

# Knautschzone versus U-Profil im quellfähigen Gipskeuper

Dr.-Ing. Martin Wittke

## Zusammenfassung

Die Planung und der Bau von Tunneln im quellfähigen Gebirge stellen eine besonders große Herausforderung für alle am Projekt Stuttgart 21 Beteiligten dar. Als Grundlage für die Planung hat WBI in den vergangenen Jahren Modellvorstellungen und darauf aufbauende Berechnungsverfahren entwickelt. Diese wurden anhand von Langzeitlabor- und Feldversuchen kalibriert und anhand von Messergebnissen von ausgeführten Tunneln in Deutschland verifiziert. Erkenntnisse zum Engelbergbasistunnel, die WBI im Jahr 2014 erlangt hat, haben gezeigt, dass auch durch die Anordnung einer Knautschzone Hebungen nicht verhindert werden können. Das hat dazu geführt, den ursprünglich für das Projekt Stuttgart 21 vorgesehenen VNS-Querschnitt durch ein U-Profil zu ersetzen. Damit und durch baubegleitende Injektionen soll es gelingen, die Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt auch in den kritischen Übergangsbereichen zwischen dem wasserführenden Gebirge und dem anhydritführenden Gebirge wie bisher sicher und ohne unzulässige Hebungen aufzufahren.

## 1. Einleitung

In der Vergangenheit ist es beim Tunnelbau im quellfähigen Gipskeuper vielfach zu Schäden an der Auskleidung und zu Hebungen der Tunnelröhren gekommen, die auch bis an die Geländeoberfläche reichen können (Wittke 2015). Um solche Hebungen zu vermeiden, wird und wurde in der Fachwelt vielfach vorgeschlagen, eine sogenannte Knautschzone anzuordnen, die Quellverformungen ohne einen nennenswerten Druckaufbau zulässt (Kirschke & Kuhnhehn & Prommersberger 1991). Ein solcher Ausbau war bereichsweise auch für die Tunnel nach Bad Cannstatt und nach Feuerbach des Projekts Stuttgart 21 vorgesehen. In den letzten zwei Jahren haben neue Erkenntnisse jedoch dazu geführt, diese Konzeption zu überdenken.

## 2. Grundlagen

Die Formation des Gipskeupers tritt in der Natur in drei unterschiedlichen Erscheinungsformen auf (Bild 1, Wittke 2015). Im Ausgangszustand enthalten die Tonsteine des Gipskeupers Sulfat in Form von Anhydrit. Hier ist der Fels in der Regel trocken und nur gering durchlässig. Als charakteristischer Wert für die Durchlässigkeit wurde in Versuchen für das Projekt Stuttgart 21 ein Wert von ca.  $10^{-8}$  m/s ermittelt (Wittke 2014, Wahlen 2009).

In geologischen Zeiten wird der Anhydrit durch Zutritt von Wasser aus grundwasserführenden Schichten in Gips umgewandelt. Die Tonsteine des Gipskeupers weisen in diesen Zonen einen etwas größeren Wassergehalt auf als im Ausgangszustand. Der Fels ist aber auch hier in der Regel gering durchlässig und trocken. An der sogenannten Auslaugungsfront wird allerdings der Gips gelöst und mit dem Grundwasser abtransportiert. Auf diese

Weise entstehen Hohlräume und sehr stark durchlässige Zonen. Oberhalb der Auslaugungsfront ist der sogenannte ausgelaugte Gipskeuper dann wiederum mit einer Durchlässigkeit von ca.  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  m/s vergleichsweise gering durchlässig.

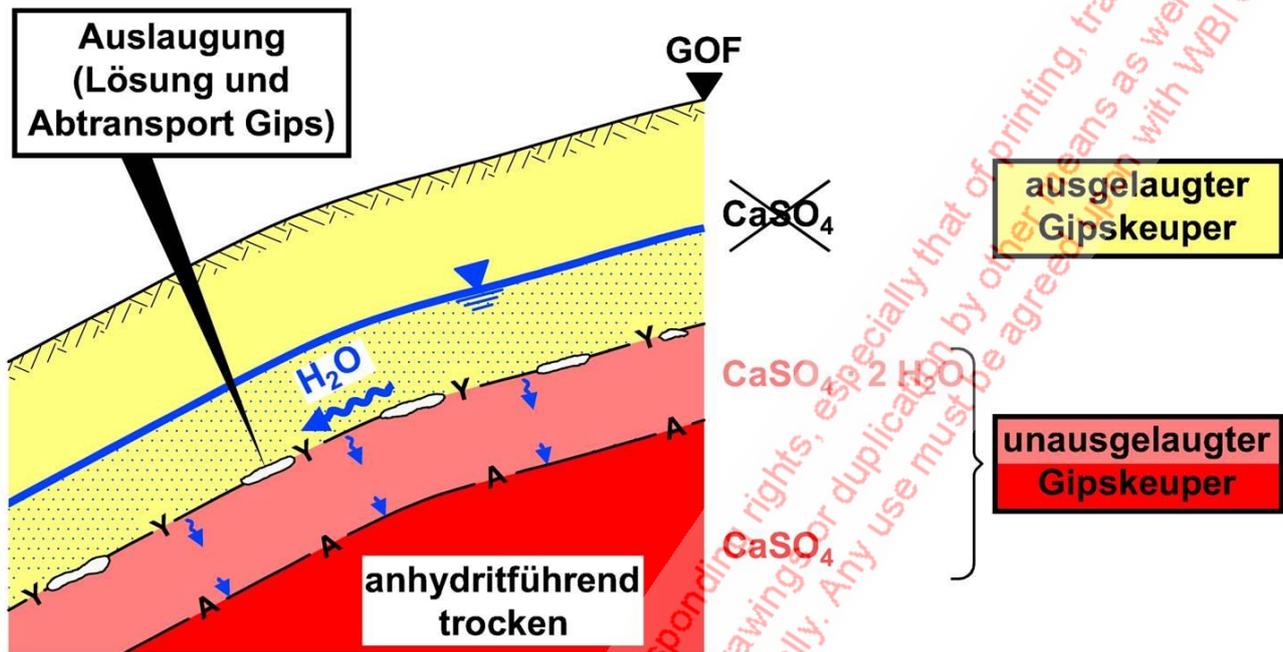


Bild 1: Gipskeuper - unausgelaugt und ausgelaugt

Um die Vorgänge beschreiben zu können, die beim Tunnelbau unter solchen Bedingungen stattfinden, wurden bei WBI seit vielen Jahren Modelle und darauf aufbauende Berechnungsverfahren entwickelt, am Beispiel des Versuchsbauwerks im Freudensteintunnel kalibriert sowie an ausgeführten Tunnels verifiziert (Wittke 2003, Wittke 2014, Wittke-Gattermann 1998). Diese Modelle bestehen aus vier Elementen, die sich gegenseitig beeinflussen (Bild 2). Wir gehen zunächst von einem geklüfteten Fels aus, der hinsichtlich seiner Verformbarkeit durch den E-Modul und die Querkontraktion beschrieben werden kann. Die Festigkeit wird im Wesentlichen durch die Trennflächen bestimmt und durch die Scherparameter  $c$  und  $\phi$  beschrieben. Außerdem müssen der sogenannte Aufgleitwinkel, der ein Maß für die Unebenheit der Trennflächen ist, sowie der Abstand und die Öffnungsweiten der Trennflächen berücksichtigt werden (Wittke 2003). Das ist wichtig, weil sich infolge des Ausbruchs des Tunnels zusätzlich zu den hohlraumnahen sprengbedingten Auflockerungen, Auflockerungszonen durch dilatante Verschiebungen auf den Trennflächen ergeben, die Zonen erhöhter Durchlässigkeit darstellen. Durch diese kann, sofern sie Verbindung zu grundwasserführenden Bereichen haben, Wasser in das quellfähige Gebirge gelangen und zu Quellvorgängen und zu entsprechenden Quelldruckbeanspruchungen führen.

Der Wassertransport in den Trennflächen wird durch die Gesetze der Spaltströmung beschrieben (Bild 3, Wittke 2014, Wittke 2003). Die Durchlässigkeit einer Trennflächenschar hängt dabei in der dritten Potenz von der Trennflächenöffnungsweite ab. Das zeigt, dass bereits geringe Änderungen der Spaltweite eine sehr große Änderung der Durchlässigkeit bewirken.

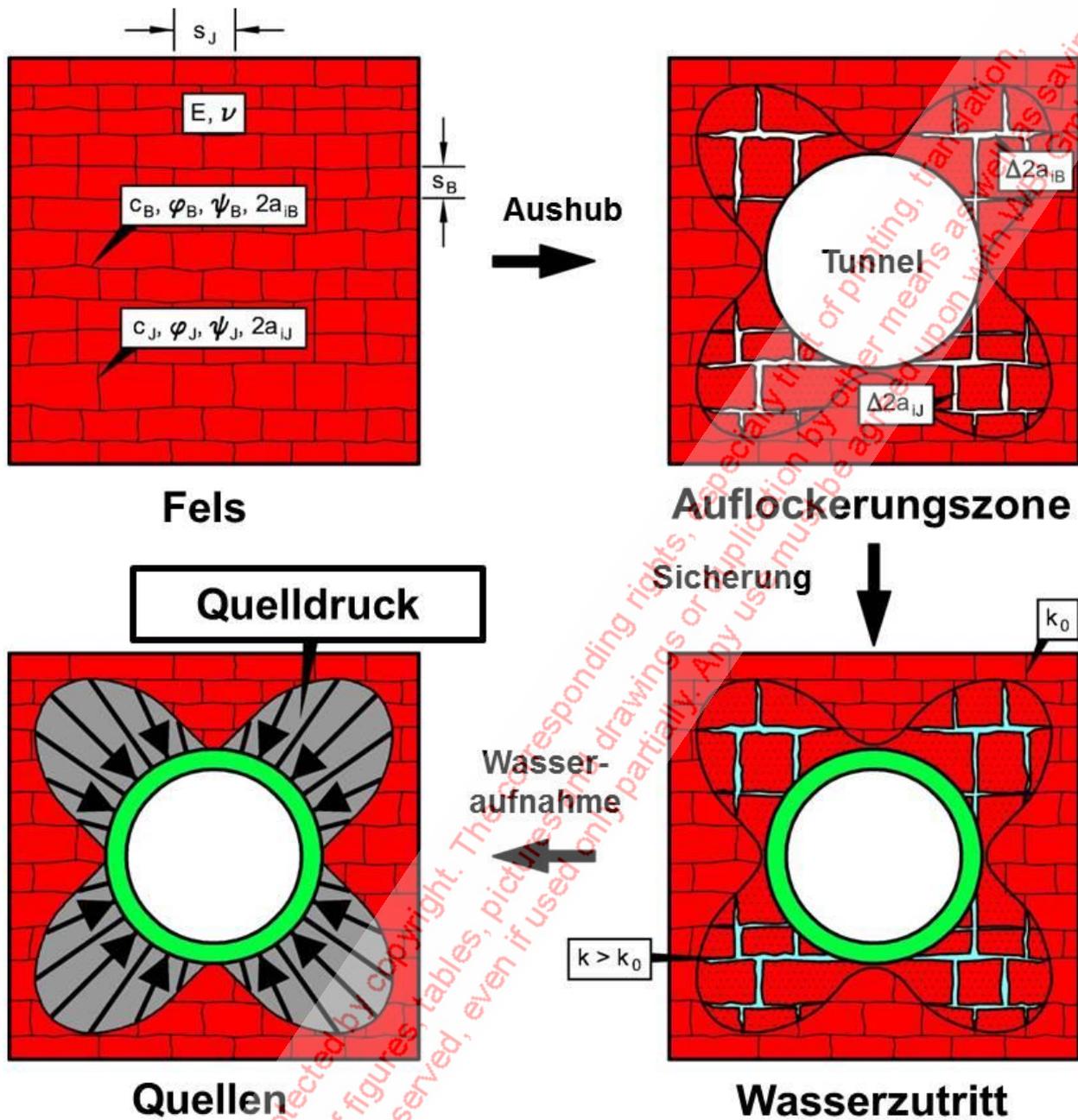
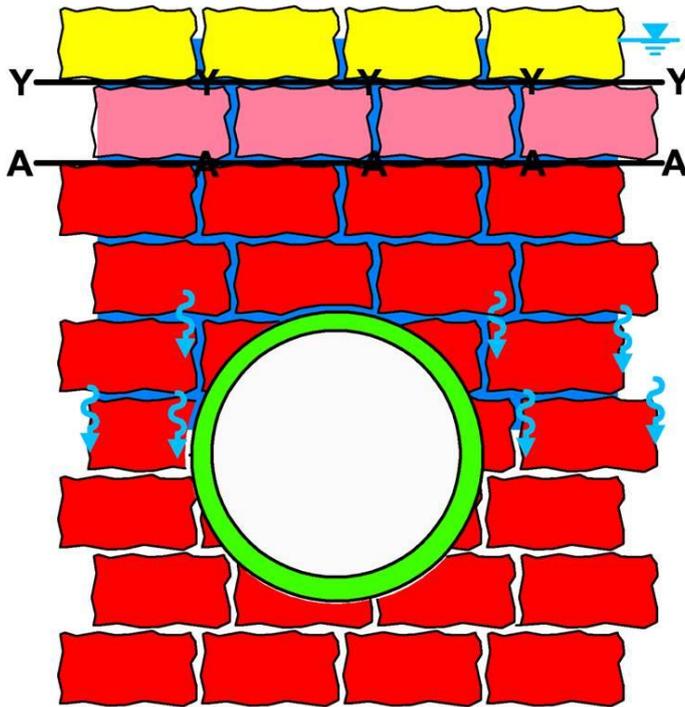


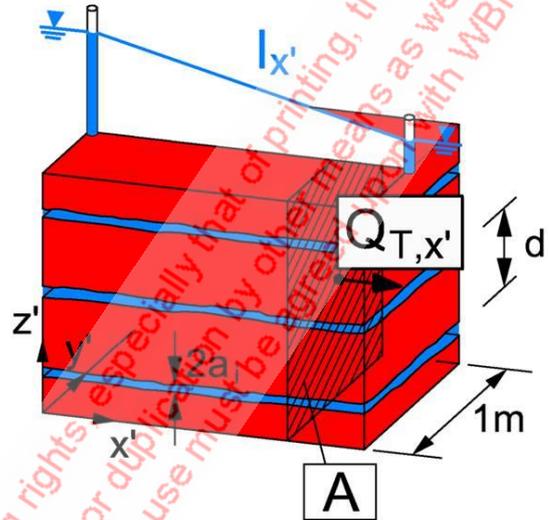
Bild 2: Wasserzutritte und Quellen beim Tunnelbau

Wenn das Wasser zum Anhydrit gelangt, wird dieser zunächst gelöst, um dann - sofern er nicht abtransportiert wird - an Ort und Stelle wieder als Gips auszukristallisieren (Witke 2014, Alonso & Olivella 2008, Alonso & Ramon 2011). Dieser Vorgang ist mit einer Zunahme des Feststoffvolumens von 61 % verbunden (Bild 4). Bei üblichen Anhydritgehalten im Gipskeuper von ca. 30 % führt das Quellen bei vollständiger Umwandlung des vorhandenen Anhydrits in Gips zu einer Vergrößerung des Felsvolumens von ca. 18 %, sofern dem Quellen kein Widerstand entgegengesetzt wird.



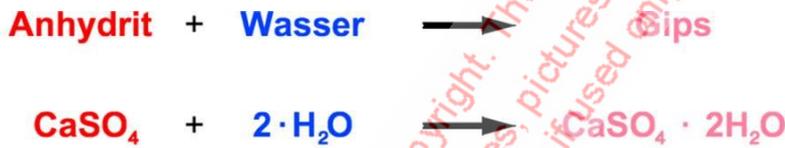
**Wassereintritt über Trennflächen**

$$k_f = \frac{g}{12v} \cdot \frac{2a_i^3}{d}$$



**Sickerströmung**

Bild 3: Sickerströmung in Trennflächen



**Volumenzunahme:**

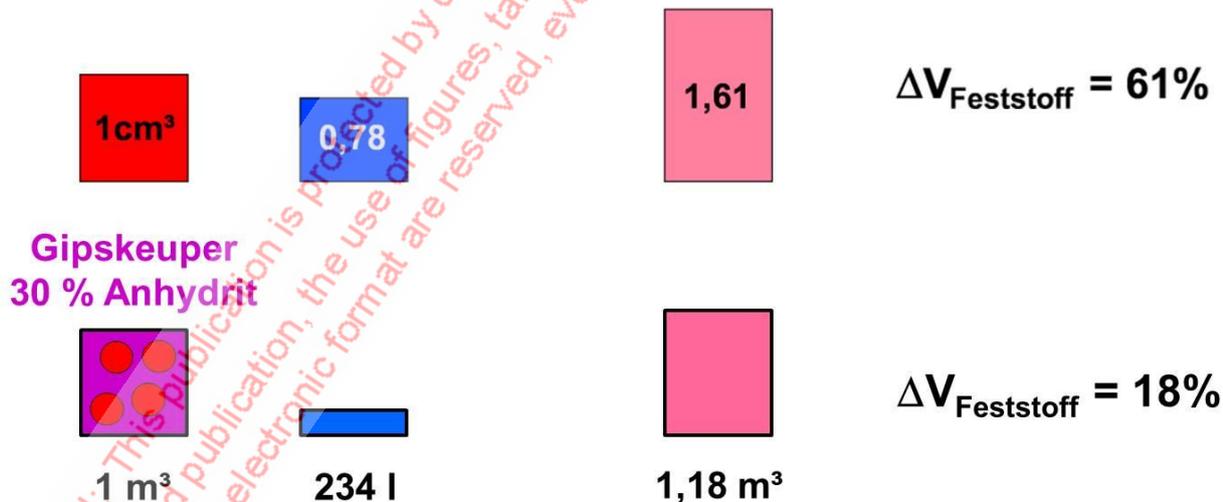


Bild 4: Quellen und Wasserbedarf für vollständige Umwandlung

Behindert man die quellbedingte Volumenvergrößerung kommt es zu Quelldrücken, die bei vollständiger Umwandlung von Anhydrit in Gips eine Größenordnung von 9 bis 10 MN/m<sup>2</sup> erreichen können (Wittke 2003, Wahlen 2009, Wittke 2014). Der Zusammenhang zwischen dem Quelldruck und den quellbedingten Dehnungen kann durch eine logarithmische Funktion beschrieben werden (Bild 5). Der max. mögliche Quelldruck ist linear vom Wasserdargebot bzw. vom Umwandlungsgrad Anhydrit in Gips abhängig (Wittke 2003).

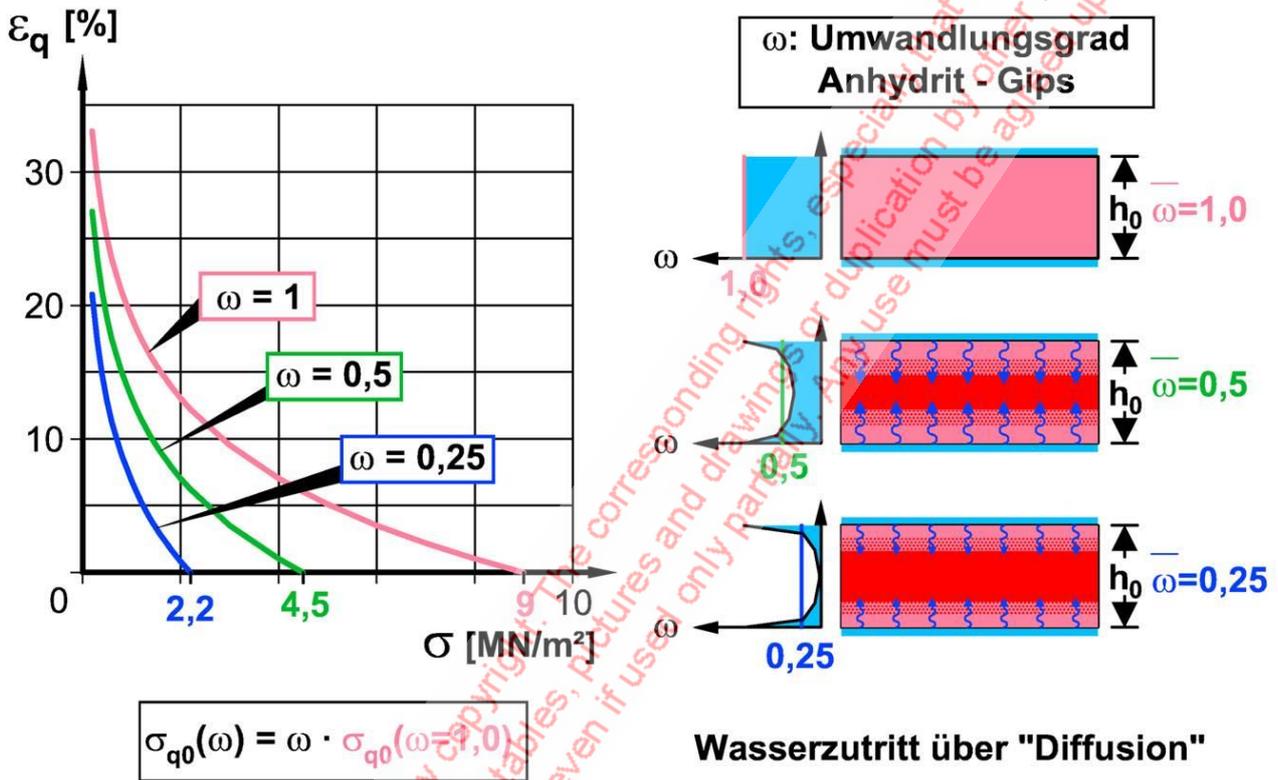


Bild 5: Quellgesetz für teilweise Umwandlung von Anhydrit in Gips

Vor diesem Hintergrund und da das Gebirge im Bereich der Auslaugungsfront eine besonders hohe Durchlässigkeit besitzt, muss ein besonderes Augenmerk bei der Planung von Tunneln im quellfähigen Gebirge auf die Tunnelabschnitte gelegt werden, die im Übergangsbereich zwischen den quellfähigen Schichten und dem wasserführenden Gebirge liegen (Bild 6). Besonders schwierig sind dabei Verhältnisse, bei denen Anhydrit in der unteren Querschnittshälfte und ausgelaugtes Gebirge in Höhe der Firste anstehen.

© WBI GmbH: This document is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, reproduction, presentation and publication, are reserved. Pictures and drawings or duplication by other means are prohibited. The use of the documents in electronic form is reserved, even if used only partially.

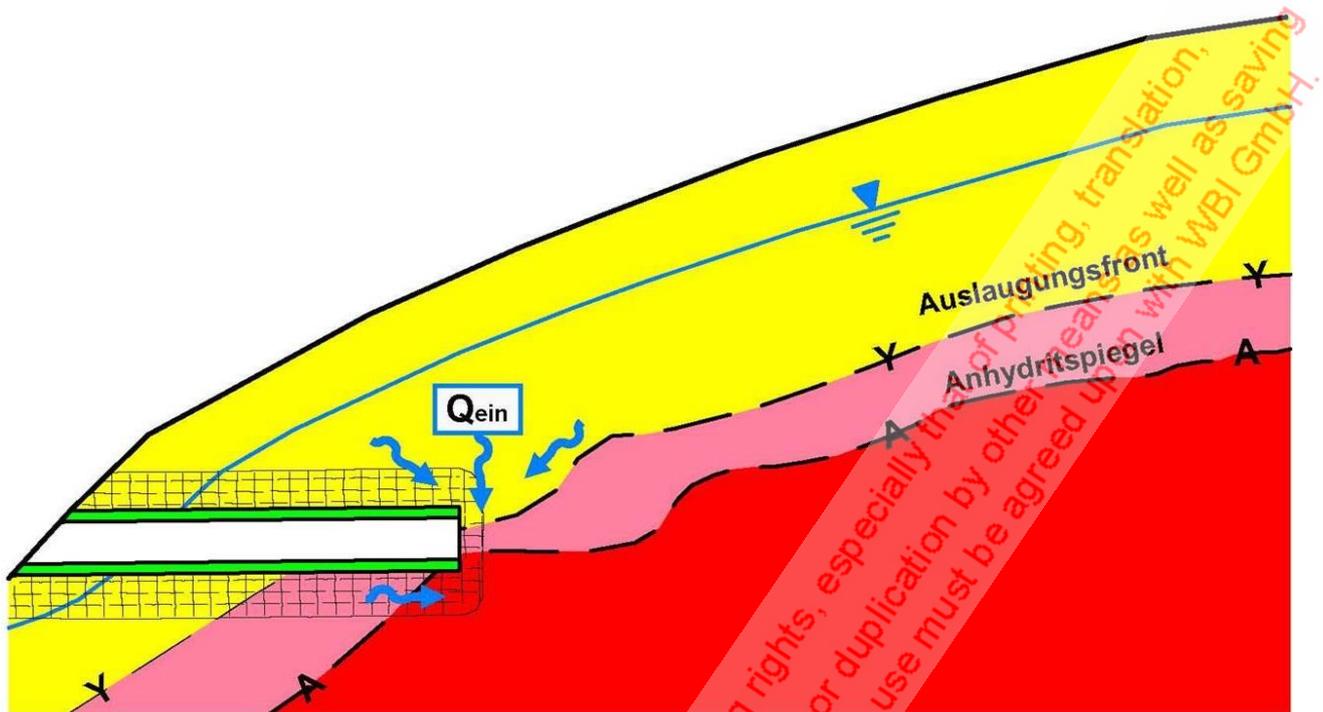


Bild 6: Tunnel in der Übergangszone zwischen Ausgelaugtem und unausgelaugtem Gipskeuper, Wasserzutritte

### 3. Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt, Planung

Beim Projekt Stuttgart 21 sind solche Verhältnisse bei den Tunneln nach Feuerbach und Bad Cannstatt zu erwarten und bereits angetroffen worden. Die ca. 2,7 km langen Röhren des Tunneln nach Bad Cannstatt durchfahren in der Nähe des Hauptbahnhofs eine sogenannte Anhydritlinse (Bild 7). Hier ist unmittelbar oberhalb und unterhalb der Linse mit wasserführendem Gebirge zu rechnen. Außerdem ist im Verlauf der hier nicht dargestellten bergseitigen Röhre des Tunneln eine weitere Anhydritlinse zu durchfahren, bei der ausgelaugtes Gebirge im oberen Bereich des Querschnitts ansteht.

Der Tunnel vom Hauptbahnhof Stuttgart nach Feuerbach durchfährt insgesamt 3 Anhydritlinsen (Bild 8). Auch hier gilt den Übergangsbereichen zwischen dem anhydritführenden Gebirge und dem wasserführenden ausgelaugten Gipskeuper besondere Aufmerksamkeit.

Gemäß der Ausschreibung für das Projekt Stuttgart 21 war für diese Übergangsbereiche das sogenannte Ausweichprinzip vorgesehen. Durch die Anordnung einer Knautschzone unterhalb der Tunnelsohle sollte vermieden werden, dass sich die Tunnelröhre, die im Bereich der Firste nur ein weiches Widerlager aus ausgelaugtem Gipskeuper hat, durch eine von unten wirkende Quelldruckbeanspruchung hebt. In Bereichen, in denen der Anhydritspiegel im oberen Teil des Querschnitts ansteht, und in denen das wasserführende Gebirge einen größeren Abstand zum Tunnelquerschnitt aufweist, ist das Widerstandsprinzip vorgesehen (Bild 9).

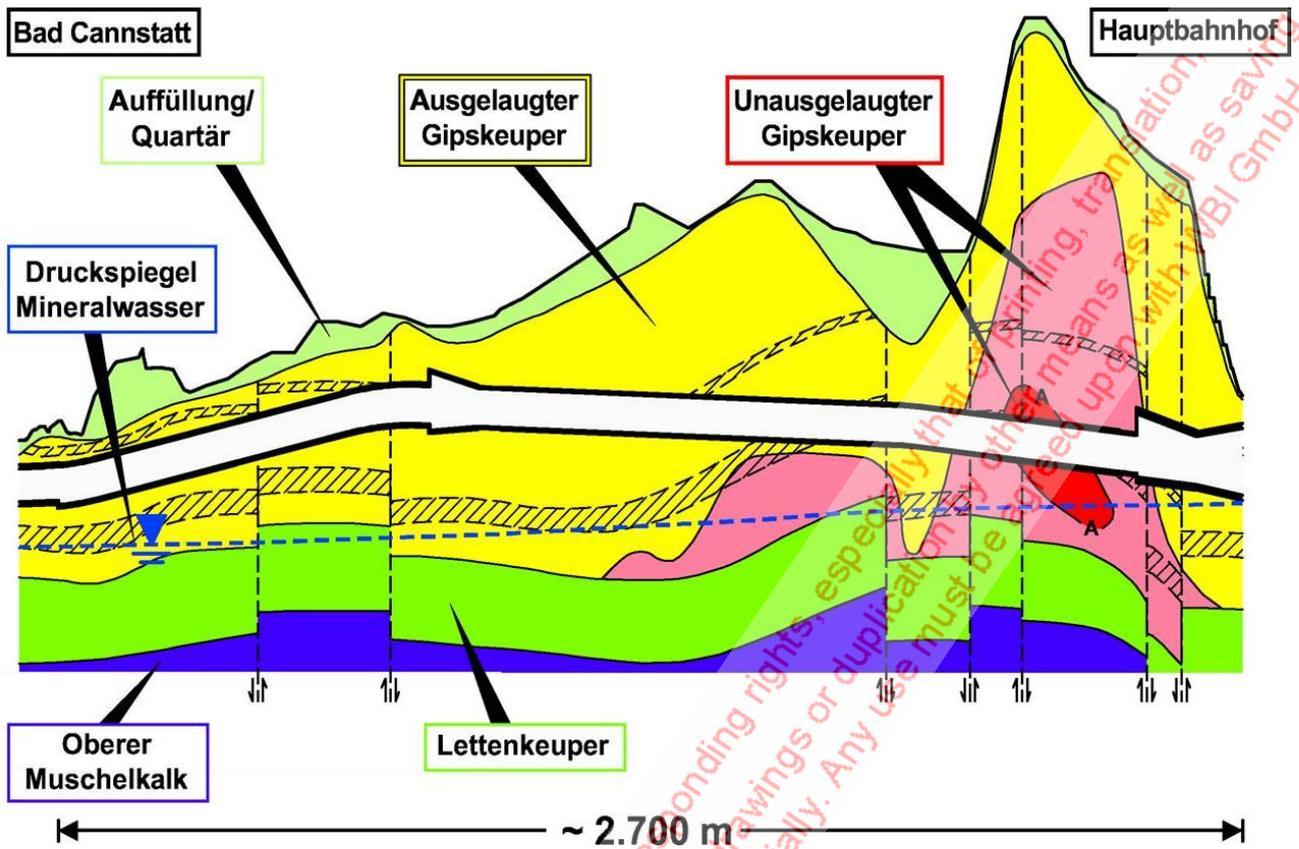


Bild 7: Tunnel nach Bad Cannstatt, Längsschnitt falseitige Röhre

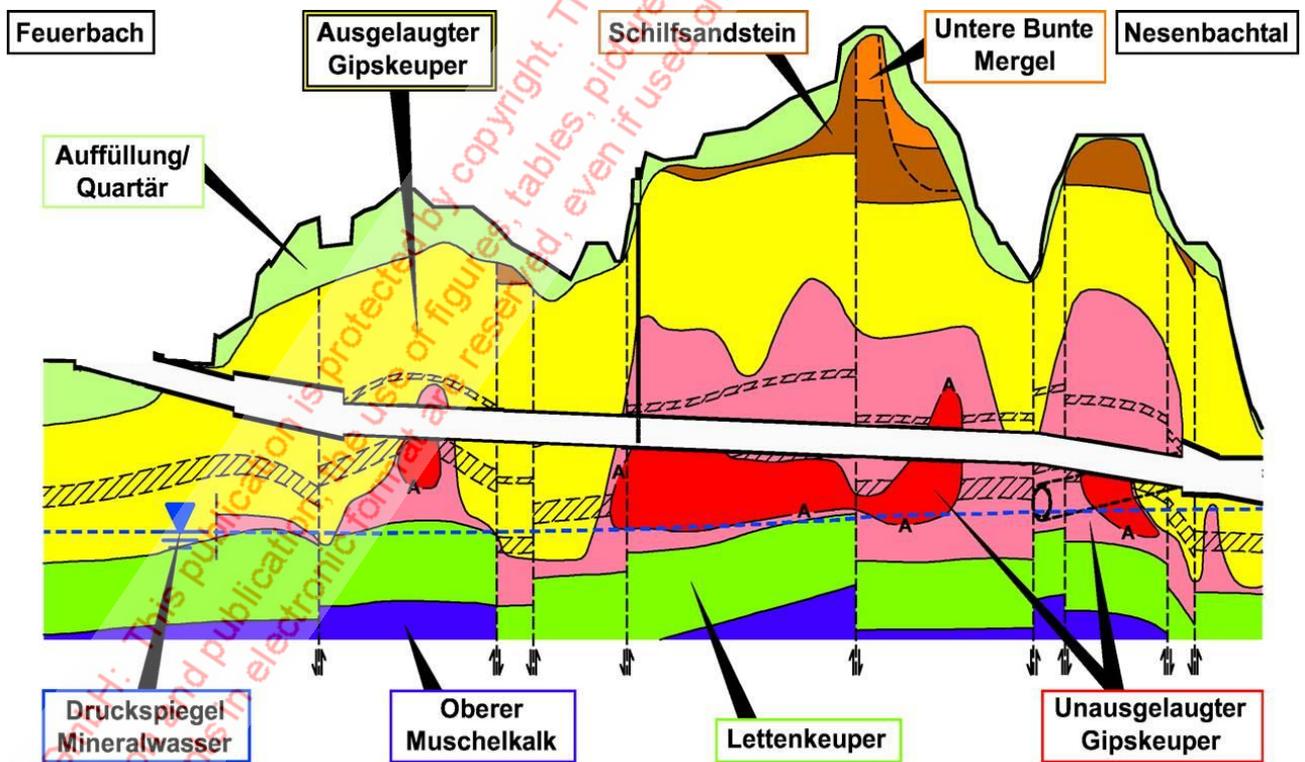
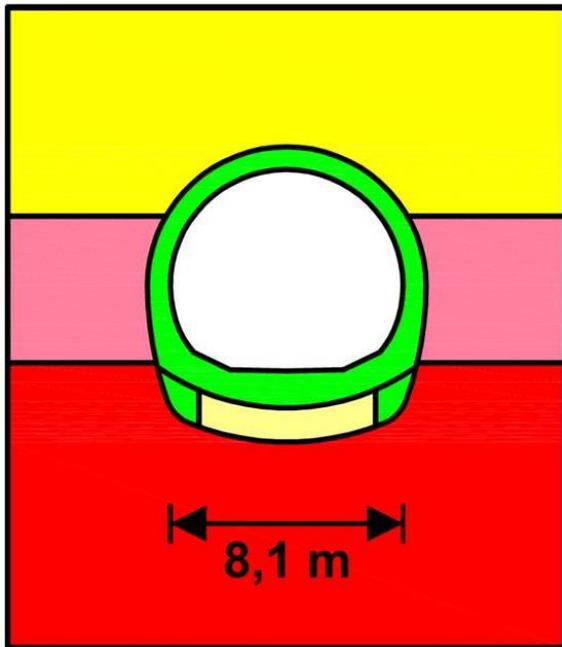
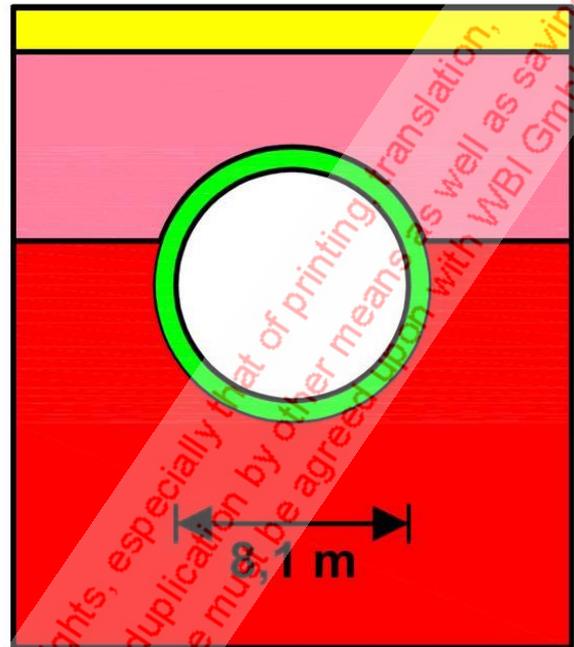


Bild 8: Tunnel nach Feuerbach, Längsschnitt



**Ausweichprinzip**



**Widerstandsprinzip**

Bild 9: Querschnitte für die Tunnel nach Bad Cannstatt und Feuerbach gemäß Entwurf

#### 4. Erfahrungen bei Straßentunneln

Eine Auswertung der ausgeführten Tunnelbauvorhaben zeigt, dass in Deutschland nur der in den 50 Jahren gebaute Wagenburgtunnel, der Straßentunnel Heschlach II und der Engelbergbasistunnel im Übergangsbereich zwischen dem wasserführenden und dem quellfähigen Gebirge liegen. Der Wagenburgtunnel und der Tunnel Heschlach II sind zweispurige Straßentunnel. Die Tunnel sind 12 bzw. 13 m breit und besitzen eine Stahlbetoninnenschale (Bild 10, Wittke 2015). Der dreispurige Autobahntunnel Engelberg ist dagegen 21 m breit. Die Auskleidung besteht aus einer Stahlbetoninnenschale, die in der Sohle 3 m und in den Ulmen ca. 1,9 m dick ist. Unterhalb der Sohle des Tunnels wurde die in Bild 10 gelb dargestellte Knautschzone angeordnet.

Entlang des Wagenburgtunnels steigt der Anhydritspiegel von unten bis max. in das untere Drittel des Querschnitts an. In diesen Abschnitten liegt die Firste des Tunnels im ausgelaugten Gebirge (Bild 11). Auch die Firste des Tunnels Heschlach II liegt im ausgelaugten Gebirge. Der Anhydritspiegel liegt hier max. in Höhe der Sohle. Beide Tunnel haben sich in der Vergangenheit gehoben (Wittke 2004). Der Wagenburgtunnel musste zudem aufgrund von Schäden saniert werden.

Die Ursache für die Hebungen ist darin zu finden, dass die durch den Tunnelbau bedingte Auflockerungszone im Gebirge, die hier in Bild 12 grau dargestellt ist, bis in das anhydritführende Gebirge reicht. Somit kann Wasser von oben in den quellfähigen Gipskeuper gelangen. Da die Schale oben im ausgelaugten Gipskeuper kein ausreichendes Widerlager findet, wird der Tunnel durch die so eingeleiteten Quellvorgänge angehoben.

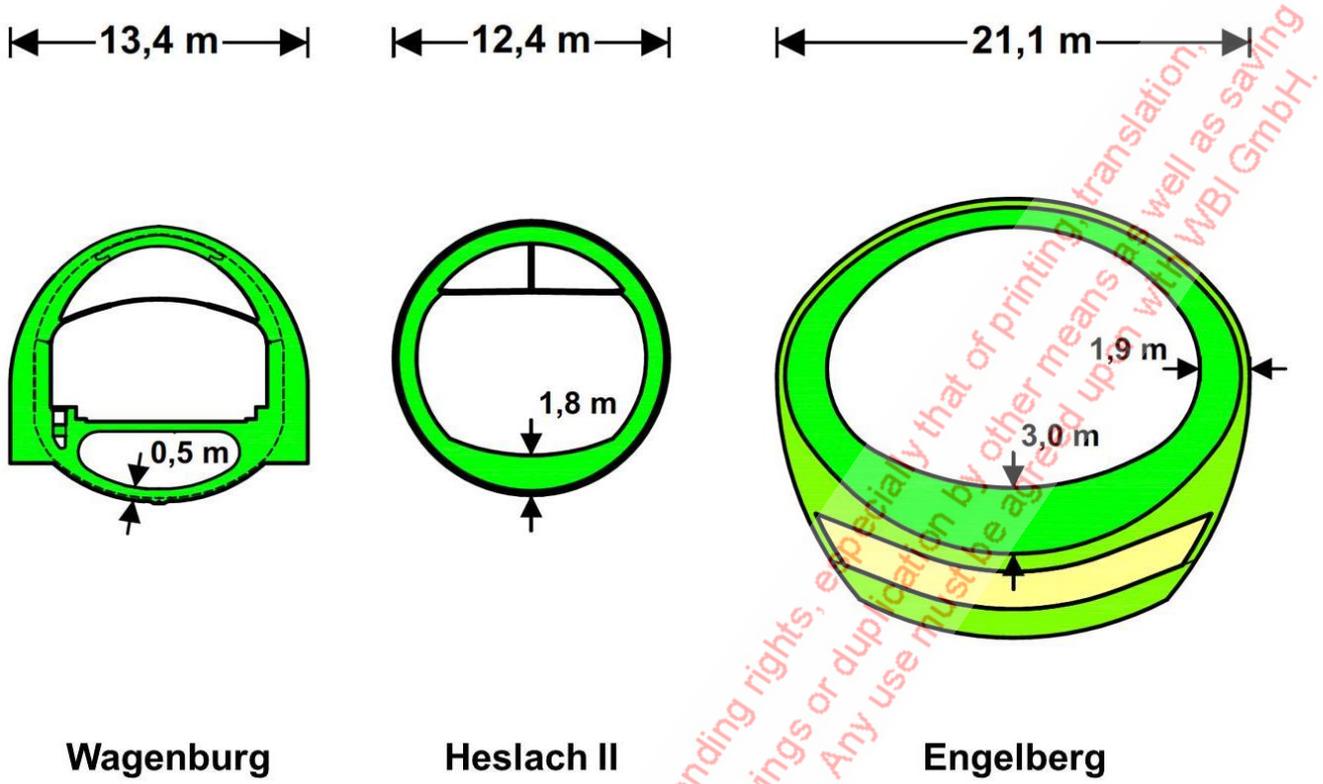


Bild 10: Querschnittsformen der Tunnel in Deutschland, die im Einflussbereich von Auslaugungsfront und Anhydritspiegel liegen

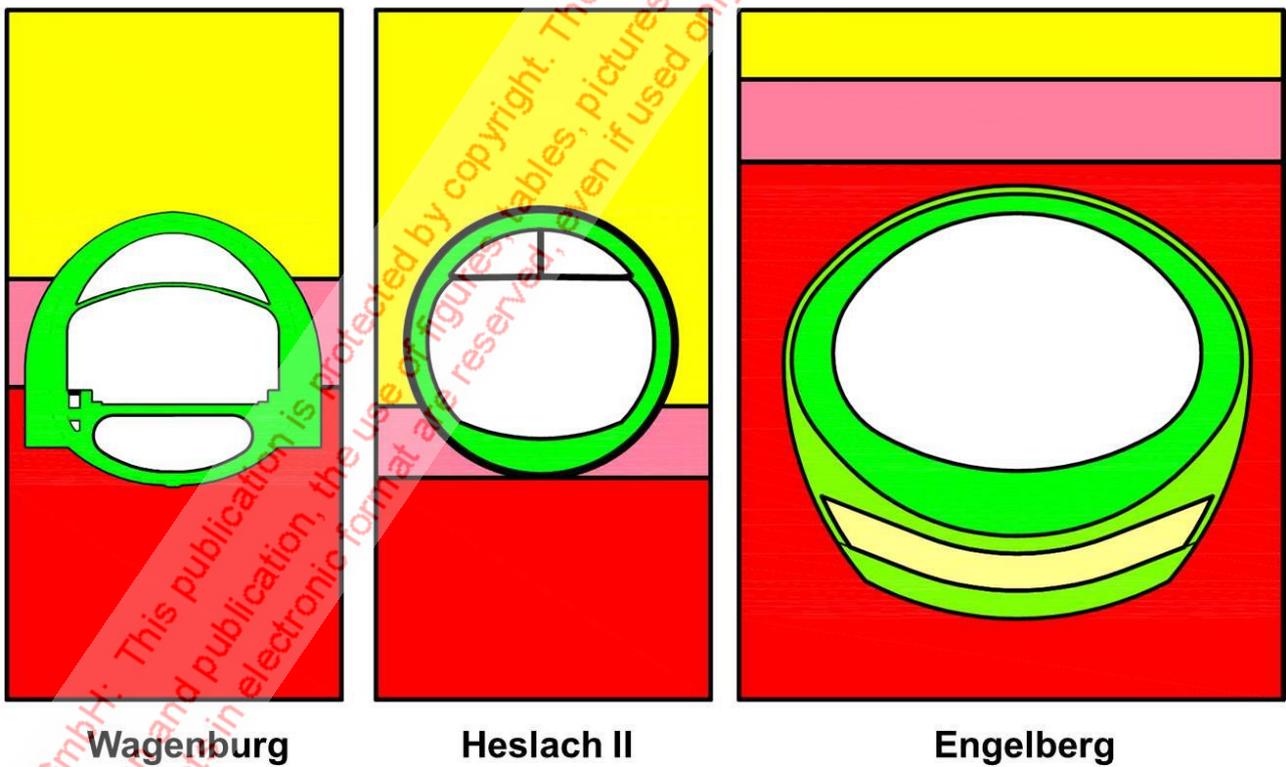


Bild 11: Tunnel in Deutschland, die im Einflussbereich von Auslaugungsfront und Anhydritspiegel liegen, höchste Lage Anhydritspiegel

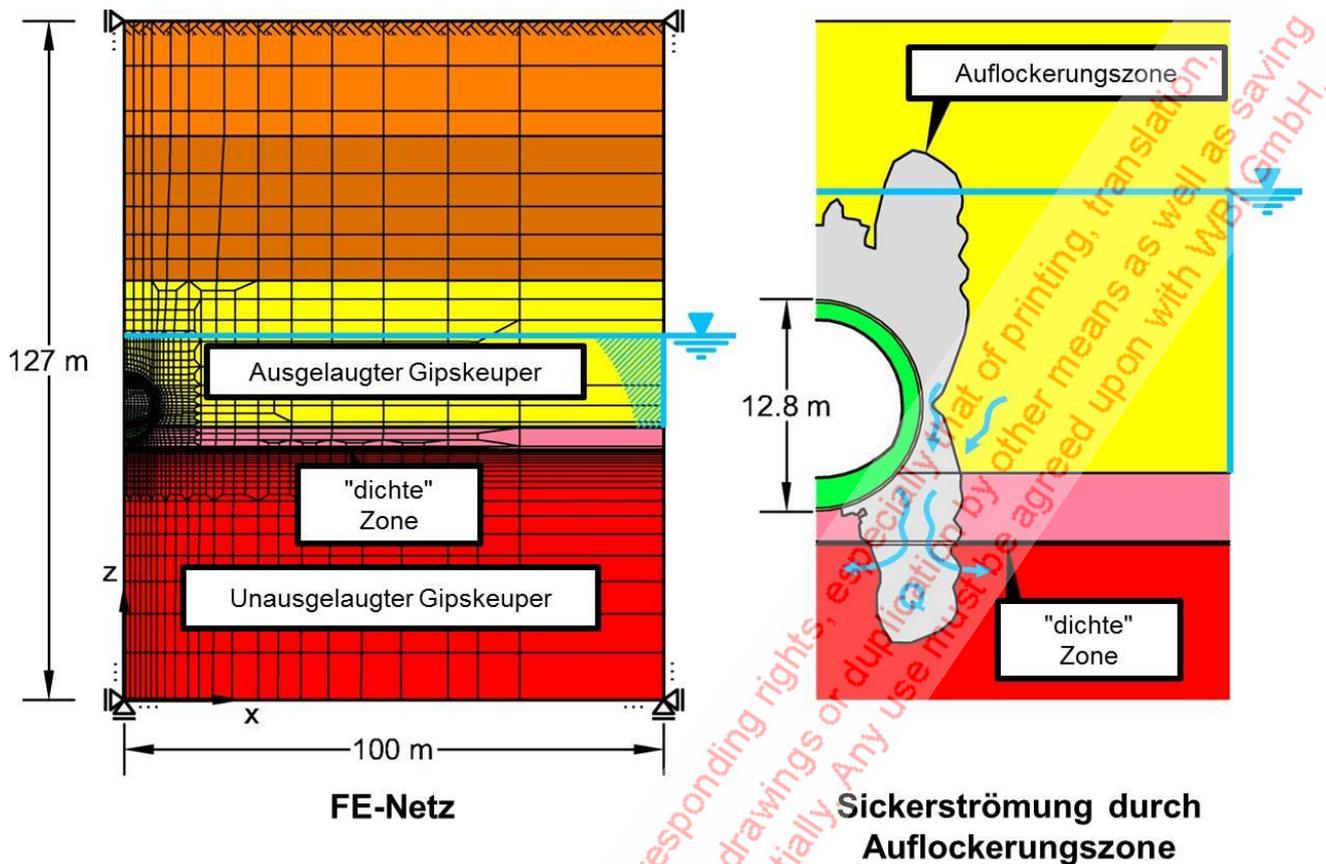


Bild 12: Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Tunnelbau, Beispiel Tunnel Heschlach II

Auch beim Engelbergbasistunnel liegt der Anhydritspiegel über weite Strecken im Bereich der Sohle. Er steigt allerdings langsam von unten nach oben an und liegt an seiner höchsten Stelle wenige Dezimeter oberhalb der Tunnelfirste (Bild 11). Das ausgelaugte Gebirge liegt im letztgenannten Bereich ca. 5 m oberhalb der Firste. Der Engelbergstunnel wurde Ende der 1990er Jahre gebaut. WBI hat dankenswerter Weise im Jahr 2014 die Gelegenheit bekommen, mit dem in Wittke 2003 vorgestellten Modell die Vorgänge beim Engelbergbasistunnel zu untersuchen und die beim Bau und Betrieb dieses Tunnels gemachten Erfahrungen auszuwerten und zu interpretieren. Kurz vor dem Felsmechanik-Tag 2016 haben wir zudem die Genehmigung des BMVI erhalten, unsere Erkenntnisse an dieser Stelle zu veröffentlichen.

Bild 13 zeigt die mit unserem Modell errechneten Hauptnormalspannungen im Gebirge nach Ausbruch und Sicherung des mehr als 20 m breiten Tunnels. Das Gewölbe im Gebirge in der Umgebung des Tunnels ist deutlich zu erkennen. Am Hohlraumrand kommt es zu einer Spannungsspitze von max. 7 MN/m<sup>2</sup> auf der linken Seite und max. 7,6 MN/m<sup>2</sup> auf der Seite des Gebirgspfeilers zwischen den beiden Tunnelröhren. Die Spannungsumlagerungen führen in dem in Bild 13 grau markierten Bereich zu Festigkeitsüberschreitungen entlang der Trennflächen. Diese Zonen reichen bis in das wasserführende, ausgelaugte Gebirge. Auch im unteren Bereich des Tunnelquerschnitts treten plastische Verschiebungen im Gebirge auf.

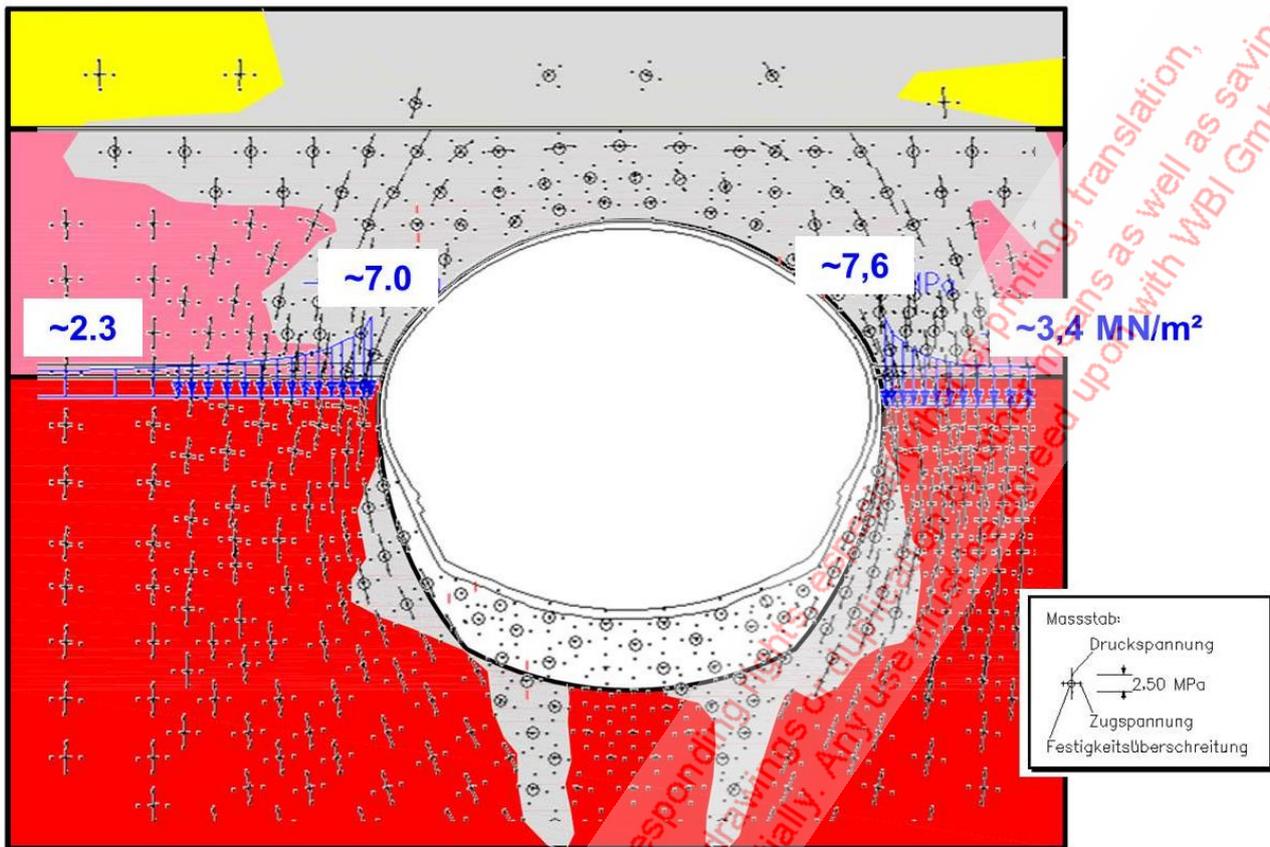


Bild 13: Engelbergbasistunnel, Abschnitte, in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Ulmen ansteht, Hauptnormalspannungen nach Ausbruch und Sicherung

Diese plastischen Verschiebungen führen zu einer Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit des Gebirges um mehrere Zehnerpotenzen. In dem in Bild 14 blau markierten Bereich hat die Durchlässigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand von  $10^{-6}$  bzw.  $10^{-8}$  m/s auf Werte von  $10^{-3}$  m/s und mehr zugenommen. Durch diese Zonen kann Wasser - aus dem ausgelaugten Gebirge - und aus dem Bereich der Knautschzone, die nachweislich Wasser führt, in den quellfähigen Fels eindringen.

Nach 12 Jahren Quellen kommt es so rechnerisch in dem in Bild 15 gestrichelt hervorgehobenen Bereich zu Quellvorgängen. Örtlich werden rechnerisch Umwandlungsgrade von Anhydrit in Gips von ca. 65 % erreicht.

Dementsprechend ergibt sich die Beanspruchung der Tunnelschale durch Quelldruck (Bild 16). Im Bereich der Knautschzone ist der Querschnitt erwartungsgemäß nicht beansprucht. Unmittelbar seitlich treten allerdings sehr große Quelldrücke von max. ca.  $5,8 \text{ MN/m}^2$  auf. Diese führen trotz der Anordnung einer Knautschzone zu Hebungen der Tunnelröhre. Außerdem kommt es auch seitlich im Bereich der Ulmen zu einer Quelldruckbeanspruchung, die zu Rissen in der hier ca. 1,9 m dicken Schale geführt hat.

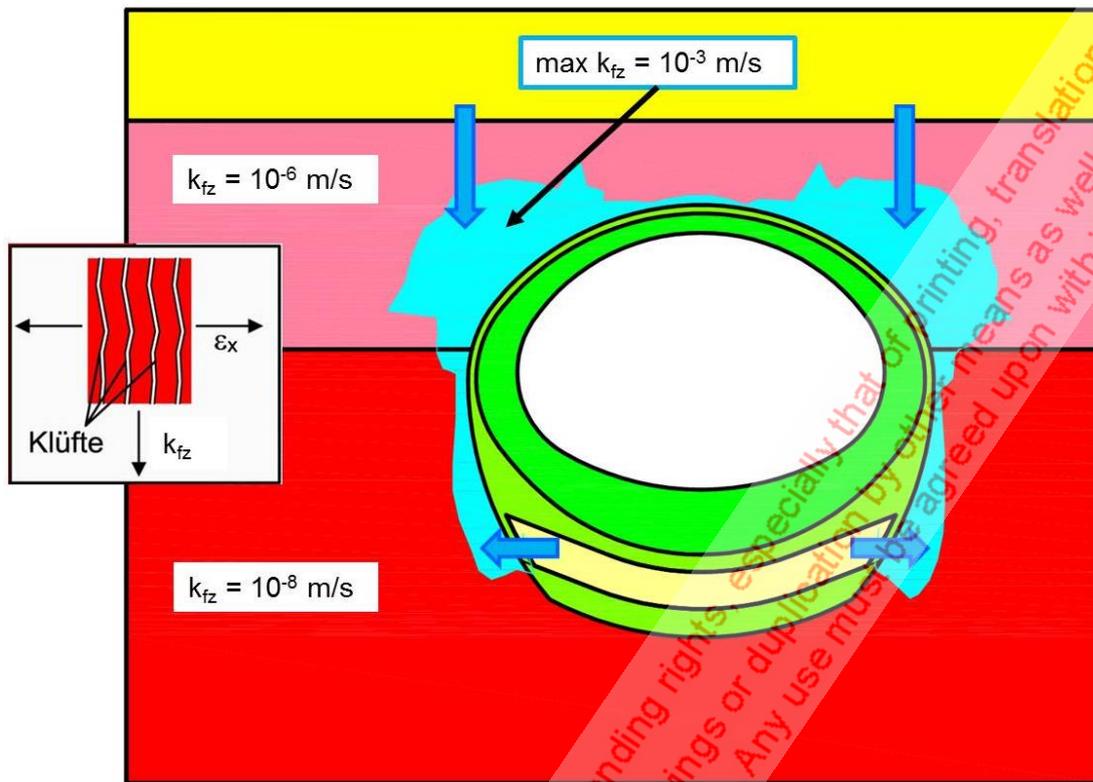


Bild 14: Engelbergbasistunnel, Abschnitte, in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Ulmen ansteht, Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Ausbruch und Sicherung

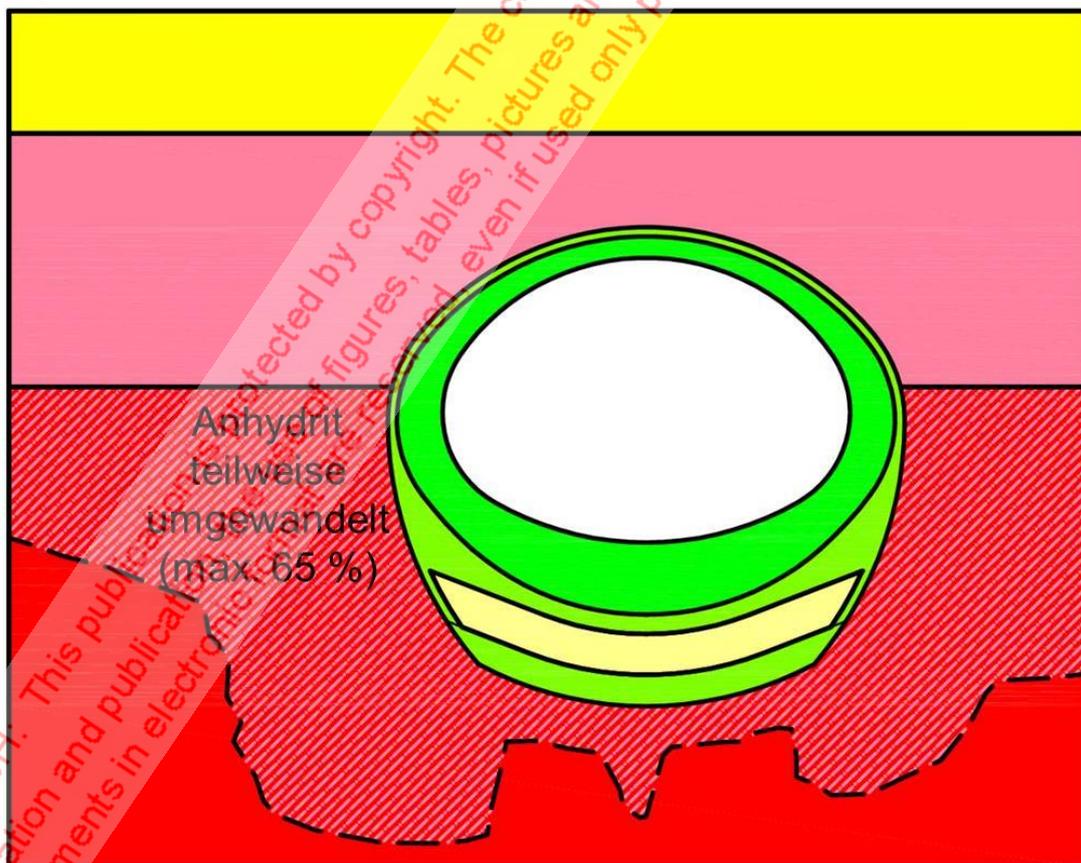


Bild 15: Engelbergbasistunnel, Abschnitte in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Ulmen ansteht, Zonen, in denen Anhydrit in Gips umgewandelt wurde, 12 Jahre nach Inbetriebnahme

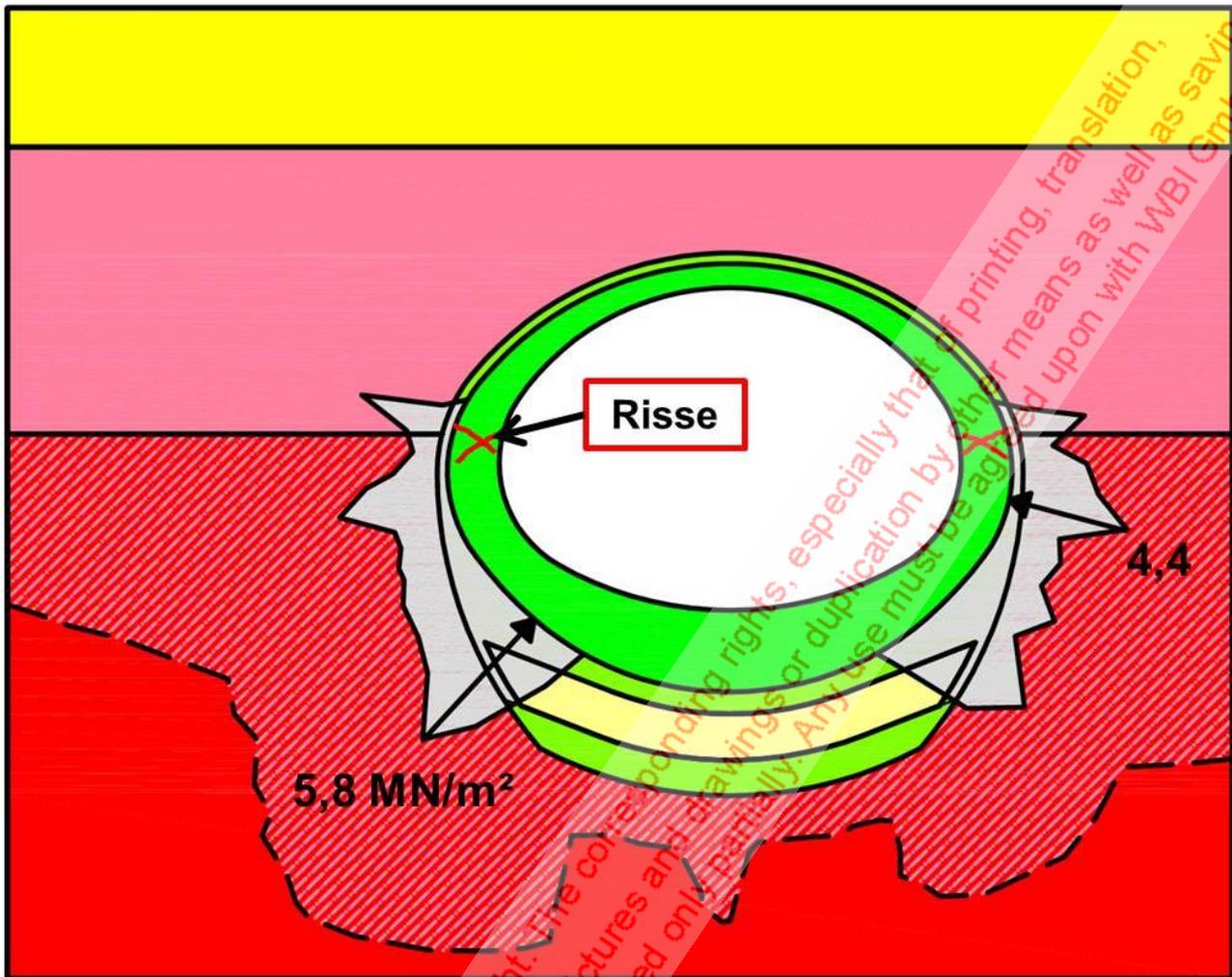


Bild 16: Engelbergbasistunnel, Abschnitte, in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Ulmen ansteht, Radialdruck auf die Innenschale 12 Jahre nach Inbetriebnahme

Auch wenn der Anhydritspiegel in Höhe der Tunnelsohle ansteht, kommt es ausbruchsbedingt in den in Bild 17 blau dargestellten Bereichen zu einer Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit um mehrere Zehnerpotenzen. Auch hier kann Wasser somit von oben und über die Knautschzone in das quellfähige Gebirge gelangen.

Die dadurch ausgelösten Quellvorgänge erstrecken sich auf den in Bild 18 gestrichelt gekennzeichneten Bereich und führen zu einer max. Quelldruckbeanspruchung der Schale von ca.  $4,2 \text{ MN/m}^2$ , die eine deutlich nach oben gerichtete Komponente hat und somit zu Hebungen geführt hat.

Die Berechnungsergebnisse werden grundsätzlich durch die Messergebnisse bestätigt (WBI 2014). Wie in Bild 19 zu erkennen, hat sich die Weströhre des Tunnels in Bereichen, in denen der Anhydritspiegel im Bereich und unterhalb der Sohle ansteht, seit der Inbetriebnahme um nahezu 10 cm gehoben. Die gemessenen Hebungen für den Abschnitt, in dem der Anhydritspiegel in der oberen Querschnittshälfte ansteht, sind mit ca. 2 cm deutlich geringer.

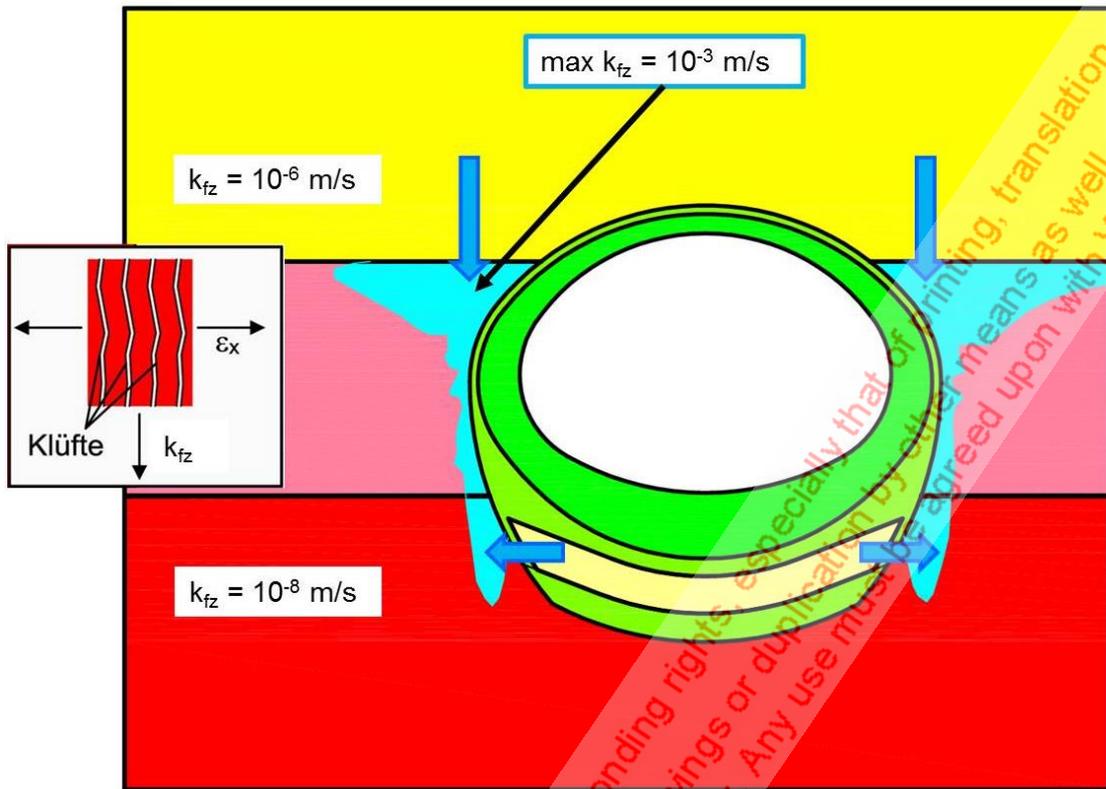


Bild 17: Engelbergbasistunnel, Abschnitte, in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Sohle ansteht, Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Ausbruch und Sicherung

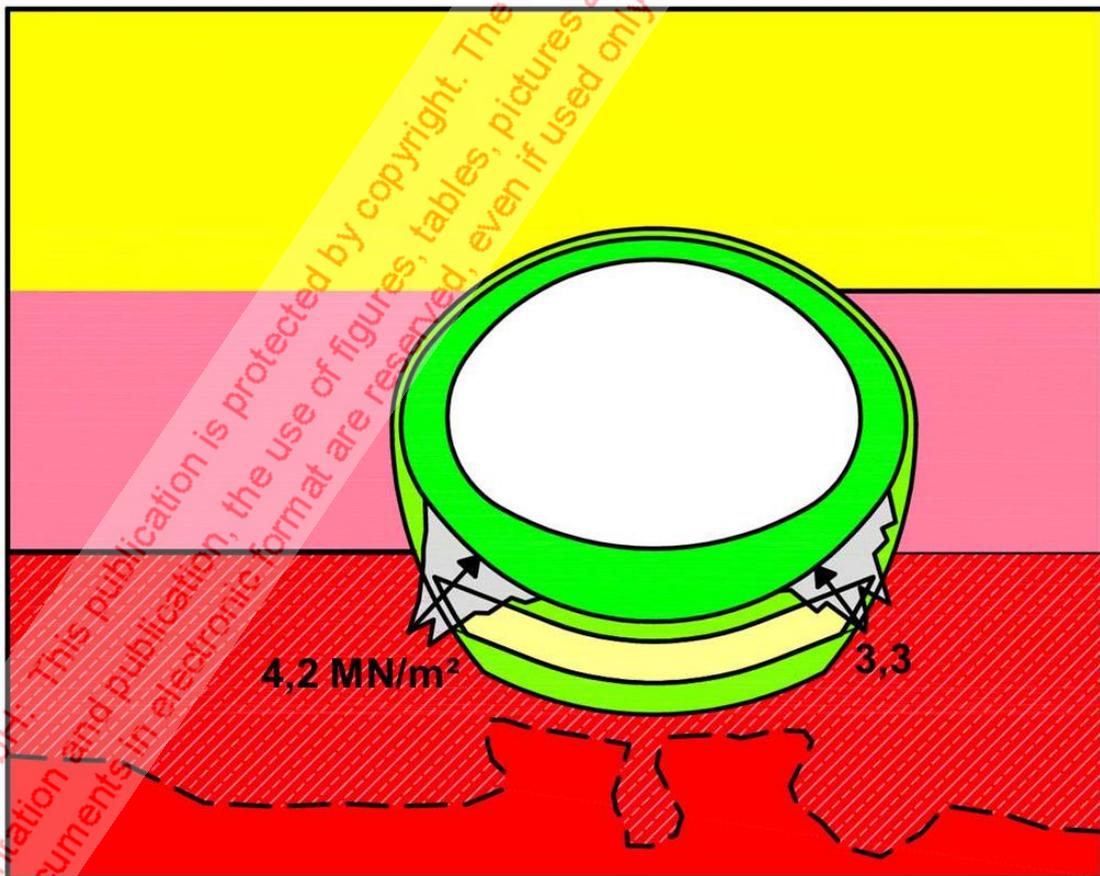


Bild 18: Engelbergbasistunnel, Abschnitte in denen der Anhydritspiegel in Höhe der Sohle ansteht, Radialdruck auf die Innenschale 12 Jahre nach Inbetriebnahme

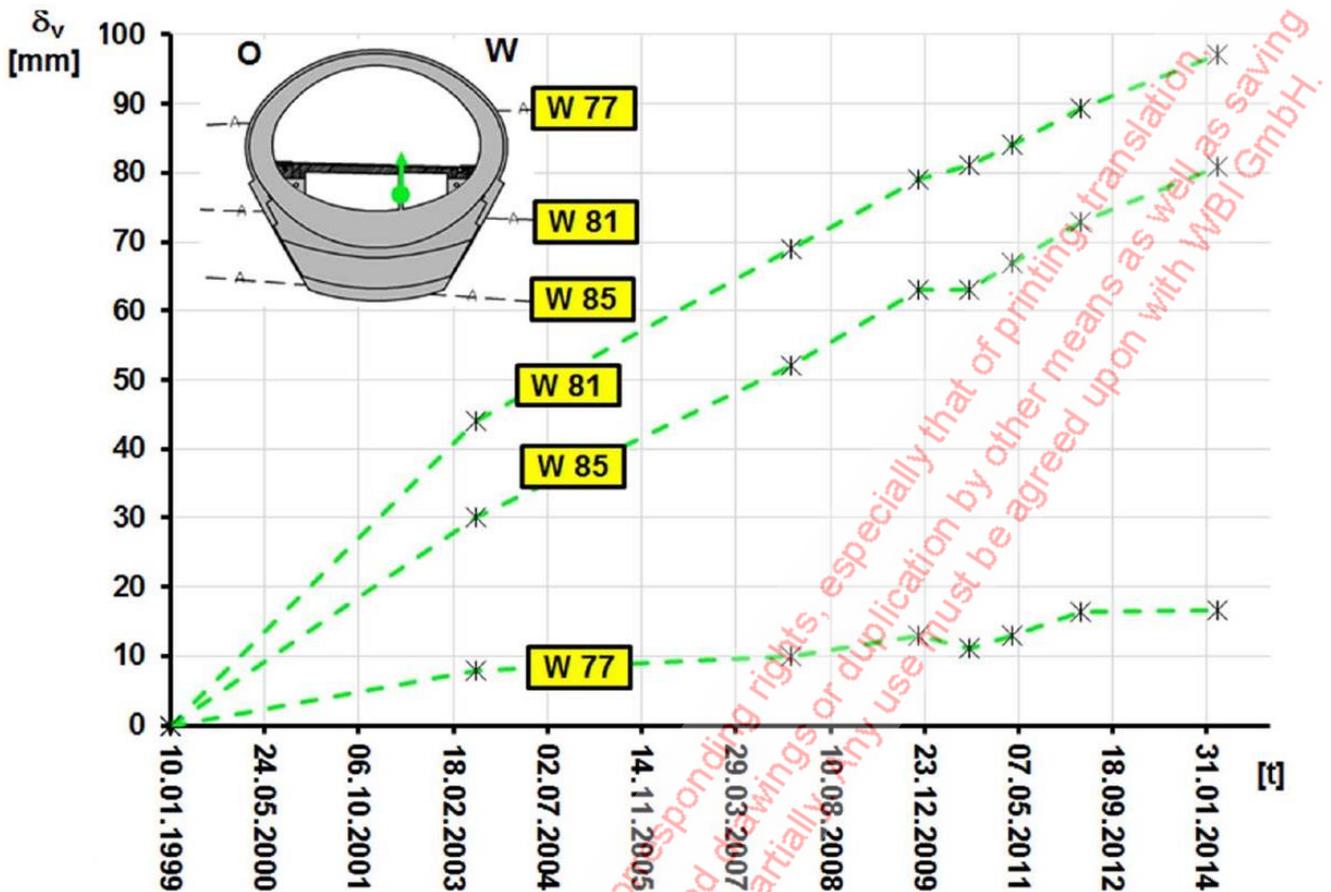


Bild 19: Engelbergbasistunnel, Messergebnisse Sohlhebungen, Weströhre (WBI 2014)

## 5. Schlussfolgerungen für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21

Die oben beschriebenen Erkenntnisse, die WBI im Jahr 2014 erarbeitet hat, haben dazu geführt, die Planungen der Tunnels nach Bad Cannstatt und Feuerbach für die Übergangsbereiche zwischen dem ausgelaugten und dem quellfähigen Gebirge noch einmal zu überprüfen bzw. zu überdenken. Wie an Bild 20 zu erkennen, treten auch bei dem deutlich kleineren Querschnitt der Eisenbahntunnel Zonen mit erhöhter Durchlässigkeit auf, die bei den zu erwartenden Verhältnissen vom wasserführenden Gebirge bis in das quellfähige Gebirge reichen. Ein Vergleich der Ausdehnung dieser Zonen zwischen dem VNS-Prinzip (Verfahren mit nachgiebiger Sohlstützung) und dem Kreisprofil zeigt, dass das VNS-Profil in dieser Hinsicht günstiger ist. Allerdings kann es auch hier zu deutlichen Wasserzutritten und, wie in Abschnitt 4 gezeigt, zu Hebungen kommen.

Um die Zonen mit einer erhöhten Durchlässigkeit zu minimieren bzw. die Verbindung der wasserführenden Schichten mit dem quellfähigen Gebirge zu unterbrechen, wurde daher ein sogenanntes U-Profil entwickelt, bei dem zumindest rechnerisch für die hier dargestellten Verhältnisse keine Verbindung der durchlässigen Zonen mit dem quellfähigen Gebirge auftritt (Bild 21).

Auf der Grundlage der hier nur in kurzer Form vorgestellten Berechnungen wurden entsprechende Ausbruchsklassen für das U-Profil ausgearbeitet. Danach ist vorgesehen, den Querschnitt im Vollausbuch mit einer abgetreppten Ortsbrust aufzufahren (Bild 22). Die

Abschlaglänge beträgt 1 bis 1,5 m und die im Übergang zwischen der Ulme und der Sohle vorgesehene Aufdickung des Spritzbetons wird größtenteils in der Nähe der Ortsbrust hergestellt. Die Dicke der Spritzbetonschale ist zur Begrenzung der Auflockerung im Gebirge mit 20 bis 30 cm vorgesehen. Außerdem werden oberhalb des Anhydritspiegels nach Notwendigkeit Vakuumlanzen vorgesehen um etwaige Wasserzutritte abzusaugen.

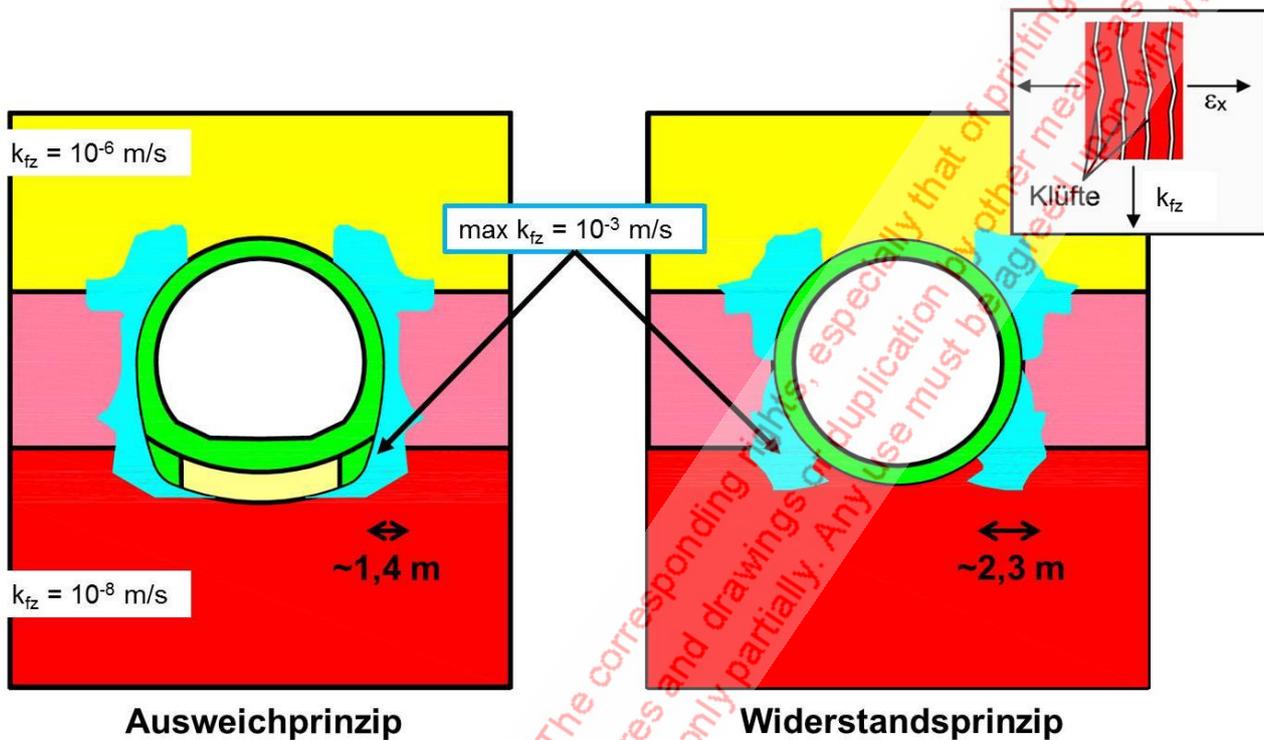


Bild 20: Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit im Fels infolge Ausbruch und Sicherung eines eingleisigen Eisenbahntunnels, Vergleich VNS-/Kreisprofil

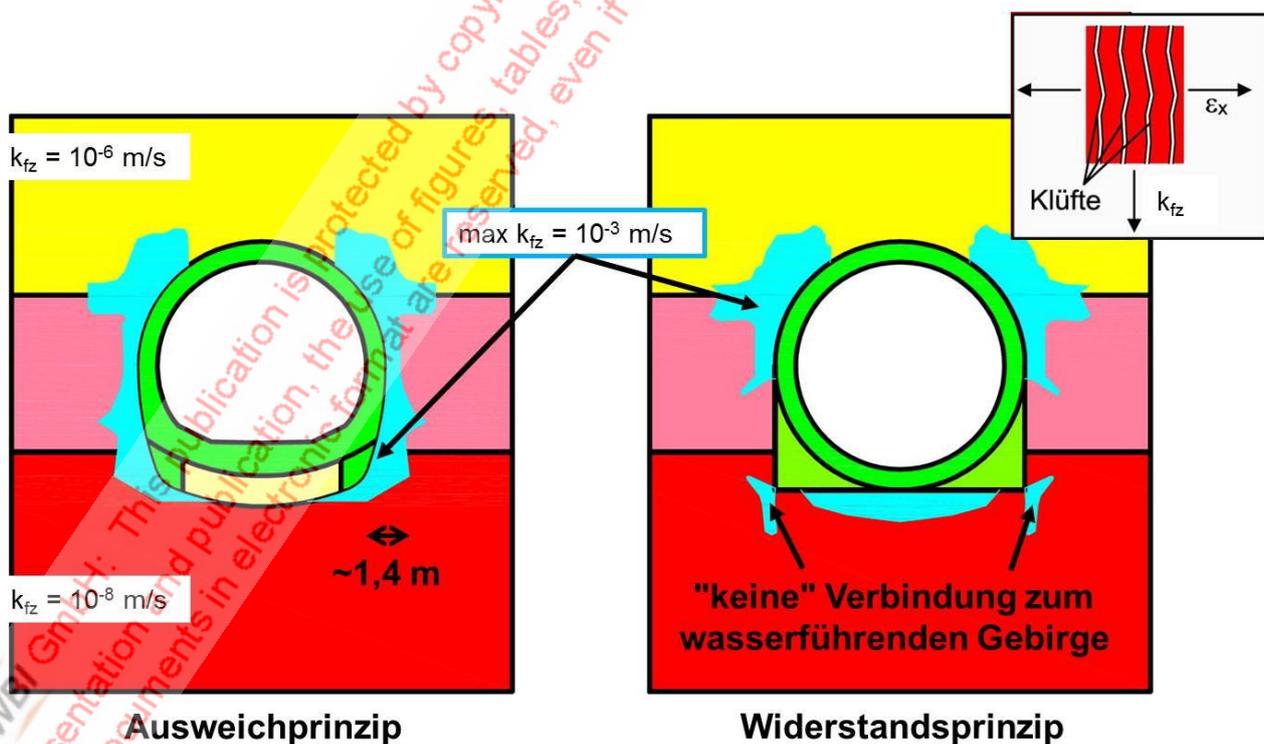


Bild 21: Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit im Fels infolge Ausbruch und Sicherung, Vergleich VNS-/U-Profil

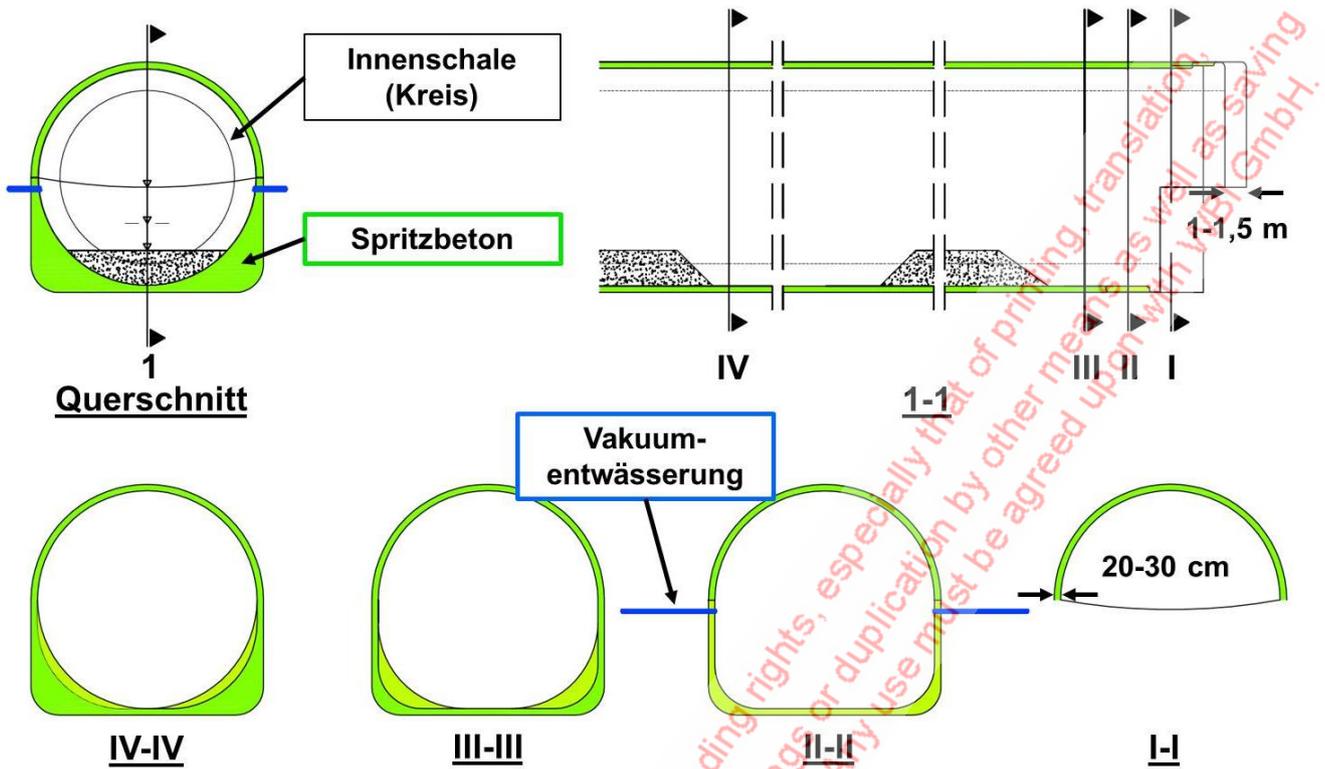


Bild 22: U-Profil für die Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt, Vortriebsklasse

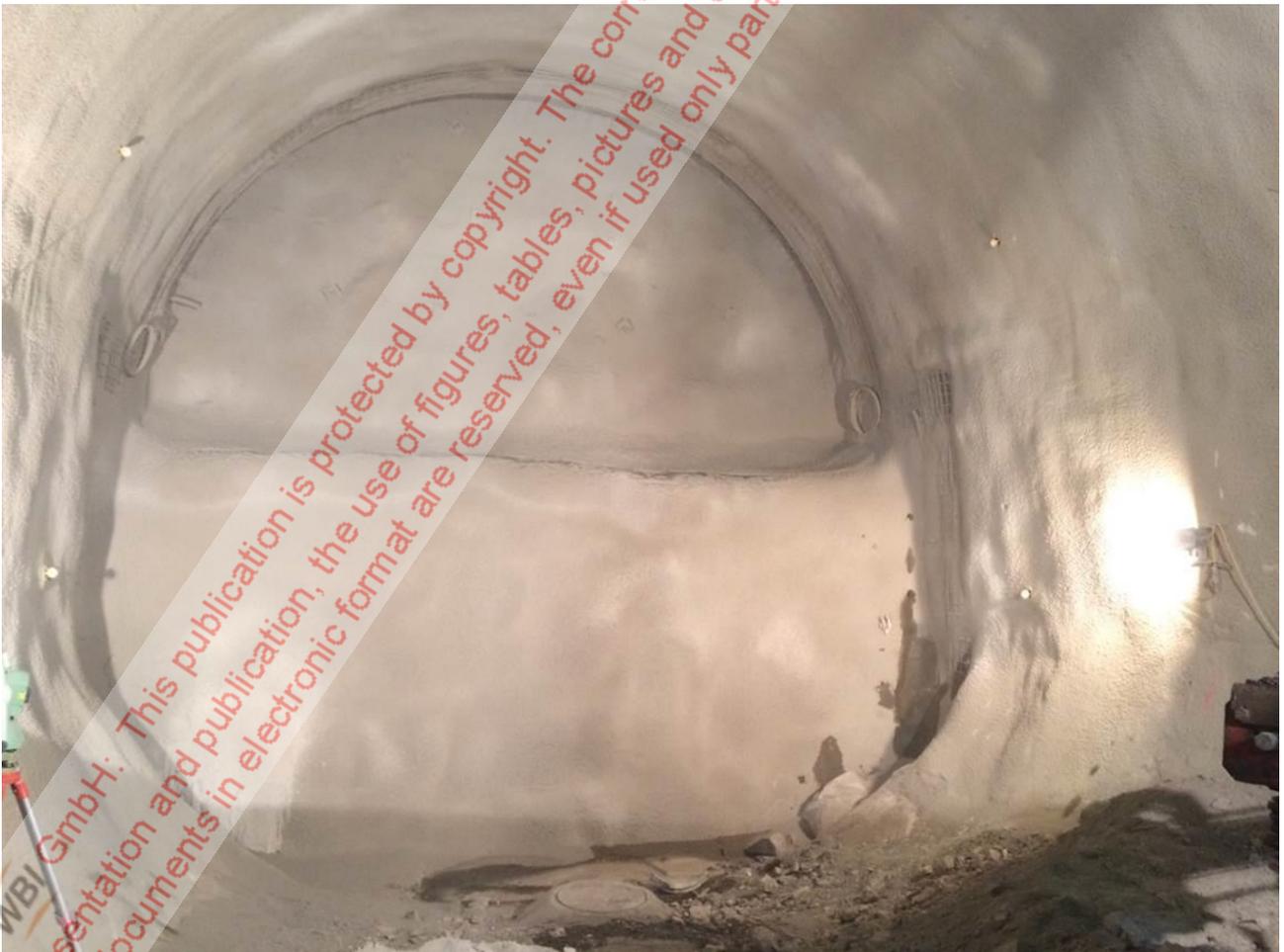


Bild 23: U-Profil, Foto

## Literaturverzeichnis

Alonso, E. E.; Olivella, S.: Modelling tunnel performance in expansive gypsum claystones. In: Proc. 12th Int. Conf. of Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, 2008.

Alonso, E. E.; Ramon, A.: El tunel de Lilla. In: Proc. Jornada Tecnica sobre Tuneles en Terrenos Salinos y Expansivos, Barcelona, 2011.

Kirschke, D.; Kuhnenn, K.; Pommersberger, G.: Der Freudensteintunnel: Eine Herausforderung für den planenden Ingenieur, ibw 7, 5 - 39, 12. 1991.

Wahlen, R.: Validierung eines Berechnungsverfahrens für Tunnelbauwerke in quellfähigem Gebirge. WBI-PRINT 17, Verlag Glückauf GmbH, Essen 2009.

WBI: BAB A81, Engelbergbasistunnel, Abschnitte im quellfähigen Gebirge, Quantifizierung von Drücken bzw. Hebungen und Sanierungsvorschläge, Bericht Nr. 04, Auswertung und Bewertung der Messergebnisse und Beobachtungen, Rückrechnung mit FE-Berechnungen und Erarbeitung von Sanierungsvorschlägen. November 2014 (unveröffentlicht).

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

Wittke, W.: Planung, Bau und Überwachung von Tunneln in quellfähigem Gipskeuper. geotechnik 27 (2004) Nr. 2, Verlag Glückauf GmbH, Essen 2004.

Wittke, W.: Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tages 2015 im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim 2015.

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

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-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunneln in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. Geotechnical engineering in research and practice, WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1998.