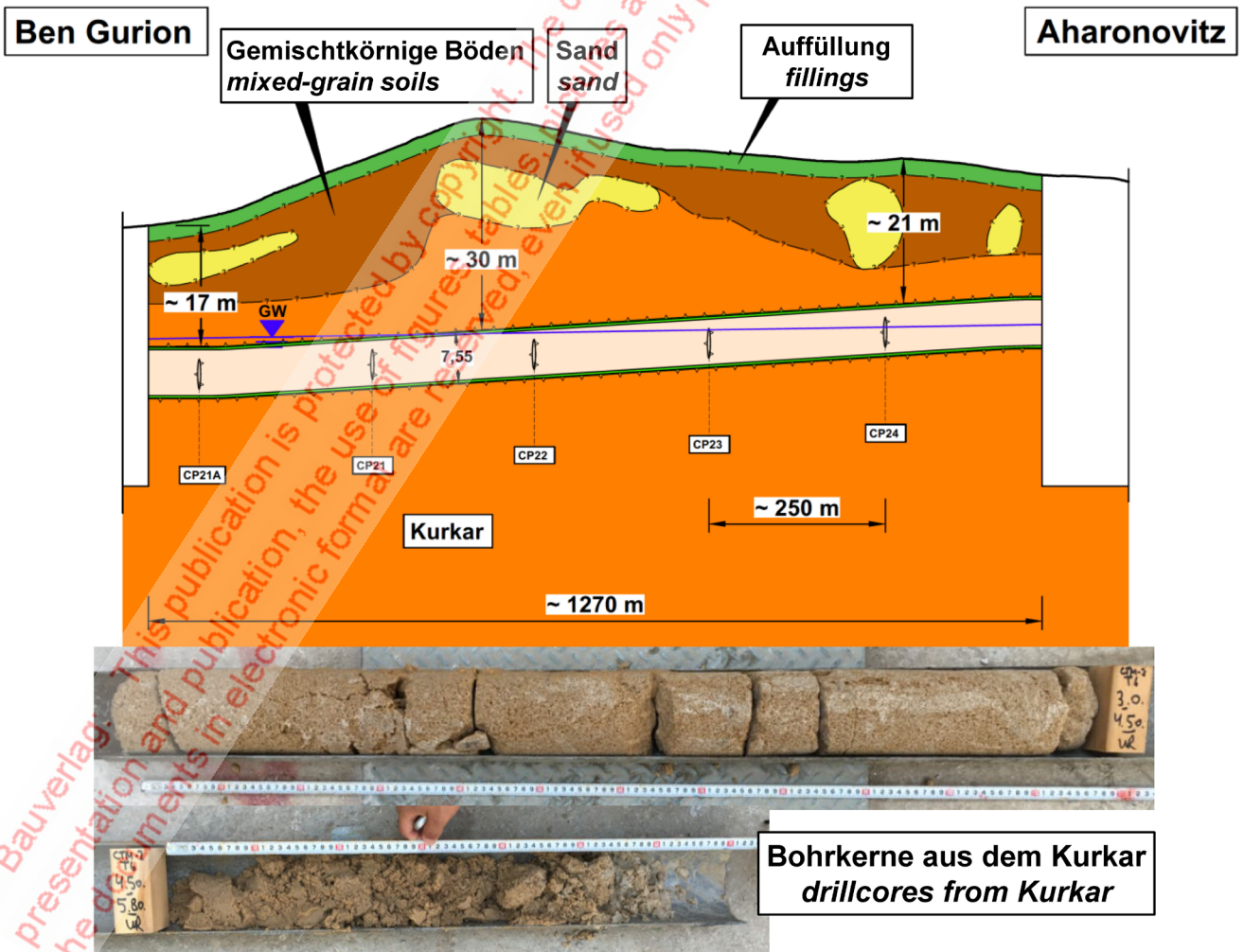
Die Tübbingauskleidung bei maschinell vorgetriebenen Tunneln wird innerhalb des Vortriebsschildes montiert. Mit den Vortriebspresen wird der fertige Tübbingring gegen die bereits eingebauten Ringe gepresst und über vertikale Reibungskräfte in der Schwebe gehalten. In diesem Zustand wird der Vortrieb fortgesetzt, der Tübbingring verlässt den Schild, und es entsteht zwischen der Ausbruchskontur und der Außenkontur des Tübbingrings ein Ringspalt in der Größenordnung von ein bis drei Dezimetern, der mit einem geeigneten Material verfüllt werden muss, um die Stützung des Gebirges, die Tragfähigkeit des Tübbingrings ohne die Einwirkung aus den Vortriebspresen und damit auch die Standsicherheit des Tunnels sicherzustellen.

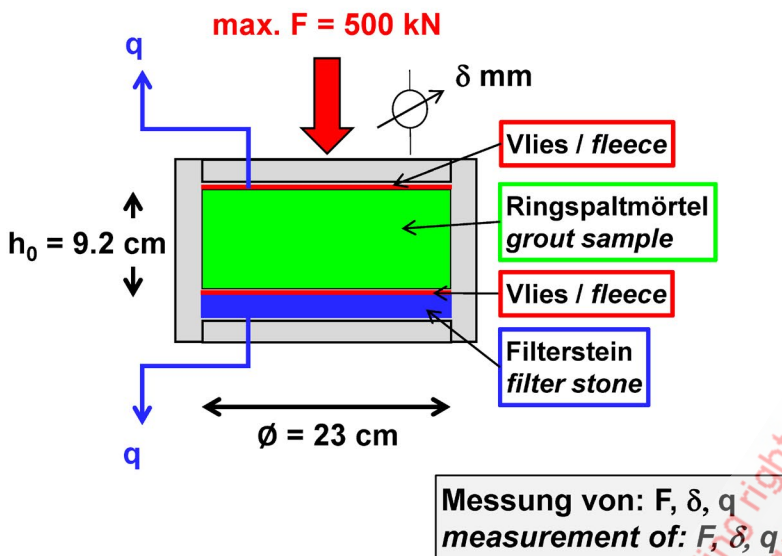
Die Ringspaltverfüllung erfolgt in der Regel mit Ringspalzmörteln über im Schildschwanz angeordnete Lisenen. In einzelnen Fällen wird auch Perlkies zur Ringspaltverfüllung verwendet. Dieser wird über radiale Bohrungen durch die Tübbinge verblasen.

- 1 Light Train Tel Aviv, Red Line Eastern Section: Plan view and cross-section  
 S-Bahn Tel Aviv, Red Line Eastern Section: Lageplan und Querschnitt



- 2 Kurkar along the section Aharonovitz–Ben Gurion  
 Kurkar im Abschnitt Aharonovitz–Ben Gurion





Credit/Quelle: [2]

- 3 Oedometer test for investigation of stress-strain behaviour of fresh annular gap grout  
 Untersuchung des Spannungsdehnungsverhaltens des frischen Ringspaltmörtels im großen Kompressionsgerät

most, the stability of the tunnel must be ensured at a short distance from the shield or at an early stage, respectively. In the stability verifications required for this purpose, the subsoil and groundwater conditions must be taken into account in addition to the segmental ring. In addition, a sufficiently low water permeability must be ensured in order to prevent possible water flow in longitudinal direction of the tunnel. Chemical attacks resulting from subsoil and groundwater must also be taken into account in order to ensure durability. In selected cases, the erodability of the mortar in the fresh state also plays a role.

In addition, construction-related criteria play a major role in the selection of a suitable annular gap backfill material. These include, for example, the preparation and transport of the backfill material, the type of backfilling and the cleaning of grout lines. In the following article, some examples from building practice are presented, from which conclusions and recommendations for further action can be drawn.

## 2 Tunnels for the Eastern Section of the Red Line in Tel Aviv, Driven in Soil

### 2.1 Project

The Red Line is part of the Light Rail network of Tel Aviv. It connects the community of Petah Tikva in E-W direction with the coast. WBI has prepared the detailed design for the eastern section of the Red Line on behalf of the joint venture of the Israeli company Danya Cebus and the Chinese construction company CCECC (Fig. 1 [1, 2]). The adjacent tubes, excavated with two earth pressure

Die Eignung der verfügbaren Ringspaltverfüllmaterialien hängt von einer Reihe von Kriterien ab. In erster Linie muss die Standsicherheit des Tunnels in einem geringen Abstand zum Vortriebsschild bzw. zu einem frühen Zeitpunkt sichergestellt werden. Bei den dazu erforderlichen Standsicherheitsnachweisen sind außer dem Tübbingring auch die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist eine ausreichend geringe Wasserdurchlässigkeit sicherzustellen, um evtl. Längsläufigkeiten zu unterbinden. Auch chemische Angriffe durch Baugrund und Grundwasser sind zu berücksichtigen, um die Langlebigkeit sicherzustellen. In Einzelfällen spielt auch die Erodierbarkeit des Mörtels im frischen Zustand eine Rolle.

Darüber hinaus spielen baubetriebliche Kriterien bei der Auswahl eines geeigneten Ringspaltverfüllmaterials eine große Rolle. Hierzu gehören beispielsweise die Aufbereitung und der Transport des Verfüllmaterials, die Art der Verfüllung und die Reinigung von Verpressleitungen.

Im folgenden Beitrag werden einige Beispiele aus der Baupraxis erläutert, aus denen sich Schlussfolgerungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen ergeben.

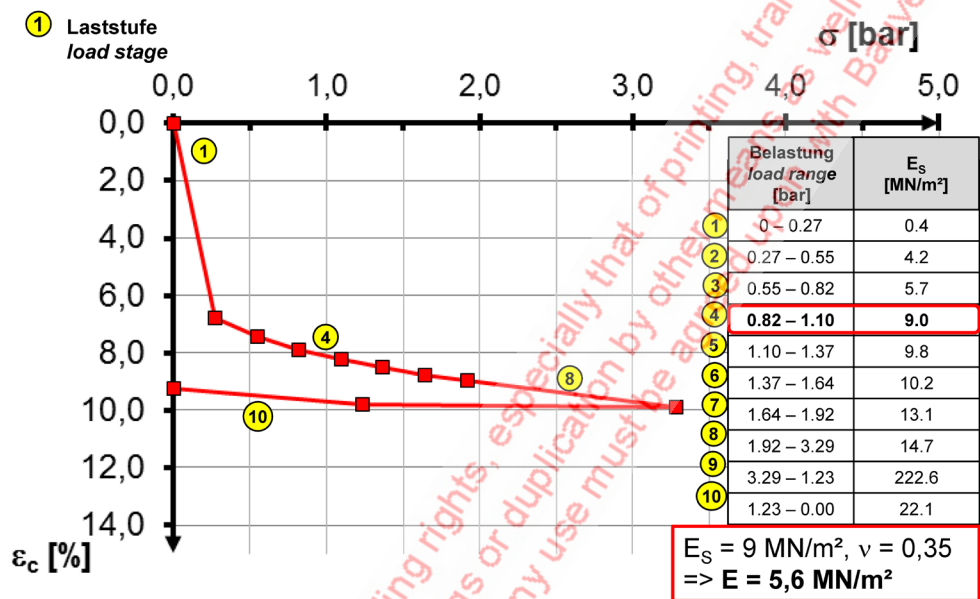
## 2 Im Lockergestein liegende Tunnel der Red Line Eastern Section in Tel Aviv

### 2.1 Projekt

Die Red Line ist Teil des Light Rail Netzes in Tel Aviv. Sie verbindet die Gemeinde Petah Tikva in E-W-Richtung mit der Küste. WBI hat im Auftrag des Joint Ventures aus der israelischen Firma Danya Cebus und dem Chinesischen Bauunternehmen CCECC die Ausführungsplanung für den östlichen Abschnitt der Red Line erstellt (Bild 1 [1, 2]). Die mit zwei Erddruckschilden



- 4 Oedometer test, load-compression-curve, sample 28, mix 2 (t = 0,5 h, T = 22,3 °C)
- Oedometer-Versuch, Drucksetzungskurve, Probe 28, Mischung 2 (t = 0,5 h, T = 22,3 °C)



Credit/Quelle: [2]

balanced shields, have an internal diameter of 6.5 m and are lined with 35 cm thick segments. The annular gap has a thickness of 17.5 cm (Fig. 1).

Major part of the tunnels lies in the Kurkar formation, a locally cemented, gravelly sand with varying degrees of fines (Fig. 2). The section between the depot and the Em Hamoshavot station is located in clays and mixed-grained soils with low permeability.

## 2.2 Annular Gap Mortar

The annular gap mortar used in this project mainly consists of cement, sand, bentonite and water:

- Cement CEM II 42.5N/A-V 200 kg/m<sup>3</sup>
- Sand (0–5 mm) 772.5 kg/m<sup>3</sup>
- Sand (0–2 mm) 772.5 kg/m<sup>3</sup>
- Bentonite IMERY S 50 kg/m<sup>3</sup>
- Water reducer Master Rheobuild 4 kg/m<sup>3</sup>
- Retarder: Pozzolite 132 4 kg/m<sup>3</sup>
- Water 275 kg/m<sup>3</sup>

Tests in the laboratory of WBI GmbH showed flow spreads with decreasing tendency from 55 cm to 45 cm in the first 6 hours after mixing. The setting process began about 7 to 8 hours after mixing. The stress-strain behavior of the fresh mortar was investigated in a large, WBI-owned compression test device with a sample diameter of 23 cm (Fig. 3). The measured stress-strain curve exemplarily shown in Figure 4 shows an increase in the oedometric modulus with increasing stress. This increase can be explained by the consolidation of the sample, which is associated with the release of pore water (excess water).

aufgefahrenen, benachbarten Röhren haben einen Innendurchmesser von 6,5 m und sind mit 35 cm dicken Tübbingungen ausgekleidet. Der Ringspalt besitzt eine Dicke von 17,5 cm (Bild 1).

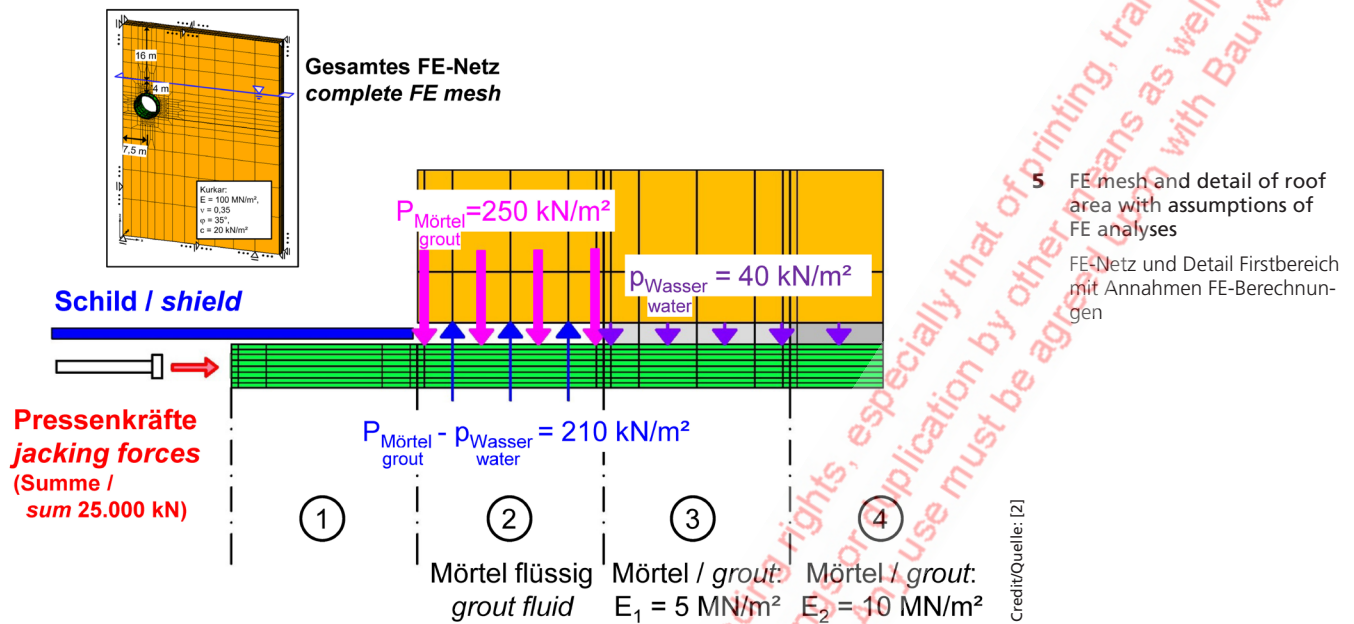
Der größte Teil der Strecke liegt in der Formation des Kurkar, einem örtlich verfestigten Kiessand mit unterschiedlichen Feinanteilen (Bild 2). Der Streckenabschnitt zwischen dem Depot und der Station Em Hamoshavot liegt in gering durchlässigen Tonen und gemischtkörnigen Böden.

## 2.2 Ringspaltmörtel

Der verwendete Ringspaltmörtel besteht im Wesentlichen aus Zement, Sand, Bentonit und Wasser:

- Zement CEM II 42.5N/A-V 200 kg/m<sup>3</sup>
- Sand (0–5 mm) 772,5 kg/m<sup>3</sup>
- Sand (0–2 mm) 772,5 kg/m<sup>3</sup>
- Bentonit IMERY S 50 kg/m<sup>3</sup>
- Water reducer Master Rheobuild 4 kg/m<sup>3</sup>
- Verzögerer: Pozzolith 132 4 kg/m<sup>3</sup>
- Wasser 275 kg/m<sup>3</sup>

Versuche im Labor der WBI GmbH haben in den ersten 6 Stunden nach dem Anmischen Ausbreitmaße mit abnehmender Tendenz von 55 cm bis 45 cm ergeben. Etwa 7–8 Stunden nach dem Anmischen begann der Abbindeprozess. Das Spannungsdehnungsverhalten des frischen Mörtels wurde in einem großen, WBI-eigenen Kompressionsgerät mit einem Probendurchmesser von 23 cm untersucht (Bild 3). Die in Bild 4 beispielhaft dargestellte, gemessene Drucksetzungskurve zeigt ein Anwachsen des Steifemoduls mit zunehmender Spannung. Diese Zunahme ist mit der Konsolidierung der Probe zu erklären,



At a pressure of 0.82–1.10 bar, a constrained modulus of 9 MPa is obtained. Assuming a Poisson's ratio of 0.35, this corresponds to a Young's modulus of 5.6 MPa.

### 2.3 Tunnel Sections Located in Kurkar

A stability check for the segmental lining was carried out with the above-mentioned E-modulus [1, 2]. **Figure 5** shows a detail of the 3D-FE mesh containing 4 segmental rings, in the roof area of the tunnel.

The first ring is constructed within the shield and held in place with the jacks (**Fig. 5**). In the area of the second ring, the annular gap grouting takes place. In the calculations presented here, a grouting pressure of 2.5 bar is assumed, which loads the segmental ring. At the same time, the excavation contour is loaded by the difference between the grout injection pressure and the water pressure.

For the area of the third ring, it is assumed that setting of the mortar has started and a certain stiffness was reached. Based on the results of the described laboratory tests, the modulus of elasticity of the mortar in this zone is assumed to 5 MN/m<sup>2</sup>. This assumption is on the safe side against the background of the selected grouting pressure of 2.5 bar. In the area of ring 4, the modulus of elasticity is assumed to be somewhat higher at 10 MN/m<sup>2</sup> due to the greater age of the mortar.

The normal stresses in the segments of rings 2 and 3 resulting from the calculations are shown in **Figure 6**. It can be seen that the segments are mainly subjected to normal force. The stresses in ring 3 are somewhat greater than those in ring 2.

As the water permeability of the Kurkar formation allows for a consolidation of the annular gap mortar similar

die mit der Abgabe von Porenwasser (Überschusswasser) verbunden ist. Bei einem Druck von 0,82–1,10 bar ergibt sich ein Steifemodul von 9 MPa. Das entspricht bei Annahme einer Poissonzahl von 0,35 einem E-Modul von 5,6 MPa.

### 2.3 Tunnelabschnitte im Kurkar

Mit dem o. g. E-Modul wurde ein Standsicherheitsnachweis für die Tübbinggeführt [1, 2]. Ein Ausschnitt aus dem räumlichen FE-Netz, das vier Tübbingringe enthält, im Firstbereich des Tunnels zeigt das **Bild 5**.

Der erste Ring wird im Schutz des Schildmantels errichtet und durch die Vortriebspresen gehalten (**Bild 5**). Im Bereich des zweiten Rings erfolgt die Ringspaltverpressung. In den hier vorgestellten Berechnungen wird von einem Mörtelverpressdruck von 2,5 bar ausgegangen, der den Tübbingring belastet. Gleichzeitig wird die Ausbruchskontur durch die Differenz zwischen dem Mörtelverpressdruck und dem Wasserdruck beansprucht.

Für den Bereich des dritten Rings wird angenommen, dass der Mörtel angesteift ist. Auf der Grundlage der Ergebnisse der beschriebenen Laborversuche wird der E-Modul des Mörtels mit 5 MN/m<sup>2</sup> angenommen. Diese Annahme liegt vor dem Hintergrund des gewählten Verpressdrucks von 2,5 bar auf der sicheren Seite. Im Bereich des Rings 4 wird der E-Modul aufgrund des höheren Alters des Mörtels mit 10 MN/m<sup>2</sup> etwas höher angenommen

Die aus den Berechnungen resultierenden Normalspannungen in den Tübbing der Ringe 2 und 3 sind in **Bild 6** dargestellt. Man erkennt, dass die Tübbing überwiegend auf Normalkraft beansprucht werden. Die Beanspruchung im Bereich des Rings 3 ist etwas größer als die im Ring 2.

Da die Wasserdurchlässigkeit der Formation des Kurkar eine Konsolidation des Ringspaltmörtels ähnlich derjenigen im

to the one in the laboratory test, with these calculations, the stability of the segmental lining could be proven with the annular gap mortar foreseen. The tunnels were successfully driven.

It should also be mentioned that the results of the calculations performed are influenced by the jacking force, the grout injection pressure and the stiffness of the mortar. These three variables can generally be changed or controlled to achieve a satisfactory result.

## 2.4 Tunnel Sections in Clay and Mixed-Grain Soil

The water permeability of the clay and mixed-grained soils is small. Therefore, as opposed to the tunnel sections in Kurkar, no consolidation of the mortar takes place here. Since the water-saturated mortar is not compressible or in other words incompressible, it has a much lower deformability than the fresh, drained mortar. As a result, when the annular gap is completely filled, adequate bedding of the segments is ensured, even though the mortar sets much more slowly because of the lack of or limited drainage. Therefore, the mortar described above was successfully used in these tunnel sections, too. A prerequisite for this, however, was that the setting of mortar and mixing water to cement stone happens without loss of volume.

## 3 Tunnels Located in Rock Mass

### 3.1 Filder Tunnel

#### 3.1.1 Project

The 9.5 km long Filder Tunnel of the Stuttgart 21 project connects the new Stuttgart main station with the Filder plain located 155 m above. It was excavated with a TBM on most of its length. Coming from the Filder plain, the tunnel crosses the claystones and limestones of the Lias  $\alpha$ , the mudstones of the nodular marl and the sandstones

Laborversuch ermöglicht, konnte mit diesen Berechnungen der Nachweis der Standsicherheit der Tübbingauskleidung für den vorgesehenen Ringspaltmörtel erbracht werden. Die Vortriebe der Tunnelröhren wurden erfolgreich durchgeführt.

Es sei noch erwähnt, dass die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen von der Vortriebspresskraft, dem Mörtelverpresdruck und der Steifigkeit des Mörtels beeinflusst werden. Diese drei Größen lassen sich im allgemeinen Fall verändern bzw. steuern, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen.

## 2.4 Tunnelabschnitte im Ton und gemischtkörnigen Boden

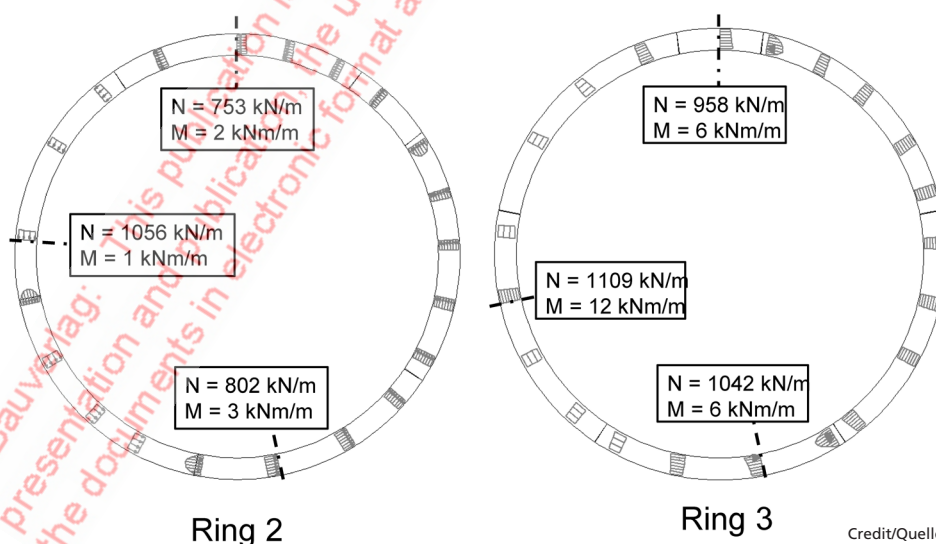
Die Wasserdurchlässigkeit des Tons und der gemischtkörnigen Böden ist gering. Deshalb findet keine Konsolidation des Mörtels wie im Kurkar statt. Da der wassergesättigte Mörtel nicht zusammendrückbar oder mit anderen Worten inkompressibel ist, besitzt er eine deutlich geringere Verformbarkeit, als der frische, dränierete Mörtel. Dadurch ist bei vollständiger Verfüllung des Ringspalts eine ausreichende Bettung der Tübbinge gewährleistet, auch wenn der Mörtel wegen der fehlenden bzw. eingeschränkten Entwässerung deutlich langsamer abbindet. Der oben beschriebene Mörtel wurde deshalb auch in diesen Tunnelabschnitten erfolgreich eingesetzt. Voraussetzung dafür war allerdings, dass der Mörtel mit dem Anmachwasser ohne Volumenverlust zu einem Zementstein erhärtet.

## 3 Tunnel im Festgestein

### 3.1 Fildertunnel

#### 3.1.1 Projekt

Der 9,5 km lange Fildertunnel des Projekts Stuttgart 21 verbindet den neuen Stuttgarter Hbf. mit der 155 m höher liegenden Filderebene. Er wurde auf dem größten Teil seiner Länge mit einer TBM aufgeföhren. Von der Filderebene kommend durchörtert der Tunnel mit den Schildfahrten 1 und 2 die Ton- und Kalksandsteine des Lias  $\alpha$ , die Tonsteine des Knollenmergels



6 Case A, normal stresses in segmental rings 2 and 3, calculation step 4

Fall A, Normalspannungen in den Tübbingringen 2 und 3, Rechenschritt 4

Credit/Quelle: [2]

and mudstones of the Stubensandstein formation with shield drives 1 and 2 (Fig. 7). After a conventionally excavated transition zone, shield drives 3 and 4, leading to the central railway station, cross the anhydritic mudstones of the Gypsum Keuper with swelling potential.

The excavation diameter of the tunnel is 10.83 m. The thickness of the segments in the area of shield drives 1 and 2 is 45 cm, while in the Gypsum Keuper with swelling potential 60 cm thick segments were installed. Thus, the inner diameter of the tunnel amounts to 4.7 m in the upper tunnel section and to 4.40 m in the Gypsum Keuper section. This is possible due to the different driving speeds in the upper and lower Filder tunnel foreseen for later operation.

### 3.1.2 Mortars With Phosphate for the Anhydritic Gypsum Keuper

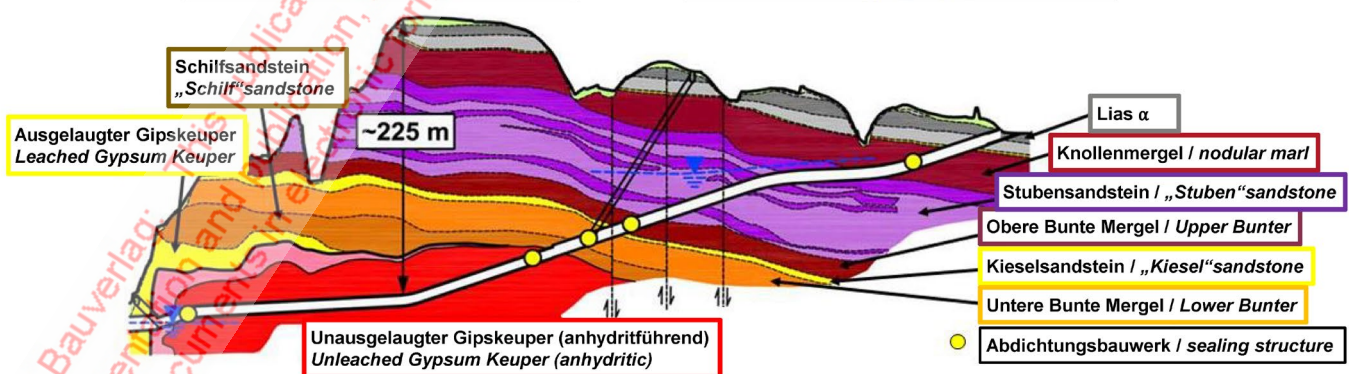
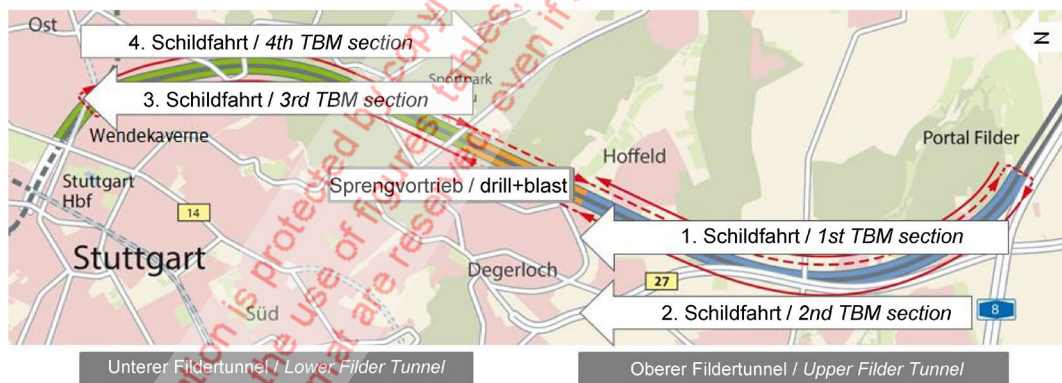
Upon contact with water, the anhydrite contained in the mudstones of the unleached Gypsum Keuper goes into solution. If the solution is not removed, it crystallizes in situ as gypsum. This process is associated with an increase in volume of 62%. If the volume increase is inhibited or hindered, large swelling pressures develop, for which the segment lining is not designed [5, 6]. Water ingress from the surrounding rock was not to be expected in the area of shield drives 3 and 4. In order to prevent swelling

sowie die Sand- und Tonsteine der Stubensandsteinformation (Bild 7). Nach einer konventionell aufgefahrene Übergangszone schließen sich in Richtung Hbf. die Schildfahrten 3 und 4 an, in deren Bereich der Tunnel in den quellfähigen, anhydrit-führenden Tonsteinen des Gipskeupers liegt.

Der Ausbruchdurchmesser des Tunnels beträgt 10,83 m. Die Dicke der Tübbinge im Bereich der Schildfahrten 1 und 2 beträgt 45 cm, während im quellfähigen Gipskeuper eine Tübbingdicke von 60 cm ausgeführt wurde. Der Innendurchmesser des Tunnels im oberen Tunnelabschnitt beträgt damit 4,70 m und im Gipskeuper 4,40 m. Das ist aufgrund der unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten im oberen und unteren Fildertunnel im späteren Betriebsfall möglich.

### 3.1.2 Phosphathaltiger Mörtel im anhydrithaltigen Gipskeuper

Der in den Tonsteinen des unausgelaugten Gipskeupers enthaltene Anhydrit geht bei Wasserzutritt in Lösung und kristallisiert, falls die Lösung nicht abtransportiert wird, an Ort und Stelle als Gips wieder aus. Mit diesem Vorgang ist eine Volumenzunahme von 62 % verbunden. Falls diese verhindert oder behindert wird, entstehen große Quelldrücke, gegen die die Tübbingauskleidung nicht bemessen ist [5, 6]. Wasserzutritte aus dem umgebenden Gebirge sind im Bereich der Schildfahrten 3 und 4 nicht zu erwarten. Damit keine



7 Filder Tunnel, plan view with heading concept and longitudinal sections with ground conditions  
Fildertunnel, Lageplan mit Vortriebskonzept und Längsschnitt mit Baugrundverhältnissen

Credit/Quelle: [3, 4]

processes from being triggered, it therefore had to be avoided that water from the fresh annular gap mortar could penetrate into the rock mass.

To achieve this, an annular gap mortar with small water content and two components was developed. The first component of this mortar consists of a binder activated by alkaline and made of granulated blast furnace slag and fly ash, as well as of sand and water. In addition, a phosphate-containing additive is added to the 1st component. This additive causes calcium phosphate to precipitate when calcium sulphate (anhydrite) is dissolved, forming a protective layer on the surface of the anhydrite.

As a second component, a setting accelerator is added in the area of the pilaster strips as an activator, which causes the mortar to set quickly.

In detail, the mortar has the following composition:

#### Component 1:

• Ground granulated blast furnace slag	200 kg/m <sup>3</sup>
• Electro filter ash	341 kg/m <sup>3</sup>
• Water	197 kg/m <sup>3</sup>
• Sand 0/2 mm	830 kg/m <sup>3</sup>
• Grit 0/7 mm	511 kg/m <sup>3</sup>
• Additive MC Grout AA 03-A1 to A3	19.26 kg/m <sup>3</sup>

#### Component 2:

• Setting accelerator Betol 38	4–6% by volume
--------------------------------	----------------

In preparatory tests with the vane probe, a shear strength of 120 kN/m<sup>2</sup> could be demonstrated for this mortar two hours after addition of the activator. The modulus of elasticity after three days was  $E = 2800$  MPa.

With this mortar, annular gap backfilling was successfully carried out in both shield drives 3 and 4 without any swelling phenomena occurring [3, 4].

### 3.1.3 Annular Gap Mortar in the Area of Shield Drives 1 and 2

In the area of shield drives 1 and 2, a 1-component cement mortar with common composition was used. Tunnel heading was carried out with a partially filled excavation chamber in open mode. Compressed air support was used in the Lias  $\alpha$  in order to minimise subsidences. The annular gap backfill was successfully carried out with the cement mortar in both – the permeable sandstones of the Stubensandstein formation, where the mortar can consolidate, as well as in the mudstones with low permeability of the Lias  $\alpha$ , the nodular marl and the Stubensandstein, where drainage of the mortar is not possible.

## 3.2 Hallandsås Tunnel

### 3.2.1 Project

The approx. 8.7 km long Hallandsås railway tunnel is located on the new line from Malmö to Gothenburg

Quellvorgänge ausgelöst werden, muss deshalb vermieden werden, dass Wasser aus dem frischen Ringspaltmörtel in den Fels eindringen kann.

Um das zu erreichen, wurde ein aus 2 Komponenten bestehender, wasserarmer Ringspaltmörtel entwickelt. Die erste Komponente dieses Mörtels besteht aus einem alkalisch aktivierten Bindemittel aus Hüttensand und Flugasche sowie aus Sand und Wasser. Außerdem wird der 1. Komponente ein phosphathaltiges Additiv hinzugefügt. Dieses Additiv führt dazu, dass bei einer Lösung von Calciumsulfat (Anhydrit) Calciumphosphat ausfällt und eine Schutzschicht auf der Oberfläche des Anhydrits bildet.

Als zweite Komponente, die erst im Bereich der Lisene zugegeben wird, wird als Aktivator ein Abbindebeschleuniger hinzugefügt, der ein schnelles Abbinden des Mörtels bewirkt. Im Einzelnen hat der Mörtel die folgende Zusammensetzung:

#### Komponente 1 (Bereitstellungsgemisch):

• Hüttensandmehl	200 kg/m <sup>3</sup>
• Elektrofilterasche	341 kg/m <sup>3</sup>
• Wasser	197 kg/m <sup>3</sup>
• Sand 0/2 mm	830 kg/m <sup>3</sup>
• Splitt 0/7 mm	511 kg/m <sup>3</sup>
• Additive MC Grout AA 03-A1 bis A3	19,26 kg/m <sup>3</sup>

#### Komponente 2:

• Abbindebeschleuniger Betol 38	4– 6 Vol.-%
---------------------------------	-------------

In Vorversuchen konnte für diesen Mörtel zwei Stunden nach Zugabe des Aktivators mit der Flügelsonde eine Scherfestigkeit von 120 kN/m<sup>2</sup> nachgewiesen werden. Der E-Modul nach drei Tagen betrug  $E = 2800$  MPa.

Mit diesem Mörtel konnte die Ringspaltverfüllung bei beiden Schildfahrten 3 und 4 erfolgreich durchgeführt werden, ohne dass Quellerscheinungen auftraten [3, 4].

### 3.1.3 Ringspaltmörtel im Bereich der Schildfahrten 1 und 2

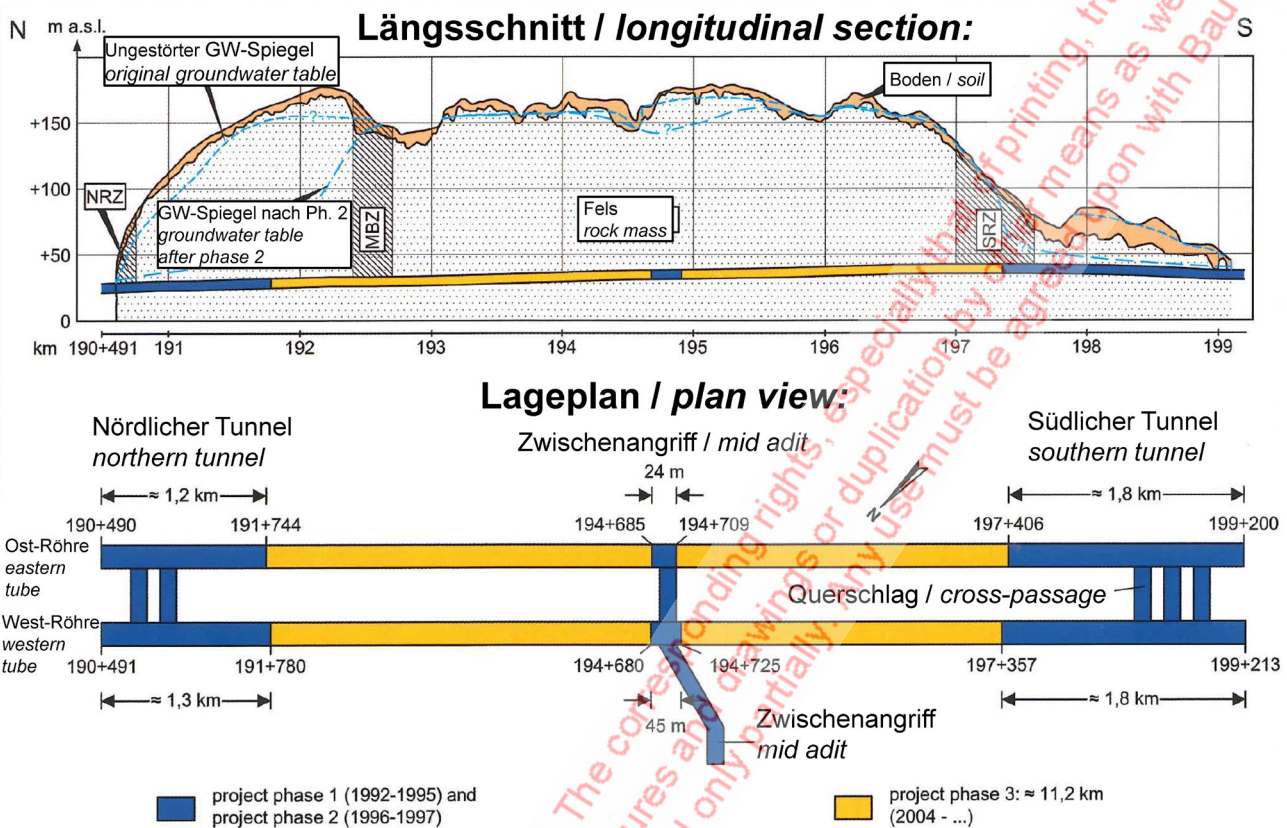
Im Bereich der Schildfahrten 1 und 2 kam ein 1-Komponenten-Zementmörtel üblicher Zusammensetzung zur Anwendung. Die Vortriebe erfolgten mit teilgefüllter Abbaukammer im offenen Modus. Im Lias  $\alpha$  wurde eine Druckluftstützung durchgeführt, um die vortriebsbedingten Senkungen zu minimieren. Sowohl in den durchlässigen Sandsteinen des Stubensandsteins, in denen der Mörtel konsolidieren kann, als auch in den gering durchlässigen Tonsteinen des Lias  $\alpha$ , des Knollenmergels und des Stubensandsteins, in deren Bereich eine Entwässerung des Mörtels nicht möglich ist, konnte die Ringspaltverfüllung erfolgreich durchgeführt werden.

## 3.2 Tunnel Hallandsås

### 3.2.1 Projekt

Der ca. 8,7 km lange Eisenbahntunnel Hallandsås liegt auf der Neubaustrecke von Malmö nach Göteborg (Bild 8). Er besteht





8 Hallandsås Tunnel, longitudinal section and plan view  
Hallandsåstunnel, Längsschnitt und Lageplan

Credit/Quelle: [7]

(Fig. 8). It consists of two parallel tubes with a diameter of approx. 9 m and a maximum overburden of 150 m. The ground does mainly consist of a jointed gneiss. The groundwater table is approximately located at the level of the ground surface.

In project phases 1 and 2, between 1992 and 1997, the tunnel sections marked in blue in Figure 8, were excavated. After an interruption of construction, excavation of the remaining approx. 6.5 km long tunnel section began in 2004. The work was carried out by a joint venture of the companies Skanska and Vinci.

Due to a previous event of damage, very strict environmental protection requirements were imposed and the quantities of water that were allowed to be extracted during tunnelling were limited to the following values:

- 100 l/s as average value during a 30-days-period.
- 300 l/s on a weekly average.
- 400 l/s as short-term withdrawal.

In view of the high groundwater level of 150 m above the tunnel and the high permeability of the gneiss, these requirements are difficult to meet.

The contractors decided to use a shielded TBM with subsequent watertight segmental lining and to complete

aus zwei parallel verlaufenden Röhren mit einem Durchmesser von ca. 9 m mit einer maximalen Überdeckung von 150 m. Der Baugrund besteht im Wesentlichen aus einem klüftigen Gneis. Der Grundwasserspiegel steht etwa in Höhe der Geländeoberfläche an.

In den Projektphasen 1 und 2 wurden in den Jahren 1992–1997 die in Bild 8 blau gekennzeichneten Bereiche aufgeföhren. Nach einer Vortriebsunterbrechung wurde im Jahr 2004 mit dem Aufföhren des verbleibenden, ca. 6,5 km langen Tunnelabschnitts begonnen. Die Arbeiten wurden von einer Arbeitsgemeinschaft der Firmen Skanska und Vinci ausgeföhrt. Aufgrund eines vorausgegangenen Schadensfalls wurden sehr strenge Auflagen zum Umweltschutz gemacht und die Entnahmemengen von Wasser wöhrend des Vortriebs auf folgende Werte begrenzt:

- 100 l/s als Mittelwert über einen Zeitraum von 30 Tagen
- 300 l/s für einen Zeitraum von einer Kalenderwoche
- 400 l/s als kurzfristige Entnahme

Angesichts des hohen Grundwasserstandes von 150 m oberhalb des Tunnels und der großen Wasserdurchlässigkeit des anstehenden Gneises sind diese Forderungen schwer zu erfüllen. Die ausföhrenden Unternehmungen entschieden sich für den Einsatz einer geschildeten TBM mit nachfolgendem

the excavation of one tunnel tube before starting excavation of the second tube.

The TBM could be operated in open mode or with a slurry support at a pressure of up to 8 bars. The shield and the sealing system were dimensioned for a water pressure of 15 bars, so that a pressure of max. 15 bars could be applied during phases of standstill. Appropriate equipment for advanced drilling and grouting was installed. The segmental rings consisted of eight 2.2 m long, 54 cm thick segments. The annular gap was 24 cm thick.

### 3.2.2 Instability of the Temporary Face and Erosion of the Annular Gap Mortar

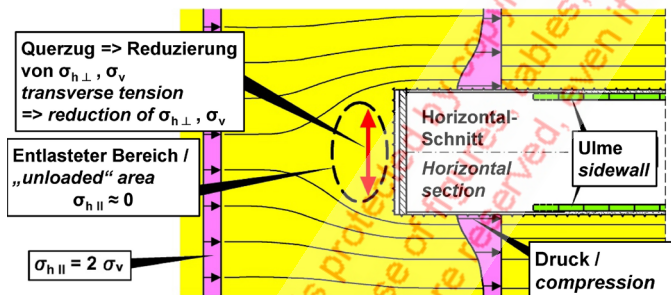
During tunnelling, instabilities of the temporary face occurred. The orthogonal set of discontinuities, consisting of discontinuities in parallel with schistosity and joints, allowed the formation of rock wedges, which – as a result of the seepage flow directed to the temporary face – were loosened from the bond and pressed against the cutterhead (Fig. 9, [7]). As a consequence, the TBM practically worked like a rock crusher leading to high wear. Particularly when driving in closed mode, the associated problems were severe and resulted in very low advance rates [8]. In addition, the cementitious annular gap mortar was washed-out towards the face in the area of water-bearing discontinuities (Fig. 10). Erosion channels formed in the

wasserdichten Tübbingausbau und dafür, den Vortrieb einer Tunnelröhre fertigzustellen, bevor mit dem Vortrieb der 2. Röhre begonnen wird.

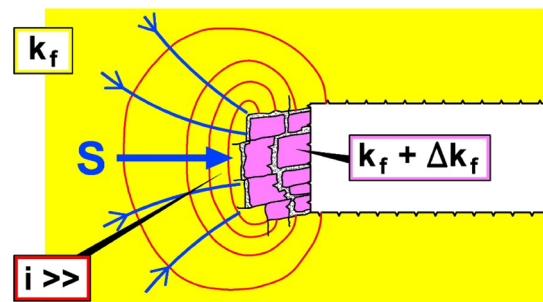
Die eingesetzte TBM konnte in offenem Modus oder mit einer flüssigkeitsgestützten Ortsbrust bis zu einem Druck von 8 bar gefahren werden. Der Schild und das Abdichtungssystem wurden für einen Wasserdruck von 15 bar bemessen, so dass in Phasen des Stillstands ein Druck von max. 15 bar aufgebracht werden konnte. Für vorausseilende Bohrungen und Abdichtungsinjektionen waren entsprechende Einrichtungen installiert. Die Tübbingringe bestanden aus acht 2,2 m langen, 54 cm dicken Tübbing. Der Ringspalt war 24 cm dick.

### 3.2.2 Instabilität der Ortsbrust und Erosion des Ringspaltmörtels

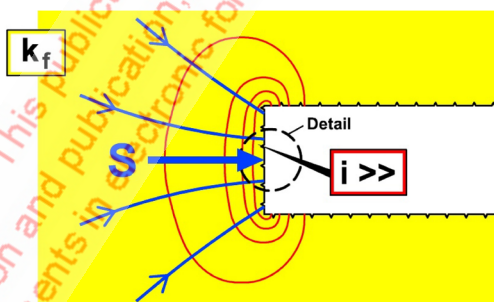
Beim Vortrieb kam es zu Instabilitäten der temporären Ortsbrust. Die schieferungsparallelen Trennflächen und darauf senkrecht stehenden Klüfte erlaubten die Ausbildung von Felsblöcken, die infolge der zur Ortsbrust gerichteten Sickerströmung aus dem Verband gelöst und gegen den Bohrkopf gedrückt wurden (Bild 9, [7]). Als Folge arbeitete die TBM praktisch wie ein Steinbrecher, und es kam zu einem hohen Verschleiß. Insbesondere beim Vortrieb im geschlossenen Modus waren die damit verbundenen Probleme sehr groß und hatten auch sehr geringe Vortriebsleistungen zur Folge [8]. Außerdem wurde der zementgebundene Ringspaltmörtel im



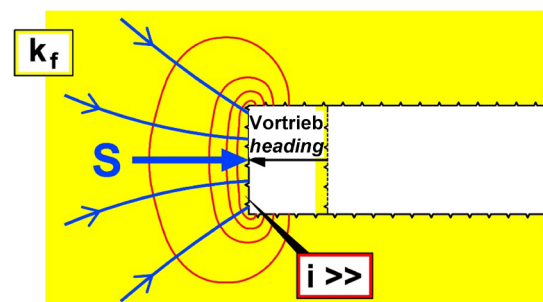
**Spannungsumlagerung vor Ortsbrust**  
Stress redistribution around face



**Destabilisierung, Auflockerung, Erhöhung  $k_f$**   
Instability, loosening, increase of  $k_f$



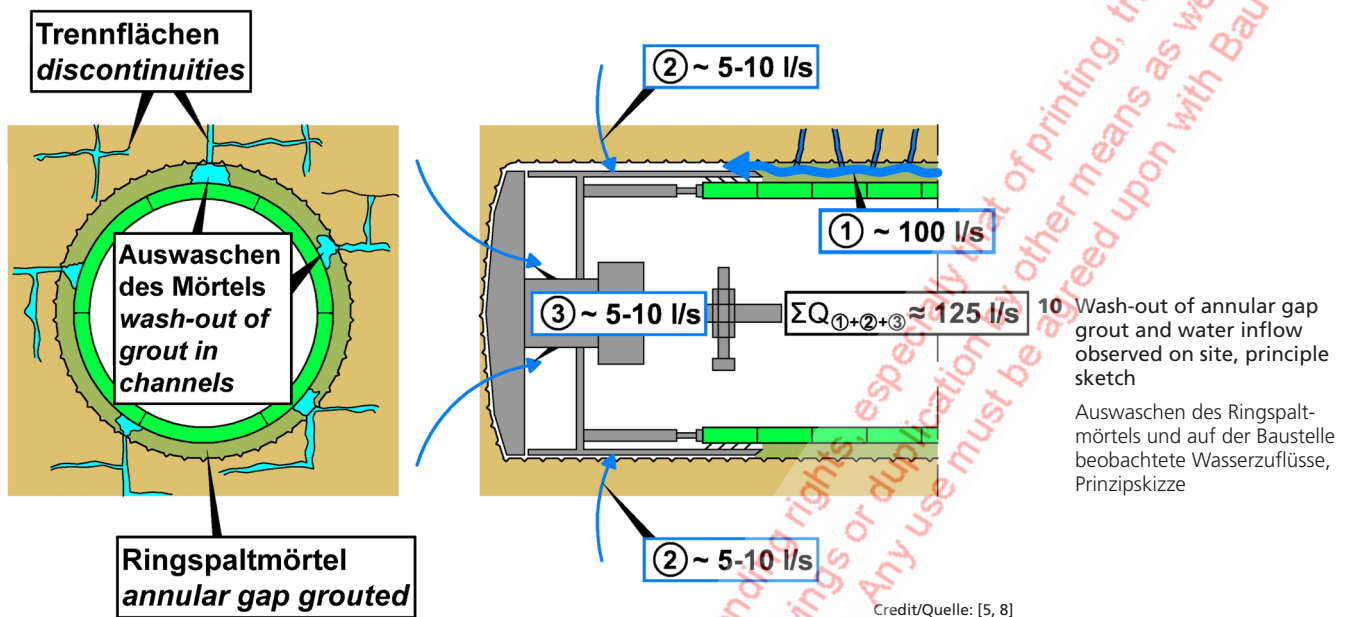
**Sickerströmung zur Ortsbrust**  
Seepage towards face



**Weiterer Vortrieb**  
Progress of excavation

Credit/Quelle: [5, 8]

9 Reasons for instability of temporary face  
Gründe für Destabilisierung der Ortsbrust



annular gap mortar. As a result, very high amounts of seepage water resulted so that it was not possible or at least very difficult to meet the required water extraction limits. With the help of three-dimensional finite element calculations, these observations were theoretically reproduced:

- From the seepage flow calculations, an equipotential distribution is obtained that leads to gradients in the rock mass in front of the temporary face of  $i = 10-20$  (Fig. 11, [5, 8, 9]). The resulting seepage forces stress the rock mass in front of the temporary face and cause the instabilities described above (Fig. 9). The stress-strain calculations performed on this issue will not be presented here.
- Also in parallel with the annular gap and thus in the longitudinal direction of the tunnel, very large gradients result for the open mode assumed in the calculation (Fig. 11). Investigations in another context [10] show that such gradients lead to the observed erosion of the fresh annular gap mortar.

### 3.3 Bossler Tunnel

#### 3.3.1 Project

The two tubes of the 8.8 km long Bossler Tunnel form part of the new high-speed railway line from Wendlingen to Ulm (Stuttgart–Munich). With a gradient of 2.5%, they overcome a difference in altitude of 220 m from the Aichelberg portal to the Buch portal in the Filstal valley. The tunnel tubes cross the geological strata of the Brown Jurassic and the White Jurassic (Fig. 12). They were excavated with a TBM in open mode and a segmental lining was installed. The annular gap had a thickness of 22.5 cm and a volume of 7.8 m<sup>3</sup> per running m.

Bereich wasserführender Klüfte zur Ortsbrust hin ausgewaschen (Bild 10). Es bildeten sich Erosionskanäle im Ringspaltmörtel, und es ergaben sich als Folge sehr hohe Sickerwassermengen, so dass die Forderungen nach einer Begrenzung der Wasserentnahme nicht oder nur sehr schwer eingehalten werden konnten.

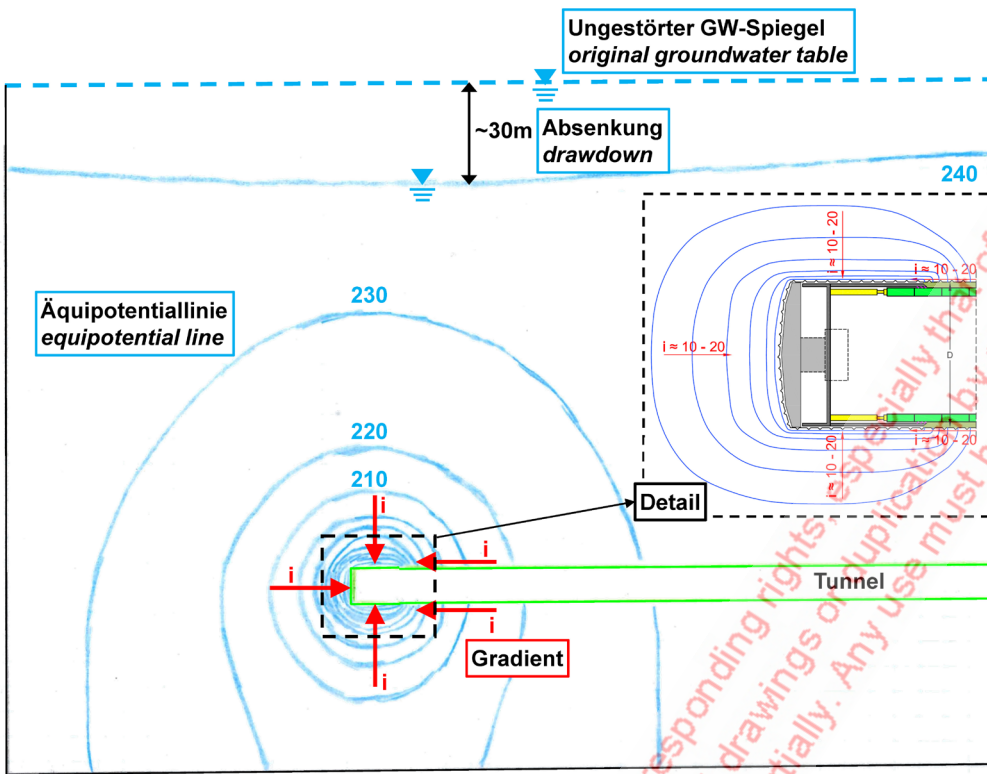
Mit Hilfe dreidimensionaler FE-Berechnungen wurden diese Beobachtungen theoretisch nachgebildet:

- Aus den Sickerströmungsberechnungen ergibt sich eine Potentialverteilung, die zu Gradienten im Fels vor der Ortsbrust von  $i = 10-20$  führt (Bild 11, [5, 8, 9]). Die daraus resultierenden Strömungskräfte belasten den Fels vor der Ortsbrust und verursachen die oben beschriebenen Instabilitäten (Bild 9). Die zu dieser Frage durchgeführten mechanischen Berechnungen sollen hier nicht dargestellt werden.
- Auch parallel zum Ringspalt in Längsrichtung des Tunnels ergeben sich für den in der Berechnung angenommenen, offenen Modus sehr große Gradienten (Bild 11). Untersuchungen in anderem Zusammenhang [10] zeigen, dass diese Gradienten zur beobachteten Erosion des frischen Ringspaltmörtels führen.

### 3.3 Boßlertunnel

#### 3.3.1 Projekt

Die zwei Röhren des 8,8 km langen Boßlertunnels sind Teil der NBS Wendlingen–Ulm. Mit einer Steigung von 2,5 % überwinden sie einen Höhenunterschied von 220 m vom Portal Aichelberg zum Portal Buch im Filstal. Dabei werden die Schichten des Braunjuras und des Weißen Juras durchörtert (Bild 12). Die Tunnel wurden mit einer TBM im offenen Modus aufgeföhren und mit Tübbingem ausgekleidet. Der Ringspalt war 22,5 cm dick und besaß ein Volumen von 7,8 m<sup>3</sup>/lfdm.



11 Equipotentials and gradients resulting from seepage flow

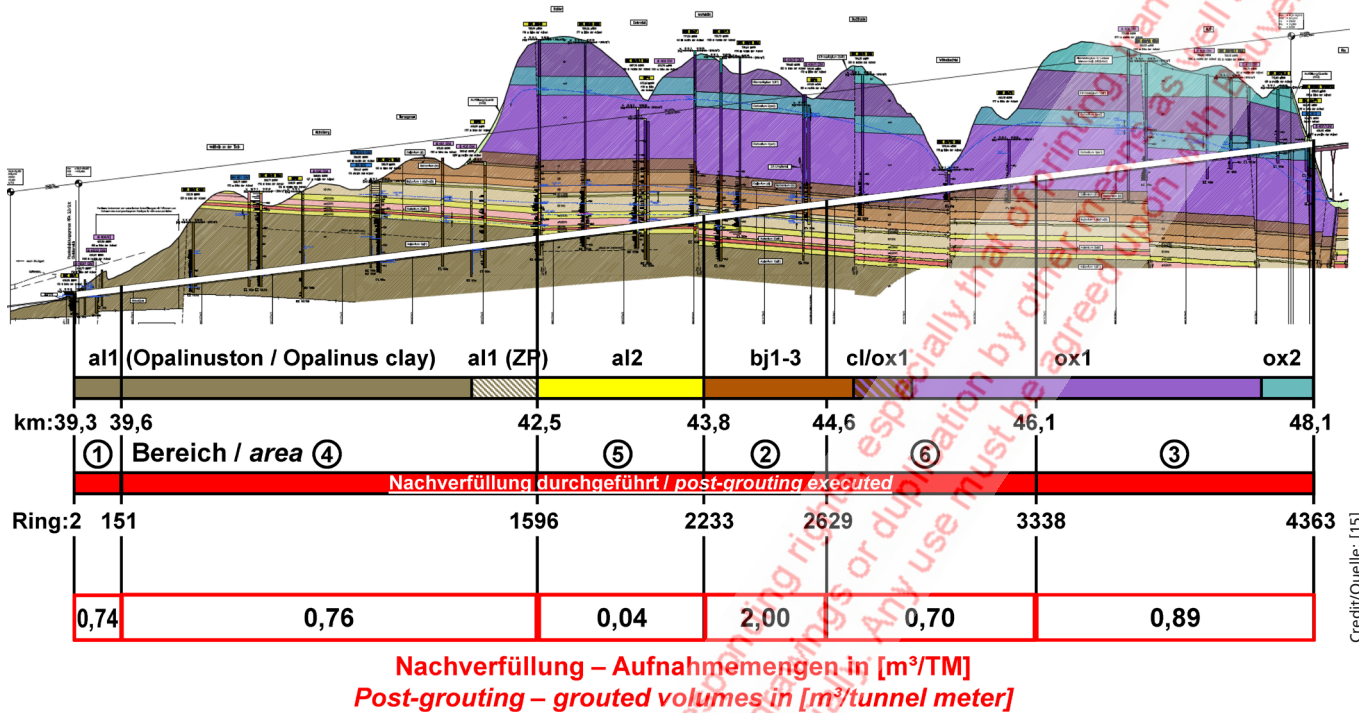
Potentialliniennetz und Gradienten infolge Sickerströmung

Devo-Tech\_ 1/4 SW

HBI\_ 1/4 SE

©

Bauverlag: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially those of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings of duplication by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even if used only partially. Any use must be agreed upon with Bauverlag.



Credit/Quelle: [15]

12 Bessler Tunnel, eastern tube, longitudinal section with geological layers and volumes grouted during post-grouting of annular gap  
Boßlertunnel, Oströhre, Längsschnitt mit Schichten und Aufnahmemengen bei Nachverfüllung Ringspalt

### 3.3.2 Bi-Component Annular Gap Mortar

A bi-component mortar with the following composition was used as annular gap mortar:

#### Component A:

- Cement CEM III/A 52.5 N H 260 kg/m<sup>3</sup>
- Bentonite Activ CT Ibeco 35 kg/m<sup>3</sup>
- Stabilizer/Retarder Mapequick CBS System 1 0–6 kg/m<sup>3</sup>
- Water 827 kg/m<sup>3</sup>

#### Component B:

- Accelerator Mapequick CBS System 2 90 kg/m<sup>3</sup>

Accordingly, the A-component consisted of bentonite, cement, a relatively large proportion of water and a stabilizer. This mixture has a Marsh time of 30–40 sec, a relatively high sedimentation stability and a long time until setting starts of 48–72 hours. The B-component (accelerator), which is also liquid and added in the area of the pilaster strips, leads to a rapid gel formation of the mixture.

The Young's modulus and the strength after 7 days amount to  $E = 212 \text{ MPa}$  and  $\sigma = 0.8\text{--}1.8 \text{ MPa}$ . Their development takes place slowly and begins about 1 hour after mixing if the material is at rest. As long as the material is in motion, the development of modulus and strength is very slow.

In the rock mass conditions prevailing in Bessler Tunnel, the excavation contour remains stable in the area of the shield and beyond. This means that the steering gap between shield and rock mass remains open up to

### 3.3.2 Bikomponenten-Ringspaltmörtel

Als Ringspaltmörtel kam ein Bikomponentenmörtel mit der nachstehenden Zusammensetzung zum Einsatz:

#### Komponente A:

- Zement CEM III/A 52,5 N HS 260 kg/m<sup>3</sup>
- Bentonit Activ CT Ibeco 35 kg/m<sup>3</sup>
- Stabilisator/Verzögerer Mapequick CBS System 1 0–6 kg/m<sup>3</sup>
- Wasser 827 kg/m<sup>3</sup>

#### Komponente B:

- Beschleuniger Mapequick CBS System 2 90 kg/m<sup>3</sup>

Danach bestand die A-Komponente aus Betonit, Zement, einem relativ großen Anteil von Wasser und einem Stabilisator. Diese Mischung besitzt eine Marsh-Zeit von 30–40 sec, eine relativ hohe Sedimentationsstabilität und eine lange Offenhaltezeit von 48–72 Stunden. Die ebenfalls flüssige B-Komponente (Beschleuniger), die im Bereich der Lisenen zugegeben wird, führt zu einer raschen Gelbildung der Mischung.

Die Entwicklung des E-Moduls und der Festigkeit, deren Werte nach sieben Tagen  $E = 212 \text{ MPa}$  und  $\sigma = 0,8\text{--}1,8 \text{ MPa}$  betragen, erfolgt langsam und beginnt, wenn sich das Material in Ruhe befindet, ca. eine Stunde nach dem Mischen. Solange sich das Material in Bewegung befindet, erfolgt die Entwicklung dieser Größen sehr langsam.

Bei den anstehenden Gebirgsverhältnissen bleibt die Ausbruchkontur im Bereich des Vortriebsschildes und darüber hinaus stabil. Das bedeutet, dass der Steuerspalt bis zum Schildschwanz offen bleibt. Da die am Schildschwanz

the shield tail. Due to local excess excavation and corresponding irregularities in the rock mass contour, the brushes on the outside of the shield tail cannot seal the steering gap against the annular gap. As a consequence, a flow path is created from the annular gap to the temporary face, through which the still liquid bi-component mortar can flow off. In fact, during driving of the east tunnel tube, large quantities of annular gap mortar flowed off, and therefore the segmental rings remained unbedded in the roof area (Fig. 13). For this reason, after breakthrough of the tunnel, it became necessary to carry out postgrouting via openings in the segments. The volumes postgrouted per running meter of tunnel are summarized in Figure 12. With two exceptions, they are in the order of 1/10 of the tunnel's circumference.

This means that the segmental rings in the roof area were not bedded over 1/10 of the circumference. This corresponds to the situation commonly resulting when pea gravel is used as backfill material. Since pea gravel can only be blown into the annular gap through openings in the segments and since a slope is formed in the backfill during this process, also in this case the segments are not bedded in the roof area in the zone immediately behind the shield tail.

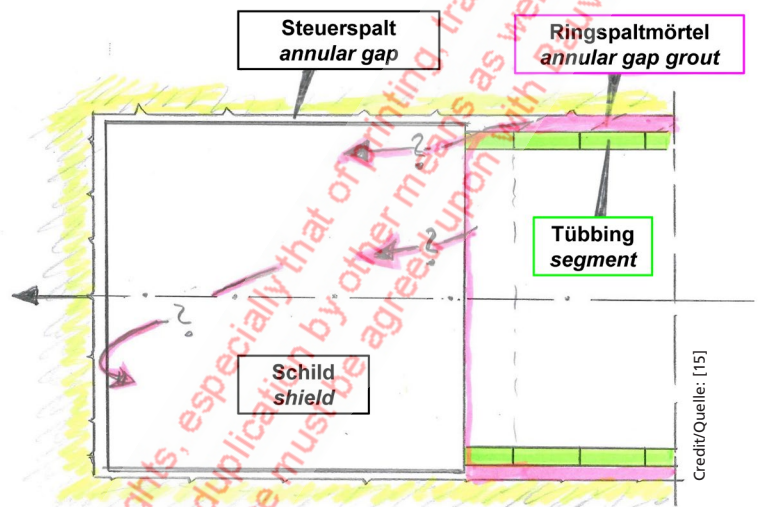
In the case of the Bossler Tunnel, due to the load-bearing capacity of the rock mass, this disadvantage had no influence on the stability of the tunnel. In the case of more heavily jointed rock mass with lower strength, however, such inadequate bedding can lead to damage, for example in the form of ovalisation of the segmental ring and joint offsets (cf. e.g. railway line Genova–Ventimiglia [5, 11, 14]). When driving the western tunnel tube, the method of backfilling the annular gap was modified. Here, postgrouting was already carried out in the area of the back-up of the TBM. Even with this procedure, however, one cannot assume complete filling of the annular gap in the area of the shield tail.

This means that this bi-component mortar is not suitable in cases where the steering gap remains open and cannot be sealed against the annular gap.

Long-term tests of the bi-component mortar have also shown that it is not resistant to sulphate-containing waters [12].

### 3.4 Special Conditions in Sedimentary Rocks, Especially in the Bunter Formation

In the Bunter formation (Buntsandstein), as in many sedimentary rocks, the discontinuity fabric usually consists of widely extending, approximately horizontal, bedding-parallel discontinuities with small strength and vertical joints extending between the bedding parallel discontinuities and exhibiting different strength values.



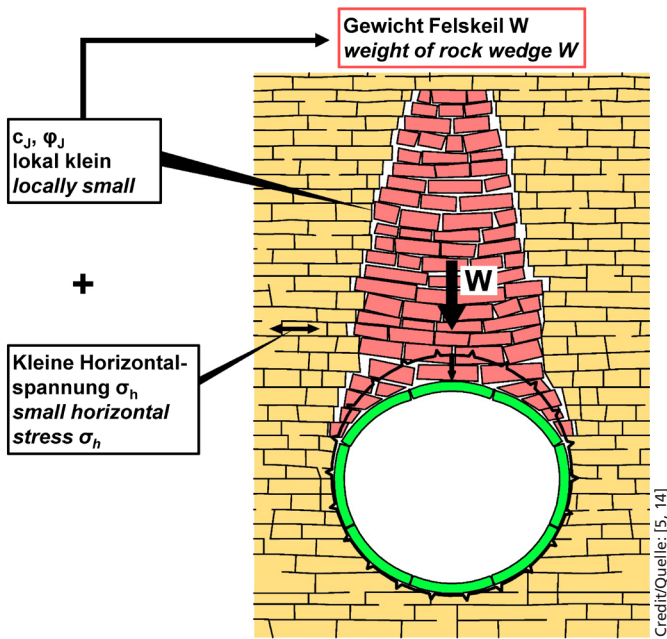
13 Scenario "Annular gap grout flowing towards temporary face", principle sketch

Szenario „Vorlaufen des Ringspaltmörtels zur Abbaukammer“, Prinzipskizze

außenliegenden Bürsten aufgrund örtlicher Mehrausbrüche, den Steuerspalt nicht gegen den Ringspalt abdichten können, entsteht ein Fließweg vom Ringspalt zur Ortsbrust, über den der noch flüssige Ringspaltmörtel abfließen kann. Tatsächlich sind beim Vortrieb der Oströhre größere Mengen des Ringspaltmörtels abgeflossen, und die Tübbingringe blieben auf diese Weise im Firstbereich ungebettet (Bild 13). Aus diesem Grund wurden nach dem Durchschlag des Tunnels Nachverpressungen über Öffnungen in den Tübbing erforderlich. Die auf den laufenden Meter nachverfüllten Volumina sind in Bild 12 zusammengestellt. Sie liegen, von zwei Ausnahmen abgesehen, in der Größenordnung von 1/10 des Umfangs. Das bedeutet, dass die Tübbingringe im Firstbereich über 1/10 des Umfangs nicht gebettet waren. Das ist eine Situation, die der eines mit Perlkies hinterblasenen Tübbingrings entspricht. Da Perlkies erst über die Tübbing verblasen werden kann und sich bei diesem Vorgang eine Böschung ausbildet, sind auch hier die Tübbing unmittelbar hinter dem Schildschwanz in der Firste ungebettet.

Beim Boßlertunnel hatte dieser Nachteil aufgrund der Tragfähigkeit des anstehenden Gebirges keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Tunnels. Bei einem stärker geklüfteten Gebirge mit geringerer Festigkeit, kann eine solche mangelhafte Bettung jedoch zu Schäden beispielsweise in Form von Ovalisierungen und Fugenversätzen führen (vgl. z.B. NBS Genova–Ventimiglia [5, 11, 14]).

Beim Vortrieb der Weströhre wurde die Ringspaltverfüllung umgestellt. Hier wurde eine Nachverpressung bereits im Bereich des Nachläufers vorgenommen. Auch bei dieser Vorgehensweise kann man jedoch nicht von einer vollständigen Verfüllung des Ringspalt im Bereich des Schildschwanzes ausgehen.



If the strength on the vertical joints is low and only small horizontal stresses act in the transverse direction of the tunnel, then no arch can form in the rock mass around the tunnel. In this case, a rock wedge may form above the roof of the tunnel, which loads the tunnel in vertical direction (Fig. 14). Figures 15 and 16 show the result of a parametric study for segmental rings located immediately behind the shield, in the area of which the annular gap mortar is still soft (cf. Fig. 4 + 5). The modulus of elasticity of the annular gap mortar was assumed to be correspondingly low at  $E = 3 \text{ MPa}$ . Furthermore, a small strength on the bedding-parallel discontinuities was simulated. The strength on the vertical joints was assumed to be small in case 1 and higher in case 2. As

**14** Missing arching effect in densely bedded and vertically jointed sedimentary rock

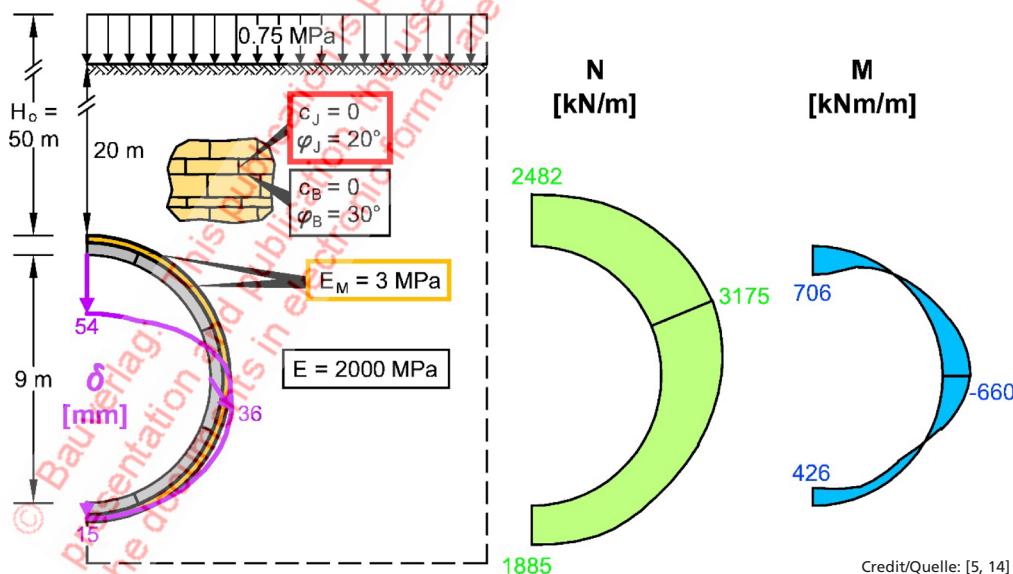
Fehlende Gewölbewirkung in eng geschichteten und vertikal geklüfteten Sedimentgesteinen

Das bedeutet, dass dieser Bikomponentenmörtel in solchen Fällen nicht geeignet ist, in denen der Spalt offen bleibt und sich nicht gegen den Ringspalt abdichten lässt.

Langzeituntersuchungen des Bikomponentenmörtels haben darüber hinaus ergeben, dass dieser gegen sulfathaltige Wasser nicht beständig ist [12].

**3.4 Besonderheiten in Sedimentgesteinen, insbesondere im Buntsandstein**

Im Buntsandstein, wie in vielen Sedimentgesteinen, besteht das Trennflächengefüge in der Regel aus durchgehenden annähernd horizontalen Bankungsfugen mit geringer Festigkeit sowie vertikalen Klüften, die an den Bankungsfugen absetzen und verschiedene Festigkeiten aufweisen. Wenn die Festigkeiten auf den vertikalen Klüften gering sind und nur kleine horizontale Spannungen in Querrichtung des Tunnels wirken, dann kann sich kein Gewölbe im Fels oberhalb des Tunnels ausbilden. In diesem Fall kann sich über der Firste des Tunnels ein Felskeil ausbilden, der den Tunnel vertikal belastet (Bild 14). Bild 15 und Bild 16 zeigen das Ergebnis einer Parameterstudie für unmittelbar hinter dem Schild liegende Tübbingringe, in deren Bereich der Ringspaltmörtel noch weich ist (vgl. Bild 4 + 5). Der E-Modul des Ringspaltmörtels wurde mit  $E = 3 \text{ MPa}$  entsprechend gering angenommen. Ebenso wurde eine kleine Festigkeit auf den Schichtfugen simuliert. Die Festigkeit auf den Klüften wurde im Fall 1 gering angenommen, im Fall 2 höher. Erwartungsgemäß ist im Fall 2, in dem sich ein Gewölbe im Fels ausbilden kann, die Belastung des Tübbingrings



**15** Case study, case 1, fresh mortar and small strength on joints (rock wedge above roof)

Fallstudie, Fall 1, frischer Mörtel und geringe Festigkeit auf Klüften (Felskeil Firste)

expected, in case 2, where an arch can form in the rock mass around the tunnel, the loading of the segmental ring is significantly smaller (Fig. 16) than in case 1, where it must be assumed that the segmental ring is loaded by a rock wedge in the roof area (Fig. 15).

In the case of the Bunter formation (Buntsandstein), there is also often a frequent alternation of rock masses with different permeabilities – such that in the area of the tunnel cross-section there are both, more permeable layers, which allow for consolidation of the annular gap mortar, and more impermeable layers, in which no consolidation is possible (Fig. 17). In the zones of the tunnel cross-section where consolidation is not possible, the annular gap mortar sets significantly slower than in the areas where consolidation is possible due to greater permeability. The setting process is also slow compared with the advance of TBM heading. This results in different bedding of the segmental ring in different cross-sectional areas. If, in addition, as described above, rock wedges in the roof area lead to a vertical load on the tunnel in this area, the segmental ring is subjected to very unfavorable stresses. These cases require a separate consideration.

#### 4 Conclusions

On the basis of some examples from the practice of TBM tunnelling, various aspects were discussed which are of importance with regard to the properties and the use of annular gap filling materials.

With the example of the tunnel for the Red Line in Tel Aviv, it was shown that conventional cement-based annular gap mortar is suitable as an annular gap filling material for both – coarse-grained, permeable soils and soils with small permeability. In the case of higher permeability, the grouting pressure leads to a dewatering and

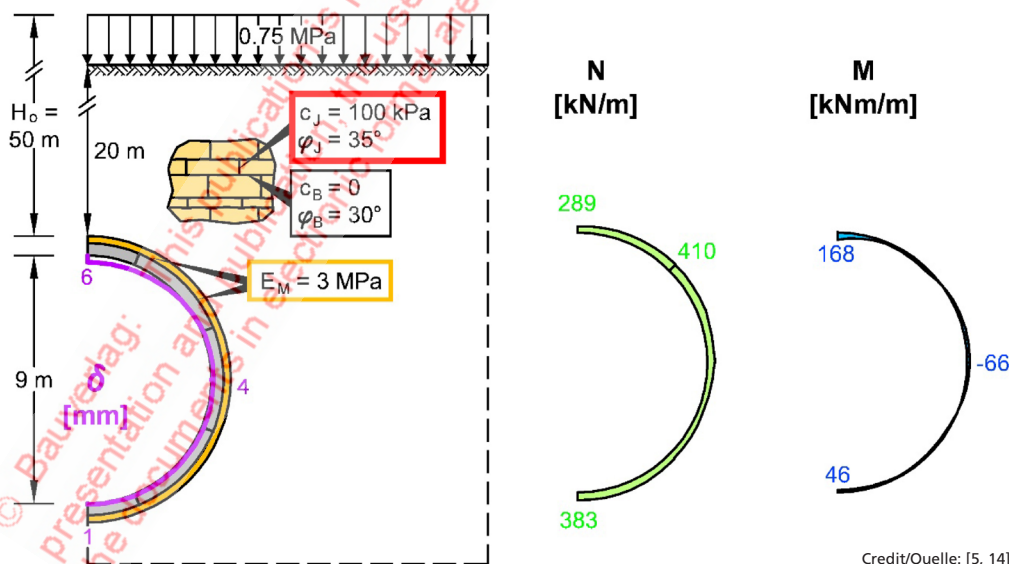
deutlich geringer (Bild 16) als im Fall 1, in dem man davon ausgehen muss, dass der Tübbingring von einem Felskeil belastet wird (Bild 15).

Im Falle des Buntsandsteins liegt darüber hinaus häufig eine engere Wechselfolge von Gesteinen unterschiedlicher Durchlässigkeiten vor – derart, dass im Bereich des Tunnelquerschnitts sowohl durchlässigere Schichten, die eine Konsolidation des Ringspaltmörtels ermöglichen, anstehen als auch undurchlässigere Schichten, in denen keine Konsolidation möglich ist (Bild 17). In den Zonen des Tunnelquerschnitts, in denen keine Konsolidation möglich ist, bindet der Ringspaltmörtel deutlich langsamer ab als in den Bereichen, in denen aufgrund größerer Durchlässigkeiten eine Konsolidation möglich ist. Auch ist der Abbindevorgang im Vergleich zum Vortrieb langsam. Dadurch kommt es zu unterschiedlicher Bettung des Tübbingrings in verschiedenen Querschnittsbereichen. Wenn sich darüber hinaus, wie oben beschrieben, das Gebirge im Firstbereich auflagt und zu einer Firstauflast führt, wird der Tübbingring sehr ungünstig beansprucht. Diese Fälle erfordern eine gesonderte Betrachtung.

#### 4 Schlussfolgerungen

Anhand einiger Beispiele aus der Praxis des maschinellen Tunnelbaus wurden Aspekte aufgezeigt, die im Hinblick auf die Eigenschaften und den Einsatz von Ringspaltverfüllmaterialien von Bedeutung sind.

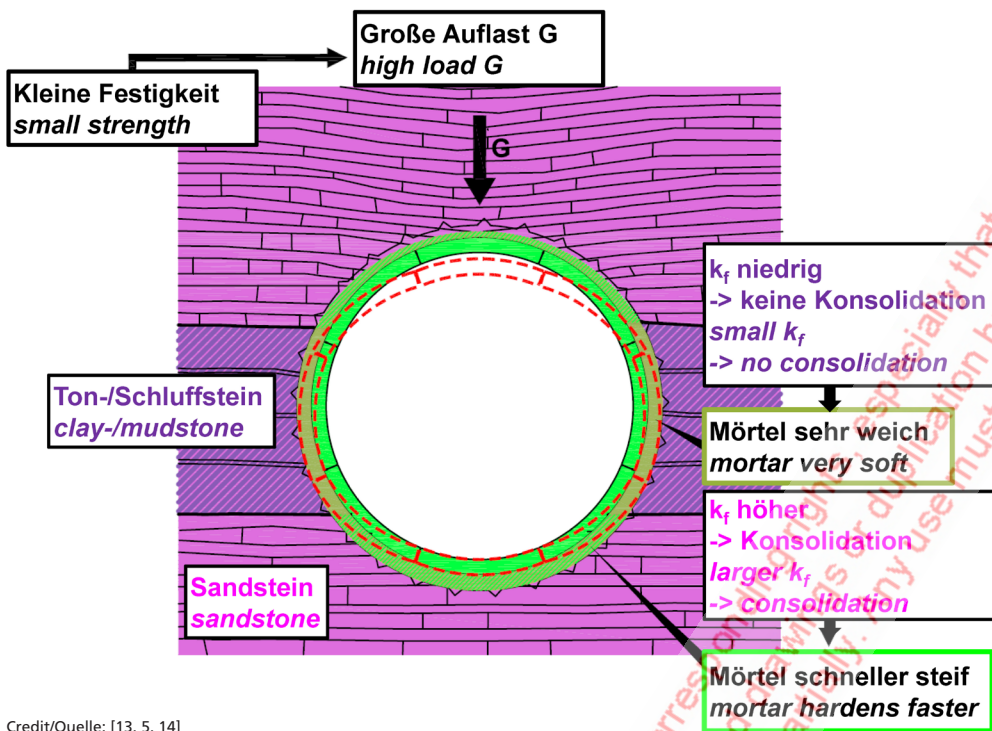
Mit dem Beispiel der Tunnel für die Red Line in Tel Aviv wurde gezeigt, dass konventioneller Ringspaltmörtel auf Zementbasis sich sowohl bei grobkörnigen, wasserdurchlässigen Böden als auch bei gering durchlässigen Böden als Ringspaltverfüllmaterial eignet. Im ersten Fall erfolgt aufgrund des Verfülldrucks eine Entwässerung bzw. Konsolidierung und Verfestigung des Mörtels im frühen Zustand, während im zweiten Fall der



16 Case study, case 2, fresh mortar and higher strength on joints (no rock wedge above roof)  
Fallstudie, Fall 2, frischer Mörtel und höhere Festigkeit auf Klüften (kein Felskeil Firste)

Credit/Quelle: [5, 14]





17 Alternating sequence of layers with high and low permeability, possibly in combination with rock wedge above roof, effect on annular gap grout and bedding of segmental ring

Wechsellagerung von Schichten hoher und niedriger Durchlässigkeit, ggf. in Kombination mit Firstlast, Auswirkung auf Ringspaltverfüllung und Bettung des Tübbingrings

Credit/Quelle: [13, 5, 14]

consolidation of the mortar in the early state. In the case of low permeability, the liquid, incompressible mortar stabilizes the segmental rings until the mortar begins to set. This experience was confirmed in the sandstones and claystones of the upper sections of the Filder tunnel. A cement-based annular gap mortar with the appropriate composition can thus also be used in subsoils with small permeability. However, separate investigations are required in the case of alternating layers with different permeability located within the cross-sectional area of the tunnel, and also in sedimentary rock masses with low strengths on bedding-parallel discontinuities and joints.

The example of the Hallandsås Tunnel shows that a high groundwater level in combination with greater permeabilities of the rock mass and a steering gap that remains more or less open, can lead to a washing-out of the fresh mortar in the direction of the temporary face when driving in open mode or with small support pressures.

A bi-component mortar of the type used in the Bossler Tunnel would be suitable mainly in soil or in conditions where the steering gap is closed by the ground moving down to the shield. In such a case, the pressures required to backfill the annular gap up to the tunnel roof can be applied without running the risk that the mortar, which is still liquid, flows off to the temporary face, which would result in the necessity of postgrouting.

A special problem arises in the case of swelling rock, where water ingress from the annular gap mortar into the rock mass must be avoided.

flüssige, inkompressible Mörtel die Tübbingringe bis zum Erstarrungsbeginn des Mörtels stabilisiert. Diese Erfahrung wurde in den Sand- und Tonsteinen des oberen Fildertunnels bestätigt. Ein zementbasierter Ringspaltmörtel ist damit bei entsprechender Zusammensetzung auch bei gering durchlässigem Baugrund einsetzbar.

Gesonderte Untersuchungen sind jedoch im Falle von Wechsellagerungen mit unterschiedlich durchlässigen Schichten im Querschnittsbereich des Tunnels sowie auch in Sedimentgesteinen mit geringen Festigkeiten auf Schichtfugen und Klüften erforderlich.

Am Beispiel des Hallandsåstunnels wird deutlich, dass ein hoher Grundwasserstand bei einem Vortrieb im offenen Modus oder mit geringem Stützdruck bei größerer Wasserdurchlässigkeit eines Felses und weitgehend offenem Steuerspalt zu einem Auswaschen des frischen Mörtels in Richtung der Ortsbrust erfolgen kann.

Ein Bikomponentenmörtel der beim Boßlertunnel eingesetzten Art würde sich vorwiegend im Lockergestein bzw. in Verhältnissen eignen, bei denen der Steuerspalt durch Anlegen des Baugrunds geschlossen wird. In einem solchen Fall können die für eine Verfüllung des Ringspalts bis zur Tunnelrinne erforderlichen Drücke aufgebracht werden, ohne dass der noch flüssige Mörtel zur Ortsbrust abfließt und eine Nachverpressung erforderlich wird.

Eine besondere Problematik ergibt sich im Falle quellfähigen Gebirges, bei dem ein Wasserzutritt aus dem Ringspaltmörtel in das Gebirge zu vermeiden ist.

In summary, it can be stated that – due to the complexity as well as the importance of this issue – investigations and the selection of a suitable annular gap filling material should already be carried out in the planning phase. In this, the various influencing factors such as subsoil (load-bearing capacity, permeability), TBM (geometry, jacking forces, jacking modes), segmental lining, construction aspects (preparation and transport of grout, mode of grouting, grouting pressure, cleaning of grout lines), durability of the material as well as any special conditions must be considered in a realistic manner. This requires three-dimensional stress-strain and seepage flow calculations, which take into account the areas of the temporary face, the shield and the segmental ring as well as the surrounding rock mass.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Auswahl eines geeigneten Ringspaltverfüllmaterials aufgrund der Komplexität sowie der Bedeutung dieser Fragestellung schon in der Planungsphase erfolgen sollte. Dabei müssen die verschiedenen Einflüsse wie Baugrund (Tragfähigkeit/Durchlässigkeit), TBM (Geometrie, Vortriebspresenkräfte, Vortriebsmodi), Tübbingauskleidung, baubetriebliche Aspekte (Aufbereitung, Transport, Art der Verpressung, Mörtelverpressdruck, Reinigung), Langlebigkeit des Materials sowie etwaige Besonderheiten wirklichkeitsnah erfasst werden. Als Grundlage sollten dreidimensionale Standsicherheitsnachweise und Sickerströmungsberechnungen dienen, mit denen die Bereiche der Ortsbrust, des Vortriebschildes und des Tübbingrings sowie des umgebenden Gebirges erfasst werden.

## REFERENCES/LITERATUR

- [1] Wittke, M.; Wittke, W.; Ashkenazi, S.; Gang, J.: Entwurf der Tunnel für die Red Line der Stadtbahn von Tel Aviv, Israel. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.
- [2] Wittke-Gattermann, P.; Wittke, M.; Teboulle, N.; Aimin, J.: Red Line, Tel Aviv, Eastern Section – Einfluss der Eigenschaften des Ringspaltmörtels auf die Bemessung der Tübbingauskleidung. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2017. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.
- [3] Berner, T.; Bayer, L.: Verwendung eines phosphathaltigen Mörtels im anhydrithaltigen Gebirge im Fildertunnel. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 07.06.2017. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. WBI-PRINT 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2003. ISBN: 3-7739-1313-3.
- [7] Lundman, P.; Rosell, K.; Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.: Railway Tunnel Hallandsås, Sweden: Technical Problems, Reasons for Increase of Costs and Construction Time (viewpoint of the client). STUVA Tagung 2009, Hamburg, 1. bis 3. Dezember 2009, Forschung + Praxis, Heft 43, STUVA Köln, 2009.
- [8] WBI: Tunnel Hallandsås, Blocky ground and overbreak in good rock classes, inflow of seepage water – statement of problem, qualitative and quantitative evaluation on the basis of tender and contract documents, measures for improvement. Various Reports. Aachen in 2007 and 2008.
- [9] Wittke, W.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B.: TBM-Heading in rock, design of the shield mantle. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunneling (EURO:TUN 2007). J. Eberhardsteiner et al. (eds.). Vienna, Austria, August 27–29, 2007.
- [10] RWTH Aachen (University) - Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau: ABS/NBS Stuttgart–Augsburg, Laborversuche zur Eignung von Zementpasten für Einpressmaßnahmen in durchströmten Karstgebirge, Januar 1993.
- [11] Wittke-Schmitt, B.; Lorenzo Martin, F.: Entwurf von fünf maschinell aufgefahrenen Felstunneln der Bahnstrecke Genua–Ventimiglia, geotechnik 29(2), 179–184, 2006.
- [12] WBI: NBS Wendlingen-Ulm, PFA 2.2, Boßlertunnel, Gutachterliche Begleitung Bericht Nr. 07, Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Ringspaltmörtels für den TVM-Vortrieb, Untersuchungen zum Sulfatwiderstand des Ringspaltmörtels. November 2016. (unveröffentlichte Projektunterlagen)
- [13] WBI: Neuer Schlüchterner Tunnel, Hohlklingende Stellen (HKS) in Tübingen, Untersuchung Ursachen, Februar 2011. (unveröffentlichte Projektunterlagen)
- [14] Wittke, W.: Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein. Mining + geo 4, 634–638, 2012.
- [15] WBI: NBS Wendlingen-Ulm, PFA 2.2, Boßlertunnel, Gutachterliche Begleitung, Interne Projektunterlagen. (unveröffentlicht)