

Planung und Ausführung von Injektionen im anhydritführenden Gipskeuper

Dipl.-Ing. Christoph Lienhart

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

Zusammenfassung

Der Planfeststellungsabschnitt 1.5 des Großprojekts Stuttgart 21 umfasst unter anderem die in großen Teilen im anhydritführenden Gipskeuper liegenden Tunnel Feuerbach und Tunnel Cannstatt. Aufgrund der Quellfähigkeit dieses Gesteins bei Wasserzutritt sind während der gesamten Rohbauarbeiten aufwendige Maßnahmen vorzusehen. Das umfangreiche Maßnahmenpaket und der resultierende Aufwand für die Projektbeteiligten werden in diesem Beitrag skizziert.

1. Das Projekt

Das Bahnprojekt Stuttgart-Ulm umfasst die Baumaßnahme Stuttgart 21 und die Neubaus Strecke Wendlingen-Ulm. Stuttgart 21 (s. Bild 1) ist die komplette Neuordnung des Bahnknotens Stuttgart.

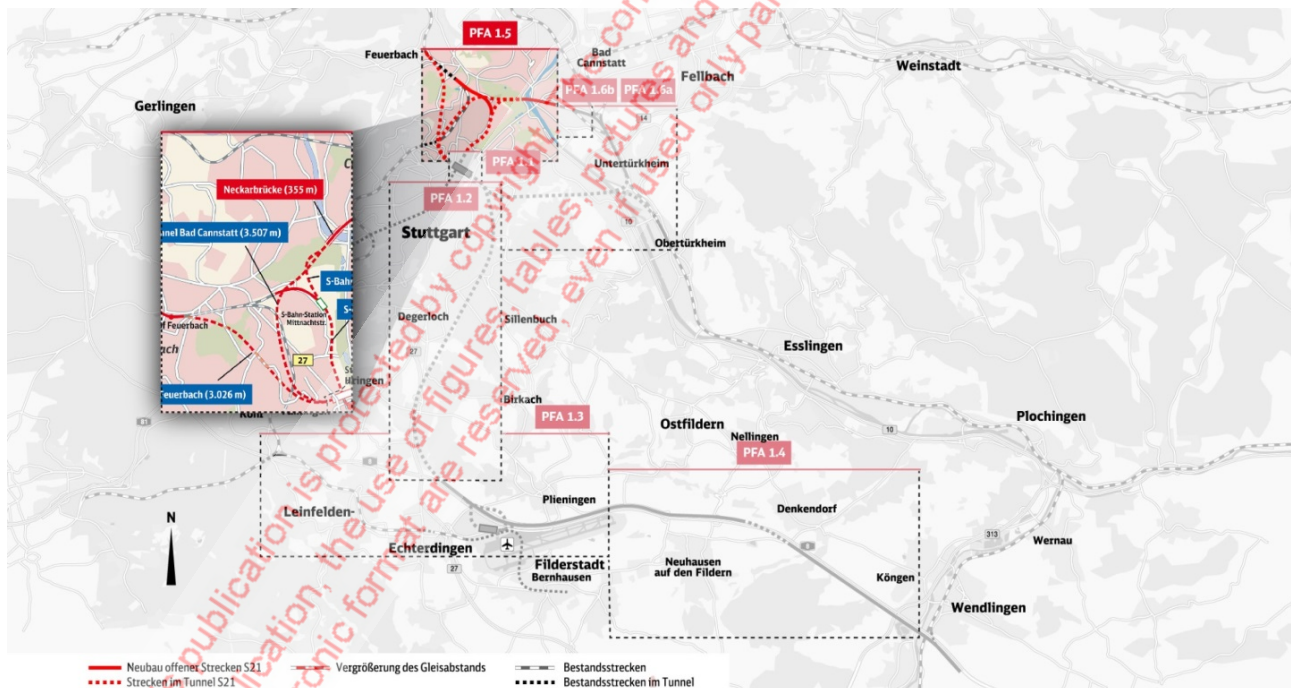


Bild 1: Planfeststellungsabschnitte Stuttgart 21 - Übersicht

Das Gemeinschaftsprojekt wurde 2009 mit dem Finanzierungsvertrag von Bund, Land Baden-Württemberg, Landeshauptstadt Stuttgart, Verband Region Stuttgart, Flughafen Stuttgart GmbH und der Deutschen Bahn beschlossen. Gebaut werden:

- vier neue Bahnhöfe,
- 57 Kilometer neue Schienenwege, die mit bis zu 250 km/h befahren werden,
- 59 Kilometer Tunnelröhren,
- 16 Tunnel und Durchlässe,
- 18 Brücken.

Davon entfallen ca. 15 Kilometer auf die Tunnel Feuerbach und Cannstatt (s. Bild 2).

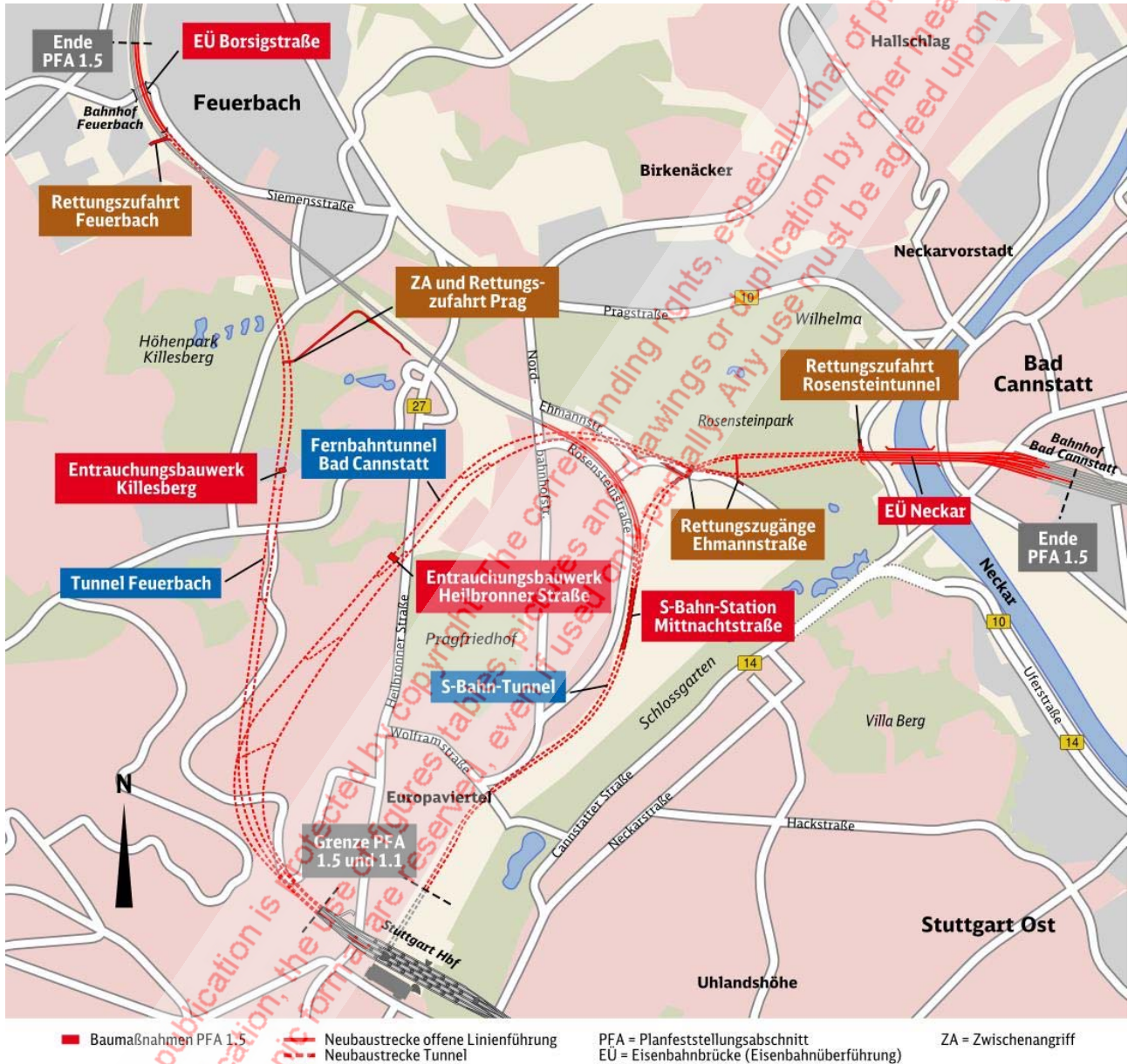


Bild 2: Planfeststellungsabschnitt PFA 1.5 - Übersicht

Mit Stand 06/2018 sind alle Vortriebe im PFA 1.5 im anhydrithaltigen Gipskeuper abgeschlossen und die abdichtenden Acrylatgelinjektionen sowie die Betonagen der ersten hochbewehrten Innenschalenblöcke werden ausgeführt (s. Bild 3).

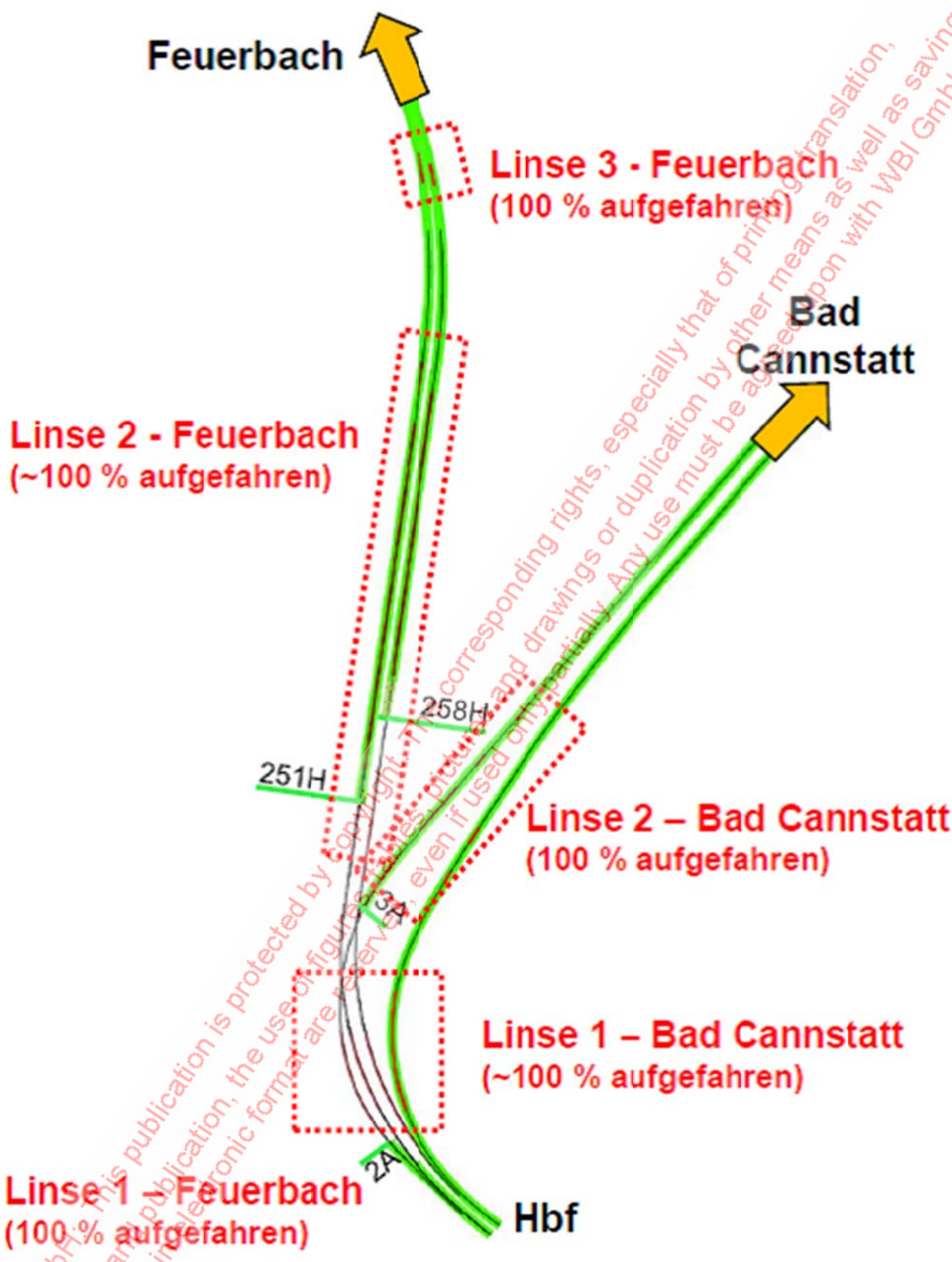


Bild 3: Stand der Arbeiten im PFA 1.5

2. Untergrundverhältnisse

Die Trassen der beiden Tunnel Feuerbach und Cannstatt liegen vollständig im regional-typischen ausgelaugten und unausgelaugten Gipskeuper (Bilder 4 und 5).

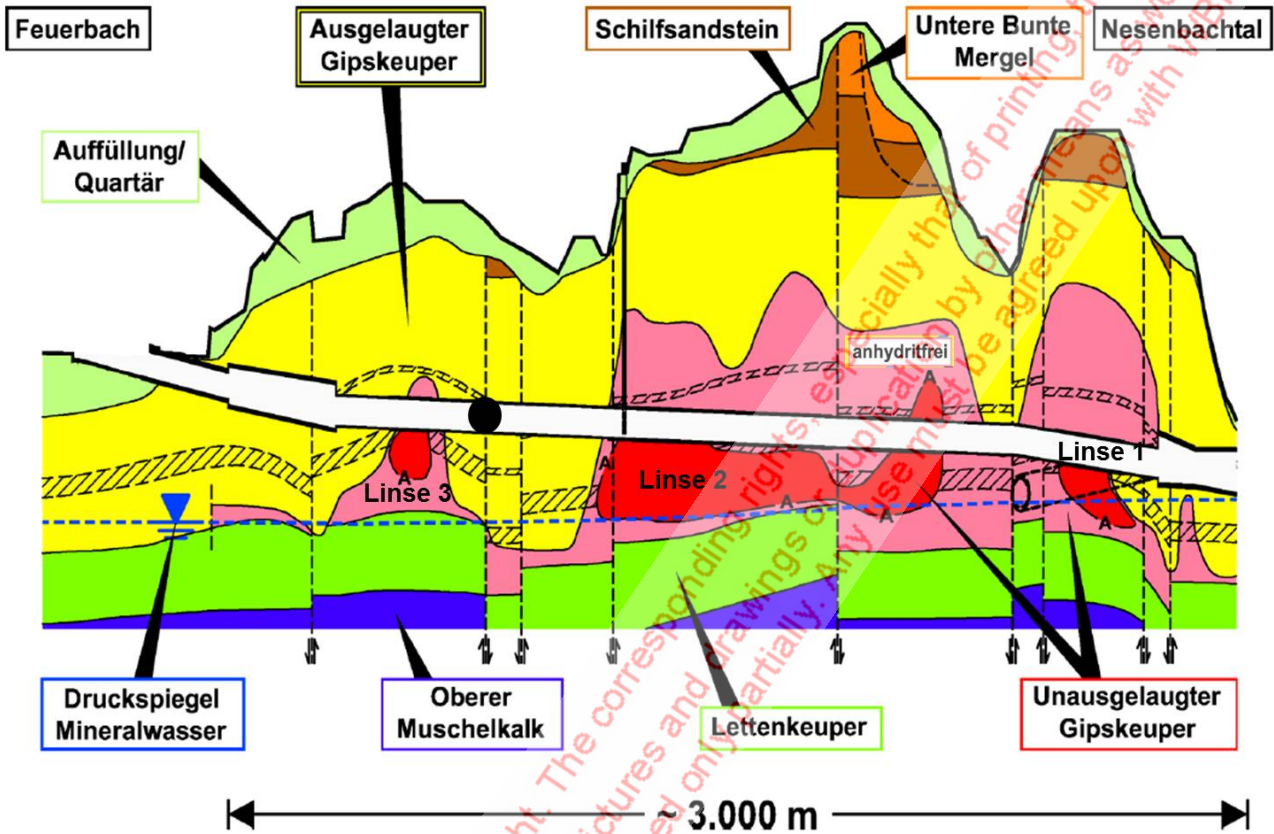


Bild 4: Geologischer Längsschnitt Tunnel Feuerbach

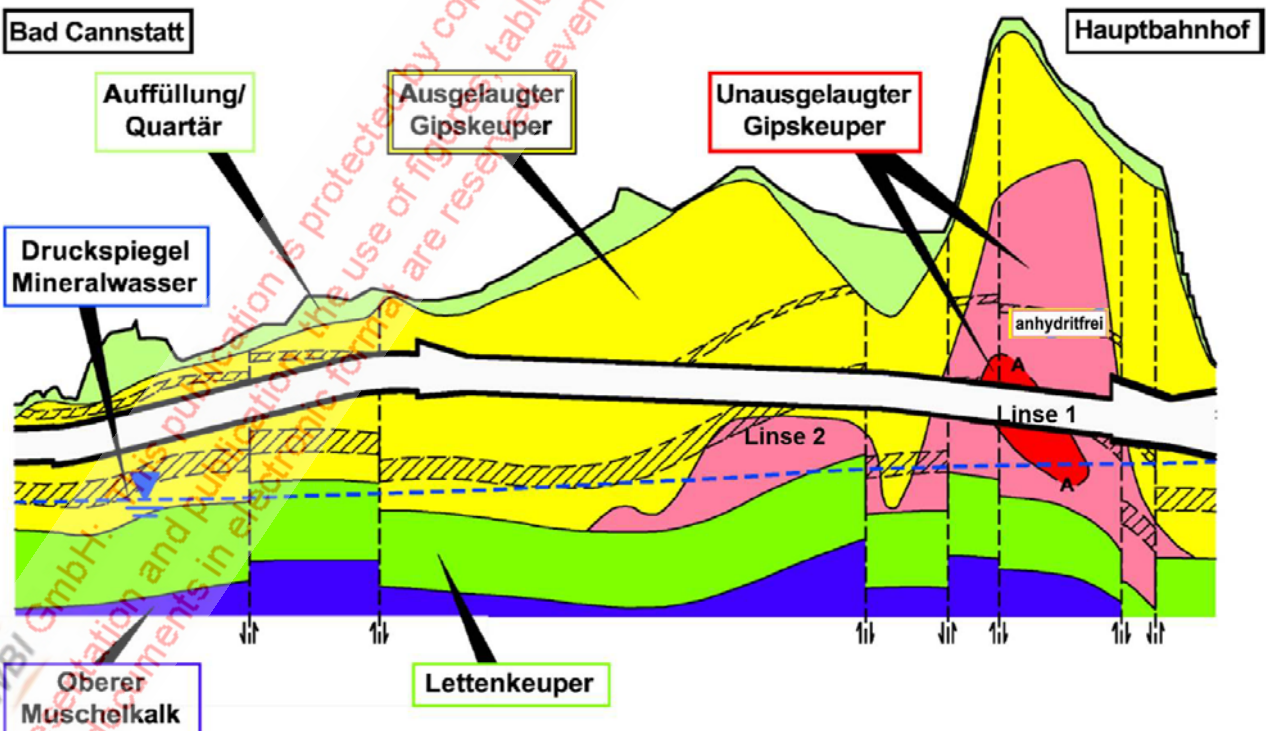


Bild 5: Geologischer Längsschnitt Tunnel Cannstatt

Der unausgelaugte Gipskeuper ist wiederum teilweise anhydritführend, so dass ca. 3.500 Tunnelmeter eingleisige Röhren unter den in den folgenden Kapiteln geschilderten bautechnischen Besonderheiten aufgeföhren, abgedichtet und mit hochbewehrten Innenschalen ausgebaut werden, um auf das Quellpotential des Anhydrits zu reagieren. Anhydrit (CaSO_4) reagiert nämlich unter Wasserzugabe (H_2O) zu Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Dieser chemische Vorgang ist mit einer bis zu 60%-igen Volumenzunahme verbunden. Bei Behinderung der Quellverformungen föhrt diese Reaktion wiederum zu Quelldrücken. Diese sind statisch bei der Dimensionierung des Bauwerks zu berücksichtigen.

In Bild 6 sind ein Gefügemodell und die mechanischen Eigenschaften des unausgelaugten Gipskeupers dargestellt.

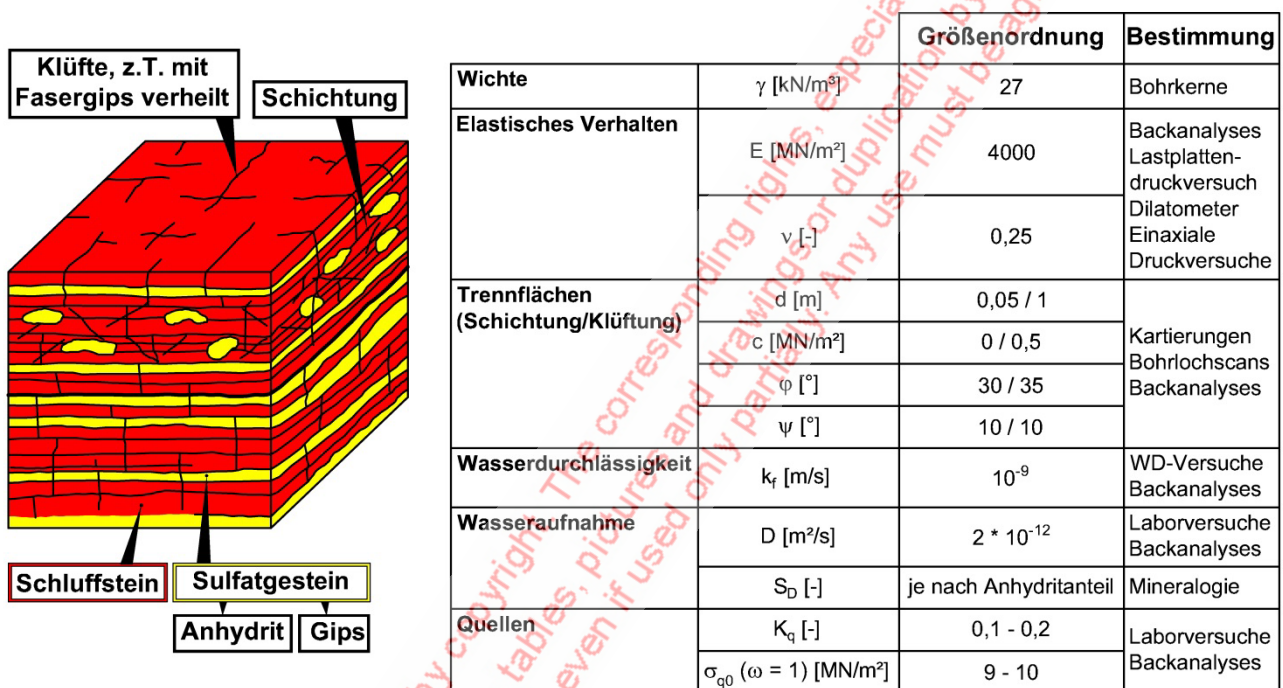


Bild 6: Unausgelaugter Gipskeuper - Gefügemodell und Kennwerte

3. Bautechnische Besonderheiten

Die Tunnel Feuerbach und Cannstatt werden im Widerstandsprinzip gebaut. Das bedeutet, dass, anders als beim VNS-Prinzip, keine Knautschzone ausgeführt wird, die mögliche Volumenzunahmen des anhydritführenden Gipskeupers kompensiert, und stattdessen die Innenschale den auftretenden Quelldruck abträgt. Aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit und des Eisenbahnbetriebs dürfen die Verformungen der Innenschale bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Hierzu muss sichergestellt sein, dass eine ausreichende Betung oberhalb des Tunnels vorliegt und die Quellprozesse durch die Abdichtungsinjektionen soweit reduziert werden, dass über die Nutzungsdauer hinweg nur geringe Wasserzutritte in den Anhydrit auftreten können.

Neben den o. g. Voraussetzungen ist ein umfangreiches Maßnahmenpaket entwickelt worden, nach dem die Arbeiten im Anhydrit ausgeführt werden:

- Trockener Vortrieb im U-Profil,
- Umfangreiches Erkundungs- und Messprogramm in Bau- und Betriebsphase,
- Abdichtungsinjektionen,
- Einrichtung eines Expertengremiums.

3.1 Trockener Vortrieb im U-Profil

Anhydritführende Tunnelbereiche werden in Bereichen im U-Profil aufgeföhren, in denen anhydritführendes Gebirge in der unteren Querschnittshälfte des Tunnels ansteht (Bild 7, rechts). Bei dem zunächst für diese Bereiche vorgesehenen VNS- oder Ausweichprinzip reicht die vortriebsbedingte, stark wasserdurchlässige Auflockerungszone bis zum wasserführenden ausgelaugten Gipskeuper und erleichtert damit den Zutritt des Wassers zum Anhydrit (Bild 7, links). Das ist beim U-Profil nicht der Fall, was sich günstig auf die Quellbeanspruchung der Auskleidung und ihre zeitliche Entwicklung auswirkt. Die durch die Querschnittsform unter der horizontalen Sohle entstehende Auflockerungszone wirkt sich dagegen nicht auf die Quellbeanspruchung aus, weil hier kein Wasser ansteht (Bilder 7 und 8). In Tunnelabschnitten, in denen der Anhydritspiegel oberhalb der Querschnittsmitte ansteht, wurde ein Kreisprofil ausgeführt.

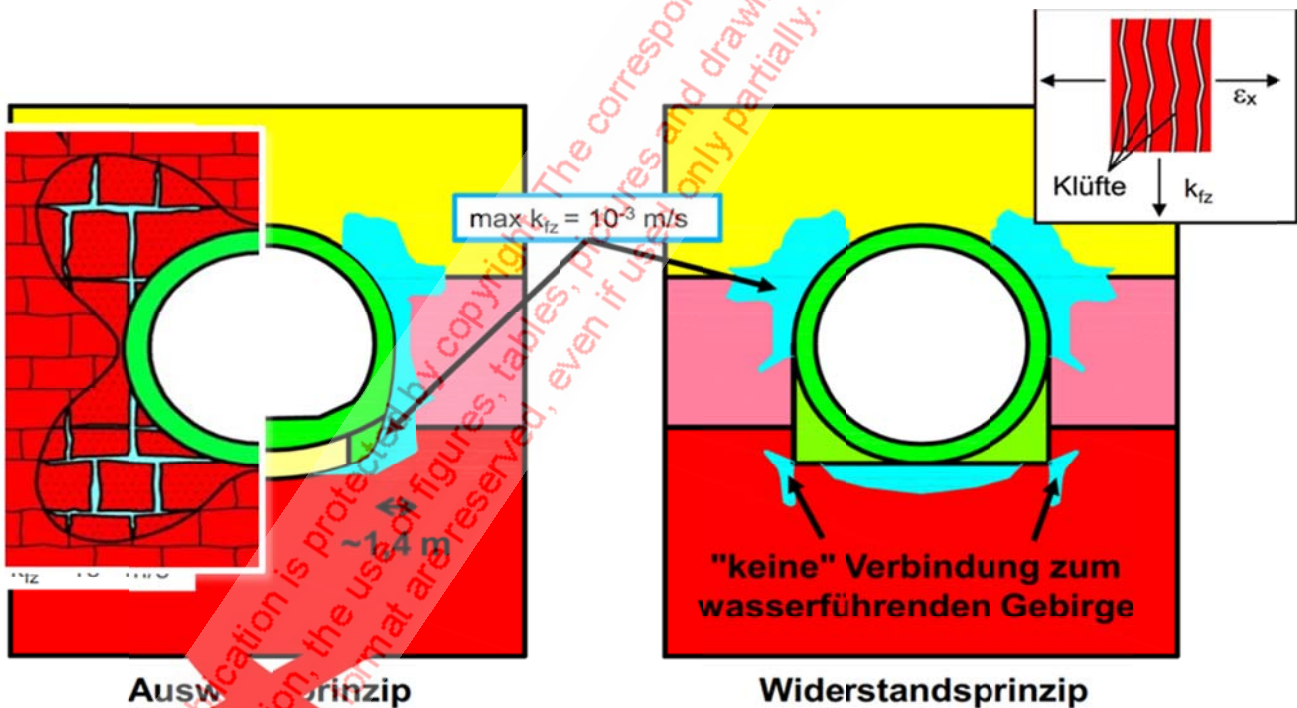


Bild 7: Vergleich Kreis- und U-Profil: Durchlässigkeiten

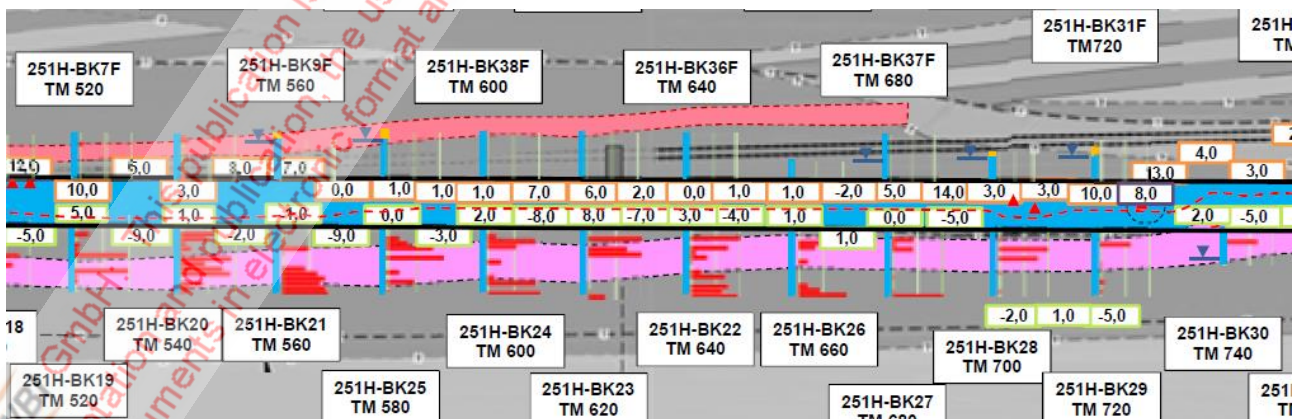
Neben der geänderten Querschnittsform wird im Vortrieb trocken gearbeitet (bspw. beim Bohren), und es werden keine Ankersicherungen ausgeführt, um ein Anbohren wasserführender Schichten zu vermeiden. Sollte im Vortrieb Wasser angetroffen werden, wird dies umgehend mittels Vakuumpflanzen gefasst und abgeföhrt. Zudem werden in diesem Fall vorausseilende Injektionen durchgeföhrt (s. Kapitel 3.3.).



Bild 8: U-Profil: Ortsbrustaufnahme

3.2 Umfangreiches Erkundungsprogramm

Um ein genaues Bild über die geologische und geochemische Situation zu erhalten, werden im Abstand von 20 m Sohl- und Firstbohrungen abgeteuft (s. Bild 9). Die aus den Bohrungen entnommenen Proben werden insbesondere auf die Anhydritgehalte hin untersucht. Zudem werden systematisch vortriebsbegleitend Proben an der Ortsbrust entnommen, an denen ebenfalls die Sulfatgehalte bestimmt werden (Bild 10). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind für die statischen Bemessungen der Innenschale maßgebend, da der Lastfall Quellen den größten Einfluss auf die Dimensionierung hat.



© Bild 9: Erkundungsprogramm: Sohl- und Firstbohrungen mit Anhydritgehaltbestimmung

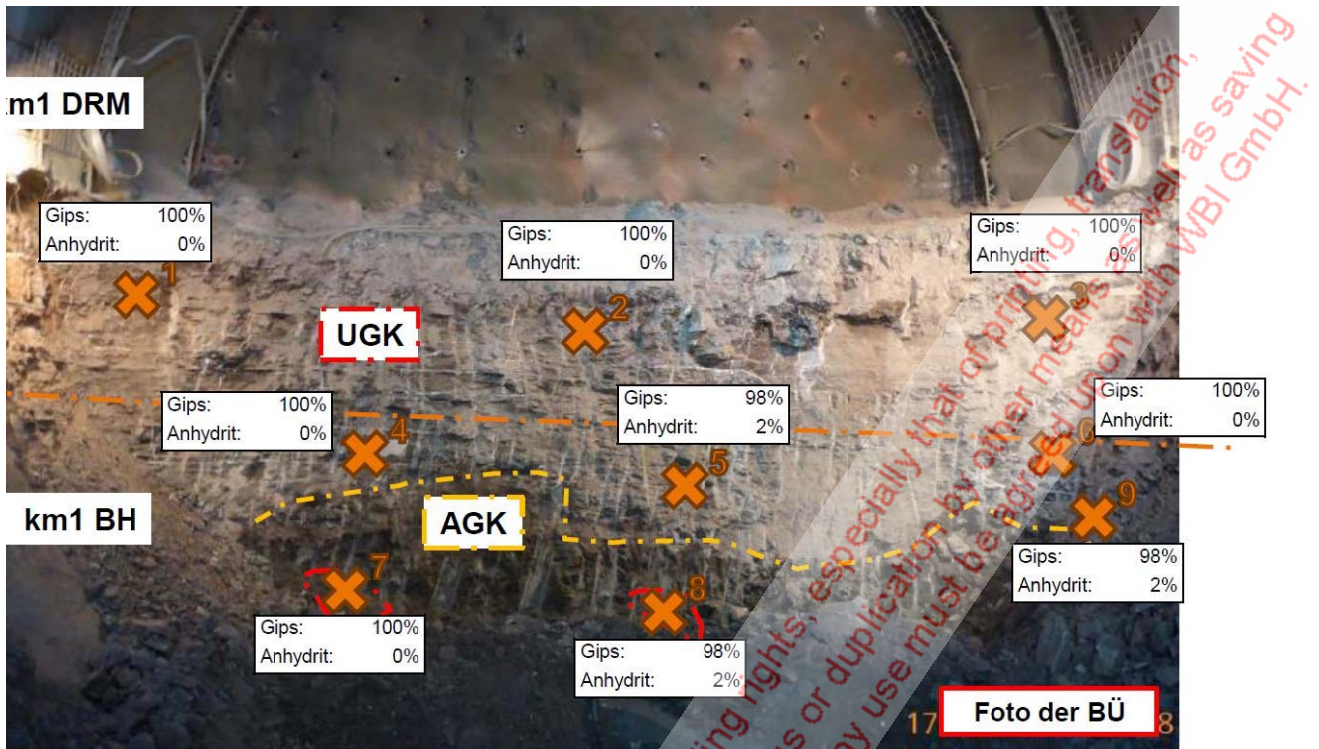


Bild 10: Probennahmen und Bestimmung der Sulfatgehalte

Darüber hinaus werden ober- und untertägige Messungen durchgeführt. Hierbei wird besonders den Sohlmesspunkten zur Messung möglicher Hebungen hohe Beachtung gewidmet. Über mehrere Messquerschnitte, die bis zu den Beweissicherungsgrenzen reichen, werden zudem obertägige Verformungsmessungen samt Extensometermessungen durchgeführt.

Im Tunnel werden wiederum an maßgebenden Stellen im Einflussbereich des Anhydrits Sohlextensometer eingebaut. Hierüber können auftretende Bewegungen unterhalb des Tunnelquerschnitts über die gesamte Nutzungsdauer aufgezeichnet und bewertet werden. Zusätzlich dazu werden in der Innenschale Druckmessdosen vorgesehen (s. Bild 11).

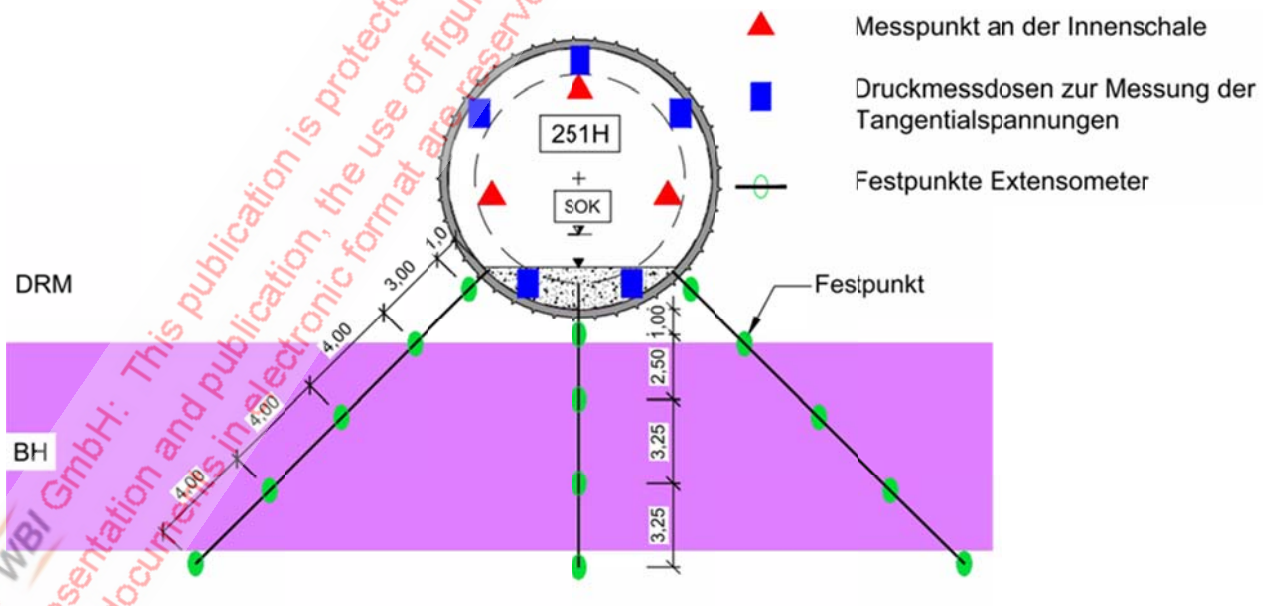


Bild 11: Messprogramm: Innenschale im Anhydrit

3.3 Abdichtungsinjektionen

Um die für die Bauwerke schadhafte Wasserzutritte zum Anhydrit zu vermeiden, werden verschiedene Arten von Injektionen im Projekt eingesetzt. An dieser Stelle wird nur auf die umfangreichsten und maßgebenden Injektionen eingegangen.

i) Vortriebsbegleitende vorausseilende Injektionen mit PU-Harz

Durch vorausseilende Injektionen im Vortrieb werden Wasserzutritte aus der Auslaugungsfront unterbunden. Sofern im Vortrieb Wasserzutritte zu beobachten sind, wird das zutretende Wasser gefasst, und es werden in mehreren Phasen vorausseilende Injektionen mit bei Wasserkontakt aufschäumendem PU-Harz ausgeführt (s. Bilder 12 und 13). Erst nach erfolgreicher Unterbindung der Wasserzutritte wird der Vortrieb fortgesetzt.

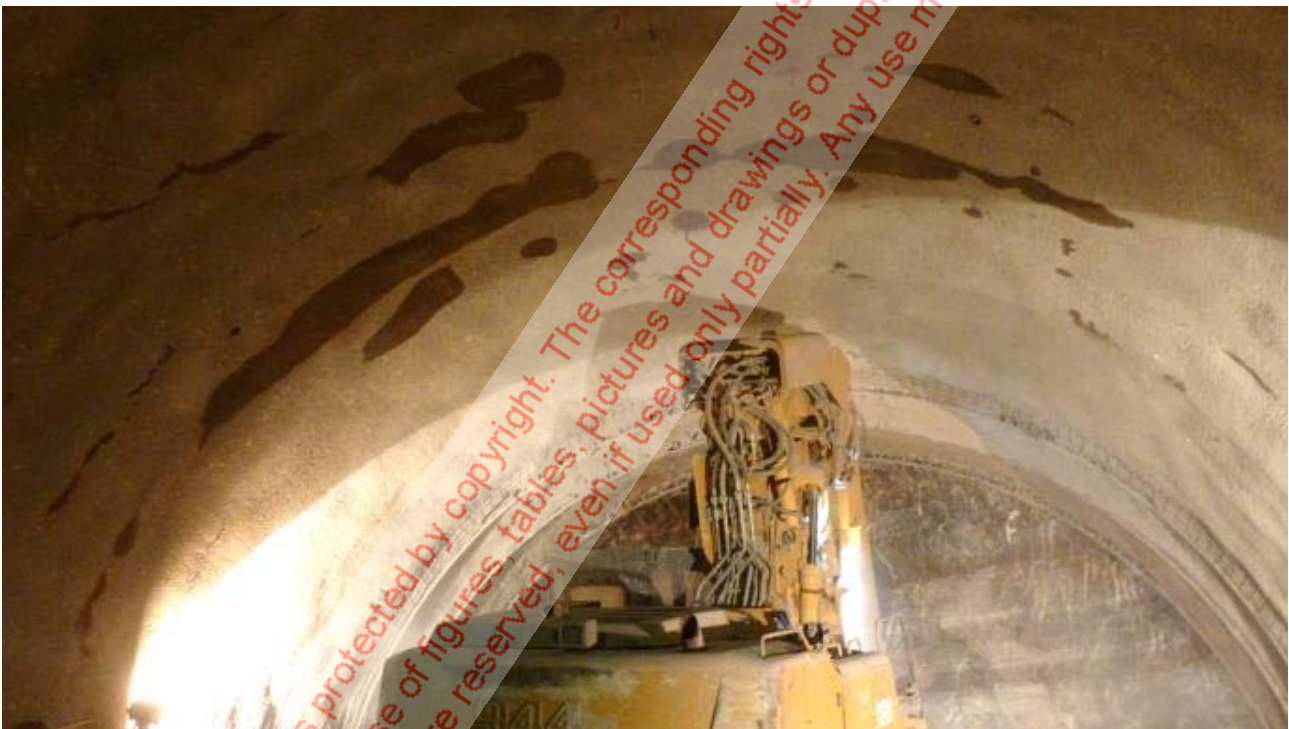


Bild 12: Wasserzutritte im Vortrieb

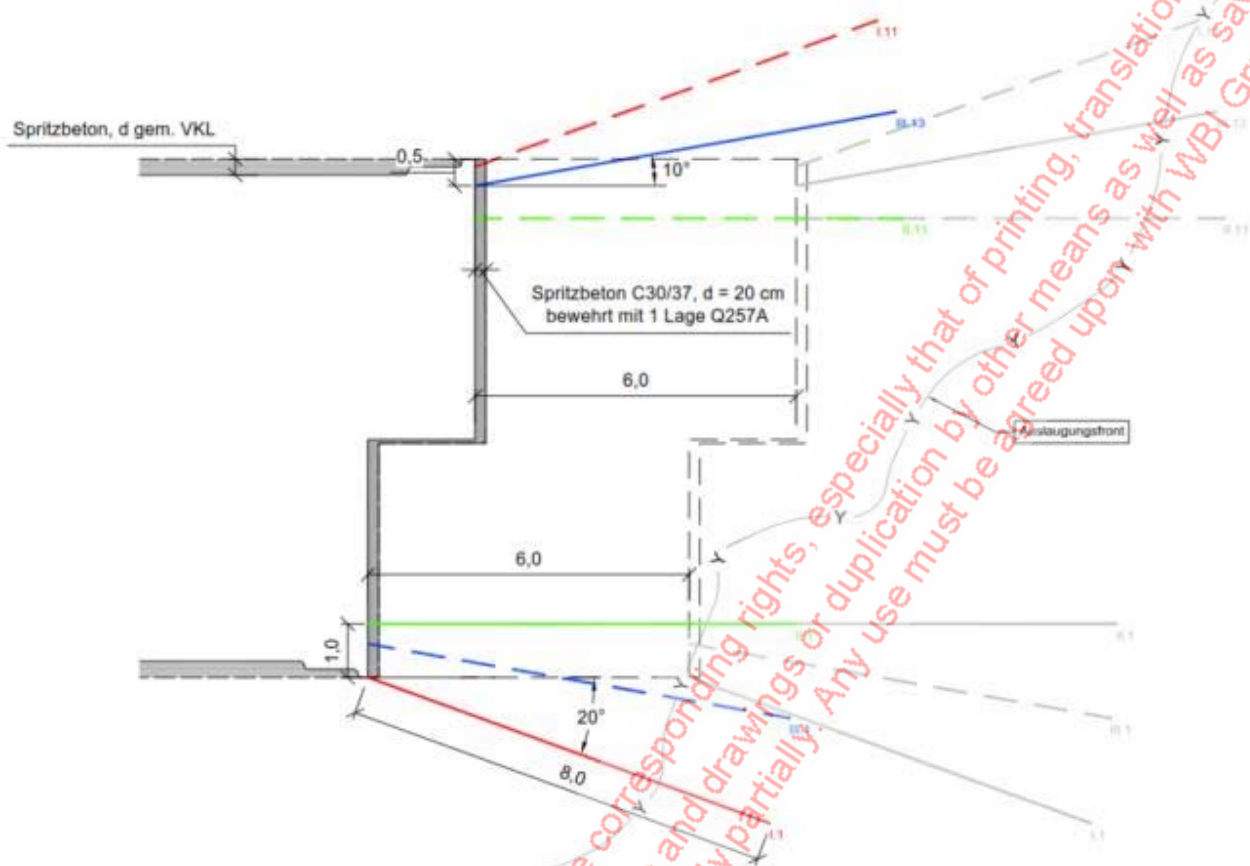


Bild 13: Vorseilende Injektionen: Konzept

ii) Abdichtungsinjektionen mit Acrylatgel

Die umfangreichste Maßnahme zur Vermeidung unzulässiger Quellhebungen sind die radialen Abdichtungsinjektionen mit Acrylatgel. Diese Injektionen erfolgen im Nachgang zum eigentlichen Vortrieb. Ziel ist die Reduzierung der Durchlässigkeit der vortriebsbedingten Auflockerungszone. Hierzu ist ein gering viskoses Injektionsmittel einzusetzen, um feinste Risse bis 0,1 mm Öffnungsweite unter Einhaltung der maximal möglichen Drücke, ohne ein Aufreißen des Gebirges (Fracking) auszulösen, zu injizieren. Die Injektionen werden radial um den Tunnel mit Längen zwischen 4 und 10 m ausgeführt. Die Längen und Injektionsbereiche hängen hauptsächlich von der Lage des Anhydritspiegels, den Anhydritgehalten und dem Abstand zu den wasserführenden Schichten ab. Aufgrund der langen Strecken im Anhydrit (s. Kapitel 1) stellen die Abdichtungsinjektionen nicht nur eine technische, sondern auch eine baubetriebliche Herausforderung dar. So sind die Tunnelbereiche, in denen Injektionen ausgeführt werden, für andere Arbeiten oder als Logistikweg nicht nutzbar. Im Bild 14 sind laufende Injektionen über 3 Hebebühnen zwischen zwei Verbindungsbauwerken dargestellt.



Bild 14: Laufende Injektionen im Tunnel Feuerbach

iii) Abdichtungsbauwerke aus Acrylatgel

Eine weitere umfangreiche Injektionsmaßnahme sind Abdichtungsbauwerke, sogenannte Dammringe, um Grundwasserströmungen entlang der Tunnellängsrichtung zu unterbinden. Hierzu wird der Querschnitt radial auf 5 Metern aufgeweitet, mit Spritzbeton wiedererfüllt und nachinjiziert. Darüber hinaus sind besondere Maßnahmen beim Innenschalenbau erforderlich.

3.4 Expertengremium

Ende 2016 wurde zudem ein Expertengremium eingerichtet, das sich mit dem besonderen Themenkomplex Anhydrit beschäftigt. In 2-monatlichen Sitzungen werden aktuelle Fragestellungen und Optimierungsmöglichkeiten erörtert.

Der Teilnehmerrunde gehören Herr Lienhart, Herr Osthoff und Herr Drescher (alle DB PSU), Herr Prof. Wittke und Herr Dr. Wittke (beide WBI), Herr Dr. Rauscher (EDR) und Herr Chiaverio (Aegerter & Bosshardt) an.

4. Herausforderungen an den Bauherrn

Aufgrund der sehr hohen Komplexität des Projekts ist der Bauherr in diesem Projekt mit vielen unterschiedlichen Herausforderungen konfrontiert, die sowohl technischer als auch politischer, vertraglicher und behördlicher Natur sind.

Die geänderten Arbeiten im Anhydrit erfordern hohe Flexibilität aller Beteiligten, was die bauvertragliche Umsetzung mit den Auftragnehmern erschwert. Zusätzlich dazu wurde die Planungsverantwortung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer geteilt. So wird z. B. die Ausführungsplanung im Anhydrit (Statik und Bewehrung) im Auftrag des Bauherrn vom Büro WBI erstellt.

Aus dem geschilderten Maßnahmenpaket in Kapitel 3 resultieren zudem Auswirkungen, die gemeinschaftlich zu lösen sind. So steigt beispielsweise der Staubanteil im Tunnel aufgrund des nicht zugelassenen Einsatzes von Wasser in den anhydritführenden Bereichen an. Dies führt u. a. zu Änderungen im Bewetterungskonzept bzw. im Arbeitsschutz. Gleichzeitig erfordert die erhöhte erforderliche Lüfterleistung zusätzliche schalltechnische Maßnahmen zum Schutz der angrenzenden Anwohner.

Eine weitere Änderung betrifft den gestiegenen Umfang der Anhydritbereiche. Daraus resultieren Mehrmengen sowohl im Vortrieb als auch bei den Injektionen und den Innenschalen (Stahlmengen, m³ Beton etc.). Dies führt zu einer längeren Parallelität unterschiedlicher Aufgaben und damit einhergehenden organisatorischen Herausforderungen in Baubetrieb und Logistik.

5. Acrylatgelinjektionen

5.1 Anforderungen und Stand der Injektionen

Mit den Injektionsarbeiten wurde im April 2017 begonnen. Der bis zum 01.06.2018 erreichte Stand der Arbeiten ist in Bild 15 dargestellt. Danach sind die Injektionsarbeiten in Tunnelabschnitten mit einer Gesamtlänge von ca. 770 m abgeschlossen. In Abschnitten mit einer gesamten Länge von 910 m werden die Einpressarbeiten z. Z. ausgeführt.

Durch das Auffahren und Sichern der Tunnelquerschnitte werden - wie bereits an anderer Stelle im vorliegenden Heft erläutert - Auflockerungszonen im Nahbereich des Hohlraums erzeugt. Diese weisen gegenüber dem unverritzten Gebirge eine erhöhte Durchlässigkeit auf. Für einen Abschnitt im Bereich der Linse 2 des Vortriebs V3B des Tunnels nach Bad Cannstatt wurden beispielweise in der Auflockerungszone Durchlässigkeitsbeiwerte für die vertikale Richtung bis $> 10^{-3}$ m/s ermittelt. Am stärksten ausgeprägt sind die Auflockerungszonen im betrachteten Beispiel im Übergang von der Ulme zur Sohle (Bild 16).

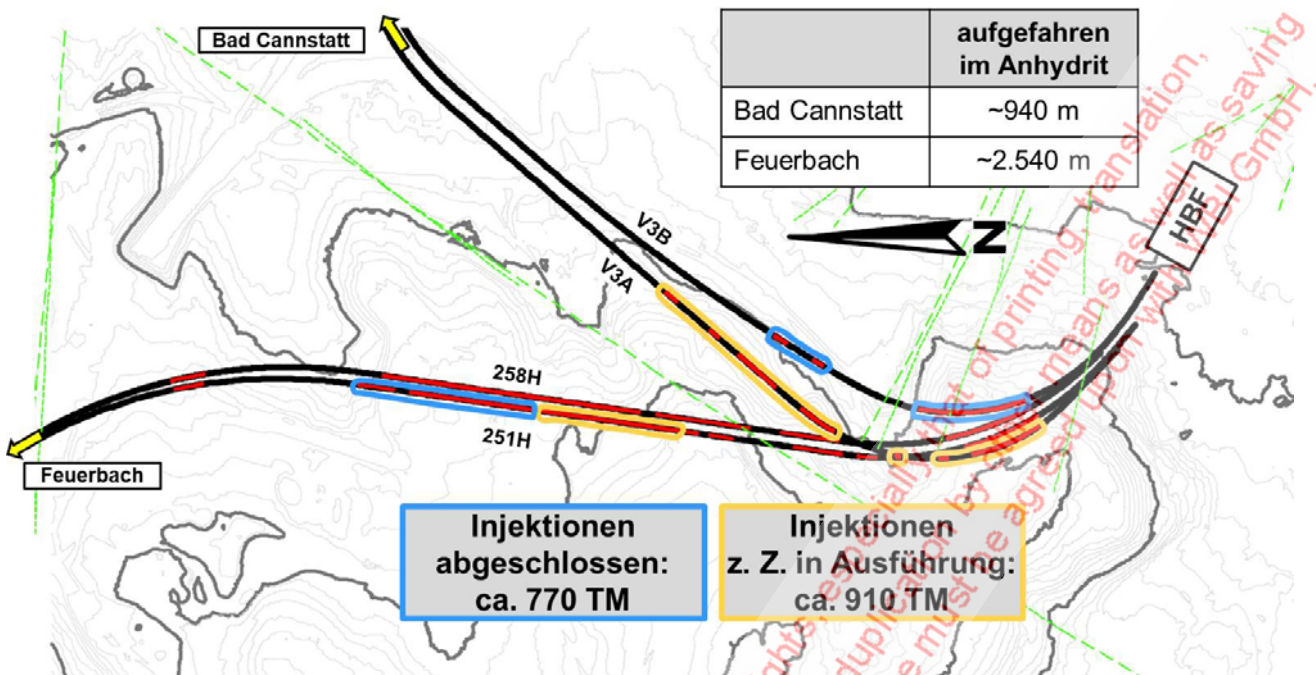


Bild 15: Lageplan mit Stand der Injektionen Anhydrit

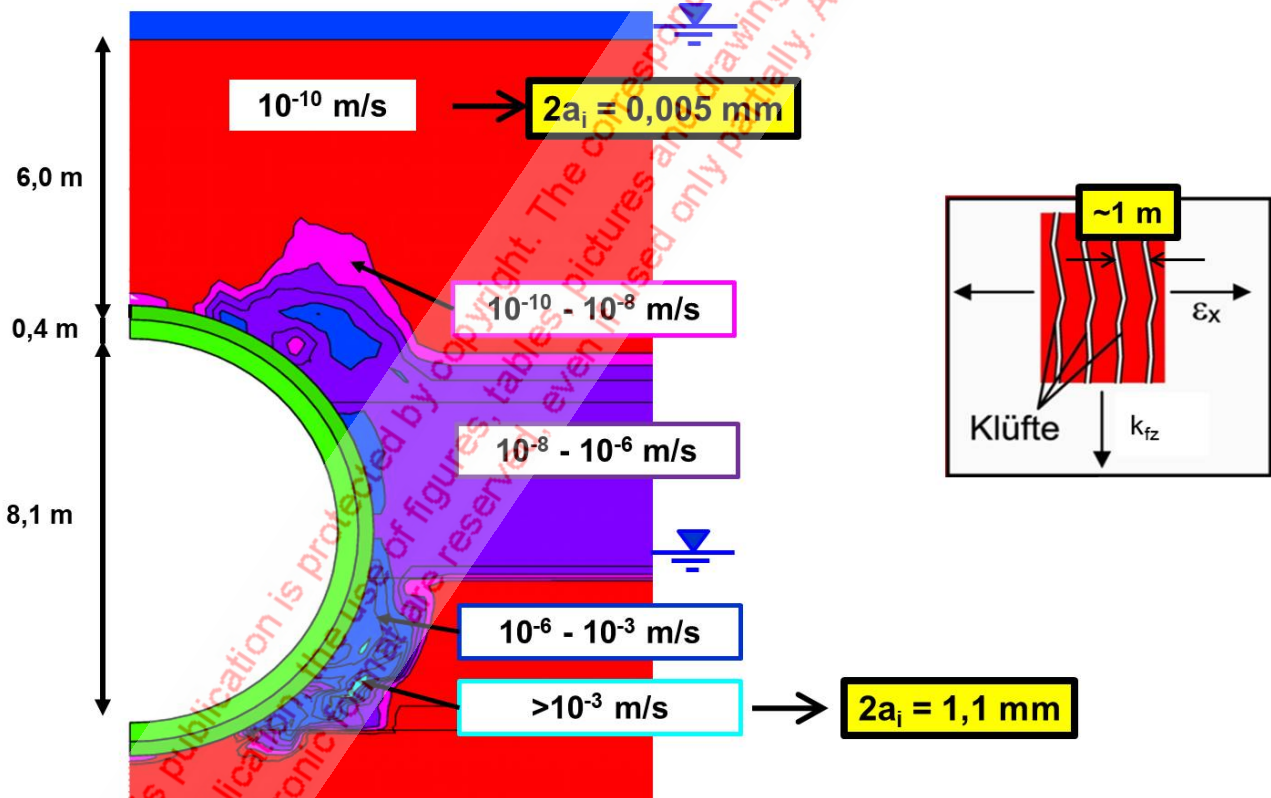


Bild 16: V3B, Linse 2, Kreisprofil - vertikale Durchlässigkeit nach Ausbruch und Sicherung

Ziel der Injektionen ist es, die vortriebsbedingt entstandenen Zonen mit erhöhter Durchlässigkeit wieder abzudichten, sodass der Zutritt von Wasser zum anhydritführenden Gebirge verhindert bzw. verzögert wird. Die Risiken von Beanspruchungen und Hebungen der Tunnelbauwerke durch Quellprozesse, die bei Zutritt von Wasser zum Anhydrit entstehen können, sollen dadurch verringert werden. Mit Hilfe des Modells für den geklüfteten Fels

können Durchlässigkeitsbeiwerte in äquivalente Öffnungsweiten von Trennflächen umgerechnet werden. Diese betragen für das betrachtete Beispiel in Bild 16 zwischen $2a_i = 0,005 \text{ mm}$ und $2a_i = 1,1 \text{ mm}$.

Erfahrungsgemäß kann der Baugrund mit Hilfe von Injektionen bis zu einem Durchlässigkeitsbeiwert der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ abgedichtet werden. Bezogen auf das Modell für den geklüfteten Fels entspricht diese Durchlässigkeit Trennflächen mit Öffnungsweiten der Größe von $2a_i = 0,05 \text{ bis } 0,1 \text{ mm}$ (Bild 17). Feinere Klüfte können somit nicht mehr abgedichtet werden.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der Planung der Injektionen verschiedene Injektionsmittel unterschiedlicher Hersteller betrachtet und untersucht. Ausgewählt wurde schließlich Acrylatgel als Injektionsgut, da dieses Mittel eine sehr geringe dynamische Viskosität besitzt, die mit einem Wert von $\eta \geq 2,5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ der Viskosität des Wassers nahekommt und dementsprechend ein sehr günstiges Eindringverhalten in den Baugrund aufweist.

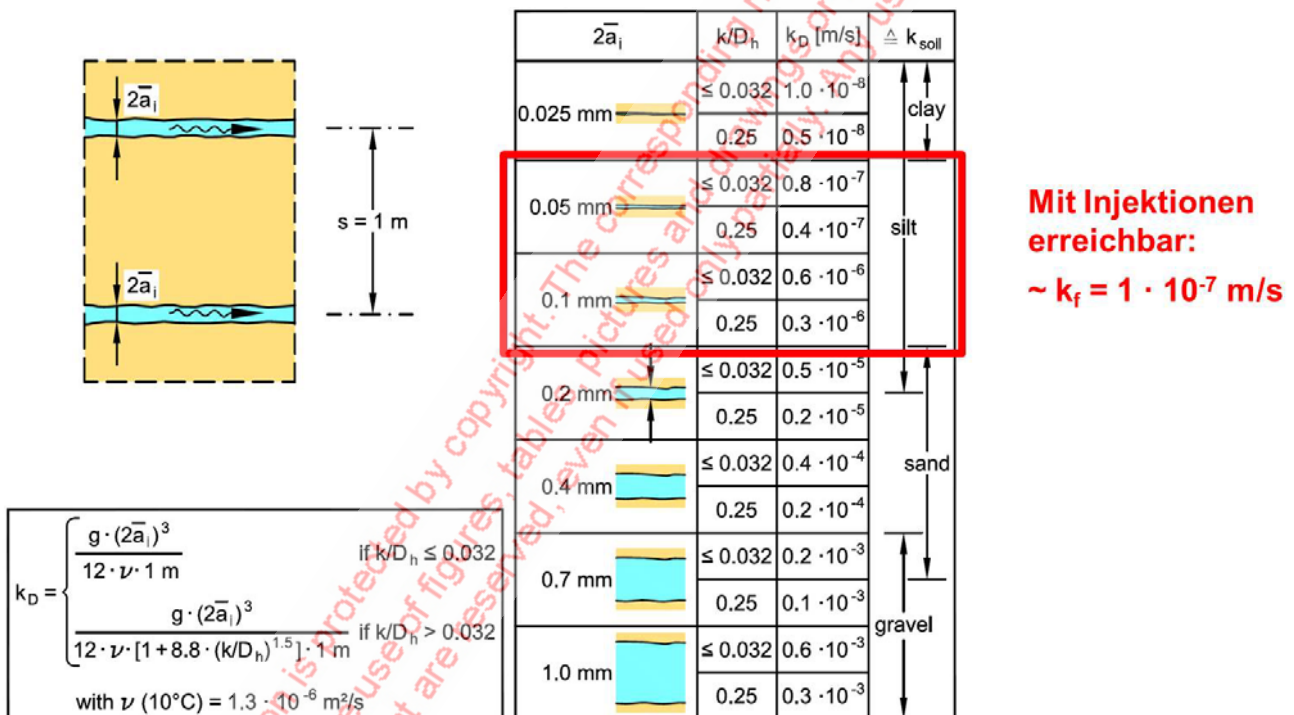


Bild 17: Durchlässigkeitsbeiwerte von Boden und Fels

5.2 Umsetzung der Injektionsarbeiten

Die eingesetzte Verpresstechnik wird nachfolgend exemplarisch für die Injektionsarbeiten, die im Tunnel nach Feuerbach ausgeführt werden, erläutert. Die Komponenten A und B werden hier getrennt in automatisierten Mischanlagen vorgemischt und von dort an Vorratsbehälter übergeben. Über Saugleitungen, in denen die Durchflüsse der A- und der B-Komponente getrennt gemessen werden, werden die Komponenten der Pumpe zugeführt (Bild 18).

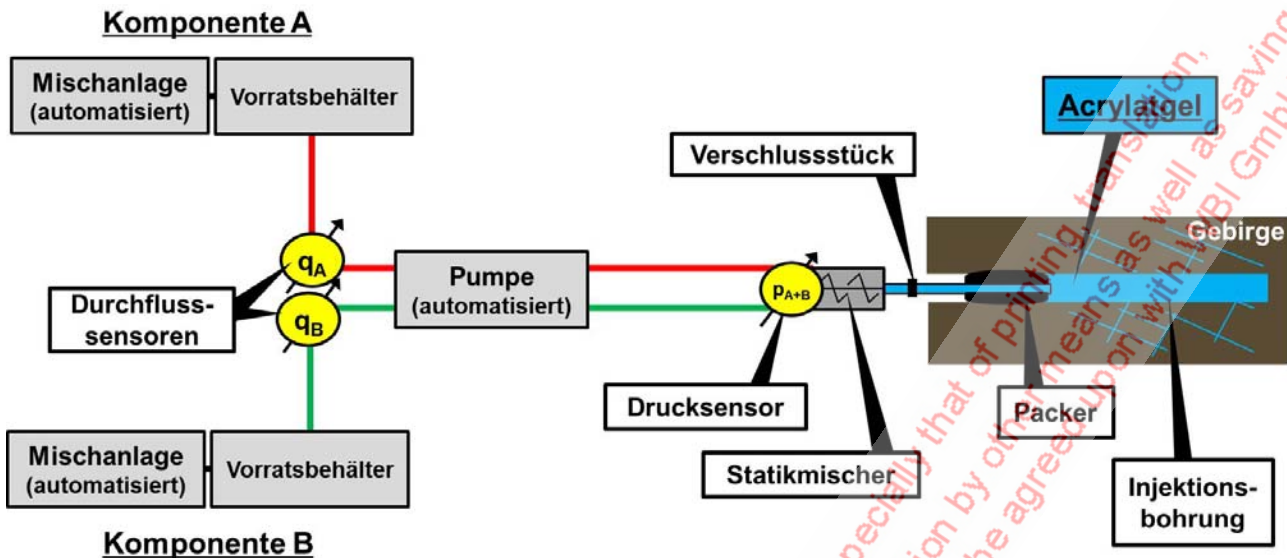
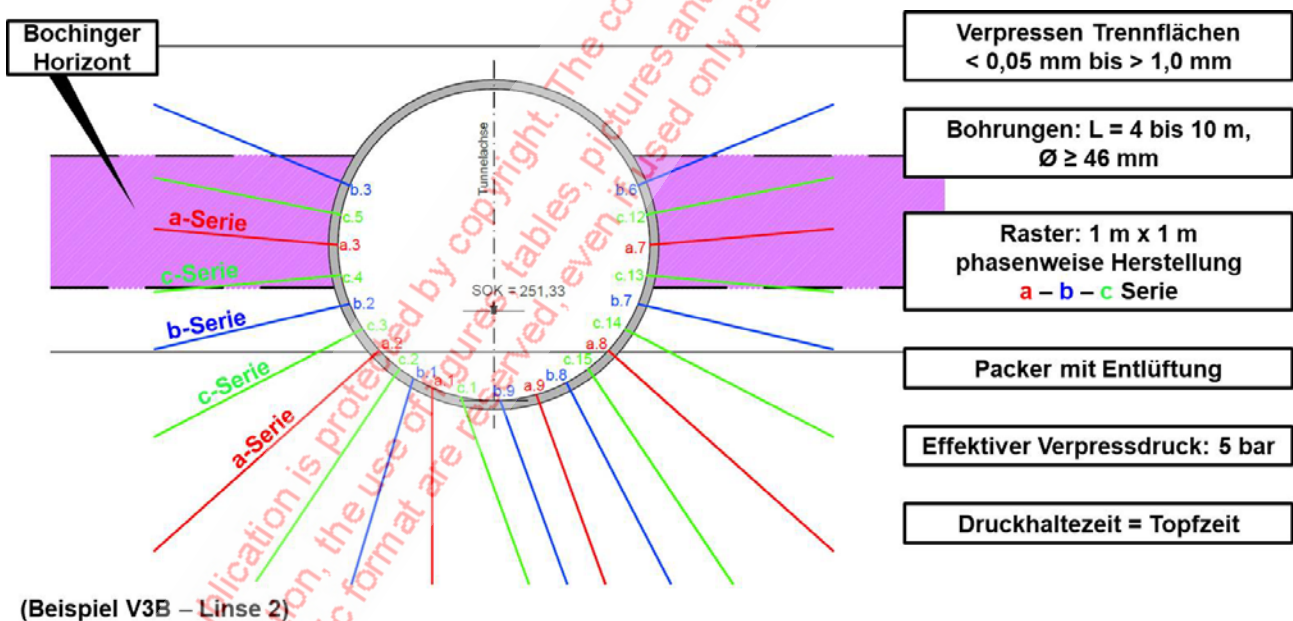


Bild 18: Injektionstechnik am Beispiel Tunnel nach Feuerbach

Die Injektionspumpe fördert die Komponenten zu gleichen Volumenanteilen unter Druck durch den Statikmischer. Durch den Mischvorgang wird das reaktive Acrylatgel hergestellt und in der Folge über eine kurze Injektionsleitung und den im Bohrloch eingebauten Injektionspacker in den Baugrund verpresst. Der Injektionsdruck wird mit einem Drucksensor am Kopf des Mixers kontinuierlich gemessen (Bild 18).



(Beispiel V3B – Linse 2)

Bild 19: Anordnung der Injektionsbohrungen und Anforderungen an die Einpressungen

Um Trennflächen mit Öffnungsweiten $2a_i < 0,05 \text{ mm}$ bis $2a_i > 1,0 \text{ mm}$ innerhalb der Auflockerungszone verpressen zu können, werden 4 bis 10 m lange Injektionsbohrungen mit Durchmessern $\geq 46 \text{ mm}$ bzw. 51 mm aus den mit einer Spritzbetonschale gesicherten Tunnelquerschnitten abgeteuft (Bild 19).

Die Bohrungen, die etwa radial angeordnet sind, werden phasenweise hergestellt und injiziert. Dabei wird das Raster der Bohrungen sukzessive von der a-Serie über die b-Serie zur c-Serie verdichtet. Über die Ausführung der einzelnen Phasen der Injektionsbohrungen wird jeweils auf der Grundlage der Ergebnisse der Injektionen der vorangegangenen Phasen entschieden. Im Endzustand - bei vollständiger Ausführung der Bohrungen der a-, der b- und der c-Serie - beträgt der gegenseitige Abstand der Injektionsbohrungen in Längs- und Querrichtung des Tunnels jeweils ca. 1 m (Bild 19).

Aufgrund der vergleichsweise geringen Durchlässigkeit des unausgelaugten Gipskeupers werden bei den Acrylatgelinjektionen Injektionspacker mit Entlüftung eingesetzt. Dadurch ist es möglich, die Bohrlöcher zu Beginn der Einpressungen schnell aufzufüllen, sodass auch entsprechend schnell mit dem Druckaufbau im Gebirge begonnen werden kann. Der effektive Verpressdruck im Bohrloch wird auf einen maximalen Wert von 5 bar begrenzt. Ein Aufreißen des Gebirges durch den Injektionsdruck (Fracking) wird auf diese Weise vermieden (Bild 19). Bei den Injektionen der einzelnen Bohrungen bzw. Stufen wird jeweils eine Druckhaltezeit angewendet, die der Topfzeit des Injektionsgutes entspricht. Durch dieses Vorgehen wird dem Volumenverlust des Acrylatgels, der beim Abbinden entsteht, entgegengewirkt.

5.3 Erfolgskontrolle

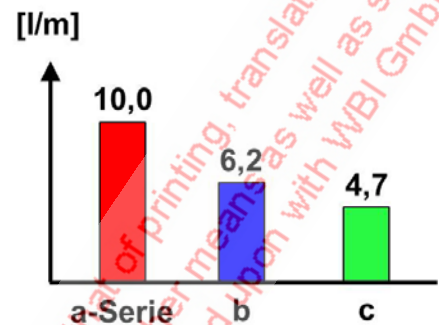
Der Erfolg der Injektionen kann direkt anhand der Entwicklung der Aufnahmemengen der unterschiedlichen Bohrlochserien überwacht und festgestellt werden. In der ersten Phase der Injektionen, die mit einem relativ großen Bohrlochabstand von ca. 4 m ausgeführt wird, sind vergleichsweise hohe Aufnahmemengen des Fels zu erwarten. Die durch diese Bohrungen aufgeschlossenen Trennflächen werden in Abhängigkeit von der Reichweite der Injektion verfüllt. In den nachfolgenden Phasen können nur noch die Kluftvolumina verpresst werden, die noch nicht durch die Bohrungen der vorlaufenden Phasen abgedichtet wurden. Somit ist im Zuge der Verdichtung des Rasters der Injektionsbohrungen ein Rückgang der Aufnahmemengen des Felses zu erwarten.

Ein Beispiel aus einem Tunnelabschnitt im Bereich der Linse 2 des Vortriebs 3B des Tunnels nach Bad Cannstatt verdeutlicht diese Form der Erfolgskontrolle. Danach wurde im betreffenden Abschnitt in der a-Serie zunächst eine mittlere Aufnahmemenge des Felses von 10 l Acrylatgel je m Bohrloch gemessen. In der b-Serie konnte noch eine Menge von im Mittel 6,2 l/m verpresst werden. In der abschließenden c-Serie betrug die Aufnahmemenge des Felses dagegen nur noch 4,7 l/m (Bild 20). Die offenen Trennflächen, die die Durchlässigkeit des Felses bestimmen, wurden hier offensichtlich wirksam verfüllt und somit abgedichtet.

	Alle Serien							
	Σl	Σn	Σt	$\Sigma t/\Sigma n$	Σq_{Fels}	$\Sigma q_{\text{Fels}}/\Sigma l$	$\Sigma q_{\text{Bohrloch}}$	Σq_{Gesamt}
	[m]	[-]	[h]	[min/Stufe]	[l]	[l/m]	[l]	[l]
Gesamt	7.095,9	1.303	1.304,7	60,1	46.921,3	6,6	14.495,6	61.416,8
PU	-	-	-	-	-	-	-	-
Acrylatgel	7.095,9	1.303	1.304,7	60,1	46.921,3	6,6	14.495,6	61.416,8

	Einzelserien					
	a			b		
	Σl	Σq_{Fels}	$\Sigma q_{\text{Fels}}/\Sigma l$	Σl	Σq_{Fels}	$\Sigma q_{\text{Fels}}/\Sigma l$
[m]	[l]	[l/m]	[m]	[l]	[l/m]	
Gesamt	1.957,2	19.628,2	10,0	2.134,1	13.286,6	6,2
PU	-	-	-	-	-	-
Acrylatgel	1.957,2	19.628,2	10,0	2.134,1	13.286,6	6,2

	c			andere		
	Σl	Σq_{Fels}	$\Sigma q_{\text{Fels}}/\Sigma l$	Σl	Σq_{Fels}	$\Sigma q_{\text{Fels}}/\Sigma l$
	[m]	[l]	[l/m]	[m]	[l]	[l/m]
Gesamt	3.004,6	14.006,5	4,7	-	-	-
PU	-	-	-	-	-	-
Acrylatgel	3.004,6	14.006,5	4,7	-	-	-



(Beispiel V3B – Linse 2, TM 1110 bis 1150)

Bild 20: Rückgang der Aufnahmemengen Fels von der a-Serie zur c-Serie

Entsprechend dem vorstehend beschriebenen Vorgehen wurden in den Tunneln des Loses 2 Richtung Feuerbach bis Anfang Juni 2018 insgesamt ca. 30.500 m Injektionsbohrungen abgeteuft und verpresst. Dabei konnten insgesamt ca. 137.200 l Acrylatgel bei einer mittleren Aufnahmemenge von 4,5 l/m in den Fels injiziert werden. Im Nachbarlos 3 der Tunnel nach Bad Cannstatt beträgt die Anzahl der hergestellten Bohrmeter insgesamt ca. 76.500. Die Aufnahmemenge von insgesamt 459.000 l Acrylatgel entspricht in diesem Baulos einer mittleren Aufnahmemenge von ca. 6,0 l/m. In beiden Losen wurde somit die prognostizierte mittlere Aufnahmemenge je Bohrloch eingehalten bzw. unterschritten (Bild 21).

Stand 04.06.2018

	Los 2 Tunnel nach Feuerbach	Los 3 Tunnel nach Bad Cannstatt
Anzahl Injektionsstufen [-]	ca. 10.200	ca. 21.300
Bohrmeter [m]	ca. 30.500	ca. 76.500
Q_{Bohrlochfüllung} [l]	ca. 62.200	ca. 156.100
Q_{Fels} [l]	ca. 137.200	ca. 459.000
q_{Fels} [l/m]	4,5	6,0
q_{Fels} – Prognose [l/m]	5,0	6,0

Bild 21: Acrylatgelverpressung in den Losen 2 und 3

Ergänzend zur Kontrolle der Aufnahmemengen in den verschiedenen Serien der Injektionsbohrungen wurden nach Abschluss der Injektionen in verschiedenen Tunnelabschnitten Durchlässigkeitsversuche zur Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte des injizierten Gebirges durchgeführt. Dazu wurden Kern- und Vollbohrungen mit Durchmessern von 86 bzw. 92 mm innerhalb der injizierten Gebirgsabschnitte abgeteuft. Die Versuche wurden im Sinne von WD-Tests in verschiedenen Testabschnitten und mit verschiedenen Druckstufen ausgeführt und entsprechend ausgewertet. Da der Einsatz von Wasser als Testmedium im anhydritführenden Gebirge nicht zulässig ist, wurde ein Acrylatgel mit einer Topfzeit von 60 min in den Versuchen verwendet (Bild 22). Die gegenüber dem Wasser unterschiedliche Viskosität des eingesetzten Verpressmediums wurde bei der Auswertung der Versuche entsprechend berücksichtigt.

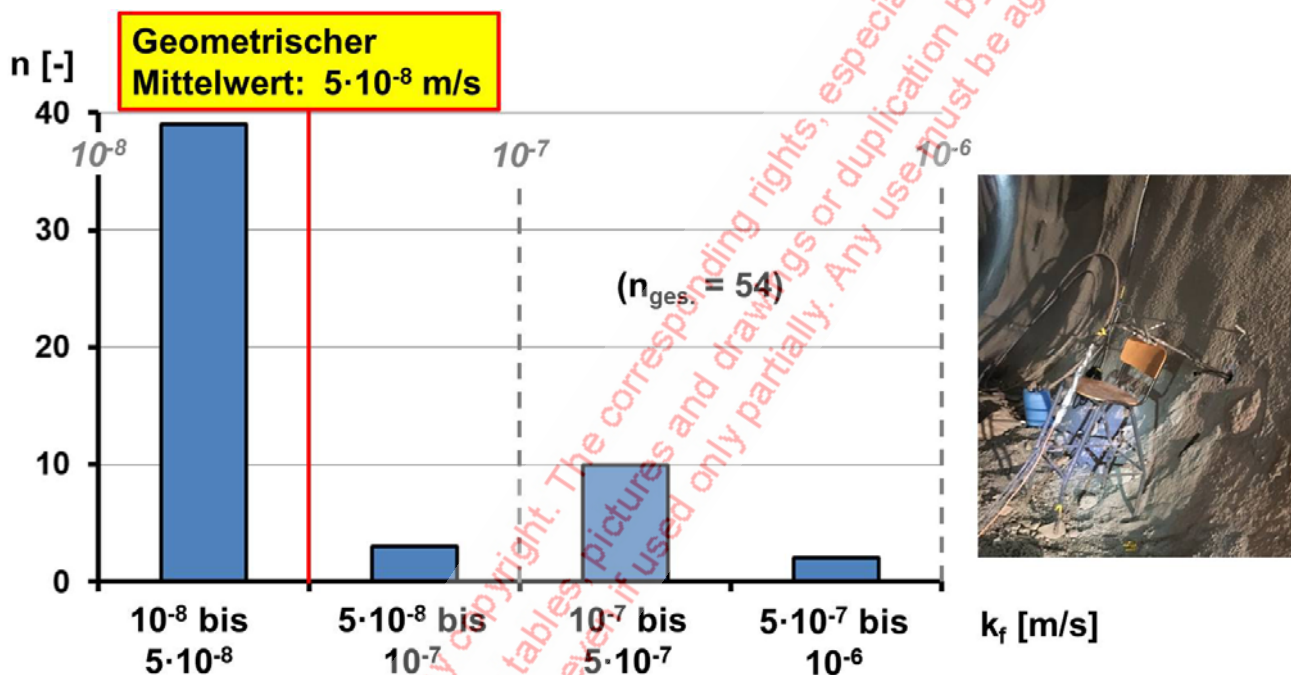


Bild 22: Durchlässigkeitsversuche im Fels und ermittelte k_f -Werte

Insgesamt wurden in den Tunneln nach Feuerbach und Bad Cannstatt bisher 54 Durchlässigkeitsversuche ausgeführt, in denen der injizierte Fels getestet wurde. Die Verteilung der dabei ermittelten k_f -Werte ist in Form eines Histogramms in Bild 22 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Großteil der Versuche Durchlässigkeitsbeiwerte $k_f < 10^{-7}$ m/s bestimmt werden konnten. Lediglich bei einigen wenigen Versuchen wurden k_f -Werte $> 10^{-7}$ m/s ermittelt. Der geometrische Mittelwert der Durchlässigkeitsversuche beträgt $k_f = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Damit wird der Erfolg der "Injektionen Anhydrit" im Fels deutlich ausgewiesen (Bild 22).

5.4 Acrylatgel vs. PU-Harz

Bei den "Injektionen Anhydrit" sind - wie vorstehend erläutert - Trennflächen mit sehr geringen Öffnungsweiten zu verpressen. Da derzeit Diskussionen zur Eignung von PU-Harzen als Alternative zum Acrylatgel geführt werden, werden nachfolgend Überlegungen und Versuchsergebnisse zu dieser Fragestellung vorgestellt.

Die dynamische Viskosität η von PU-Harzen beträgt je nach Produkt bei Temperaturen von ca. 23 °C zwischen $\eta = 45$ bis 250 mPa · s. Sie übersteigt damit die Viskosität von Acrylatgelen um ein Vielfaches. Da die Viskosität eines Verpressmittels ein maßgebender Parameter für das Eindringverhalten des Baustoffs während einer Injektion ist, sind bei der Verpressung von PU-Harzen im Vergleich zu den sehr niedrig viskosen Acrylatgelen - bei gleichen effektiven Verpressdrücken - entsprechend verlängerte Injektionszeiten zu erwarten.

Dieser Effekt wurde im Labor von WBI mit Hilfe eines Spaltmodells untersucht (Bild 23). Das Modell besteht aus 2 horizontal gelagerten Plexiglasplatten, die im Raster von 15 cm x 15 cm miteinander verschraubt sind. Im Bereich der Schrauben sind Abstandhalter eingebaut, die einen Spalt zwischen den Platten mit einer Dicke von 0,07 mm Dicke erzeugen. Im Deckel des Modells befindet sich eine zentrische Bohrung mit einem Durchmesser von $D = 18$ mm. Über diese Bohrung und einen daran angeschlossenen Trichter kann Injektionsgut mit einer konstanten Druckhöhe von 50 cm in den horizontalen Spalt injiziert werden. Während eines Versuchs wird das Eindringen des Verpressmittels in den Spalt in seiner zeitlichen Entwicklung erfasst. Die im Modell nachgebildete Spaltweite entspricht der Größenordnung der Spaltweite $2a_i$ von Klüften, die zum Erreichen eines Durchlässigkeitsbeiwertes von $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s abgedichtet werden müssen (vgl. Bild 17).

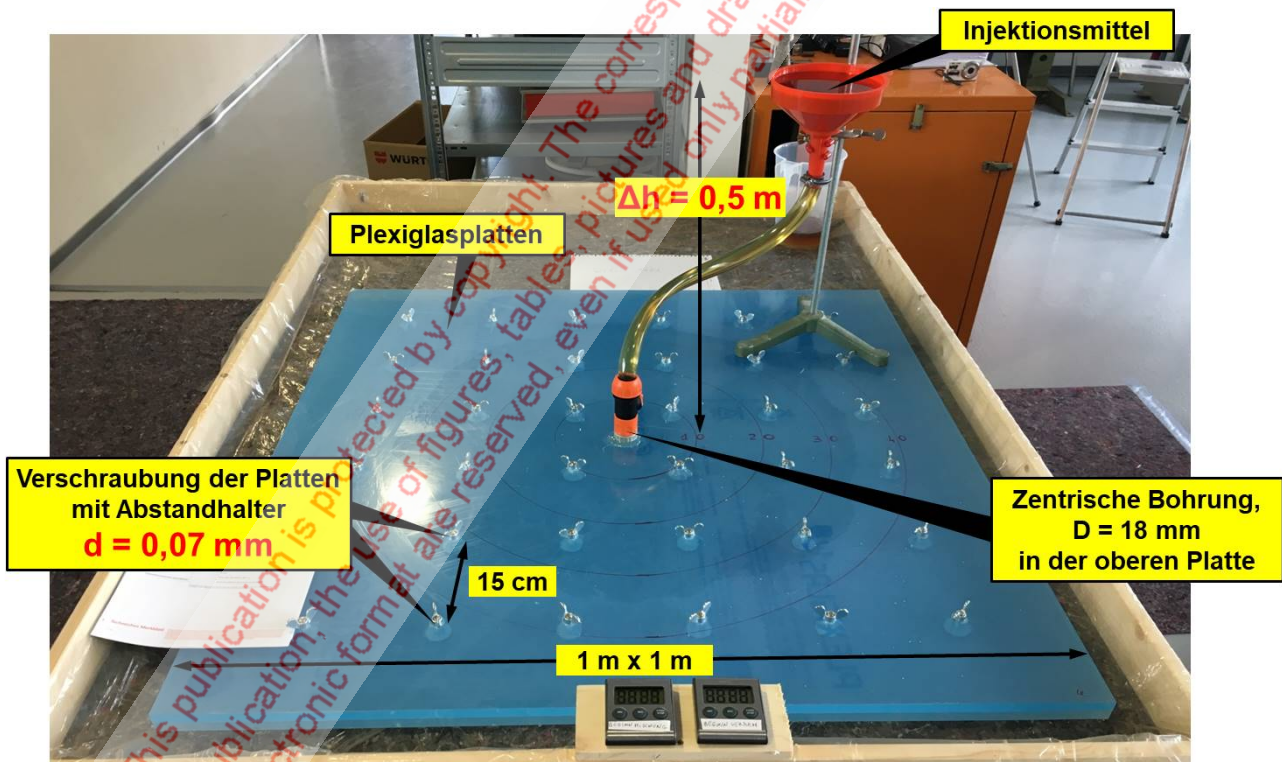


Bild 23: Spaltmodell

Im Bild 24 sind exemplarisch die Ergebnisse von 2 Versuchen mit dem Spaltmodell dargestellt. Im Versuch 1 wurde ein Acrylatgel mit einer Viskosität $\eta = 2,5$ mPa · s untersucht. Der 2. Versuch wurde unter Verwendung eines niedrigviskosen PU-Harzes durchgeführt. Die Viskosität des verwendeten PU-Harzes beträgt $\eta = 45$ mPa · s. Die im Diagramm in

blau dargestellte Messkurve für das Acrylatgel weist aus, dass das Acrylatgel nach 3 Minuten ca. 30 cm in den Spalt eingedrungen ist. Nach einer Versuchsdauer von 7 - 8 Minuten hatte das Acrylatgel den Rand des Modells erreicht. Im Vergleich dazu benötigte das eingesetzte PU-Harz einen Zeitraum von ca. 54 Minuten, bis eine Eindringtiefe von 30 cm erreicht war (Bild 24).

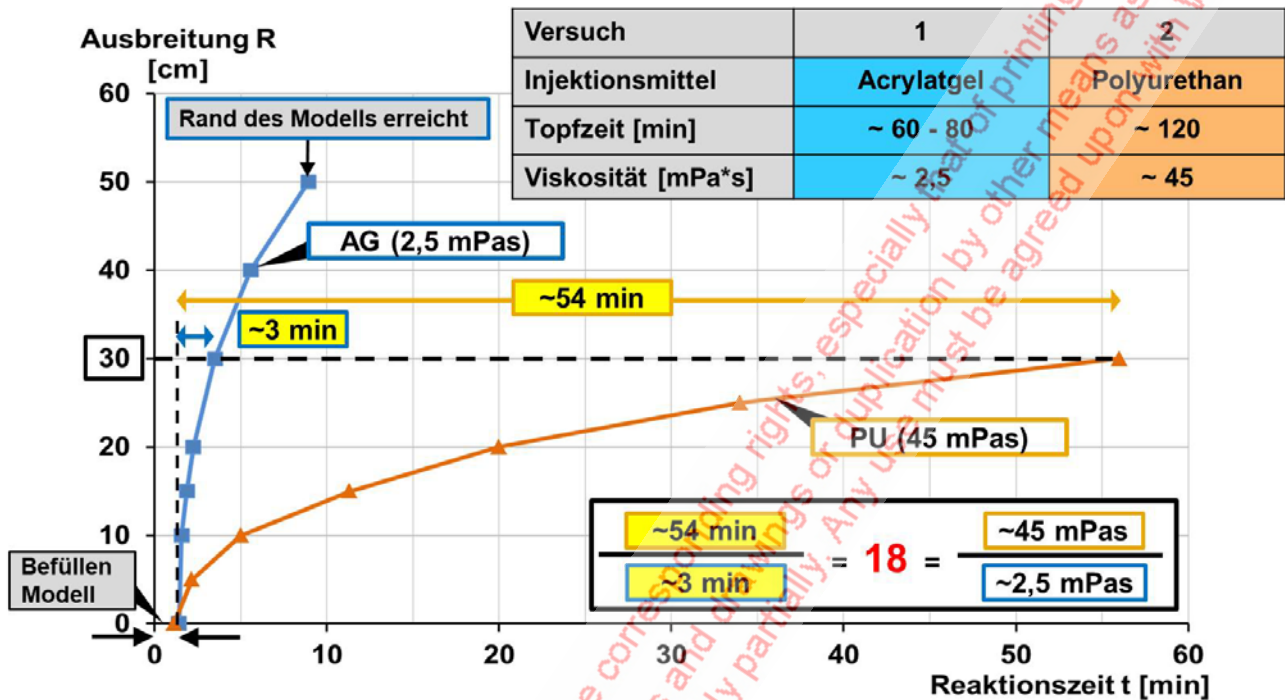


Bild 24: Ausbreitung Injektionsgut im Spalt, Versuchsergebnisse

Das Verhältnis der Zeiträume, die in den Modellversuchen jeweils für eine Reichweite von 30 cm erforderlich waren, beträgt somit $f = 54/3 = 18$. Dieser Wert entspricht dem Verhältnis der Viskositäten der beiden untersuchten Injektionsmittel (Bild 24).

Zwar spielen bei den "Injektionen Anhydrit" auch andere Effekte eine Rolle. Hier zu nennen sind z. B. die Rauheit der Trennflächen, die Verzweigung von Trennflächen und die Größe der Injektionsdrücke. Vereinfachend kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das in Modellversuchen festgestellte Eindringverhalten der beiden Baustoffe auch auf die in situ Verhältnisse übertragen werden kann. Derzeit beträgt der im Baulos 2 erforderliche Zeitraum für die Ausführung einer Acrylatgelinjektion - ohne Berücksichtigung einer Druckhaltezeit - ca. 10 Minuten. Bei Verwendung von PU-Harz als Injektionsgut würde eine solche Injektion mit dem gleichen effektiven Druck im Bohrloch somit etwa einen Zeitraum von $10 \text{ min} \times 18 = 180 \text{ min}$ bzw. 3 Stunden erfordern. Dies hätte eine entsprechende Verlängerung der Injektionszeiten und damit der gesamten Bauzeit zur Folge, die nicht zu vertreten ist. Die vorstehenden Ausführungen machen deutlich, dass unter den vorherrschenden Randbedingungen PU-Harze für die "Injektionen Anhydrit" als Alternative zu Acrylatgelen nicht geeignet sind.

6. Ausblick

Die maßgebenden Vortriebsarbeiten im anhydritführenden Gebirge sind bereits in beiden Tunneln beendet. Zudem werden die Abdichtungsinjektionen im Anhydrit 2019 abgeschlossen.

Die aufwendigen Innenschalenarbeiten haben ebenso bereits in beiden Losen begonnen und werden voraussichtlich 2021 fertiggestellt.

Somit ist nach Herstellung der Bankette und diversen Restarbeiten mit einer Übergabe der Tunnel im Rohbau an die Bahntechnik Ende 2021 zu rechnen.

Literatur

Leger, M.: Stand der Planungs- und Bauarbeiten beim Projekt Stuttgart-Ulm. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.

Wittke, W.: Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags 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, W.; Wittke-Gattermann, P.; Boettcher, A.: Bemessung und Bewehrung der Stahlbetoninnenschalen im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.