

# **Bemessung und Bewehrung der Stahlbetoninnenschalen im anhydrit-führenden Gebirge**

**Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann  
Dipl.-Ing. Andreas Boettcher**

## **Zusammenfassung**

Von den ca. 17 km im anhydritführenden Gipskeuper liegenden Tunnelabschnitten des Projekts Stuttgart 21 wurden zwischenzeitlich 76 % erfolgreich aufgeföhren. Als Folge des trockenen Vortriebs sind nur sehr geringe quellbedingte Hebungen von max. 1 - 2 cm aufgetreten.

Der unausgelaugte Gipskeuper ist im Projektbereich horizontal geschichtet und vertikal geklüftet. Bei Wasserzutritt geht der im Gestein enthaltene Anhydrit in Lösung und kristallisiert - falls er nicht mit dem Grundwasser abtransportiert wird - als Gips aus. Dieser Vorgang ist mit einer Volumenzunahme und/oder mit der Entwicklung großer Quelldrücke verbunden und muss bei der Bemessung der Stahlbetoninnenschalen der Tunnel berücksichtigt werden.

Das hierzu entwickelte felsmechanische Modell und das darauf aufbauende Berechnungsverfahren erfordert die Kenntnis einer größeren Anzahl von Kennwerten, von denen die Wasserdurchlässigkeit des Gebirges und die die Quelldrücke bestimmenden Parameter entscheidend sind. Außerdem ist es wichtig, die Höhenlage des während des Vortriebs abgesenkten Grundwasserspiegels nach der Herstellung der Innenschale und dem Verpressen der Baudränage zu berücksichtigen.

In dem Beitrag werden 3 charakteristische Fälle untersucht. Steht der Anhydritspiegel deutlich oberhalb des Tunnels an, so gilt es nur, die Längsläufigkeit des Grundwassers mit Hilfe von Abdichtungsbauwerken zu unterbinden. In diesem Fall treten keine Quelldrücke auf.

Steht der Anhydritspiegel in Höhe der Tunnelsohle an, so muss man außer dem Quelldruck insbesondere quellbedingte Hebungen befürchten und dagegen Maßnahmen ergreifen.

Starke Bewehrungen werden erforderlich, wenn der Anhydritspiegel in Höhe des Tunnelquerschnitts ansteht.

Zur Vorbereitung des Baus wurde deshalb ein Problock ausgeführt, über den ebenfalls berichtet wird.

Ein Ausblick auf die erforderliche Bauzeit wird abschließend gegeben.

## 1. Veranlassung

Ungefähr 17 km der Tunnel des Projekts im Stadtgebiet von Stuttgart liegen im anhydritführenden Gipskeuper.

In Bild 1 sind diese Tunnelabschnitte für die Tunnel nach Unter- und Obertürkheim, nach Feuerbach und Bad Cannstatt rot gekennzeichnet. In diesen Tunneln sind alle im anhydritführenden Gebirge liegenden Tunnelstrecken erfolgreich aufgefahren. Im hier nicht dargestellten Fildertunnel fehlen noch 47 % der anhydritführenden Abschnitte, die mit einer TBM aufgefahren werden.

Quellbedingte Hebungen konnten auf 1 - 2 cm begrenzt werden, weil es gelang, die Röhren ohne Einsatz von Brauchwasser trocken aufzufahren.

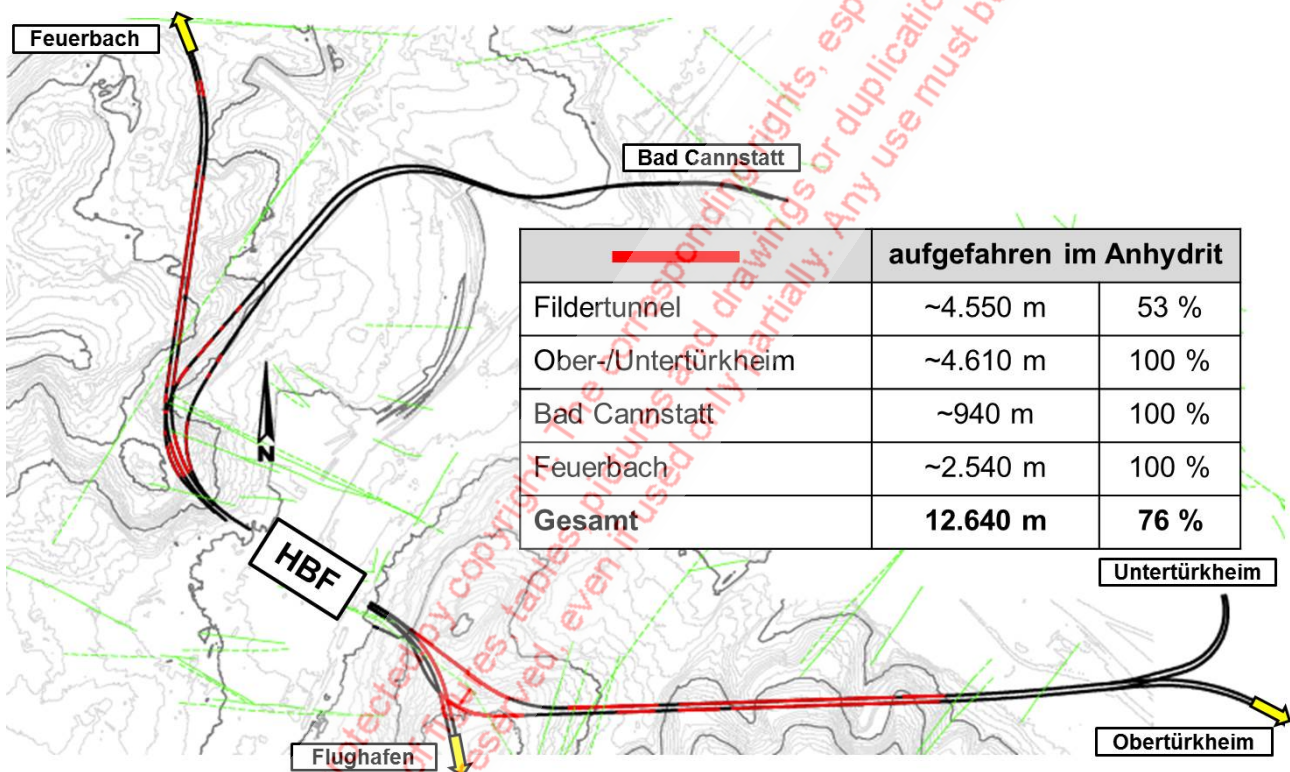


Bild 1: Stuttgart 21, Tunnel im Anhydrit (Stand 01.06.2018)

## 2. Grundlagen

Der Gipskeuper tritt im Stuttgarter Baugrund in drei Erscheinungsformen auf (Witke 2015).

Im Ausgangszustand handelt es sich um Tonsteine, in die Anhydrit ( $\text{Ca-SO}_4$ ) in Lagen und fein verteilter Form eingelagert ist (Bild 2).

Daneben tritt das in den Tonsteinen eingelagerte Sulfat auch als Gips ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) auf. Eine Umwandlung von Anhydrit in Gips erfolgt, wenn der Anhydrit in Lösung geht und an Ort und Stelle wieder als Gips auskristallisiert. Dieser Prozess ist - wenn das Wasser

von außen zugeführt wird - mit einer Volumenvergrößerung von 61 % verbunden und - wenn man diese nicht verhindert - mit großen Quelldrücken verbunden. Dieser Vorgang hat im Tunnelbau in der Vergangenheit zu vielen Schäden geführt.

Bei direktem Kontakt des Gesteins mit dem strömenden Grundwasser geht das Sulfat in Lösung und wird abtransportiert. Daraus entsteht ein sogenanntes Residualgestein, der ausgelaugte Gipskeuper, der die Eigenschaften eines Lockergesteins aufweist (Bild 2).

Die Wasserdurchlässigkeit des unausgelaugten Gipskeupers ist sehr gering, während das Residualgestein, der sogenannte ausgelaugte Gipskeuper, die Wasserdurchlässigkeit eines Schluffs aufweist (Bild 2). An der Übergangszone vom unausgelaugten zum ausgelaugten Gipskeuper tritt eine durch die Lösung bzw. Auslaugung bedingte, stark wasser-durchlässige Zone, die sogenannte Auslaugungsfront, auf (Bild 2).

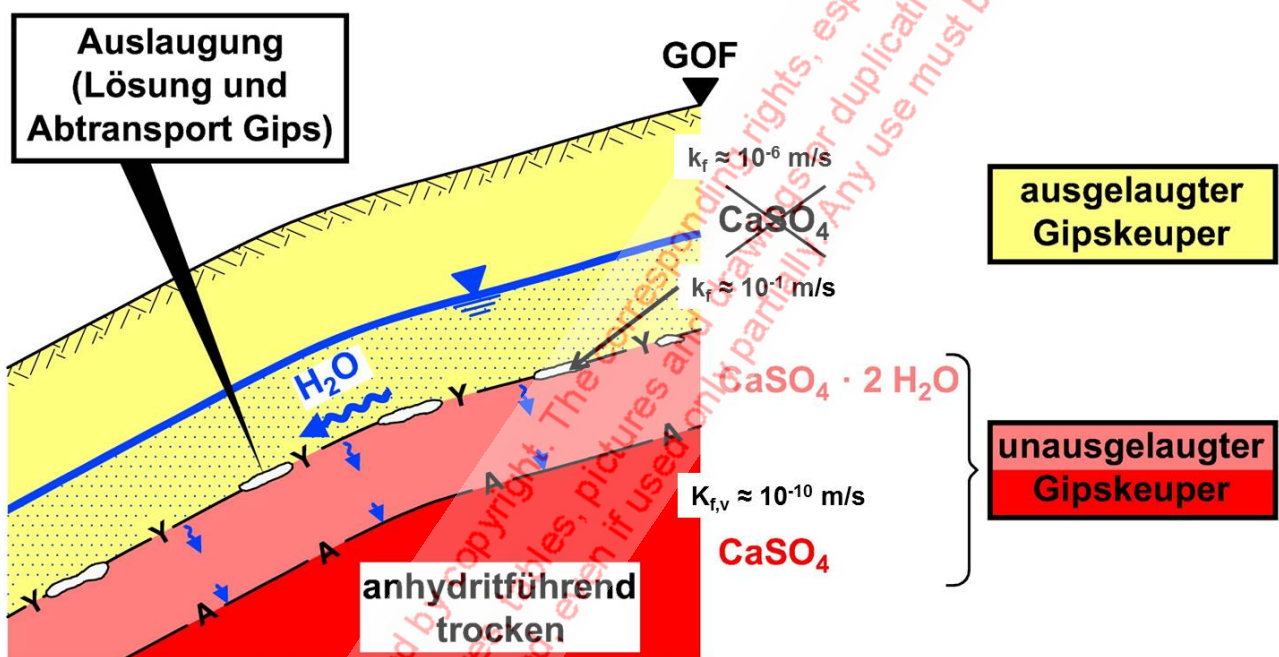


Bild 2: Gipskeuper - unausgelaugt und ausgelaugt

### 3. Baugrund und Grundwasser

Der unausgelaugte Gipskeuper im Stuttgarter Raum ist horizontal geschichtet und vertikal geklüftet. Die Schichtfugen weisen in der Regel eine große Erstreckung auf, während die Klüfte häufiger an den Schichtfugen absetzen. Dementsprechend lassen sich die Trennflächen durch das in Bild 3 dargestellte Gefügemodell darstellen. In Rot ist der Tonstein dargestellt, während das Sulfat in gelber Farbe abgebildet ist (Bild 3).

Standortsicherheitsuntersuchungen in anhydritführendem, unausgelaugtem Gipskeuper werden unter Berücksichtigung der parallel zu den Schichtfugen und Klüften im Vergleich zum Gestein abgeminderten Scherfestigkeit auf der Grundlage des "Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)" durchgeführt (Wittke 2014).

Zur Berücksichtigung der quellbedingten Beanspruchungen bei der Bemessung der Innenschale des Tunnels wurde das Modell um die rechnerische Ermittlung der Wasserzufuhr durch Sickerströmung in den Trennflächen (Wittke 2014) und Diffusion in das Gestein (Wittke 2003) erweitert. Außerdem wurde ein im Vergleich zum Ansatz von Huder-Amberg (Huder & Amberg 1970) erweitertes Quellgesetz berücksichtigt. Eine Kopplung des elastisch-viskoplastischen, anisotropen Spannungsdehnungsverhalten, der Sickerströmung in den Trennflächen, der Diffusion in den Gesteinen und der quellbedingten Spannungen und Dehnungen wurde in einem dreidimensionalen FE-Programm vorgenommen (Wittke 2003).

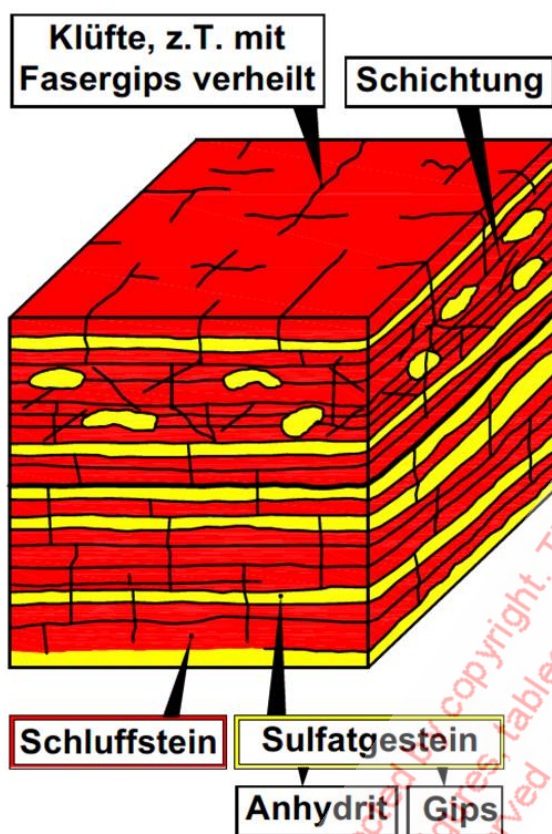


Bild 3: Unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell

Statische Berechnungen auf der Grundlage dieses Modells erfordern eine vergleichsweise große Zahl von Kennwerten, die in Bild 4 zusammengestellt sind. Diese wurden mit Hilfe von felsmechanischen Versuchen und durch Nachrechnungen von ausgeführten Bauwerken ermittelt (Wittke & Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017).

Die bislang durchgeführten statischen Berechnungen haben zu dem Ergebnis geführt, dass der bei vollständiger Vermeidung einer Dehnung auftretende maximale Quelldruck ( $\sigma_{q0}$ ) und die vertikale Wasserdurchlässigkeit des Gebirges ( $k_{f,v}$ ) den größten Einfluss auf die quellbedingten Beanspruchungen der Stahlbetoninnenschale des Tunnels haben (Bild 4).

Mit den vier Tunnelröhren nach Unter- und Obertürkheim wurde zwischenzeitlich der Neckar unterfahren (Bild 5). Die Firsten der beiden oben liegenden Tunnel der Achsen 61 nach Obertürkheim und 713 nach Untertürkheim haben in diesem Bereich einen Abstand vom Wasserspiegel des Neckars von 12,5 m.

### Elastisch-Viskoplastisch:

$$\begin{aligned} \gamma &= 25 \text{ kN/m}^3 \\ E &= 4.000 \text{ MN/m}^2 \\ \nu &= 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1ax} &= 20 - 30 \text{ MN/m}^2 \\ &\rightarrow \text{Gestein elastisch} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_k &= 50 - 500 \text{ kN/m}^2 \\ \varphi_k &= 35^\circ \\ c_s &= 0 - 200 \text{ kN/m}^2 \\ \varphi_s &= 30^\circ \end{aligned}$$

### Wasserzufuhr:

$$\begin{aligned} k_{f,h} &= 10^{-8} \text{ m/s} \\ k_{f,v} &= 10^{-10} \text{ m/s} \end{aligned}$$

(ohne Bochinger Horizont und Bleiglanzbank)

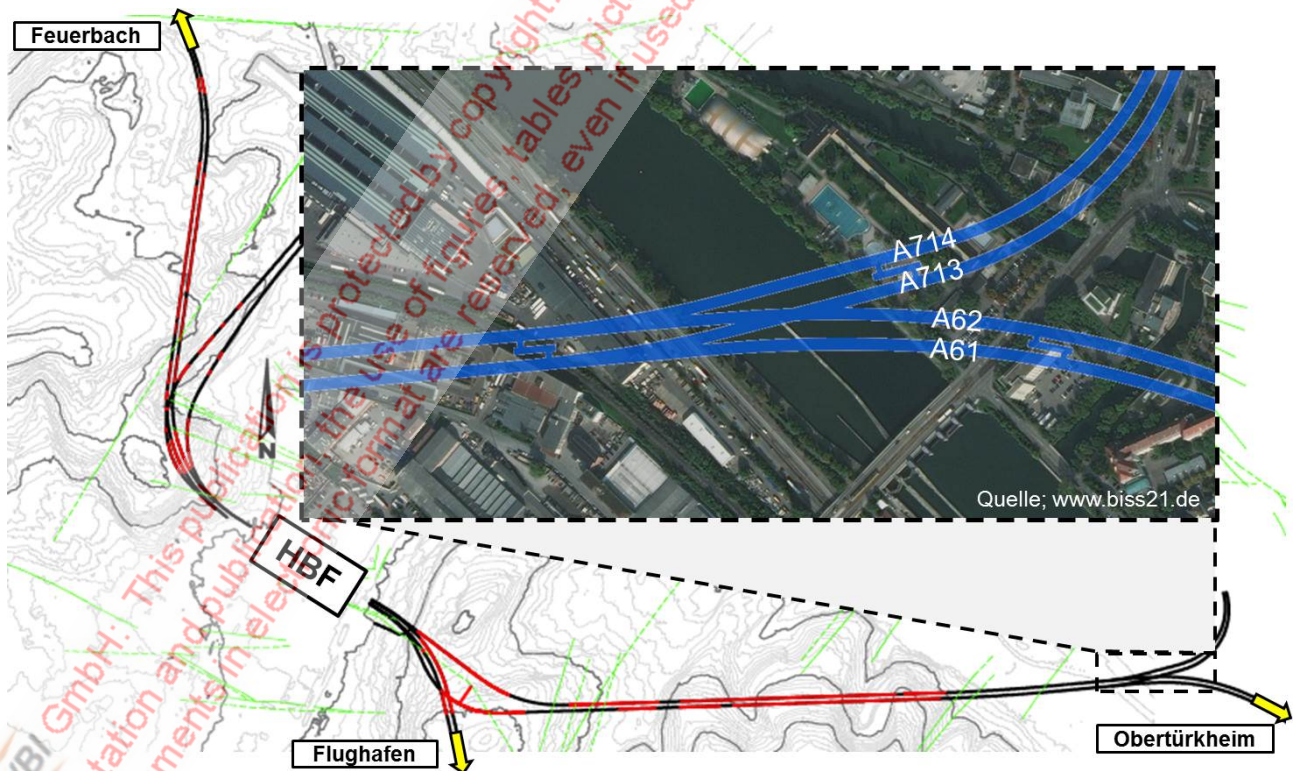
$$\begin{aligned} d_k &= 1,0 \text{ m} \\ d_s &= 0,1 \text{ m} \\ D &= 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

### Quellen:

$$\begin{aligned} K_q &= 0,2 \\ \sigma_{q0} (\omega=1) &= 9 \text{ MN/m}^2 \end{aligned}$$

(abhängig vom Anhydritanteil)

Bild 4: Zusammenstellung der Kennwerte



© Bild 5: Neckarunterfahrung (abgeschlossen im Mai 2018)

Die Dicke der Schicht aus unausgelaugtem Gipskeuper zwischen der Tunnelfirste und dem Lockergestein unterhalb des Neckarbetts beträgt 6,5 m. Das Gefälle des dadurch dem Tunnel zusickernden Wassers beträgt ca.  $i = 1$ . Eine einfache Berechnung zeigt, dass einem Tunnel bei einer Wasserdurchlässigkeit des Felses von  $10^{-8}$  m/s am Tag 1.500 l hätten zufließen müssen. Tatsächlich war der Tunnel aber beim Vortrieb trocken (Bild 6). Mit der Annahme eines Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von  $k_f = 10^{-10}$  m/s würden einem Tunnel ungefähr  $\Sigma Q \approx 15$  l/d zufließen. Eine solche Menge könnte u. U. verdunstet sein und würde den Tunnel trotzdem trocken aussehen lassen. Die Wasserdurchlässigkeit des ungestörten unausgelaugten Gipskeupers in vertikaler Richtung wird deshalb  $k_{f,v} \leq 10^{-10}$  m/s betragen.

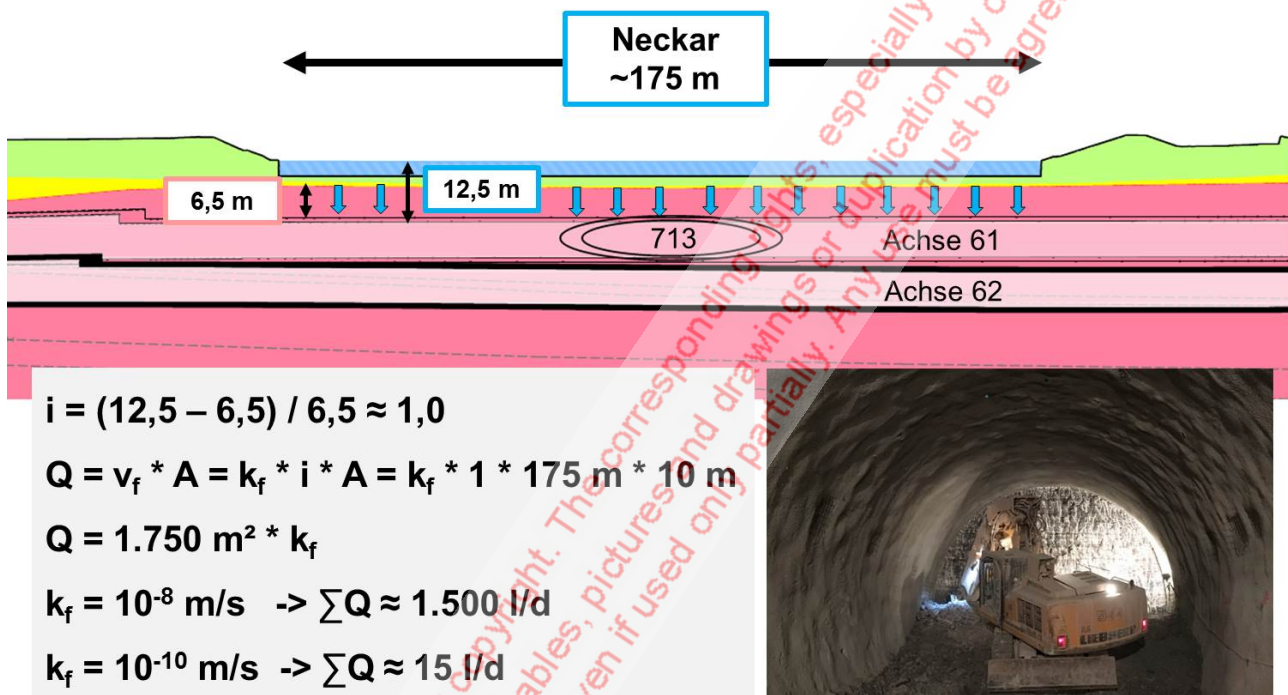


Bild 6: Unausgelaugter Gipskeuper, Abschätzung der vertikalen Durchlässigkeit

Eine räumliche Darstellung des Baugrundes im Bereich der vier an das Verzweigungsbauprodukt am neuen Hauptbahnhof anschließenden Tunnelröhren nach Bad Cannstatt und Feuerbach zeigt das Bild 7.

Man erkennt, dass der Vortrieb 3B nach Bad Cannstatt zunächst im unausgelaugten Gipskeuper verläuft. Dieser ist im Bereich des Tunnels sowohl anhydritführend als auch gipsführend (Linse 1). Danach verläuft die Tunnelröhre im ausgelaugten Gipskeuper, ehe sie mit der Linse 2 wieder den unausgelaugten Gipskeuper erreicht (Bild 7). In beiden Linsen erkennt man im Bild 7 auch ein violettes Band. Hier handelt es sich um den Bochinger Horizont, einen Leithorizont im Gipskeuper, der die Dunkelroten Mergel von den Grundgips-schichten trennt. Der Bochinger Horizont hat einen geringeren Sulfatanteil als die angrenzenden Schichten und besitzt eine größere Wasserdurchlässigkeit in horizontaler Richtung.

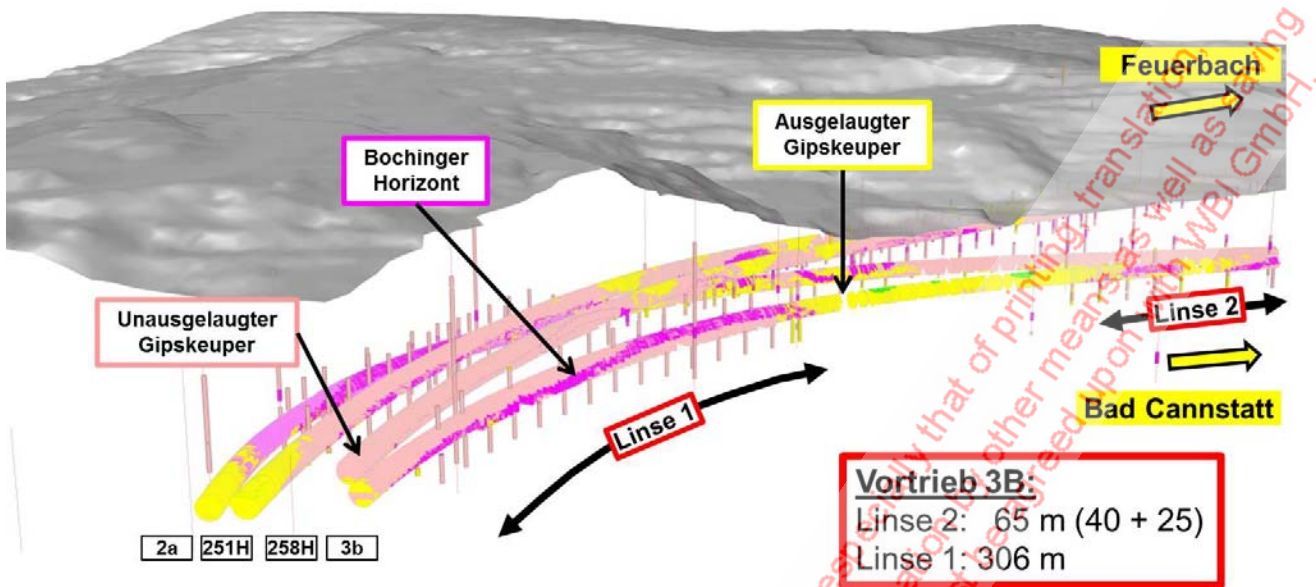


Bild 7: Schichtenfolge Vortriebe im PFA 1.5

Im Verlauf des Vortriebes der Tunnelröhren wird im Bereich des stärker durchlässigen ausgelaugten Gipskeupers der Grundwasserspiegel abgesenkt (Bild 8, oben). Nach dem Einbau der Stahlbetoninnenschale und dem Verpressen der Sohldränage steigt der Grundwasserspiegel wieder auf sein Ausgangsniveau an. Dieser Wasserspiegel muss bei den statischen Berechnungen und der Bemessung der Stahlbetoninnenschale des Tunnels berücksichtigt werden, weil erst dann das Quellen unter dem Einfluss des ständig wirkenden Grundwasserspiegels ausgelöst wird.

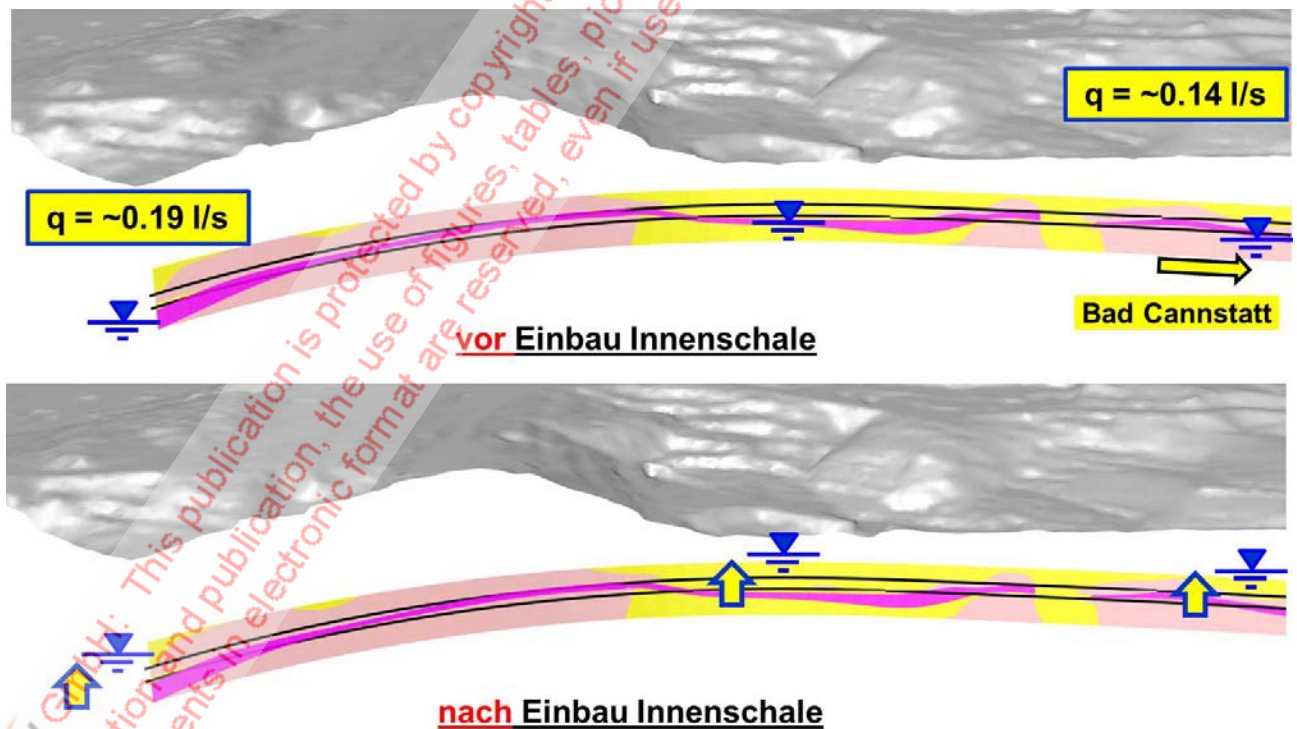


Bild 8: Vortrieb 3B, Schichtenfolge und Grundwasserverhältnisse

#### 4. Verformungen und Beanspruchung

Nachstehend werden die quellbedingten Verformungen und Beanspruchungen einer Stahlbetonninnenschale für drei charakteristische Fälle erläutert.

Liegen die Auslaugungsfront und der Anhydritspiegel deutlich oberhalb der Firste des Tunnels und hat auch unterhalb des Tunnels keine Auslaugung der Sulfate stattgefunden, so ist im Falle eines trockenen Vortriebs eine Wasserzufuhr im anhydritführenden Gestein quer zur Tunnelachse nicht möglich (Bild 9). Die Wasserdurchlässigkeit des ungestörten Gebirges ist dafür, wie oben ausgeführt, zu gering. In solchen Tunnelabschnitten, wie sie im Fildertunnel und in den Tunnelröhren nach Ober- und Untertürkheim vorkommen, kann das Grundwasser nur infolge einer Längsläufigkeit über die vortriebsbedingte Auflockerungszone zum anhydritführenden Gebirge gelangen. Unterbindet man diese mit Hilfe von Abdichtungsbauwerken an beiden Enden eines solchen Abschnitts, so sind keine Quelldrücke zu erwarten. Dementsprechend werden in diesen Abschnitten im Fildertunnel und in den Tunneln nach Ober- und Untertürkheim nur Schalendicken von 60 cm mit geringer Bewehrung ausgeführt (Bild 9). Auf der Wasserseite der Abdichtungsbauwerke werden die Innenschalen dagegen mit Schalendicken von 1 m hergestellt (Bild 9).

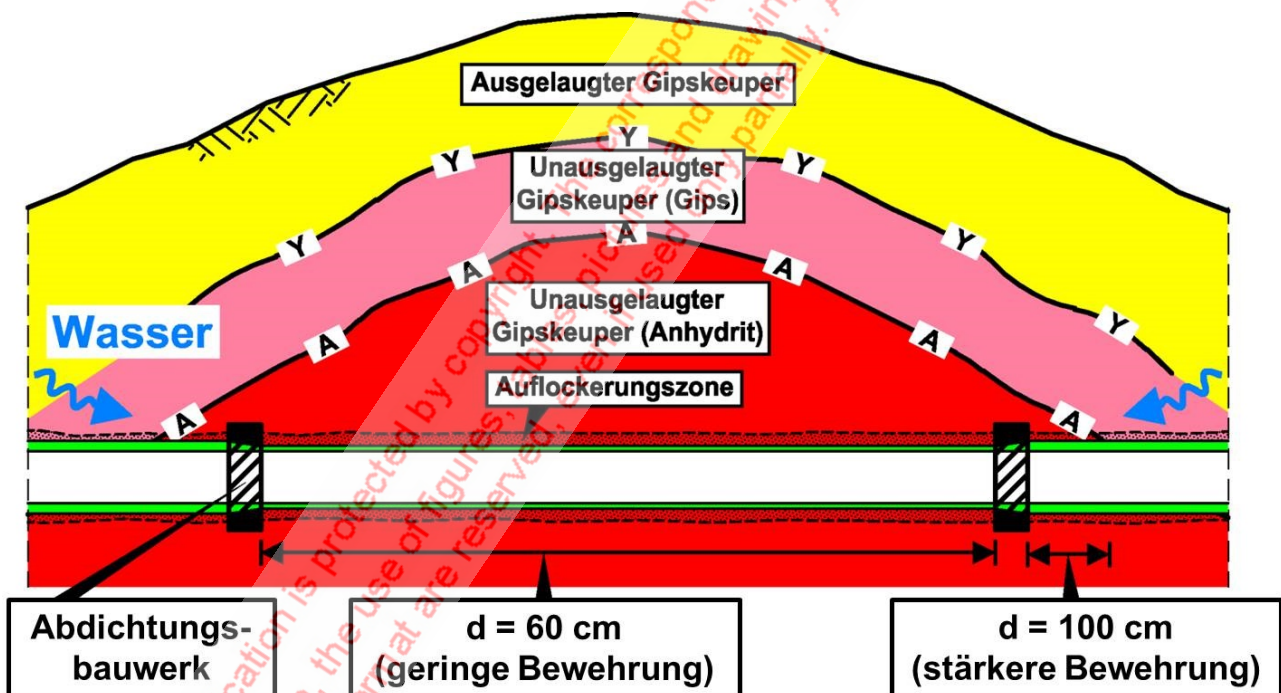


Bild 9: Fildertunnel und Tunnel nach Ober-/Untertürkheim

Im Bereich des im Bild 10 für den Vortrieb 3B nach Bad Cannstatt dargestellten Berechnungsquerschnitts BQ steht die Oberfläche des anhydritführenden Gebirges dagegen in Höhe der Tunnelsohle an (Bild 11, linkes Bild). Die wasserführende Auslaugungsfront liegt hier oberhalb der Tunnelfirste.

In Höhe des Querschnitts liegt der stärker durchlässige Bochinger Horizont, in dem auch mit einer gewissen Wasserführung gerechnet werden muss (Bild 11).



Die statischen Berechnungen haben hier zu einer Zone erhöhter vertikaler Durchlässigkeit geführt, in der für die vertikalen Klüfte Durchlässigkeitsbeiwerte bis zu  $10^{-3}$  m/s ermittelt wurden. Hierüber kann Wasser aus dem Bochinger Horizont bis zum anhydritführenden Fels vordringen und dort Quellvorgänge auslösen. Die mineralogischen Untersuchungen an Gesteinsproben, die beim Vortrieb und aus ergänzenden vertikalen Erkundungsbohrungen entnommen wurden, haben ergeben, dass 50 % des im Gestein enthaltenen Sulfatanteils aus Anhydrit bestehen. Der maximal mögliche Quelldruck wurde in den Berechnungen dementsprechend zu  $\sigma_{q0} = 4,5$  MN/m<sup>2</sup> festgelegt.

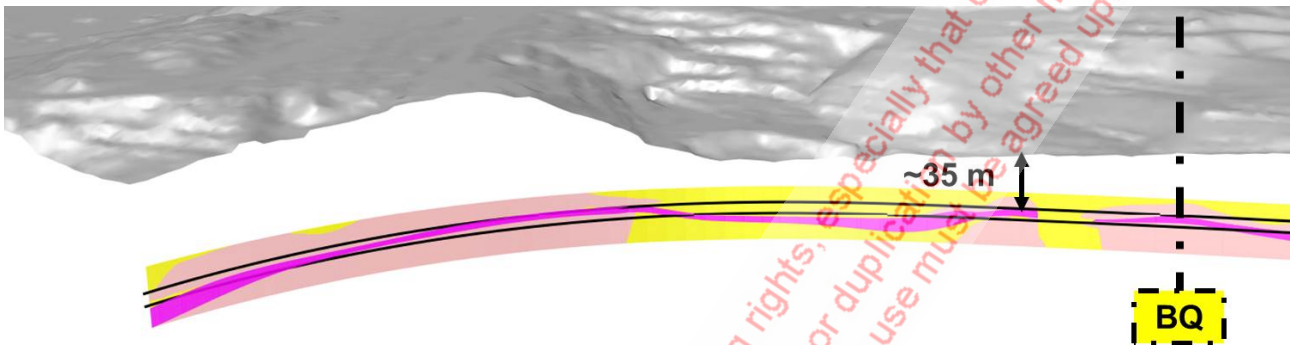


Bild 10: Tunnel im Übergangsbereich, Anhydritspiegel in Höhe der Sohle, Vortrieb 3B, Linse 2

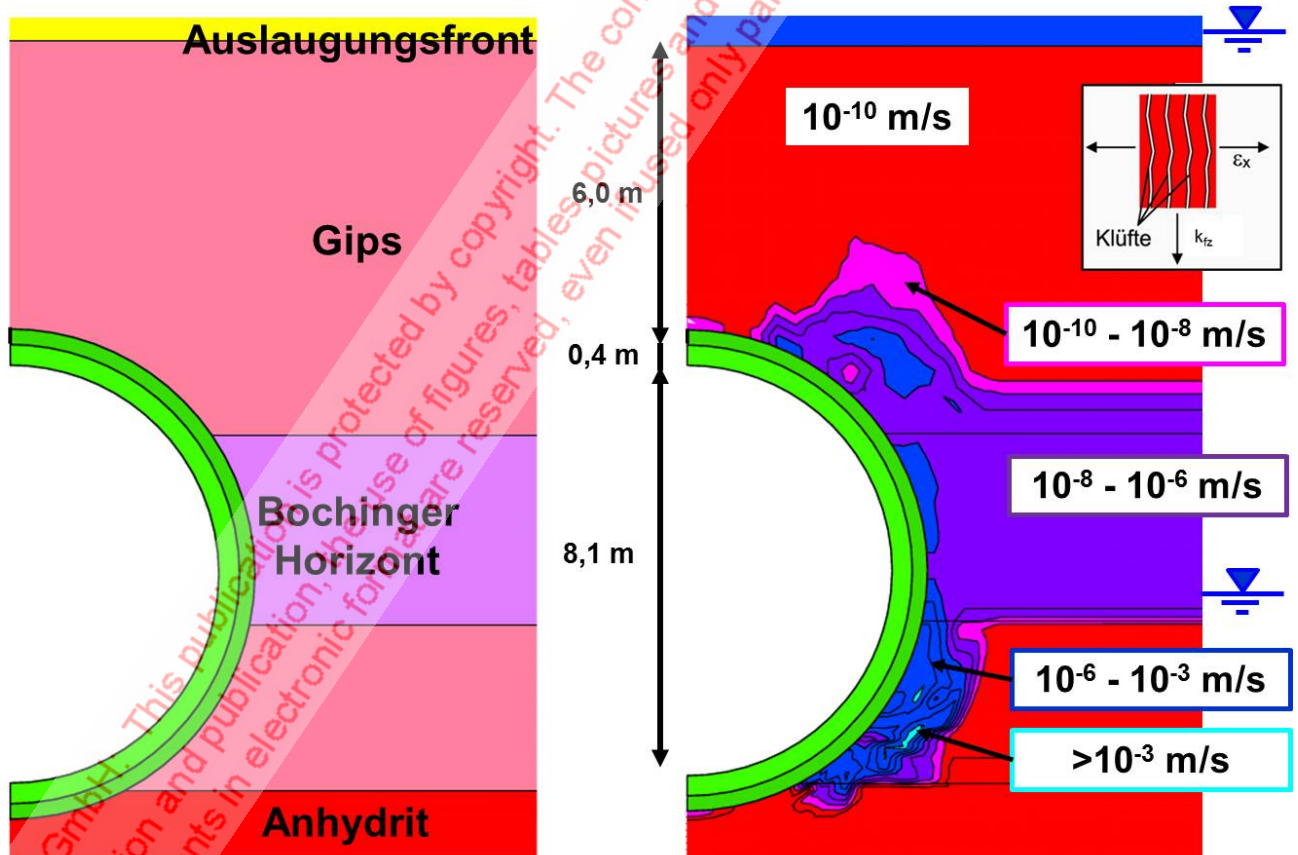


Bild 11: Vortrieb 3B, Linse 2, Kreisprofil, vertikale Durchlässigkeit nach Ausbruch und Sicherung

Als Folge der Verformungen der Stahlbetoninnenschale und des Untergrundes wird der daraus nach 100 Jahren resultierende, radiale Quelldruck auf die Innenschale auf  $p_r = 1,5 \text{ MN/m}^2$  reduziert. Dieser ist örtlich begrenzt und führt zu einer Biegezugspannung auf der Innenseite der 1 m dicken Stahlbetonschale von  $-5,0 \text{ MN/m}^2$ . Eine weitere Folge der Quelldrücke ist eine Hebung der Tunnelröhre und des darüber liegenden Gebirges, die nach 100 Jahren in Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen und Maßnahmen bis zu wenigen cm betragen kann (Bild 12).

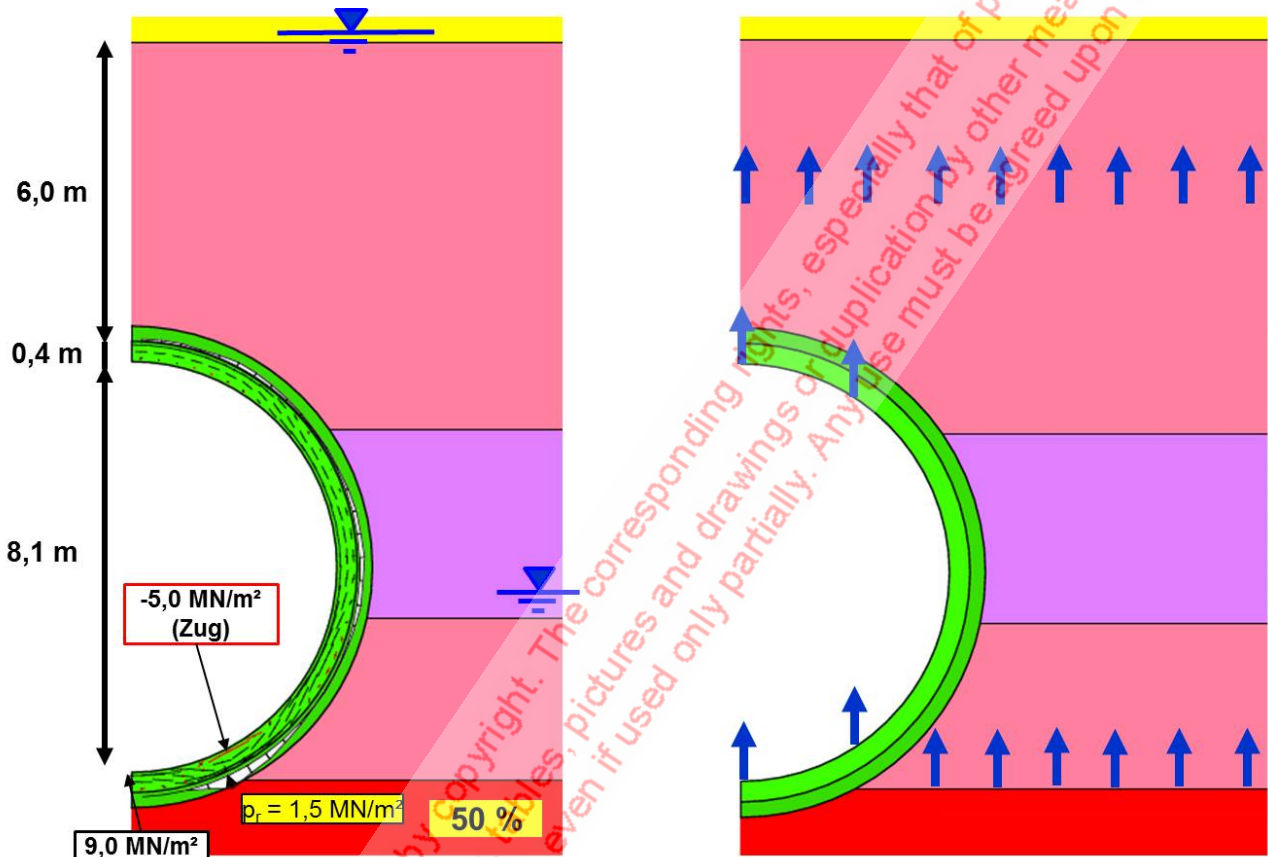


Bild 12: Vortrieb 3B, Linse 2, Kreisprofil, Beanspruchung und Hebungen (Fall V3B-I40JN)

Zur Begrenzung quellbedingter Hebungen wurde in der Regel anstelle des Kreisprofils ein U-Profil ausgeführt. Damit wird die Ausdehnung des Bereiches der vortriebsbedingten Auflockerung begrenzt, und der Zutritt des Wassers im quellfähigen Gebirge in Höhe der Sohle wird erschwert (Bild 13, Wittke 2017). Im hier betrachteten Fall hätte das Profil nachträglich aufgeweitet werden müssen.

Eine weitere Maßnahme ist die Abdichtung der Auflockerungszone mit Hilfe von Acrylatingelungen. Auch temporäre Dränagen über kurze, durch die Innenschale geführte Bohrungen helfen dabei, indem sie die Wasserzufuhr in den ersten Jahren begrenzen und damit zu einem langsameren Aufbau der Quelldrücke durch Selbstabdichtung des Gebirges führen (Bild 13).

In dem in Bild 14 gekennzeichneten Berechnungsquerschnitt, der im Bereich der Linse 1 des Vortriebs 3B liegt, steht anhydritführendes Gebirge in Höhe des Querschnitts an (Bilder 16, 17).

- Querschnittswahl, U-Profil
  - nachträgliche Aufweitung -> nicht ausgeführt
- Injektionen/Abdichtung im Bereich der Auflockerungszone
  - weniger Wasser -> weniger Quellen
- Temporäre Dränage
  - Verringerung der Wasserzufuhr in den ersten Jahren
  - Langsamer Aufbau Quelldruck
  - Selbstabdichtung
- Verbreiterung der Blockfugen

Bild 13: Maßnahmen zur Begrenzung/Beherrschung der Hebungen

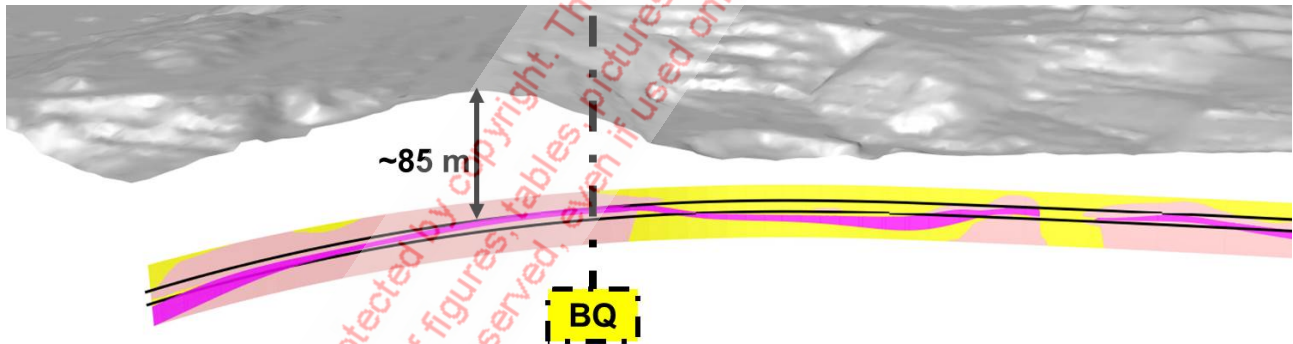


Bild 14: Tunnel im Übergangsbereich, Anhydritspiegel in Höhe der Sohle, Vortrieb 3B, Linse 2

Auch hier hat die Annahme der Größe von  $\sigma_{q0}$  einen großen Einfluss. Um die Schwierigkeiten deutlich zu machen, mit denen diese Annahme in vielen Fällen verbunden ist, sind in Bild 15 die an Proben gemessenen Anhydritgehalte aus Sulfatanteil der Gesteine über die Tunnelmeter aufgetragen. Man erkennt, dass die Anhydritgehalte der aus den Bereichen der Kalotte, der Strosse und der Sohle entnommenen Proben sehr stark streuen (Bild 15). Um diese Streuungen zu berücksichtigen, wurden in dem betrachteten Berechnungsbeispiel in Vergleichsberechnungen Anhydritgehalte von 50 % und 100 % und damit Werte von  $\sigma_{q0} = 4,5 \text{ MN/m}^2$  und  $9,0 \text{ MN/m}^2$  angenommen (Bild 16).

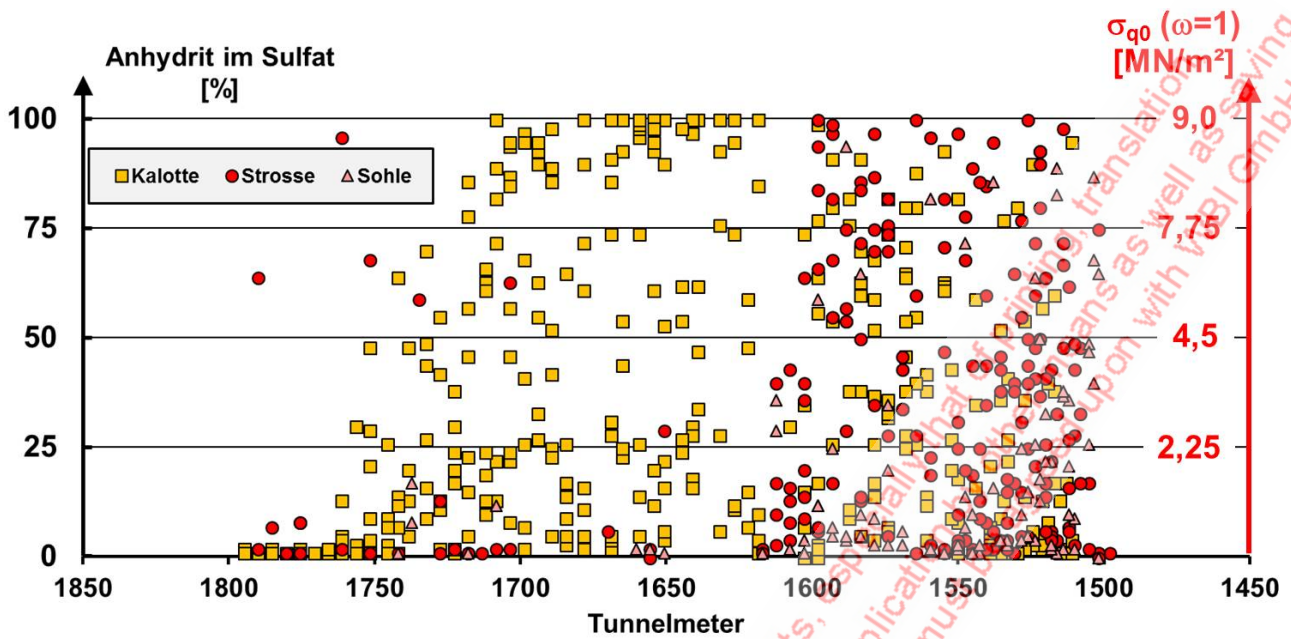


Bild 15: Vortrieb 3B, Linse 1: Anhydritanteil im Sulfatanteil, Proben aus der Ortsbrust

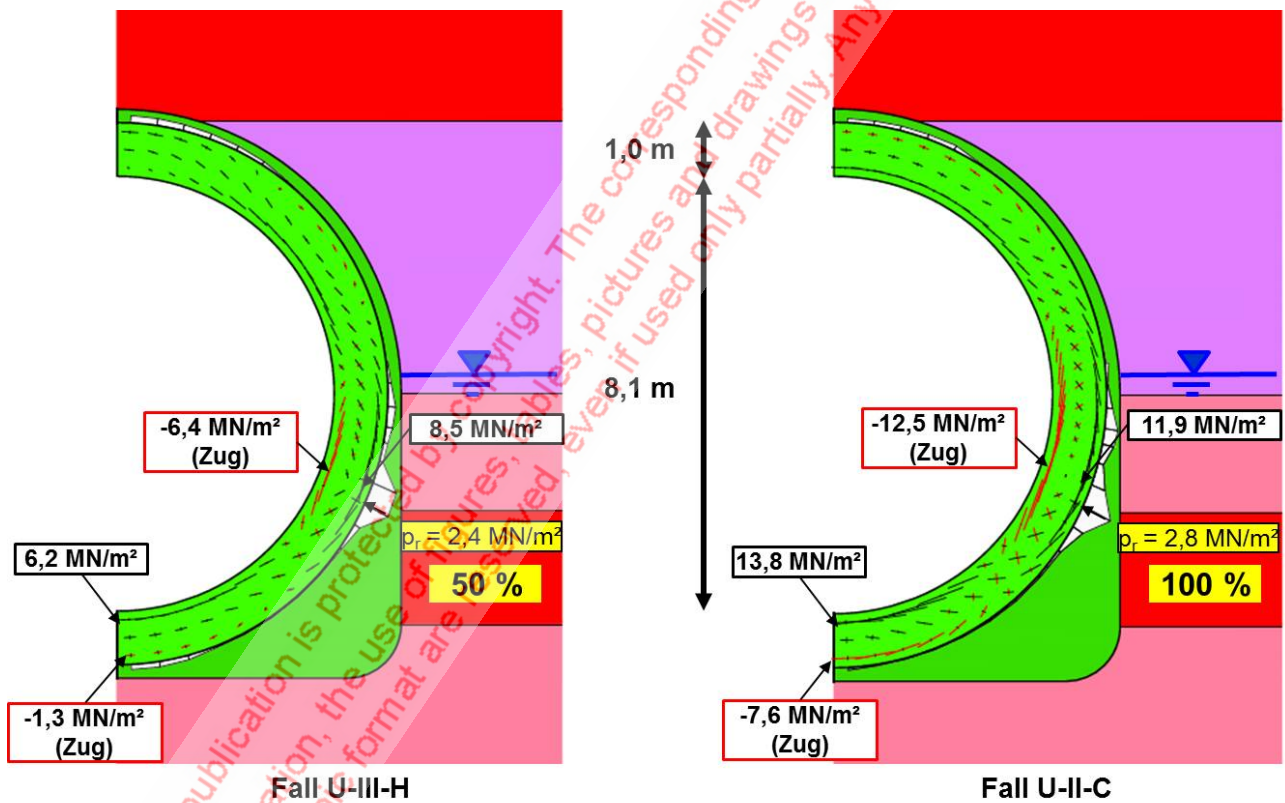


Bild 16: U-Profil, Anhydritspiegel im Bereich der Strosse, Beanspruchung der Innenschale, Einfluss Anhydritanteil

Grundwasser wurde innerhalb des im oberen Bereich des Tunnels liegenden Bochinger Horizonts angenommen.

Für das oberhalb der Firste anstehende, anhydritführende Gebirge ergab sich kein Quelldruck, weil die wasserführende Auslaugungsfront deutlich oberhalb des Querschnitts liegt

(Bild 16). Die infolge der Verformungen abgeminderten radialen Quelldrücke auf die Innenschale betragen  $p_r = 2,4 \text{ MN/m}^2$  und  $28 \text{ MN/m}^2$  (Bild 16). Diese führen zu tangentialen Zugspannungen auf der Innenseite der Stahlbetonschale von  $-6,4 \text{ MN/m}^2$  und von  $5 \text{ MN/m}^2$ .

Als Reaktion treten auf der Außenseite der Schale in Höhe der Sohle ebenfalls tangential Zugspannungen auf (Bild 16).

Untersucht man zum Vergleich noch einen Fall, bei dem der Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte ansteht, so treten die maximalen, tangentialen Zugspannungen in Höhe der Ulmen auf (Bild 17).

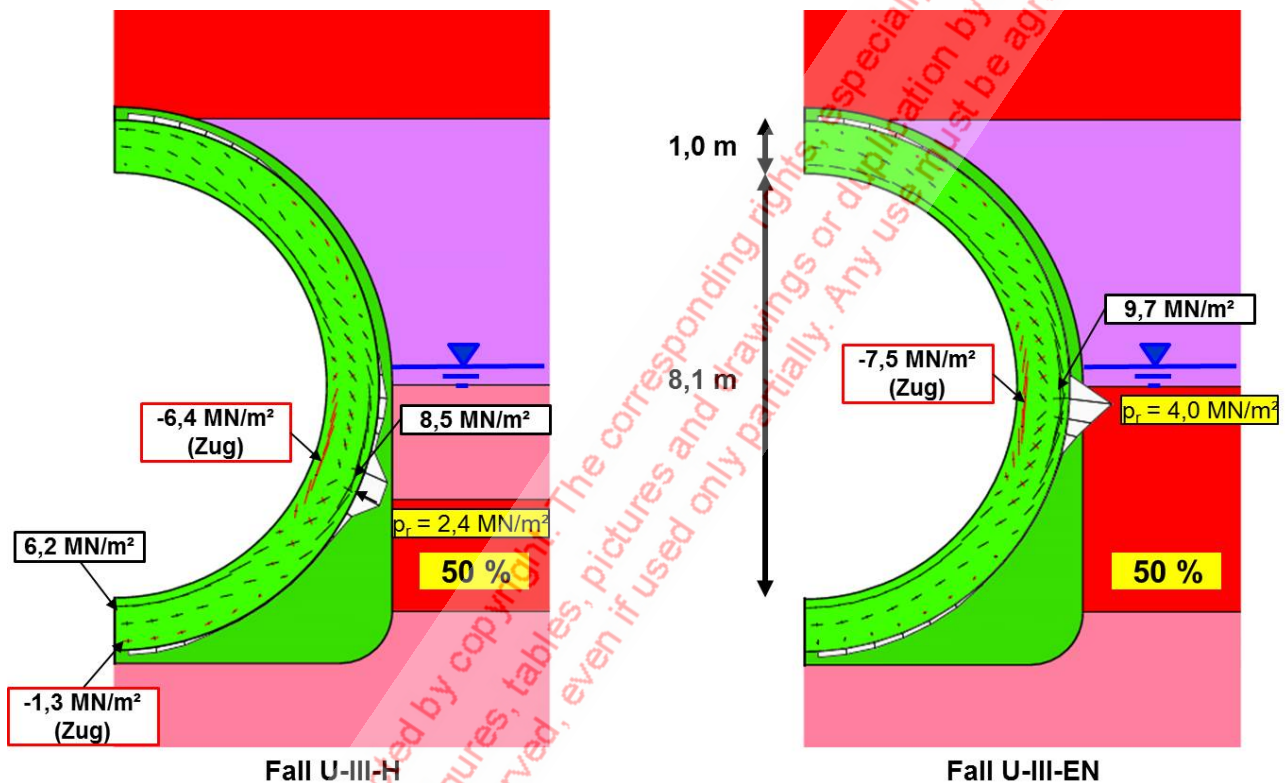


Bild 17: U-Profil, Beanspruchung der Innenschale, Einfluss Höhenlage Anhydritspiegel

## 5. Bewehrung

Die für den zuletzt genannten Fall resultierende Bewehrung ist in Bild 18 skizziert. Auf der Innenseite sind damit im Bereich der Ulme 3 Lagen Bewehrung mit einem Durchmesser von 25 mm in einem Abstand von 15 cm einzulegen. Die am Übergang in Richtung Firste und Sohle auftretenden geneigten Hauptzugspannungen erfordern die ebenfalls in Bild 18 skizzierte Schubbewehrung.

Da die Höhenlage des Anhydritspiegels in vielen Fällen in Längsrichtung des Tunnels schwankt, ist es meist erforderlich, die Bewehrung über einen größeren Bereich des Umfangs einzulegen.

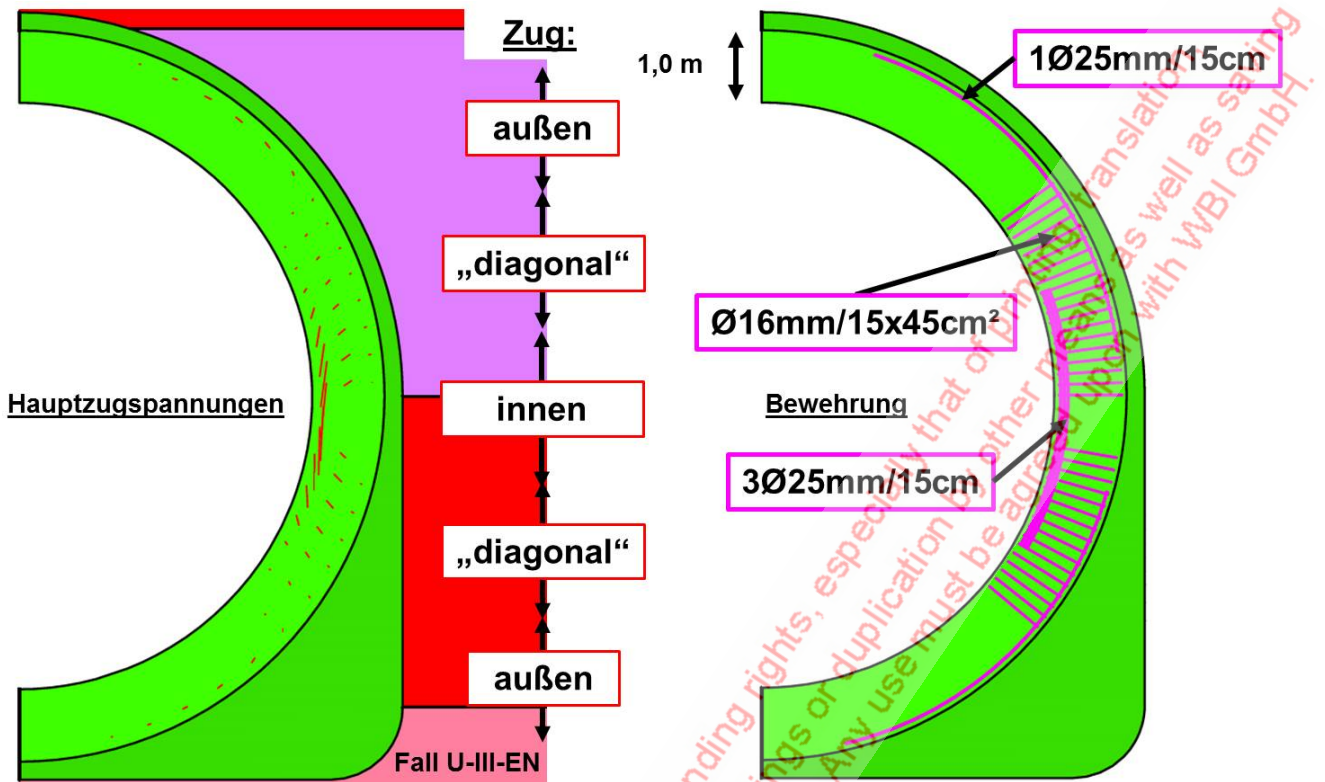


Bild 18: Hauptzugspannungen und Bewehrungsführung (Beispiel Fall U-III-EN)

## 6. Probekblock

Aufgrund der für eine Innenschale eher ungewöhnlichen, hohen und dichten Bewehrung entschloss sich die Arge Tunnel Cannstatt, einen Probekblock herzustellen (Bilder 19 und 20).

Hierbei sollten insbesondere die Bewehrungsführung und -verlegung sowie der Einbau des Betons untersucht werden.

Für den Nachweis der Eignungsprüfung wurden insgesamt 7 Bohrkern entnommen und im Labor untersucht.

Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Verarbeitbarkeit
  - Ausbreitmaß von 580 mm.
2. Bauteiltemperatur
  - Sehr geringe Hydratationswärmeentwicklung.
  - Geringe Temperaturdifferenz von weniger als 10 K zwischen Kern und Bauteilaußenseite.

### 3. Ausführungsqualität

- Bis ca. 2,0 m Höhe ein erhöhter Porenanteil erkennbar.
- Ab 2,0 m Höhe nahezu keine kleineren Poren vorhanden.
- Rüttelzeiten von 30 bis 40 Sekunden sowie Konsistenz-Zielvorgaben von  $58 \pm 3$  cm sollten eingehalten werden.
- Keine Kiesnester oder Auffälligkeiten hinsichtlich Porengröße und Verteilung erkennbar.
- Anteile und Größen an Poren und Lunkern bei entnommenen Bohrkernen normal.
- Beton kann aufgrund seiner Konsistenz in Verbindung mit steigendem Eigengewicht den gesamten Bauteilquerschnitt sehr gut ausfüllen.
- Mit eingesetzter Betonsorte konnte im Musterbauteil und der dargestellten Bewehrungs- und Bauteilgeometrie ein gutes Ergebnis erzielt werden.

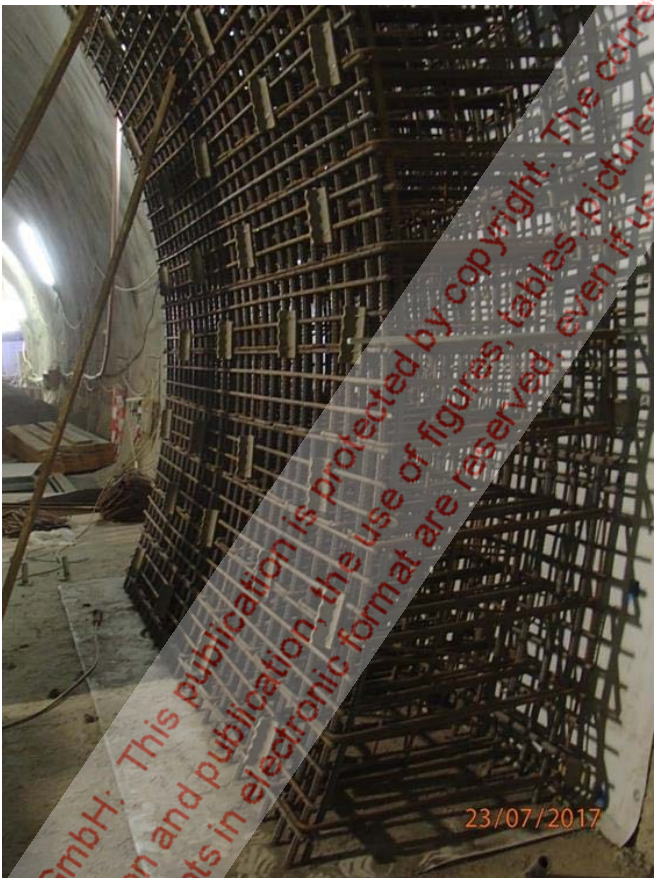


Bild 19: Bewehrung Probekblock



Bild 20: Beton Probekblock

## 7. Bauzeit

Die notwendigen Maßnahmen in den Tunnelabschnitten im Anhydrit führen zu einer Anpassung des Bauablaufes und der Bauzeit.

Derzeit sind folgende Abschnitte im PfA 1.5, Los 3 hergestellt:

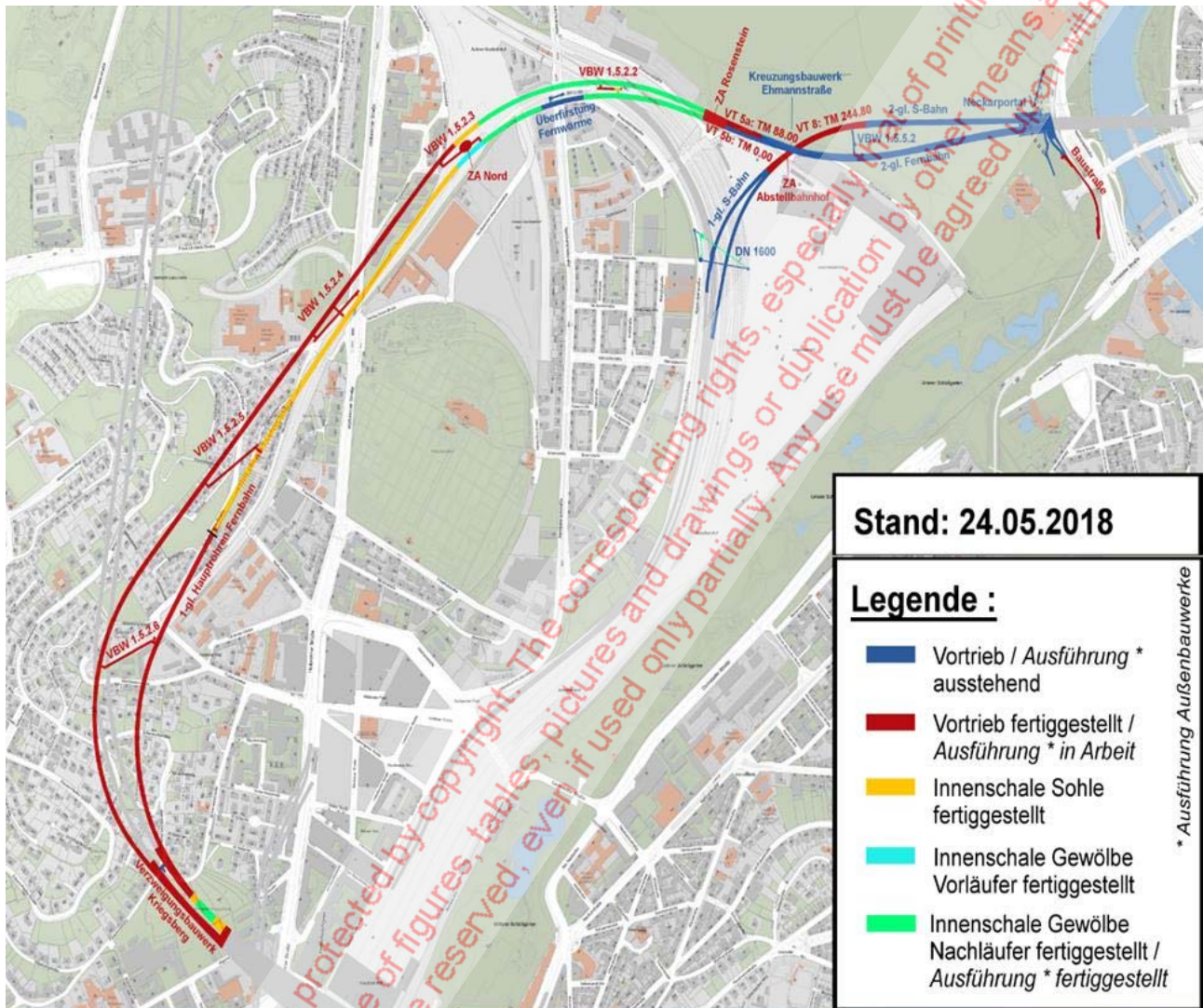


Bild 21: Stand der Arbeiten

In enger Zusammenarbeit folgen die DB PSU und die Arge Tunnel Cannstatt einer gemeinsamen Vorgehensweise mit dem Ziel einer Vereinbarung:

- Regelmäßige JourFix Partnering-Gespräche.
- Beschleunigungsmaßnahmen abgestimmt.
- Neuer Bauzeitenplan kurz vor Fertigstellung.
- Kompromisse bei der Übergabe der Teilabschnitte Beginn Gleisbau.
- Bauabläufe abgestimmt.
- Nachträge in Verhandlung.
- Meilensteine festgelegt.

→ Ziel: Vereinbarung am 01. September



## Literatur

Huder, J.; Amberg, G.: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweizerische Bauzeitung, Band 88, Heft 43, S. 975 - 980, 1970.

Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. WBI-PRINT 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2003.

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.

Wittke, W.: Baugrundverhältnisse des Bahnprojekts Stuttgart-Ulm. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

Wittke, W.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Erichsen, C.: Stoffgesetz, Berechnungsverfahren, felsmechanische Kennwerte und Ausführungsstatik für Tunnel im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.