

Einpressungen von Acrylatgel und Polyurethan zur Abdichtung des anhydritführenden Gipskeupers im Bereich der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim

**Dr.-Ing. Martin Wittke, Dipl.-Ing. Dieter Schmitt
Dipl.-Ing. Günter Osthoff**

Zusammenfassung

Für das Projekt Stuttgart 21 werden umfangreiche Injektionsmaßnahmen zur Abdichtung des unausgelaugten Gipskeupers durchgeführt. Insgesamt werden voraussichtlich mehr als 600 km Bohrungen mit Acrylatgel und Polyurethanen verpresst.

Im Beitrag werden die Vorgaben für die Injektionen und die Abdichtungsarbeiten in den Tunneln nach Ober- und Untertürkheim beschrieben. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Ausdehnung der Auflockerungszone in der Umgebung der Tunnelröhren zu. Ein Vergleich zwischen der Prognose und den erzielten Aufnahmemengen zeigt hier eine gute Übereinstimmung.

Mit den Injektionen können Durchlässigkeiten von 10^{-8} bis 10^{-9} m/s erreicht werden. Der Erfolg wird durch Feldversuche bestätigt. Die Versuchsdurchführung, die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen, die sich aus diesen Ergebnissen für die statischen Berechnungen und die Bemessung der Innenschale der Tunnel ergeben, werden vorgestellt.

1. Aufgabenstellung

Für das Bahnprojekt Stuttgart - Ulm müssen 58,8 km Tunnel im Stadtgebiet von Stuttgart aufgefahren werden. Über eine Länge von ca. 17 km liegen diese Tunnel im Einflussbereich des anhydritführenden Gipskeupers (Bild 1). Die Tunnel vom neuen Hauptbahnhof nach Feuerbach, Bad Cannstatt und nach Ober-/Untertürkheim werden in Spritzbetonbauweise errichtet. Die Vortriebsarbeiten in den anhydritführenden Bereichen sind in all diesen Tunneln erfolgreich abgeschlossen. Derzeit erfolgt der Einbau der Innenschalen. Der Fildertunnel wird sowohl konventionell in Spritzbetonbauweise als auch mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) mit einschaligem Tübbingausbau aufgefahren. Auch hier sind die konventionellen Vortriebe im Anhydrit beendet, und mit dem Einbau der Innenschalen wurde begonnen. Derzeit erfolgt die vierte Schildfahrt, die im Verlauf des Jahres 2019 abgeschlossen werden wird (Wittke & Breidenstein 2015, Wittke & Wittke & Osthoff & Lienhart 2017, Wittke & Wittke & Erichsen & Wittke-Gattermann 2017, Wittke & Osthoff & Wittke-Gattermann 2019).

Die Planung und die Ausführung der Tunnelbauten im Anhydrit erfolgen auf der Grundlage langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die im Hause WBI durchgeführt wurde und in einschlägigen Veröffentlichungen publiziert wurde (z. B. Wittke & Wittke & Erichsen & Wittke-Gattermann 2017, Wittke-Gattermann 1998, Wittke 2003, Wahlen 2009, Wittke

2014, Wittke & Wittke & Wahlen 2004, Wittke 2016, Wittke & Wittke-Gattermann & Boettcher 2018).

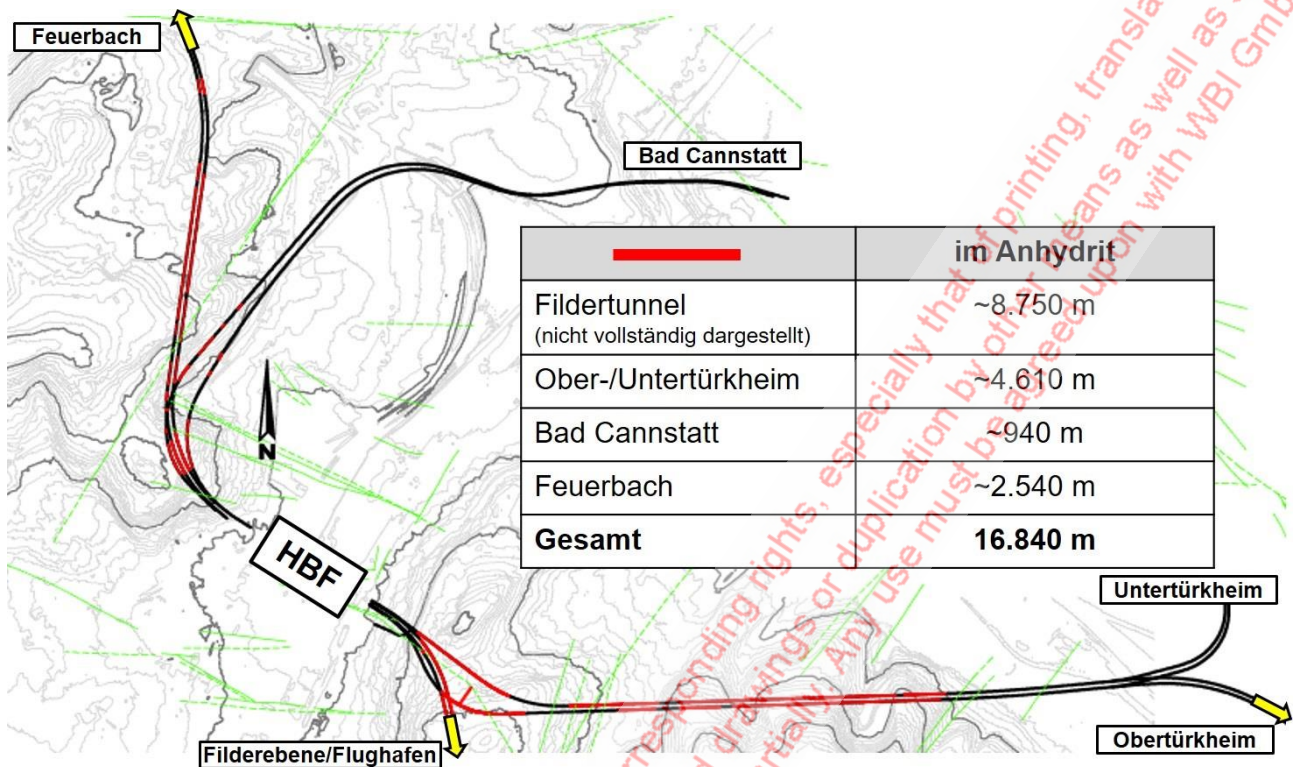


Bild 1: Stuttgart 21, Tunnelabschnitte im anhydritführenden Gebirge

Ein wesentliches Element für den erfolgreichen Bau der Tunnels bilden Abdichtungsinjektionen, mit denen die durch die Vortriebsarbeiten entstandene Auflockerungszone in der Umgebung der Tunnelröhren soweit wie möglich abgedichtet werden soll, um Wasserzutritte in das anhydritführende Gebirge auch langfristig zu unterbinden oder zumindest soweit wie möglich zu verringern.

Im vorliegenden Beitrag werden die aus der Planung resultierenden Vorgaben für die Injektionen erläutert. Außerdem werden die Gründe für die Wahl des Injektionsmittels vorgestellt, und es wird über die Bauausführung, Bauüberwachung und die Überprüfung des Injektionserfolgs berichtet.

2. Unausgelaugter Gipskeuper

Ausführliche Informationen über die Eigenschaften der verschiedenen Schichtglieder im Stuttgarter Baugrund sind beispielsweise in (WBI GmbH 2015, WBI GmbH 2016, WBI GmbH 2017, WBI GmbH 2018, Wittke 2015) enthalten. Im vorliegenden Beitrag werden nur im Hinblick auf die Injektionen wesentlichen Eigenschaften des unausgelaugten Gipskeupers beschrieben.

Der Gipskeuper ist ein Sulfat führendes Tongestein. Er tritt im Stuttgarter Baugrund in drei Erscheinungsformen auf (Wittke 2015). Im Ausgangszustand handelt es sich um Tonsteine, in die Anhydrit (CaSO_4) in Lagen, fein verteilt oder in Knollen eingelagert ist (Bild 2). Der

Fels ist im Stuttgarter Raum meist horizontal geschichtet und vertikal geklüftet. Lediglich in der Nähe von Störzonen oder als Folge von Auslaugungs- oder Quellerscheinungen sind auch geneigte Schichtflächen zu erwarten.

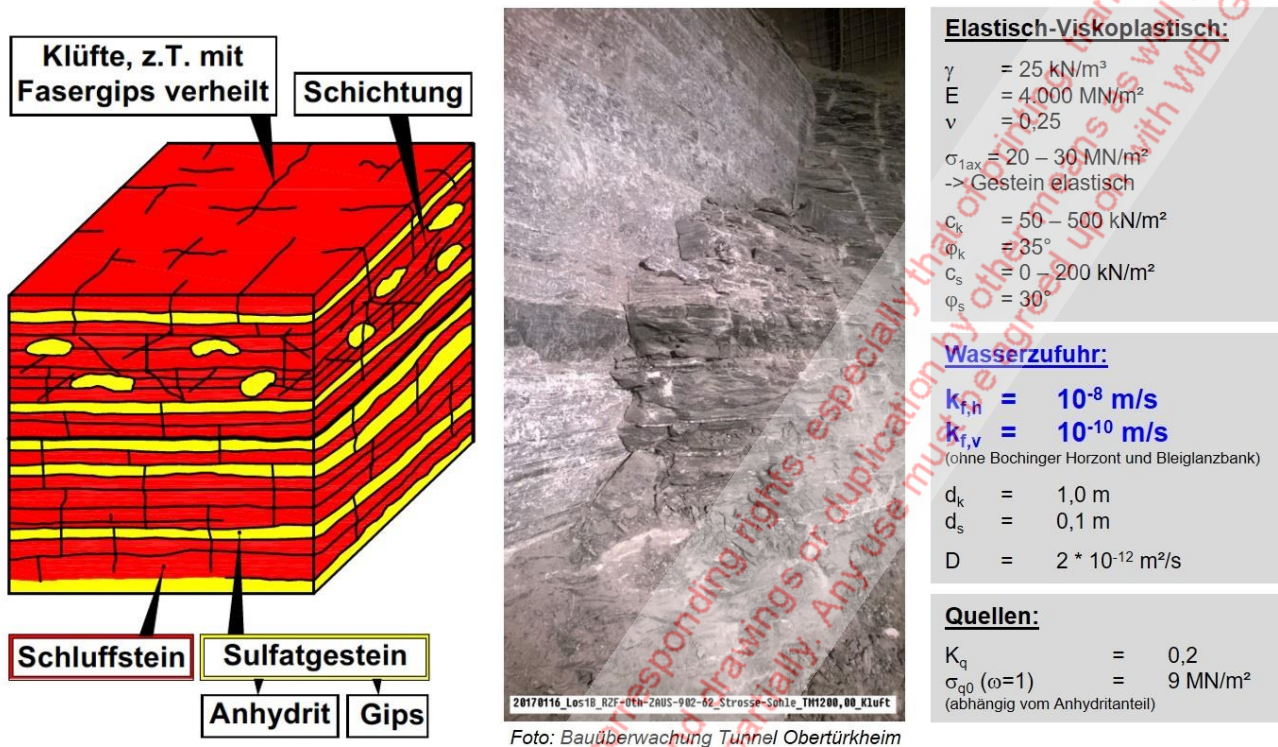


Bild 2: Unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell und Kennwerte

Aufgrund von Erfahrungen kann man davon ausgehen, dass die schichtparallelen Trennflächen, die eine gewisse Öffnungsweite besitzen und somit für eine Sickerströmung durchgängig sind, einen mittleren Abstand von ca. 10 cm besitzen. Die Klüfte setzen häufig an den Schichtfugen ab. Über weite Strecken durchgängige Klüfte, wie sie im Foto in Bild 2 zu erkennen sind, wurden im Zuge der Vortriebsarbeiten für das Projekt Stuttgart 21 nur in geringer Zahl angetroffen. Der gegenseitige Abstand der für eine Sickerströmung durchgängigen Klüfte wird mit ca. 1 m angenommen (Bild 2).

Die Durchlässigkeit des unausgelaugten Gipskeupers in horizontaler Richtung wurde im Zuge der Vorerkundungen für das Projekt Stuttgart 21 durch Versuche in vertikalen Bohrungen bestimmt. Die aus den einzelnen Versuchen resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerte streuen um Zehnerpotenzen. Für die Grundgipsschichten, die Dunkelroten Mergel, den Mittleren Gipshorizont und die Estheriensichten wurde in 197 Versuchen ein geometrisches Mittel für horizontale Durchlässigkeit des Fels von $6,3 \cdot 10^{-9}$ m/s bestimmt (Bild 3). Unter Berücksichtigung der Gesetze der Spaltströmung nach (Wittke 2014) ergeben sich für den angenommenen Abstand der Schichtfugen von 10 cm für diese Durchlässigkeit Öffnungsweiten der Schichtfugen von ca. 0,01 mm.

Die Leithorizonte (Bochinger Horizont und Bleiglanzbank) besitzen eine etwas höhere Durchlässigkeit als die übrigen Schichtglieder des Gipskeupers. Hier beträgt das geometrische Mittel für den horizontalen Durchlässigkeitsbeiwert aus 132 Versuchen $5,6 \cdot 10^{-8}$ m/s

(Bild 3). Geht man auch hier von einem mittleren Abstand der Schichtfugen von 10 cm aus, ergibt sich eine mittlere Öffnungsweite der Schichtfugen im Ausgangszustand von ca. 0,02 mm. Tatsächlich dürfte der Abstand der Schichtflächen hier größer sein, so dass die Öffnungsweite der schichtparallelen Trennflächen u. U. auch noch größer ist.

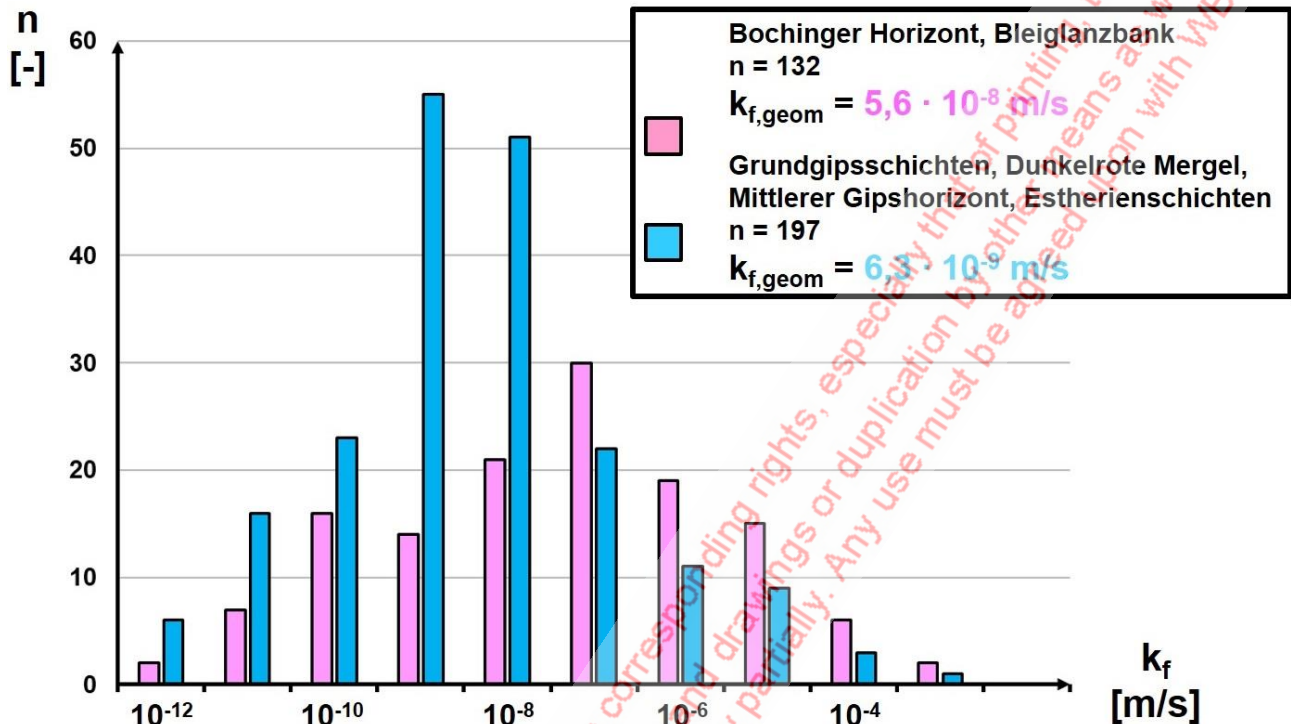


Bild 3: Unausgelaugter Gipskeuper, Durchlässigkeit in horizontaler Richtung, Ergebnisse der Baugrunderkundungen

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Gipskeupers in vertikaler Richtung, d. h. entlang der Klüfte, liegen keine Ergebnisse von Labor- und Feldversuchen vor. Da die Klüfte jedoch meist eine deutlich kleinere Erstreckung haben als die schichtparallelen Trennflächen und da der gegenseitige Abstand der Klüfte deutlich größer ist als der der schichtparallelen Trennflächen, kann man davon ausgehen, dass die Durchlässigkeit des Gebirges in vertikaler Richtung im Mittel deutlich kleiner ist als in horizontaler Richtung.

Geht man davon aus, dass die mittleren Öffnungsweiten der schichtparallelen Trennflächen und der vertikalen Klüfte gleich groß sind, ergeben sich unter Annahme des größeren Trennflächenabstands Durchlässigkeitsbeiwerte für eine vertikale Trennflächenschar von:

- $k_{f,Kluft} \approx 6 \cdot 10^{-10}$ m/s (Grundgipsschichten, Dunkelrote Mergel, Mittlerer Gipshorizont, Estheriensichten) bzw.
- $k_{f,Kluft} \approx 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (Bochinger Horizont und Bleiglanzbank).

Tatsächlich dürfte die Durchlässigkeit des Fels in vertikaler Richtung, wie die nachstehende Betrachtung zeigt, zumindest für die Grundgipsschichten, die Dunkelroten Mergel, den Mittleren Gipshorizont und die Estheriensichten im Ausgangszustand noch geringer sein.

Mit den vier Tunnelröhren nach Ober- und Untertürkheim wurde der Neckar unterfahren. 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 (Bild 4, Wittke & Wittke-Gattermann & Boettcher 2018). Die Felsüberdeckung zwischen der Tunnelfirste und dem Lockergestein unterhalb des Neckarbetts beträgt ca. 6,5 m. Das Gefälle für die Sickerströmung des dadurch dem Tunnel zusickernden Wassers beträgt somit ca. $i = 1$. Eine einfache Berechnung zeigt, dass dem Tunnel bei Annahme einer Wasserdurchlässigkeit des Felses von 10^{-8} m/s bzw. 10^{-9} m/s Wassermengen von 1.500 l bzw. 150 l am Tag hätten zufließen müssen. Tatsächlich war der Tunnel aber beim Vortrieb trocken. Mit der Annahme eines Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von $k_{f,v} = 10^{-10}$ m/s würden dem Tunnel ungefähr 15 l Wasser pro Tag zufließen (Bild 4). 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 dürfte daher $k_{f,v} \leq 10^{-10}$ m/s betragen.

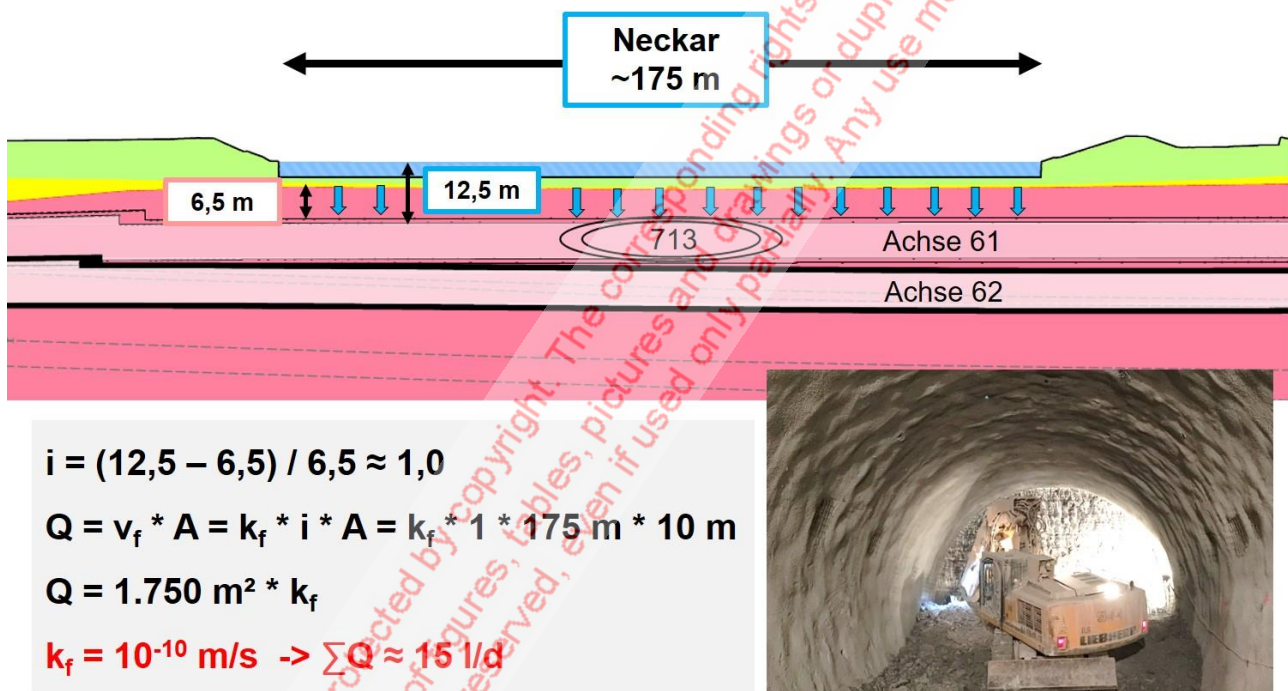


Bild 4: Unausgelaugter Gipskeuper, Abschätzung der vertikalen Durchlässigkeit auf der Grundlage der Neckarunterfahrung

3. Planerische Vorgaben für die Injektionen Anhydrit

Wie in Abschnitt 2 erläutert, besitzt der unausgelaugte Gipskeuper im ungestörten Zustand eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit. Infolge des Tunnelbaus kommt es jedoch zu Spannungumlagerungen im Gebirge und somit zu einer Scher- bzw. Schubbeanspruchung auf den Trennflächen (Wittke 2003, Wittke 2014). Diese führt zu dilatanten Verschiebungen und somit zu einer Vergrößerung der Öffnungsweite der Trennflächen. Da die Durchlässigkeit des Fels in der dritten Potenz von der Trennflächenöffnungsweite abhängt, nimmt auch die Durchlässigkeit des Fels infolgedessen überproportional zu (Wittke 2003, Wittke 2014). Örtlich kann dieser Effekt auch durch Zugspannungen verstärkt werden.

Durch die so entstandene Auflockerungszone, die im Vergleich zum umgebenden Gebirge eine erhöhte Durchlässigkeit besitzt, kann - sofern eine Verbindung zum wasserführenden Gebirge vorhanden ist - Wasser in die anhydritführenden Schichten eindringen und dort Quellvorgänge auslösen (Wittke 2003, Wittke 2014).

Die Ausdehnung der Auflockerungszone und das Maß, um das sich die Trennflächenöffnungsweiten vergrößern, können mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 numerisch ermittelt werden. Sie hängen u. a. von der Überlagerungshöhe, den Bauwerksabmessungen, der Abschlaglänge und der Sicherung des Tunnels sowie von der Festigkeit und der Rauigkeit der Trennflächen ab.

Beispielhaft ist in Bild 5 (links) die für einen Abschnitt des Tunnels nach Ober-/Untertürkheim infolge von Ausbruch und Sicherung errechnete Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Durchlässigkeit am Übergang von der Ulme zur Firste und am Übergang von der Ulme zur Sohle deutlich vergrößert. Rechnerisch ergeben sich Durchlässigkeitsbeiwerte von max. 10^{-3} m/s, die 7 Zehnerpotenzen größer sind als der Ausgangswert. Die Zone, in der sich die vertikale Durchlässigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand nennenswert erhöht, reicht ca. 2 bis 3 m in den Fels. Dieser Bereich muss durch Injektionen abgedichtet werden, wenn er - wie im vorgestellten Fall - eine Verbindung zu wasserführendem Gebirge besitzt.

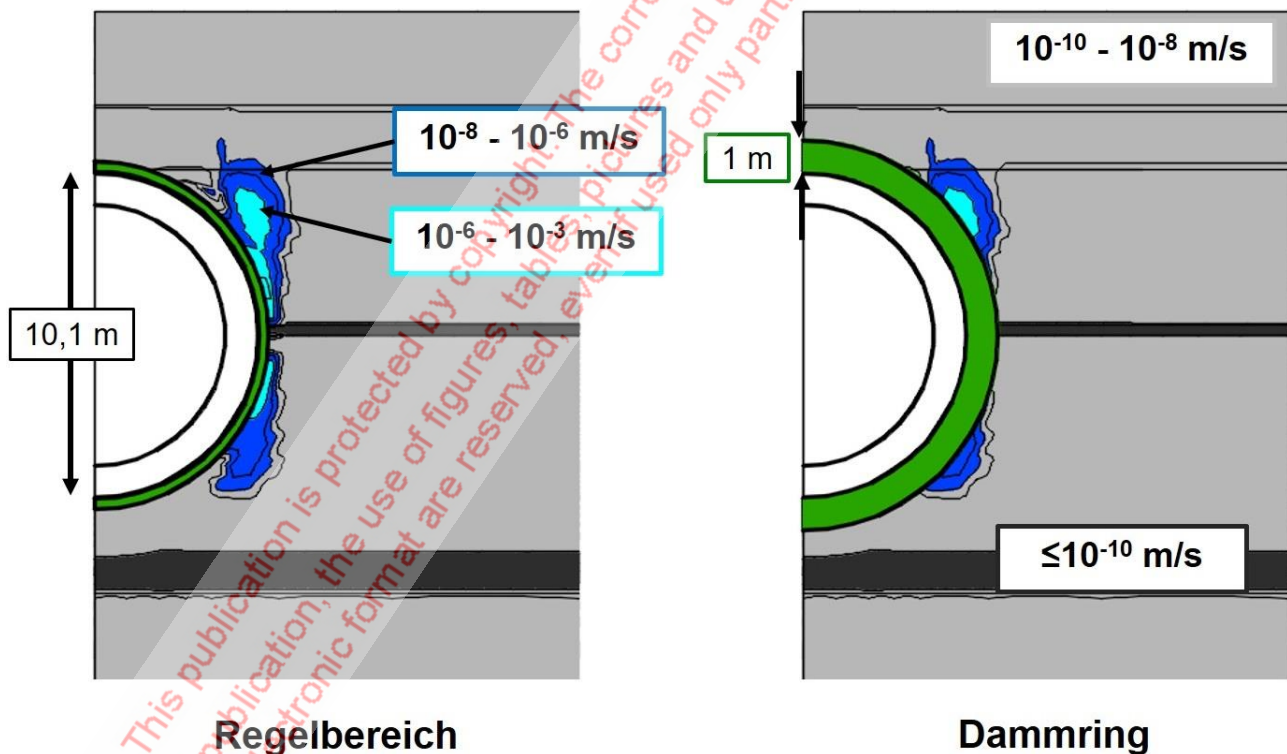


Bild 5: Erhöhung der Durchlässigkeit in vertikaler Richtung infolge Ausbruch und Sicherung, Berechnungsergebnis

Dementsprechend werden bei den Tunneln des Projekts Stuttgart 21 umfangreiche Injektionen durchgeführt (Bild 6). Die Länge und die Verteilung der Injektionsbohrungen werden in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen gewählt. Für das hier dargestellte Beispiel werden bzw. wurden 4 m lange Injektionsbohrungen in der oberen Querschnittshälfte ausgeführt (vgl. Abschnitt 5).

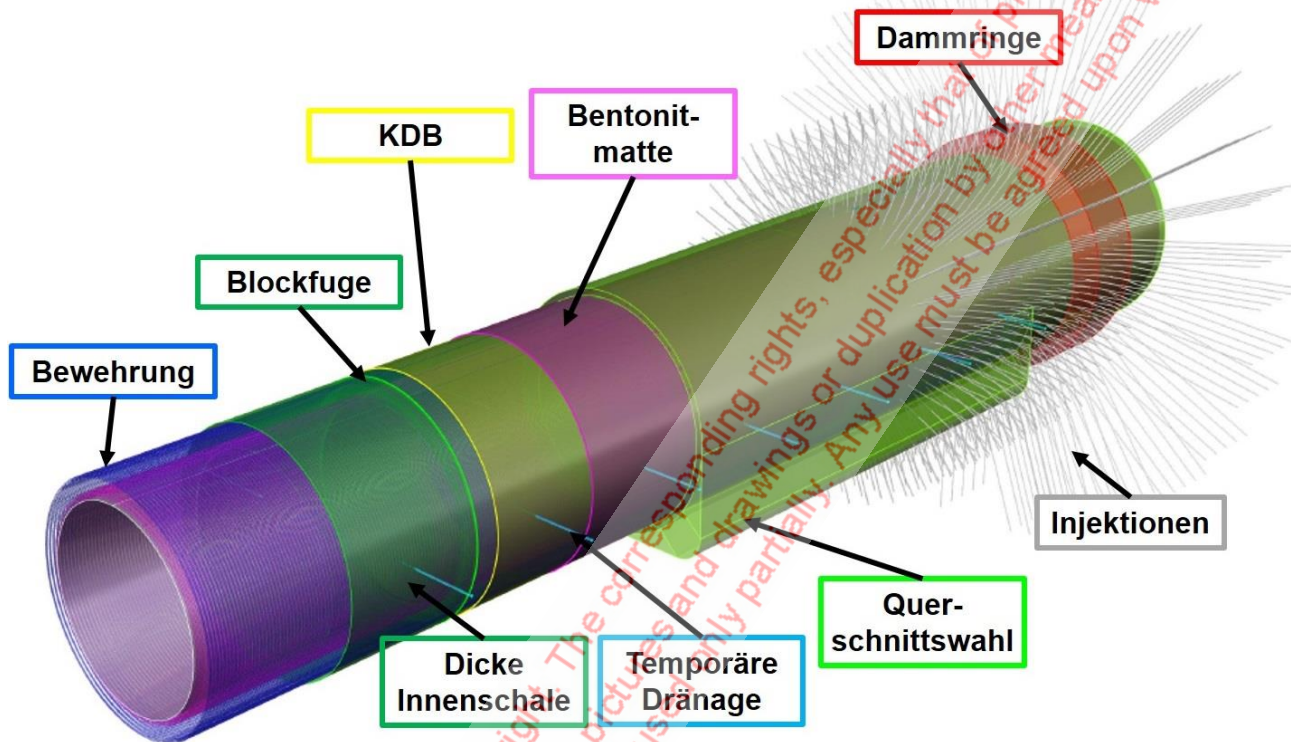


Bild 6: Bautechnische Maßnahmen für den Ausbau der Tunnel im quellfähigen Gebirge

An den Übergängen von den sogenannten "wasserführenden" Bereichen (Auflockerungszone in der Nähe von wasserführenden Schichten) zu den "trockenen" Bereichen, in denen die Tunnel einen ausreichend großen Abstand zu wasserführenden Gebirgsabschnitten besitzen, werden zusätzlich Dammringe angeordnet (Bild 6). Dazu wird bzw. wurde nach Abschluss der Vortriebsarbeiten jeweils ein ca. 5 m langer und ca. 1 m tiefer Gebirgsring ausgefräst und durch lagenweise aufgetragenen Stahlfaserspritzbeton ersetzt (WBI GmbH 2015, WBI GmbH 2016). Im Anschluss erfolgen auch hier Abdichtungsinjektionen über radiale Bohrungen.

Für die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim sind insgesamt 28 Dammringe hergestellt worden (Bild 7). Wie im Bild 5 (rechts) zu erkennen, wird ein großer Teil der Auflockerungszone durch den Stahlfaserspritzbeton des Dammrings ersetzt. Außerdem wird durch den Dammring auch die sprengbedingte Auflockerungszone, die erfahrungsgemäß nur wenige dm in das Gebirge reicht, durch Spritzbeton ausgetauscht.

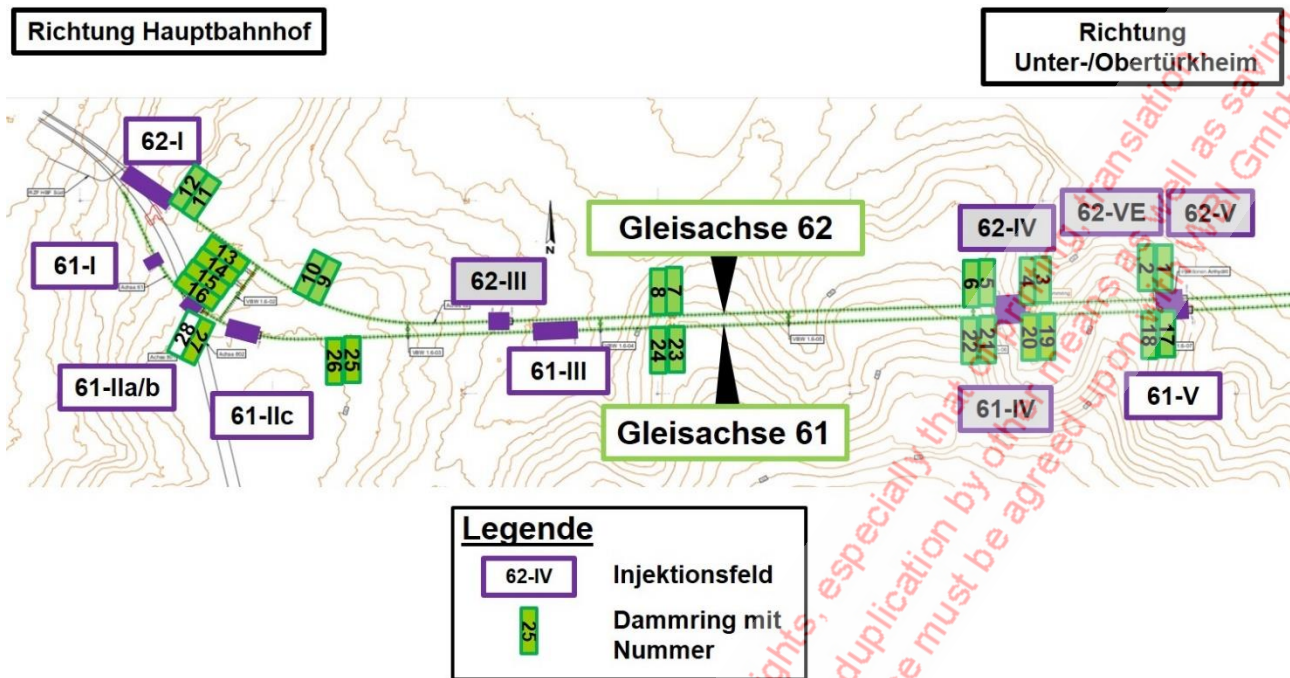


Bild 7: Tunnel nach Obertürkheim, Dammringe und Injektionen Anhydrit, Lageplan

4. Wahl des Injektionsmittels

Nach Möglichkeit sind mit Hilfe der Injektionen Durchlässigkeitsbeiwerte zu erzielen, die denen des ungestörten Gebirges entsprechen. Somit müssen Trennflächen mit Öffnungsweiten von $\leq 0,05$ mm bis $0,01$ mm abgedichtet werden. Der Abdichtungserfolg kann über

- den Einpressdruck p ,
- den Abstand der Bohrlöcher d ,
- die Einpressdauer t und
- die Viskosität η des Einpressgutes

gesteuert werden. Darüber hinaus können in gewissem Umfang auch Kapillarkräfte das Eindringverhalten des Injektionsgutes begünstigen.

Der Einpressdruck muss begrenzt werden, um ein unkontrolliertes Aufreißen des Gebirges, das zu ungewollten zusätzlichen Fließwegen führen kann, möglichst zu vermeiden. Für das Projekt Stuttgart 21 wurde der maximale effektive Verpressdruck aus diesem Grund auf 5 bar begrenzt.

Aus Gründen der Bauzeit und der Kosten müssen die Einpressdauer möglichst gering und der Abstand der Bohrlöcher möglichst groß gewählt werden. Um dessen ungeachtet den erforderlichen Verpresserfolg erreichen zu können, muss das gewählte Einpressgut eine möglichst geringe Viskosität besitzen.

Auf dem Markt erhältliche Acrylatgele besitzen bei Temperaturen von ca. 20 °C dynamische Viskositäten von $\eta \approx 2$ bis 3 mPa*s, während von den Herstellern für niedrigviskose Po-

lyurethane Viskositäten von $\eta \geq 40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ angegeben werden. Da die Viskosität des Verpressmittels ein bzw. der maßgebende Parameter für das Eindringverhalten des Baustoffs während einer Injektion ist, sind bei der Verpressung von PU-Harzen deutlich längere Injektionszeiten bzw. deutlich kleinere Bohrlochabstände erforderlich als bei Verwendung der sehr niedrig-viskosen Acrylatgele. Dieser Effekt wurde auch mit Hilfe von Versuchen an einem Spaltmodell im Labor von WBI bestätigt (WBI GmbH 2018).

Dementsprechend sind Acrylatgele für die Abdichtung von Trennflächen mit sehr geringen Öffnungsweiten deutlich besser geeignet als Polyurethane. Sie erfüllen die Mehrzahl der in (Wittke & Wittke & Wittke-Gattermann 2016, Wittke & Wittke 2014) formulierten Anforderungen sowohl in technischer Hinsicht als auch im Hinblick auf Bauzeit und Kosten. Für den Fall, dass stärker durchlässigere Zonen bzw. wasserführende Bereiche abgedichtet werden müssen, können und werden Polyurethane jedoch auch für die Injektionen Anhydrit erfolgreich eingesetzt. Dabei werden sowohl "hoch-viskose" Polyurethane ($\eta \approx 150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) als auch "niedrig-viskose" Polyurethane ($\eta \approx 40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) verwendet.

5. Bauausführung und Bauüberwachung

Injektionen Anhydrit werden in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim, im Fildertunnel, in den Tunneln nach Feuerbach und in den Tunneln nach Bad Cannstatt durchgeführt. Insgesamt werden voraussichtlich mehr als 600 km Injektionsbohrungen hergestellt und mit insgesamt mehr als 5.000.000 l Acrylatgel und Polyurethan verpresst.

Die Arbeiten werden von 3 Baufirmen bzw. Arbeitsgemeinschaften ausgeführt. Im Mittel wurden in den letzten Monaten ca. 500 Injektionsstufen pro Tag durchgeführt (Bild 8). Die Injektionsdaten werden von den Firmen per E-Mail oder über einen FTP-Zugang zur Verfügung gestellt und in das WBIM-System übernommen (WBI GmbH 2018). Auf dieser Grundlage erfolgt eine automatisierte Darstellung der Daten, die es ermöglicht, die Ergebnisse unter Berücksichtigung der geologischen Randbedingungen zu bewerten und Schlussfolgerungen für die weiteren Arbeiten und die Planung der Innenschale zu ziehen.

Die Arbeiten für die Injektionen Anhydrit in den Tunneln nach Bad Cannstatt werden voraussichtlich im Mai 2019 abgeschlossen. Die Injektionsarbeiten in den Tunneln nach Feuerbach werden voraussichtlich noch im Jahr 2019 beendet werden, während die Injektionen in den Tunneln nach Ober-/Untertürkheim und im Fildertunnel noch bis in das Jahr 2020 andauern werden.

Nachstehend werden die Bauausführung und die Ergebnisse der Injektionen erläutert, die bis Mai 2019 in den Tunneln nach Ober- und Untertürkheim durchgeführt wurden. Injektionen Anhydrit werden hier in insgesamt 11 Injektionsfeldern und 28 Dammringen durchgeführt (Bild 7). Die Arbeiten in den Feldern 61-IV, 62-III, 62-IV, 62-VE und 62-V sind abgeschlossen. Außerdem wurden die Injektionen für 27 der 28 Dammringe bereits durchgeführt.

Die 4 m langen Bohrungen im Bereich der Dammringe werden in zwei Stufen verpresst. Für die erste Stufe wird ein entlüftbarer Einfachpacker im stahlfaserbewehrten Spritzbeton des

Dammrings, ca. 15 cm vor der Fuge zwischen Dammring und Fels, eingebaut. Für die Einpressarbeiten dieser Stufe wird Acrylatgel verwendet. Für den Bohrlochverschluss bzw. die Verpressung des Spritzbetons wird im Anschluss ein Einfachpacker am Anfang des Bohrlochs verspannt, über den Polyurethan verpresst wird.

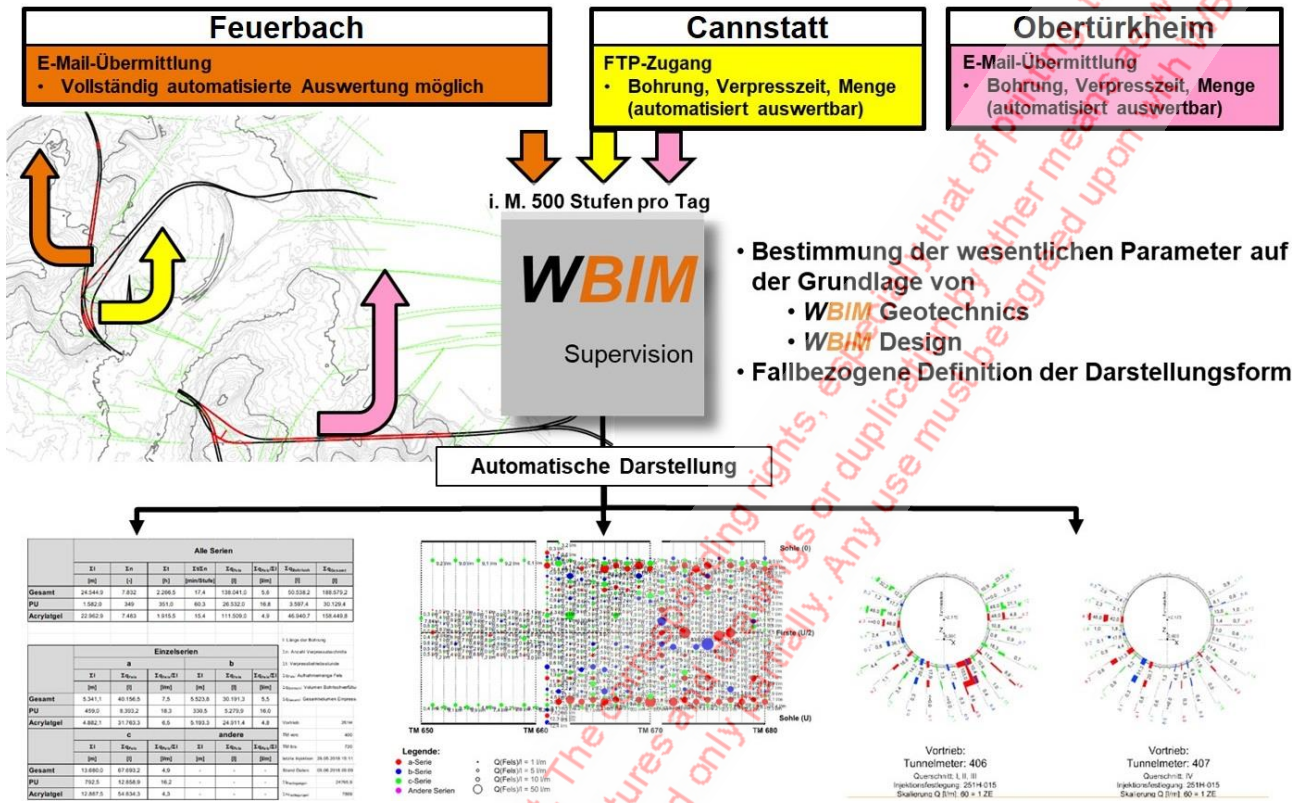
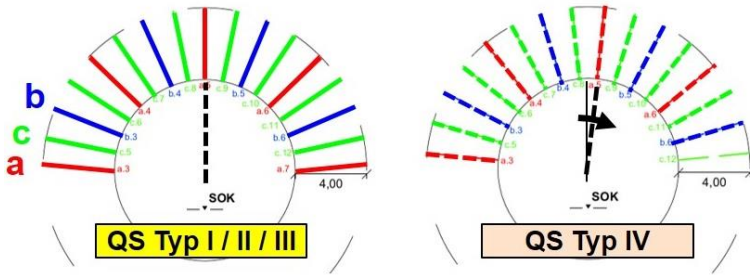


Bild 8: WBIM-Anwendung für die Überwachung und Auswertung des Injektionserfolgs

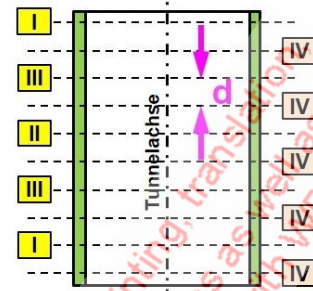
Die Vorgehensweise bei den Injektionen in den Injektionsfeldern 61-IV, 62-III, 62-IV, 62-VE und 62-V entspricht grundsätzlich der Vorgehensweise, die bei den Dammringen angewendet wird. Auch hier werden 4 m lange Bohrungen verpresst. Allerdings wird bzw. wurde der Packer in der ersten Stufe hier im Fels verspannt. Wasserführende Bohrungen und die ersten Bohrungen in den Feldern 61-IV, 62-III, 62-IV und 62-V werden bzw. wurden in einer Stufe mit PU verpresst.

Grundsätzlich erfolgen die Injektionen in allen Abschnitten nach dem Pilgerschrittverfahren. Die Herstellreihenfolge für die Injektionsfelder 61-IV, 62-III, 62-IV, 62-VE und 62-V ist in Bild 9 zusammengestellt. Injektionen erfolgen bzw. erfolgten hier nur in der oberen Querschnittshälfte. Nach Abschluss aller Phasen haben die Ansatzpunkte der Injektionsbohrungen in Umfangsrichtung einen Abstand von ca. 1 m. In Tunnellängsrichtung beträgt der Abstand bei den hier betrachteten Feldern 0,5 m bzw. 0,75 m (Bild 9).

Die Injektionen im Bereich der Dammringe werden dagegen umlaufend ausgeführt. Die 5 Injektionsquerschnitte je Dammring besitzen in Längsrichtung einen Abstand von ca. 1 m. Die Ansatzpunkte der 4 m langen Bohrungen haben nach Abschluss aller Injektionen in Umfangsrichtung ebenfalls einen Abstand von 1 m.



Anordnung der Injektionsbohrungen



Anordnung Querschnittstypen

**Herstellreihenfolge
(„Pilgerschritt“)**

1. QS I und II: **a-Reihe**
2. QS I und II: **b-Reihe**
3. QS III: **a-Reihe**
4. QS III: **b-Reihe**
5. QS IV: **a-Reihe**
6. QS IV: **b-Reihe**
7. QS I und II: **c-Reihe**
8. QS III: **c-Reihe**
9. QS IV: **c-Reihe**

Tunnelabschnitt	q^*	Anzahl Stufen	Bohrmeter
	[m]	[-]	[m]
61-IV		4.488	9.864,4
62-III	0,5	3.262	6.999,1
62-IV		3.741	8.217,4
62-V	0,75	2.576	5.644
62-VE		816	1.632
Summe		14.883	32.356,9

Stand: 08.05.2019

Bild 9: Injektionsfelder 62-V, 62-VE, 62-IV, 62-III und 61-IV, Reihenfolge der Injektionsarbeiten

6. Ergebnisse der Injektionen

Insgesamt wurde in den Injektionsfeldern 61-IV, 62-III, 62-IV, 62-VE und 62-V 32.356,9 m Bohrungen in 14.883 Stufen verpresst (Bild 9). Im Mittel wurden über alle Bohrungen 4,6 l Einpressgut (Acrylatgel und Polyurethan) je Bohrmeter in den Fels bzw. in den Spritzbeton eingebracht (Bild 10). Die Aufnahmemengen nehmen erwartungsgemäß von im Mittel 13,8 l/m bzw. 10,2 l/m in der a- und b-Reihe in den Querschnitten I/II/III auf 1,6 l/m bzw. 1,0 l/m in der c-Reihe der Querschnitte I/II/III bzw. IV ab. Die schrittweise Abnahme der Aufnahmemenge im Zuge der Verdichtung des Bohr- und Injektionsrasters zeigt den Abdichtungserfolg in allen Feldern.

Wie in Abschnitt 5 erläutert, besitzen die Injektionsquerschnitte in den Feldern 62-V und 62-VE in Tunnel längsrichtung einen Abstand von 0,75 m, während die Querschnitte in den anderen drei Feldern einen Abstand von 0,5 m aufweisen. Um die Injektionsgutaufnahmen der verschiedenen Felder miteinander vergleichen zu können, ist in Bild 10 für alle Felder die mittlere Injektionsgutaufnahme je Bohrmeter und Tunnelmeter (q^*) angegeben. Sie schwankt für die Felder 61-IV, 62-III, 62-IV und 62-V zwischen $q^* = 6,8$ l/m/TM und $q^* = 9,6$ l/m/TM. Für das Feld 62-VE ist mit $q^* = 11,1$ l/m/TM im Mittel die größte Verpressgutaufnahme zu verzeichnen (Bild 10). Die mittleren Verpresszeiten je Stufe variierten zwischen 14,5 Minuten im Feld 62-III und 19,6 Minuten im Feld 62-V.

Querschnitt Typ	Reihe	Injektionsgutaufnahme Q (Fels und Spritzbeton) [l/m]					
		61-IV	62-III	62-IV	62-V	62-VE	im Mittel
I/II/III	a	13,2	8,7	9,5	25,2	22,7	13,8
I/II/III	b	8,3	8,4	12,6	6,1	29,7	10,2
IV	a	1,8	2,3	5,7	3,8	0,7	3,1
IV	b	1,2	1,5	3,6	1,4	1,7	1,9
I/II/III	c	1,9	1,5	1,9	0,9	1,9	1,6
IV	c	0,9	1,3	1,1	0,6	1,7	1,0
Alle	a, b, c	4,1	3,4	4,8	5,6	8,3	4,6

q* = q / d		Stand: 08.05.2019					
d	[m]	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	-
q*	[l/m/TM]	8,2	6,8	9,6	7,5	11,1	
Verpresszeit	[min/Stufe]	18,5	14,5	19,1	19,6	17,5	

Bild 10: Bereiche 62-V, 62-VE, 62-IV, 62-III und 61-IV, Ergebnisse der Injektionen

Die im Vergleich zu den anderen Feldern erhöhte Verpressgutaufnahme im Feld 62-VE ist darauf zurückzuführen, dass das Feld den Verschneidungsbereich zwischen einem Verbindungsbauwerk und der Streckenröhre umfasst (Bild 11). Hier ist es insbesondere oberhalb der Verschneidung zu einer größeren Auflockerung des Gebirges gekommen, und es sind dementsprechend höhere Verpressgutaufnahmen zu verzeichnen (Bild 12).

Dagegen sind die mittleren Injektionsgutaufnahmen im Bereich der Dammringe des Tunnels nach Ober-/Untertürkheim deutlich geringer als in den an die Dammringe angrenzenden Feldern (Bild 13). Insgesamt wurden in den Dammringen bisher 17.622,8 m Bohrungen in 8.759 Injektionsstufen verpresst. Die mittlere Acrylatgelaufnahme im Fels und im Bereich der Fuge zwischen Fels und Spritzbeton beträgt ca. 2,6 l/m pro Tunnelmeter. Vom Stahlfaserspritzbeton wurden in der zweiten Stufe im Mittel ca. 2,9 l/m pro Tunnelmeter Polyurethan aufgenommen. Beide Werte sind deutlich kleiner als die mittlere Injektionsgutaufnahme in den Feldern 61-IV, 62-III, 62-IV und 62-V (6,8 bis 9,6 l/m/TM).

Dieses Ergebnis bestätigt die Erwartung bzw. die oben beschriebenen Ergebnisse der FE-Berechnungen, nach denen die Auflockerung im hohlraumnahen Bereich, d. h. in einem ca. 1 m breiten Ring um den Tunnel herum, am größten ist.

Wie erläutert, zeigt die Abnahme der Injektionsgutaufnahme im Zuge der Verdichtung des Bohr- und Injektionsrasters, dass das Gebirge erfolgreich abgedichtet worden ist. Auch der visuelle Vergleich des Zustands der Spritzbetonschale vor und nach Durchführung der Injektionen zeigt die Wirksamkeit der Injektionen (Bild 14).

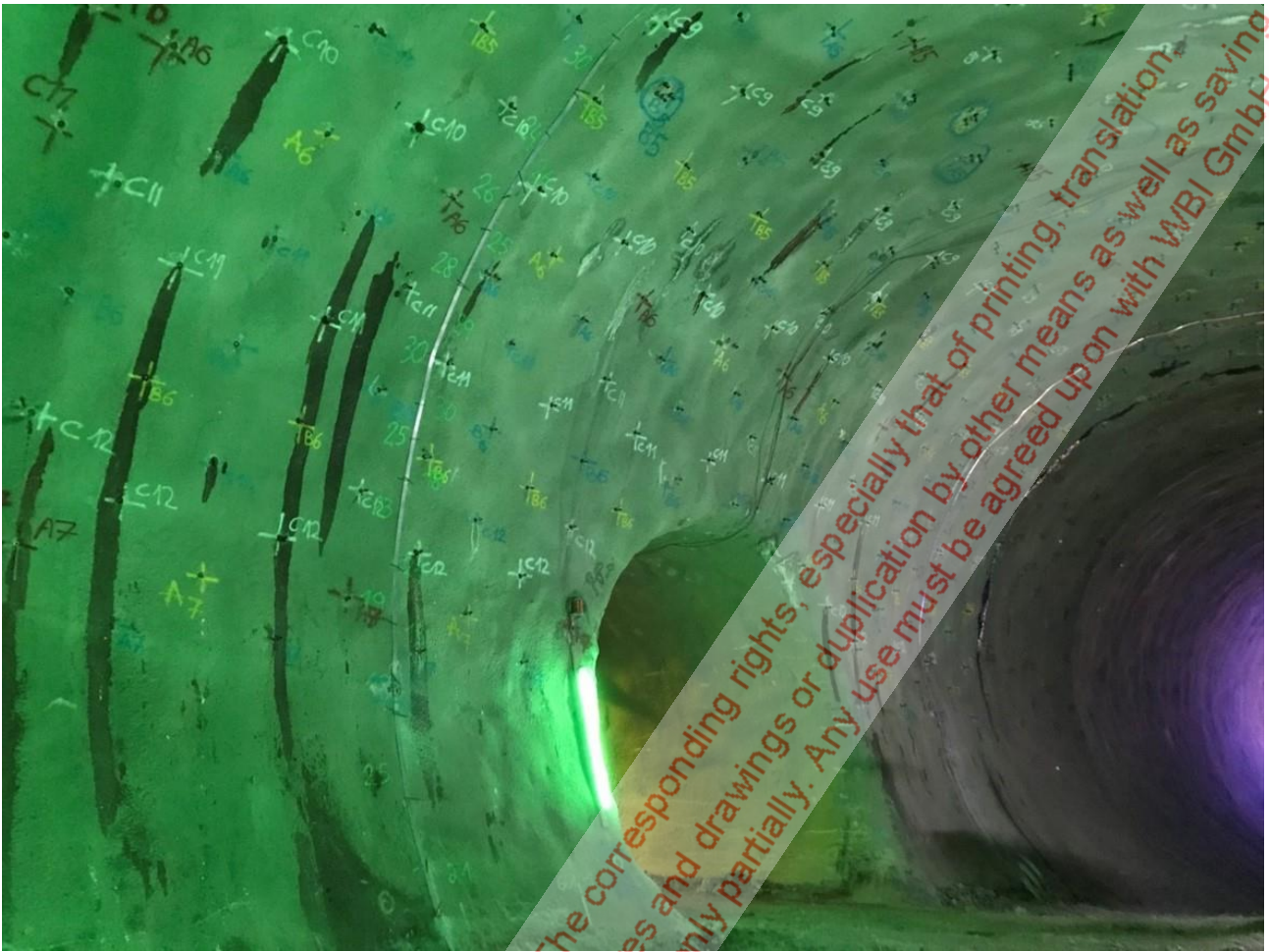
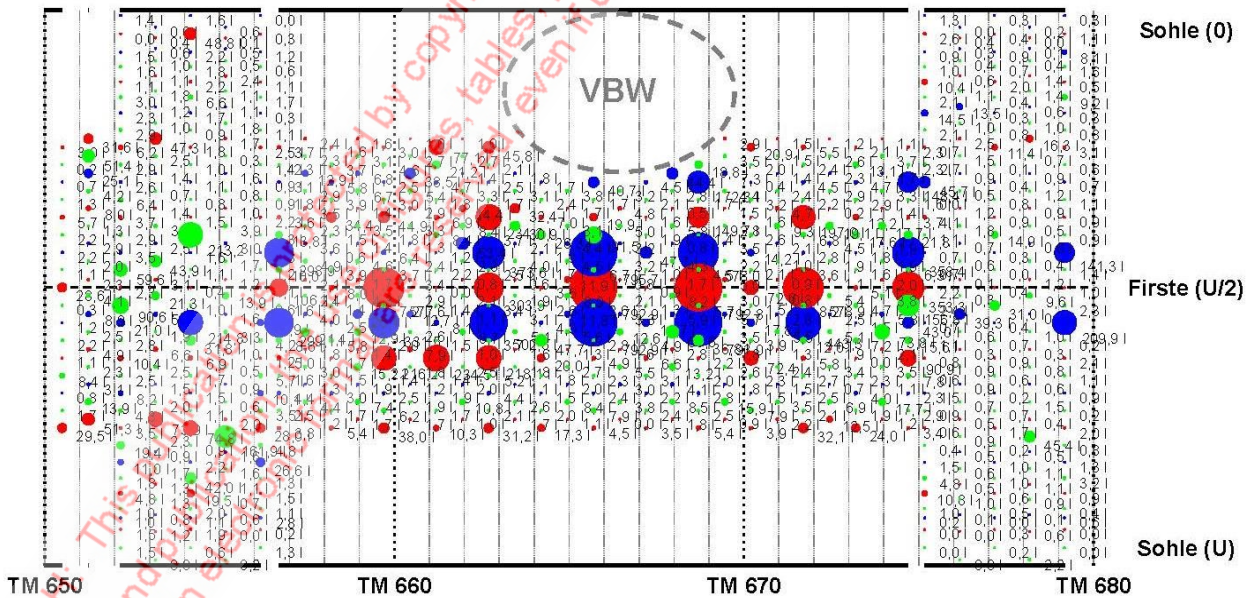


Bild 11: Feld 62-VE, Foto



Legende:

- a-Serie
- b-Serie
- c-Serie
- Andere Serien
- Q(Fels) = 10 I
- Q(Fels) = 50 I
- Q(Fels) = 100 I
- Q(Fels) = 500 I

Bild 12: Feld 62-VE, Aufnahmemenge Fels je Bohrung [I], Abwicklung



Tunnelabschnitt	d	Anzahl Stufen	Bohrmeter	Injektionsgutaufnahme	
	[m]			[m]	Fels [l/m]
DR 1 bis 27	1,0	8.759	17.622,8	2,6	2,9

Stand: 08.05.2019

Bild 13: Herstellung Dammringe



vor Injektionen

nach Injektionen

Bild 14: Tunnelachse 62, Feld V, Fotos

7. Überprüfung des Verpresserfolgs

Der Erfolg der Injektionen wird mit Durchlässigkeitsversuchen überprüft. Im vorliegenden Beitrag wird über die Ergebnisse dieser Versuche, die für die Tunnel nach Ober-/

Untertürkheim bis Mai 2019 durchgeführt wurden, berichtet. Insgesamt wurden bis zu diesem Zeitpunkt in den Feldern 62-IV, 62-V und 62-VE Durchlässigkeitsversuche in 7 Versuchsquerschnitten durchgeführt (Bild 15). In jedem Versuchsquerschnitt wurden je 3 Vollbohrungen mit einer Länge von 3 m im injizierten Bereich abgeteuft (Bild 16). Da dem anhydritführenden Gebirge kein Wasser zugeführt werden darf, wurden die Bohrungen mit Luftspülung ausgeführt.

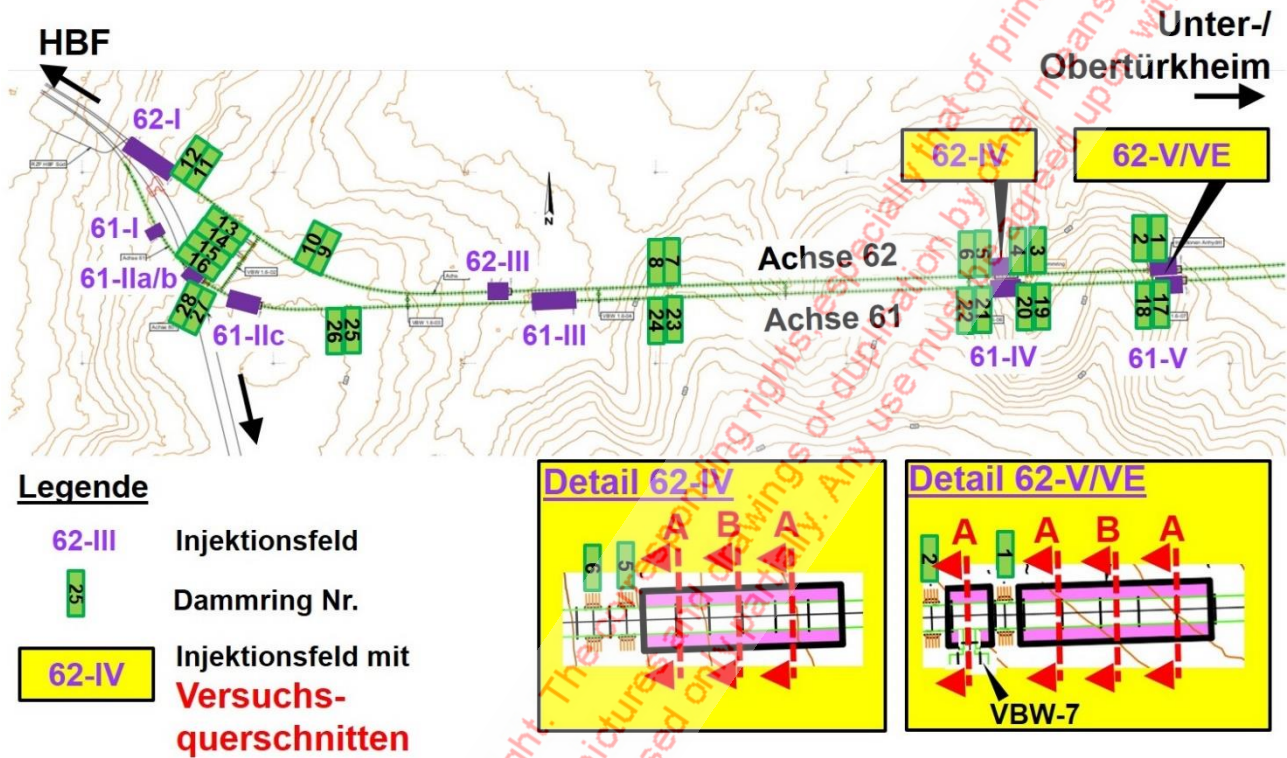


Bild 15: Lageplan mit Versuchsquerschnitten

In jeder Bohrung wurde die Durchlässigkeit in zwei Versuchsabschnitten bestimmt. Mit der ersten Stufe wurde die Durchlässigkeit des verpressten Fels überprüft. Dazu wurde ein Blähpacker mit Entlüftung im Fels unmittelbar hinter der Spritzbetonschale gesetzt. Für den zweiten Testabschnitt wurde ein mechanischer Packer ohne Entlüftung an der Innenseite der Spritzbetonschale gesetzt. In dieser Versuchsphase wurde somit die Durchlässigkeit des Spritzbetons und der Fuge zwischen Spritzbeton und Fels getestet (Bild 16).

Die Versuche wurden anstelle von Wasser mit Acrylatgel ausgeführt. Die Wasserdurchlässigkeit wird aus den Versuchsergebnissen unter Berücksichtigung der Viskosität des Versuchsmediums ermittelt (Bild 17, Wittke 2014). Um einen Einfluss einer Viskositätsänderung des Acrylatgels auf die Versuchsergebnisse auszuschließen, wurde die Reaktionszeit bzw. die Topfzeit des Gels im Vergleich zur standardgemäß verwendeten Mischung auf 60 Minuten verlängert (Rubbertite BL).

Für die Versuche wurde ein Einpressdruck von 5,5 bar vorgegeben, der am Mischkopf in Höhe der temporären Fahrsole im Tunnel gemessen wurde. Für die Auswertung der Versuche hinsichtlich der Durchlässigkeit muss jedoch der effektive Verpressdruck im Bohrloch

berücksichtigt werden. Dementsprechend ist der hydrostatische Druck zwischen dem Bohrloch und dem Messpunkt auf der Fahrsohle für die Auswertung vom Messwert zu subtrahieren. Hierfür wird näherungsweise ein Druck von 1 bar berücksichtigt. Zusätzlich müssen bei höheren Durchflussraten die Systemverluste berücksichtigt werden. Diese wurden vor Ort in Versuchen bei freiem Auslauf mit schrittweiser Reduzierung des Massenflusses ermittelt. Die Versuche haben gezeigt, dass die Systemverluste bei Massenflüssen $< 1,0 \text{ kg/min}$ bei der verwendeten Verpresstechnik vernachlässigbar gering sind.

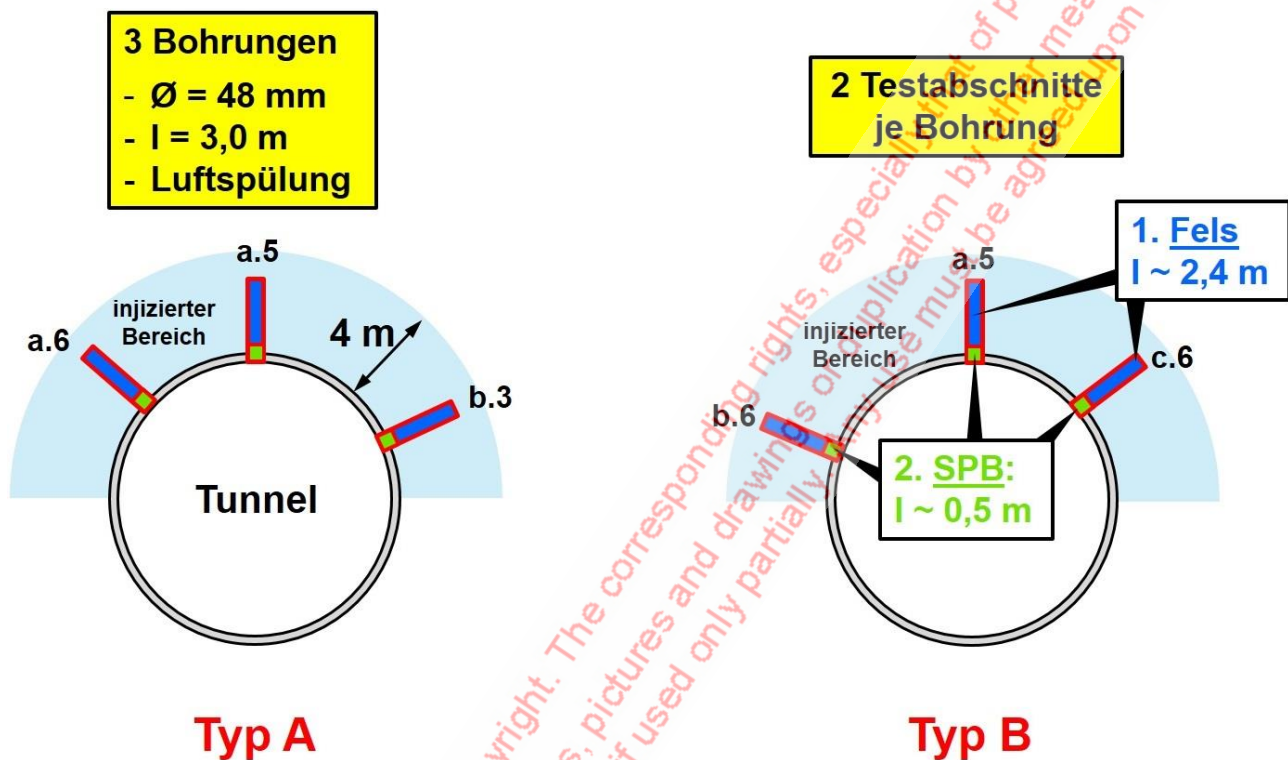


Bild 16: Versuchsquerschnitte mit Bohrungen und Testabschnitten

Aufgrund der erwarteten geringen Durchlässigkeiten musste für die Versuche eine besondere Messtechnik für die Bestimmung der Durchflussraten bzw. des Massenflusses eingesetzt werden. Dazu wurde der Sensor Promass A 300 der Firma Endress+Hauser eingesetzt, der einen Messbereich von 0,005 bis 3 kg/min besitzt (Bild 18). Kalibrierungsversuche im Labor von WBI haben gezeigt, dass mit dem Sensor auch kleinere Raten gemessen werden können, allerdings verringert sich dann die Genauigkeit der Messung.

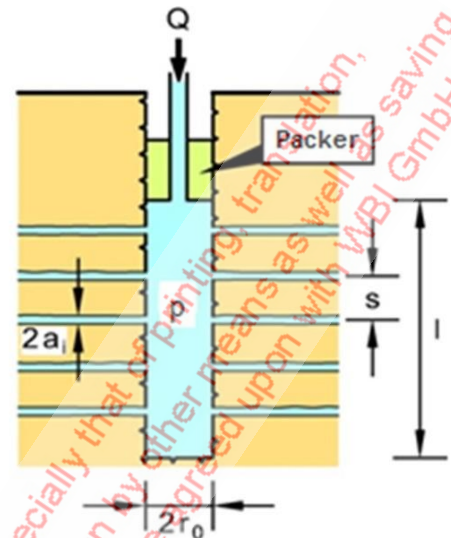
Beispielhaft ist in Bild 19 das Druck-/Mengendiagramm für den Versuch im Fels in der Bohrung C.6 bei TM 1047,25 im Feld 62-IV dargestellt. Zu Beginn des Versuchs wird das Bohrloch mit einer Verpressrate von ca. 3 kg/min gefüllt und entlüftet. Die hierfür erforderlichen Verpressdrücke entsprechen in etwa den Systemverlusten. Nach Abschluss der Bohrlochfüllung wird die Entlüftungsleitung verschlossen und der Versuch beginnt. Am Anfang des Versuchs zeigt die Durchflussrate zunächst eine deutliche Abnahme (instationäre Phase), ehe sich ein konstanter Durchfluss einstellt (stationäre Phase).

$$k_D = \frac{Q}{2\pi \cdot l \cdot \Delta h} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{g \cdot (2a_i)^3}{12\nu \cdot s}$$

$$v = \eta / \rho$$

$$\Delta h = \Delta p / (g \cdot \rho)$$

$$\Delta p = (6/\pi) \cdot \eta \cdot Q \cdot (s/l) \cdot (1/(2a_i)^3) \cdot \ln(R/r_0)$$



mit

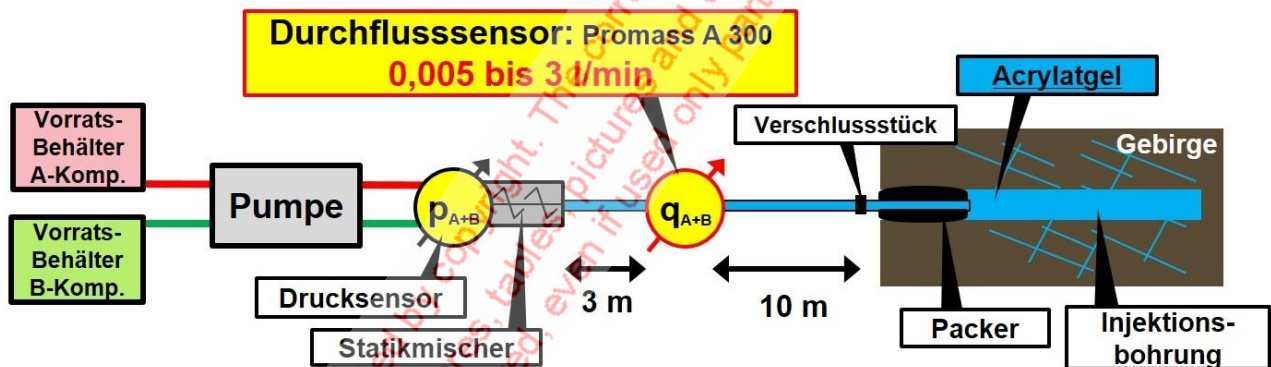
$$R = 1,0 \text{ m}$$

$$r_0 = 0,048/2 = 0,024 \text{ m}$$

$l = \text{variabel}$, Länge der Einpressstrecken

Q und $p = \sim 4,5 \text{ bar}$ nach Bohrlochfüllung

Bild 17: Auswertung der Abpressversuche, Modell und Parameter



Pneumatische Doppelkolbenpumpe



Steuerung und Durchflusssensor

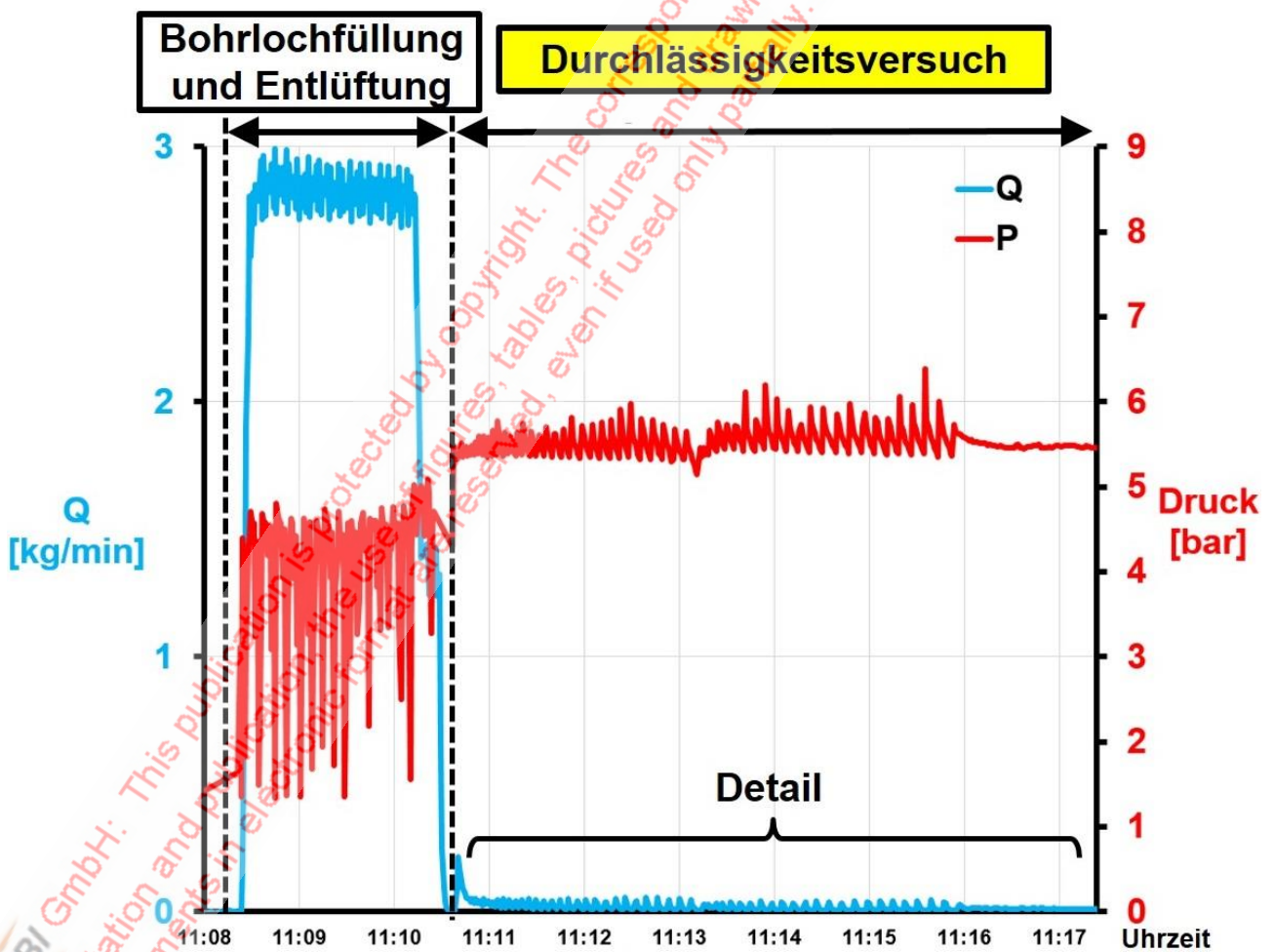
Bild 18: Pumpen- und Messtechnik

Für die Auswertung der Versuche im Hinblick auf die Durchlässigkeit wird die stationäre Phase berücksichtigt. Für die Bohrung C.6 bei TM 1047,25 ergibt sich für diese Phase eine

Einpressrate von ca. 0,012 l/min. Für einen effektiven Verpressdruck von 4,5 bar kann hieraus unter Berücksichtigung der Testabschnittlänge eine Durchlässigkeit des abgedichteten Gebirges von $2,7 \cdot 10^{-9}$ m/s abgeleitet werden (Bild 20). Für den Versuch in der Bohrung B.6 bei TM 1047,25 ergibt sich sogar eine Gebirgsdurchlässigkeit von nur $2,2 \cdot 10^{-10}$ m/s (Bild 21).

Insgesamt haben alle 21 bis zum Mai 2019 durchgeführten Versuche für den abgedichteten Fels Durchlässigkeiten $\leq 10^{-8}$ m/s ergeben (Bild 22). Der geometrische Mittelwert der Versuchsergebnisse beträgt $1,5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Die für den Spritzbeton bzw. die Fuge zwischen Spritzbeton und Fels in den Versuchen ermittelte Durchlässigkeit ist etwas höher. Allerdings ergibt sich auch hier ein sehr geringer geometrischer Mittelwert von nur $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Bild 22). Die Abdichtungsinjektionen können daher als sehr erfolgreich angesehen werden.

Auch die für die Tunnel nach Bad Cannstatt und Feuerbach durchgeführten Durchlässigkeitsversuche bestätigen den Erfolg der Abdichtungsmaßnahmen. Hier konnten in 147 Abpressversuchen mit wenigen Ausnahmen Durchlässigkeitsbeiwerte von 10^{-7} m/s und weniger nachgewiesen werden (Bild 23). Der geometrische Mittelwert für den Durchlässigkeitsbeiwert liegt hier derzeit bei ca. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s.



© Bild 19: Druck-/Mengendiagramm Bohrung C.6 TM 1047,25

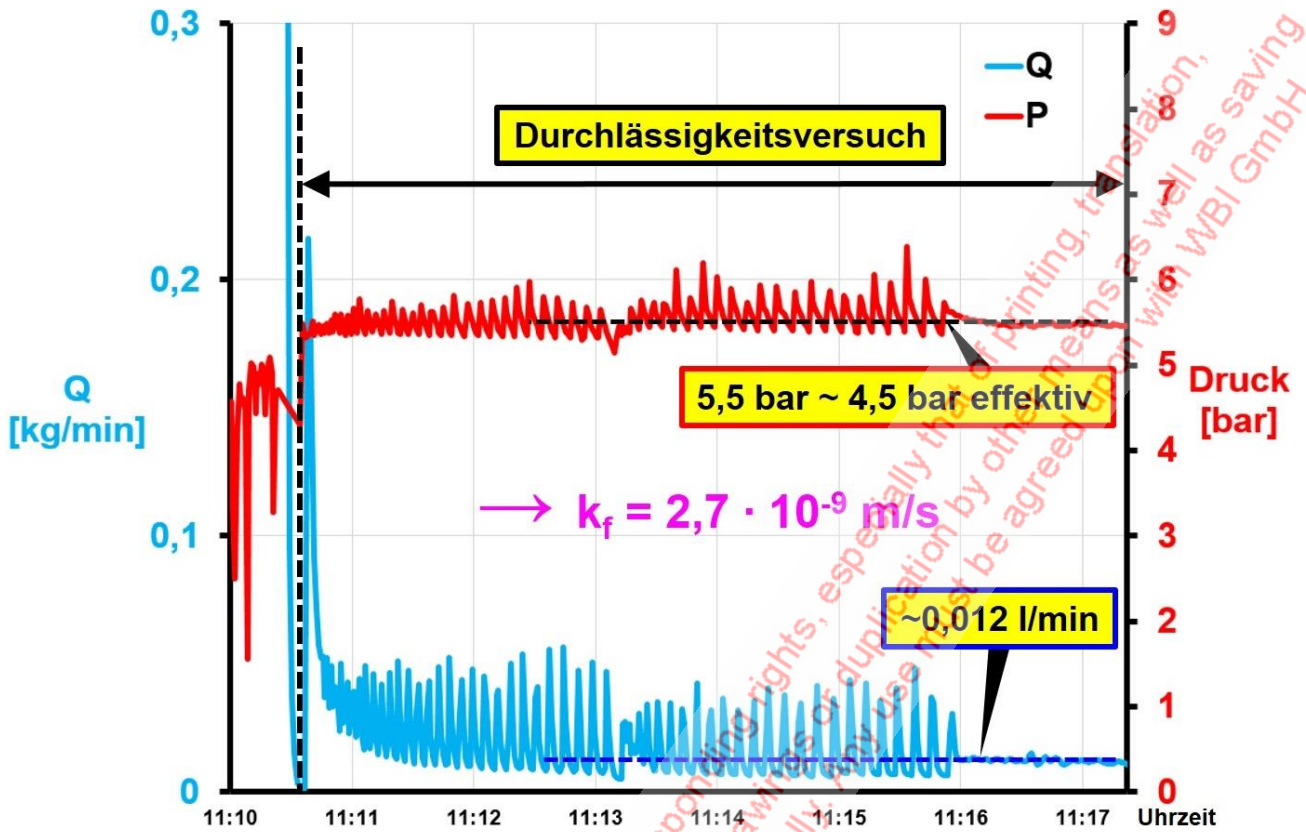


Bild 20: Druck-/Mengendiagramm Bohrung C.6 TM 1047,25, Detail

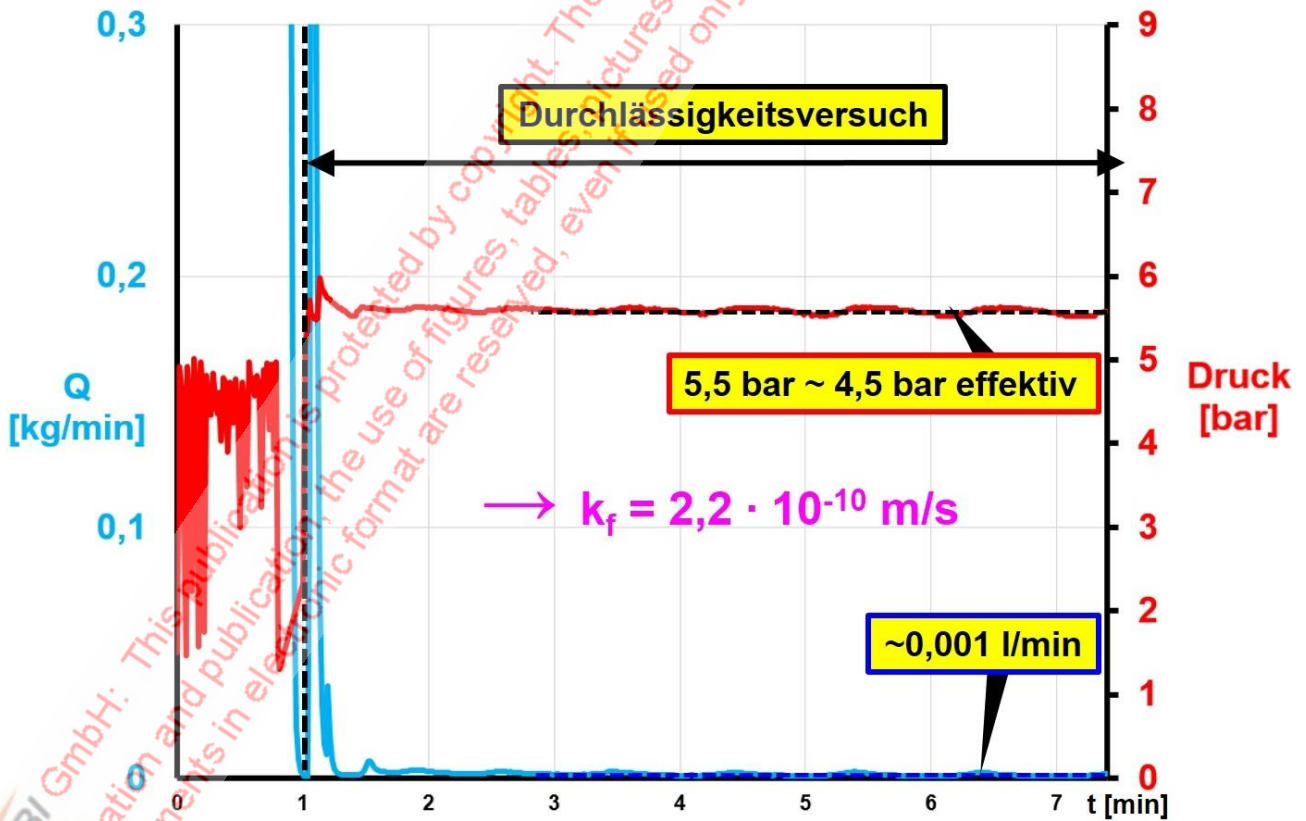


Bild 21: Druck-/Mengendiagramm Bohrung B.6 TM 1047,25, Detail

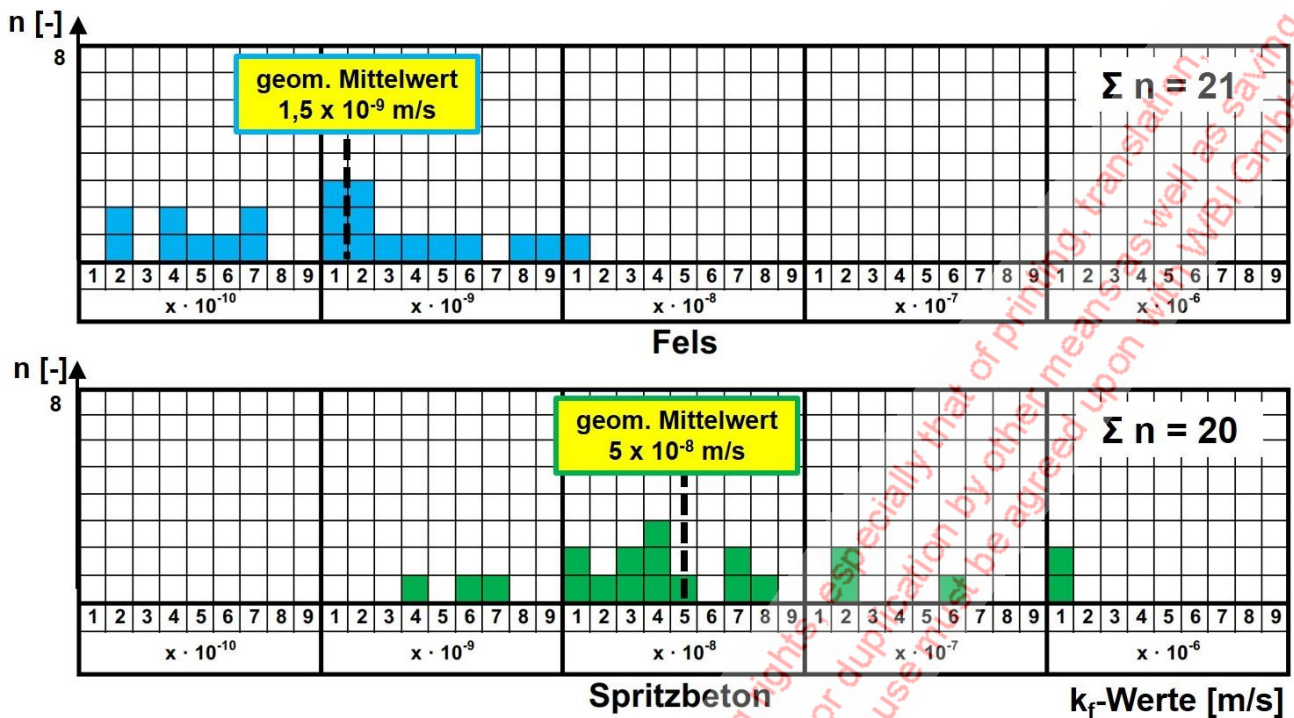


Bild 22: Abpressversuche 62-V/VE und 62-IV, Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte

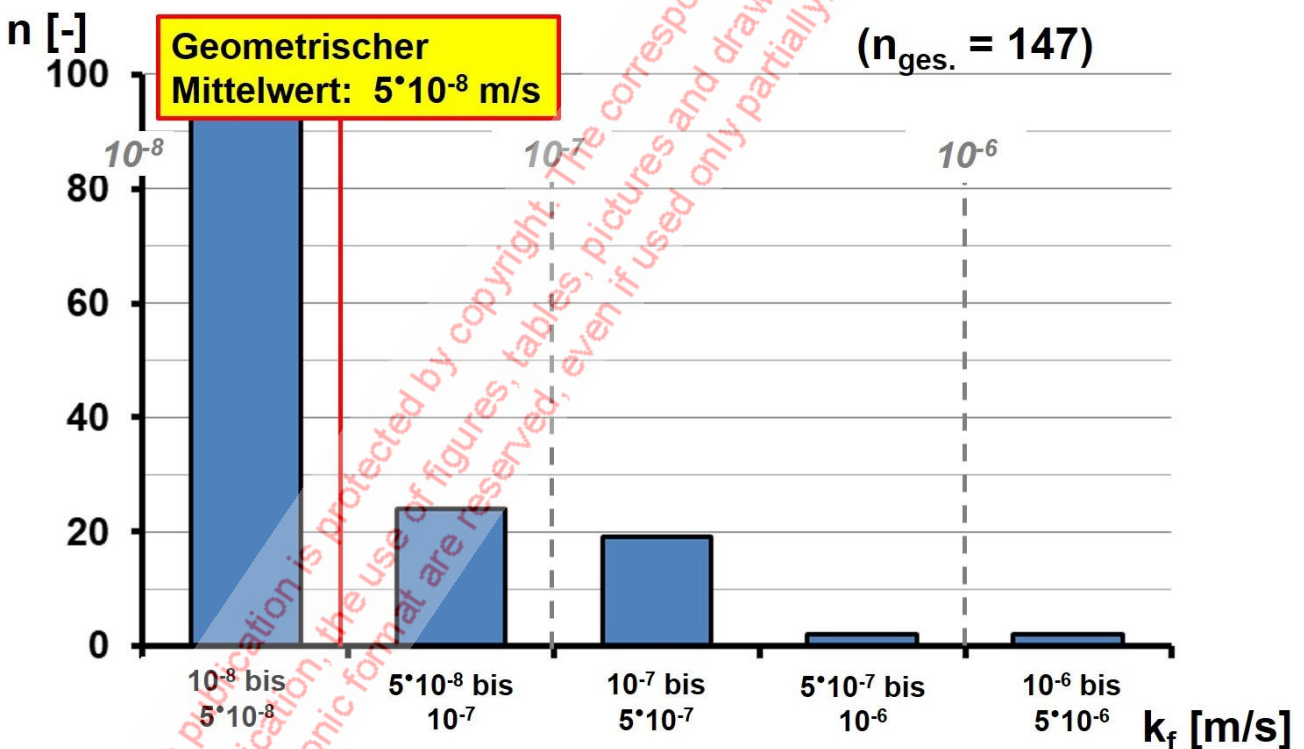


Bild 23: Tunnel nach Feuerbach und Bad Cannstatt, Ergebnisse der Abpressversuche, Stand März 2019

8. Zusammenfassung

Für das Bahnprojekt Stuttgart - Ulm werden ca. 17 km Tunnel im anhydritführenden unausgelaugten Gipskeuper gebaut. Die Planung und Ausführung der Tunnelbauten erfolgen bzw. erfolgten auf der Grundlage langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die im

Hause WBI durchgeführt wurden. Ein wesentliches Element für den erfolgreichen Tunnelbau im quellfähigen Gebirge ist es, Wasserzutritte in das anhydritführende Gebirge soweit möglich zu verhindern bzw. zu verringern. Aus diesem Grund werden für das Projekt umfangreiche Injektionsarbeiten durchgeführt.

Insgesamt werden Acrylatgel und Polyurethan über mehr als 600 km Bohrungen in den Fels und den Spritzbeton des Tunnels eingebracht. Damit werden die durch den Tunnelbau bedingte Auflockerungszone, die im hier betrachteten Fall ca. 2 bis 3 m in das Gebirge reicht, die Kontaktzone zwischen Spritzbeton und Fels sowie der Spritzbeton abgedichtet. Die Anordnung und Länge der Injektionsbohrungen sowie das Einpressmittel werden von Fall zu Fall auf der Grundlage der vorhandenen Erkenntnisse aus der Baugrunderkundung und dem Bau sowie den Ergebnissen der statischen Berechnungen festgelegt.

Der Verpresserfolg wird durch Durchlässigkeitsversuche überprüft. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Auflockerungszone in den injizierten Bereichen der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim nahezu auf das Niveau der Durchlässigkeit verringert werden kann, das vor dem Bau der Tunnel vorhanden war. Es werden Durchlässigkeitsbeiwerte von 10^{-8} m/s bis 10^{-10} m/s erreicht. Dieser Abdichtungserfolg wird bei der Bemessung der Innenschale der Tunnel und den Verformungsprognosen mit dem WBI-eigenen Programmsystem FEST03 berücksichtigt und führt stellenweise auch zu einer Einsparung von Bewehrung und somit zu einer Verbesserung der Qualität der Innenschale (Bild 24).

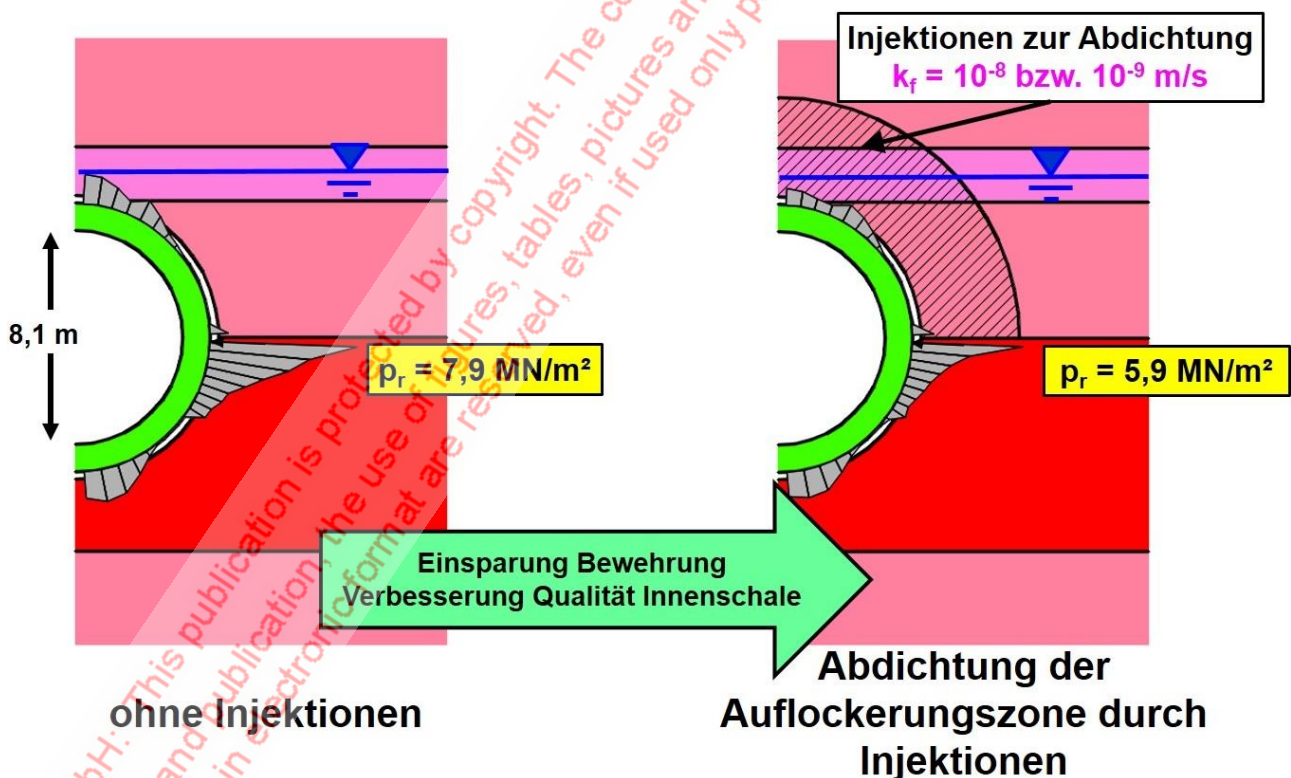


Bild 24: Einfluss der Injektionen auf die Quelldruckbeanspruchung der Innenschale nach 100 Jahren, Berechnungsergebnisse

Auch bei den Injektionen Anhydrit, die in den Tunneln nach Feuerbach und Bad Cannstatt durchgeführt werden, wird das Abdichtungsziel erreicht. Hier können Durchlässigkeitsbeiwerte von $\leq 10^{-7}$ m/s nachgewiesen werden.

Wir freuen uns, dass es durch den Einsatz moderner und innovativer Planungs- und Bauverfahren gelingt, die vortriebsbedingte Auflockerungszone erfolgreich abzudichten und möchten uns bei den beteiligten Bauarbeitsgemeinschaften und deren Subunternehmern

- der Arge ATCOST 21 und DMI für die Tunnel nach Ober-/Untertürkheim und den Fildertunnel,
- der Arge ATC und Bemo für die Tunnel nach Bad Cannstatt und
- der Arge ATF und Renesco

für die erfolgreiche und gute Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

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

WBI GmbH: Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart - Ulm. Vorträge anlässlich des Felsmechanik-Tages am 16.04.2015 im WBI-Center in Weinheim. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

WBI GmbH: Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart - Ulm. Vorträge anlässlich des 2. Felsmechanik-Tages am 13.04.2016 im WBI-Center in Weinheim. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.

WBI GmbH: Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart - Ulm und anderer Großprojekte im In- und Ausland. Vorträge anlässlich des 3. Felsmechanik-Tages am 11.05.2017 im WBI-Center in Weinheim. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.

WBI GmbH: Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart - Ulm und anderer Großprojekte im In- und Ausland. Vorträge anlässlich des 4. Felsmechanik-Tages am 07.06.2018 im WBI-Center in Weinheim. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.

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

Wittke, M.: Knautschzone versus U-Profil im quellfähigen Gipskeuper. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.

Wittke, M.; Breidenstein, M.: Bahnprojekt Stuttgart - Ulm - Der Fildertunnel - Erfahrung und Ausblick mit der kombinierten Bauweise mittels Spritzbeton und Tunnelvortriebsmaschine. Veröffentlichung anlässlich der STUVA-Tagung 2015 in Dortmund.

Wittke, M.; Osthoff, G.; Wittke-Gattermann, P.: Fildertunnel und Tunnel nach Ober-/Untertürkheim, Maßnahmen für erfolgreiches Bauen im Anhydrit. Swiss Tunnel Congress Luzern, 2019.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014. ISBN 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.; Erichsen, C.; Wittke-Gattermann, P.: Stoffgesetz, Berechnungsverfahren, felsmechanische Kennwerte und Ausführungsstatik für Tunnel im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbautages 2017 im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.

Wittke, W.; Wittke, M.; Osthoff, G.; Lienhart, C.: Stuttgart 21 - Mehr als 15 km Tunnel im Anhydrit. Besondere Maßnahmen zur Beherrschung der Quellproblematik und Erfahrungen aus der Umsetzung. Veröffentlichung anlässlich der STUVA-Tagung 2017 in Stuttgart.

Wittke, W.; Wittke, M.; Tintelnot, G.: Kunstharzinjektionen zur Abdichtung beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge, Taschenbuch für den Tunnelbau 2014.

Wittke, W.; Wittke, M.; Wahlen, R.: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper. Geotechnik 27, Nr. 2, S. 112 - 117, 2004.

Wittke, W.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.: Tunnelvortrieb im anhydritführenden Gebirge, Taschenbuch für den Tunnelbau 2016.

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.

Wittke-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunnels in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1998.