

# Ergebnisse eines Feldversuches zur Abdichtung gering durchlässigen Felses mit Acrylatgel

M. Eng. André Reinhardt  
Dipl.-Ing. Dieter Schmitt

## Zusammenfassung

In dem Beitrag wird ein Überblick über die Tunnelbauarbeiten im Planfeststellungsabschnitt 1.5 des Bahnprojekts Stuttgart - Ulm gegeben. Die Tunnel liegen im Gipskeuper. In 3 Abschnitten kommen die Tunnelröhren nach Feuerbach in anhydritführendem, quellfähigem Fels zu liegen. Hier wird der Tunnelbau trocken durchgeführt. Nach dem Auffahren der Röhren werden die vortriebsbedingt aufgelockerten Zonen in der Umgebung des Tunnels mit Acrylatgel abgedichtet, um Wasserzutritte zum quellfähigen Gestein auch nach dem Bau zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Zur Erprobung der Verpresstechnik und zur Ermittlung der erforderlichen Abstände und Tiefen der Injektionsbohrlöcher sowie der zu verpressenden Mengen wurde im Tunnel Feuerbach ein Injektionsversuch durchgeführt. Damit wurde gezeigt, dass der Verpresserfolg mit der eingesetzten Technik und den gewählten Bohrlochabständen und Verpressdrücken erreicht werden konnte.

## 1. Überblick Planfeststellungsabschnitt 1.5

Der Planfeststellungsabschnitt 1.5 des Bahnprojekts Stuttgart - Ulm umfasst 4 Baulose. Die Lose 2 und 3 bestehen aus den Fernbahnzuführungen von Feuerbach und Bad Cannstatt zum neuen Neckar Hauptbahnhof. Zum Los 4 gehört die S-Bahn-Anbindung vom Hauptbahnhof nach Stuttgart-Nord bzw. Feuerbach in offener Bauweise. Der Bau der Unterbauten der Eisenbahnüberführung über den Neckar gehört zum Los 5 (Bilder 1 und 2).

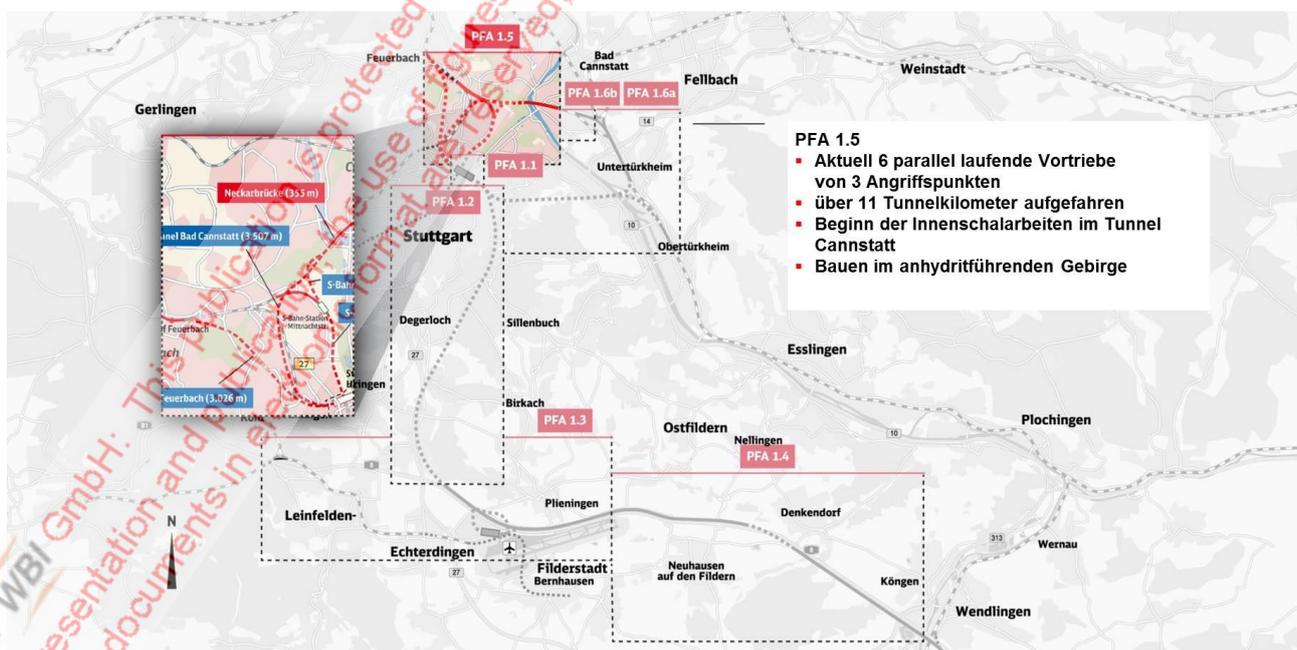
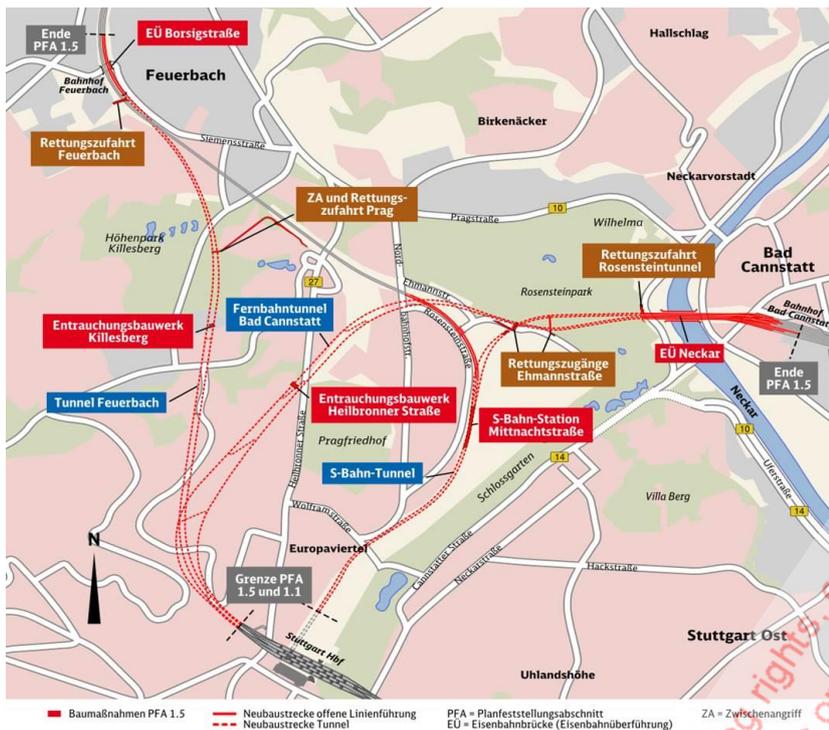


Bild 1: Überblick Planfeststellungsabschnitt 1.5



Die Bauausführung im PFA 1.5 erfolgt in 4 Baulosen:

- Los 2 – Fernbahnzuführung von Feuerbach zum Hauptbahnhof inkl. Haltepunkt Feuerbach  
Tunnel: 3.850 m / 6.050 m
- Los 3 – Fernbahnzuführung von Bad Cannstatt zum Hauptbahnhof und S-Bahn Tunnel Rosenstein  
Tunnel: 6.300 m / 9.080 m
- Los 4 – S-Bahn-Anbindung Hauptbahnhof nach Stuttgart-Nord bzw. Feuerbach (OBW)  
Nord: 772 m / 1.417 m  
Süd: Ausschreibung (496 m)
- Los 5 – EÜ Neckar  
Bau der Unterbauten (Pfeiler)

Bild 2: Überblick der Baulose PFA 1.5

Von den insgesamt ca. 20 km in konventioneller Bauweise aufzufahrenden Tunnels waren bis Mai 2017 mehr als 11 km aufgeföhren. Die Tunnelvortriebe erfolgen über die Zwischenangriffe Nord und Prag sowie vom Hauptbahnhof und der Ehmmanstraße aus.

## 2. Baugrund im Bereich der Tunnel Feuerbach und Cannstatt

Die Tunnel vom Hauptbahnhof nach Feuerbach und Bad Cannstatt liegen im Gipskeuper (Bilder 3 und 4). Unterhalb des Gipskeupers stehen die Lettenkeuper und der obere Muschelkalk an. Oberhalb des Gips wurden bereichsweise der Schilfsandstein und die Unteren Bunten Mergel erbohrt.

Der Gipskeuper steht in drei Erscheinungsformen an, die auf den Sulfatgehalt der Ton-schluffsteine dieser Formation zurückzuführen sind. Die in den Bildern 3 und 4 in roter Farbe dargestellten Schichten enthalten Sulfat in Form von Anhydrit. Dieser geht bei Wasserzutritt in Lösung und kristallisiert, falls die Lösung nicht mit dem Grundwasser abtransportiert wird, an Ort und Stelle als Gips wieder aus. Dieser Vorgang findet in der Natur in geologischen Zeiten statt. Deshalb steht der Sulfatanteil in den rosa gekennzeichneten Schichten in Form von Gips an. Es handelt sich aber auch dann noch um festen Fels, der allerdings nicht mehr quellfähig ist. An der Oberfläche dieser Schicht, der sogenannten Auslaugungsfront, wird bei Zutritt von Wasser der Gips gelöst und mit dem Grundwasser abtransportiert. Es bleibt dann der in gelb gekennzeichnete ausgelaugte Gipskeuper, ein sogenanntes Residualgestein, übrig. Diese Schicht besitzt Lockergesteinseigenschaften und verhält sich hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit wie ein Schluff und im Hinblick auf die Verformbarkeit wie ein Kiessand (Bilder 3, 4, 7, Wittke & M. Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017).

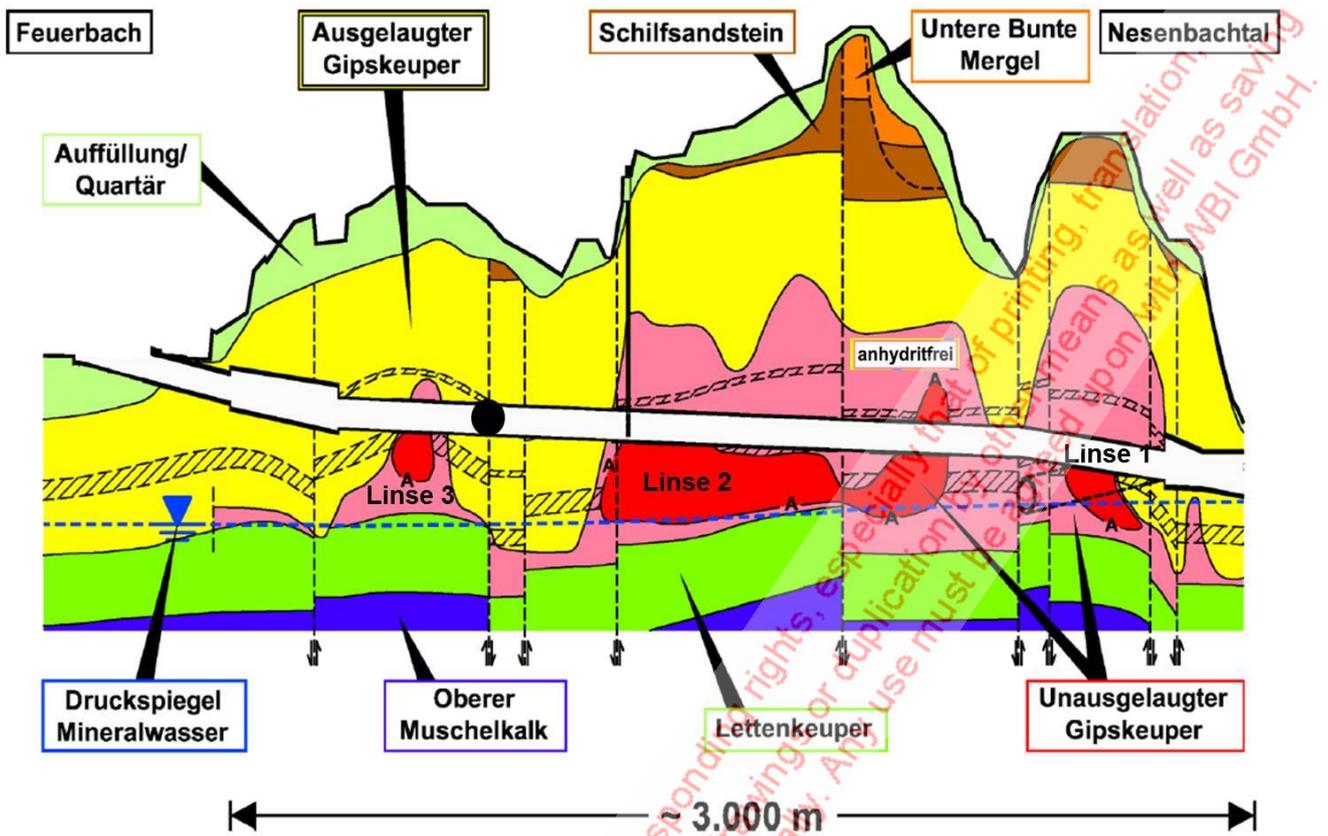


Bild 3: Geologischer Längsschnitt Tunnel Feuerbach

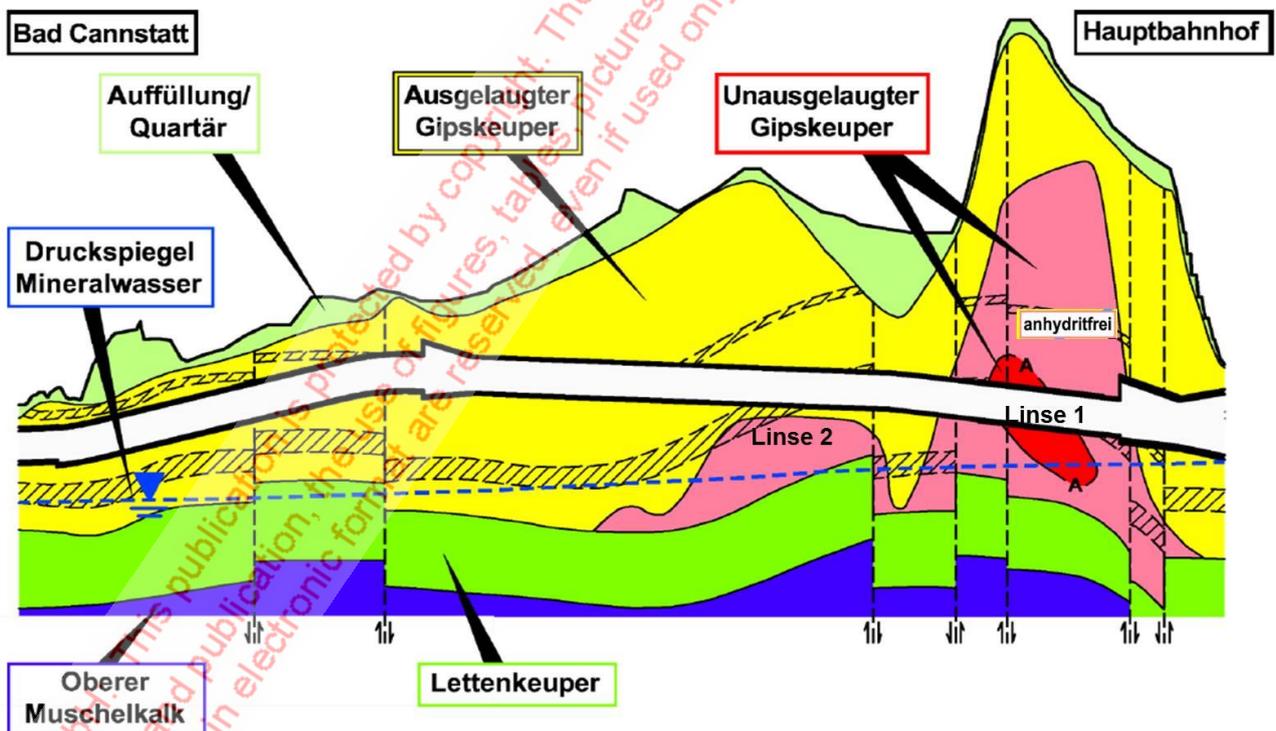


Bild 4: Geologischer Längsschnitt Tunnel Cannstatt

Die Umwandlung von Anhydrit in Gips und die dabei auftretenden Quelldrücke und quellbedingten Hebungen werden durch den Tunnelbau in diesen Schichten ausgelöst bzw.

beschleunigt, wenn es nicht gelingt, größere Auflockerungen und den Zutritt von Wasser zu vermeiden.

Das Entwurfskonzept für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21 geht deshalb davon aus, dass Wasserzutritte beim Bau vermieden und nach dem Bau minimiert werden müssen.

Der Bau der Tunnel in den anhydritführenden Schichten (Linsen 1 bis 3 in den Bildern 3 und 4) erfolgt deshalb absolut trocken. Beim Durchörteren der meist wasserführenden Auslaugungsfront werden dem Vortrieb vorausliegende Abdichtungsinjektionen durchgeführt. Außerdem werden die anhydritführenden Bereiche durch Abdichtungsbauwerke von den wasserführenden Bereichen abgetrennt (Wittke 2014). Um den Wasserzutritt aus oberhalb des Tunnels liegenden Schichten zu unterbinden, wird darüber hinaus die vortriebsbedingte Auflockerungszone in der unmittelbaren Umgebung durch nacheilende Acrylatgelinjektionen abgedichtet (Wittke 2014; Wittke & M. Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017).

Da zwischenzeitlich bereits etwa 3/4 der im Anhydrit liegenden Abschnitte der Tunneln nach Feuerbach und Bad Cannstatt aufgefahen wurden (Bild 5), konnte mit diesen Injektionen bereits begonnen werden.

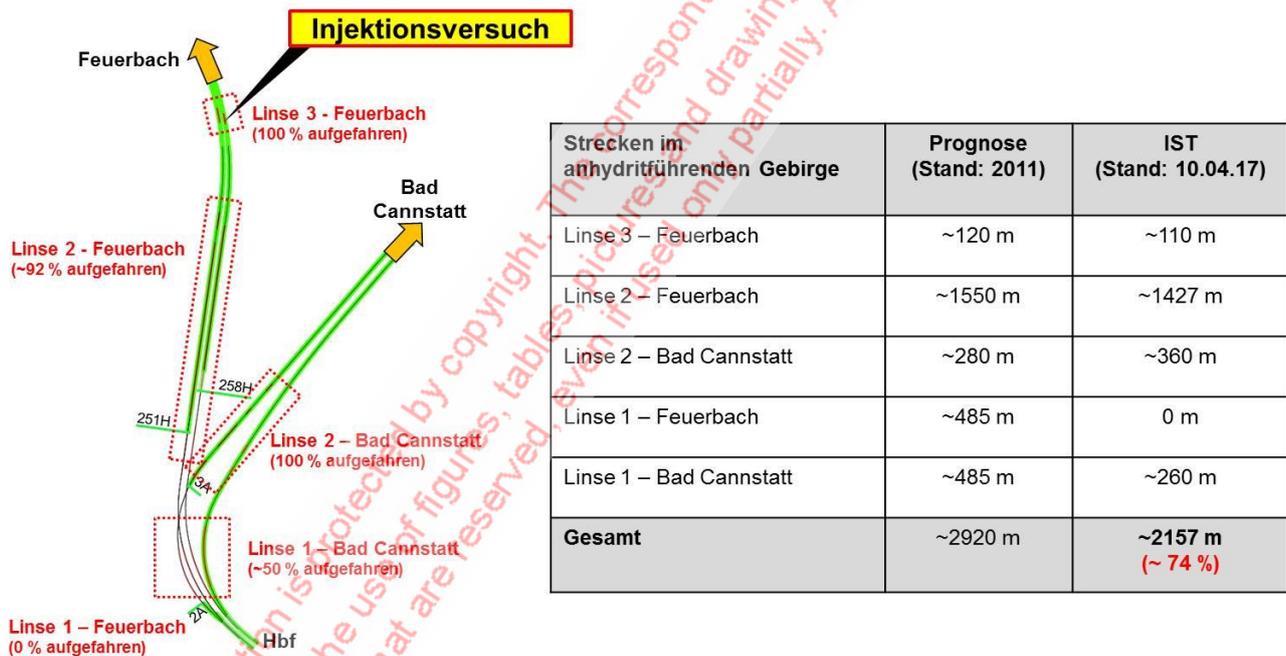


Bild 5: Anhydritbereich Tunnel Feuerbach / Cannstatt

Für ein Beispiel, bei dem der Tunnel mit der Sohle im anhydritführenden Gebirge und mit der Firste im wasserführenden ausgelaugten Gipskeuper liegt, ist die vortriebsbedingte Auflockerungszone in Bild 6 dargestellt. Berechnungen mit dem in Wittke & M. Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017 dargestellten Berechnungsprogramm ergeben, dass sich in der in Bild 6 in blau dargestellten Zone eine größere Wasserdurchlässigkeit parallel zu den vertikalen Klüften ergibt als für den Fels im ungestörten Zustand, für den Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von  $10^{-8}$  bis  $10^{-10}$  m/s angenommen werden können.

### Beispiel Kreisprofil

Auflockerungszone mit erhöhter vertikaler Durchlässigkeit und potenzieller Wasserwegigkeit

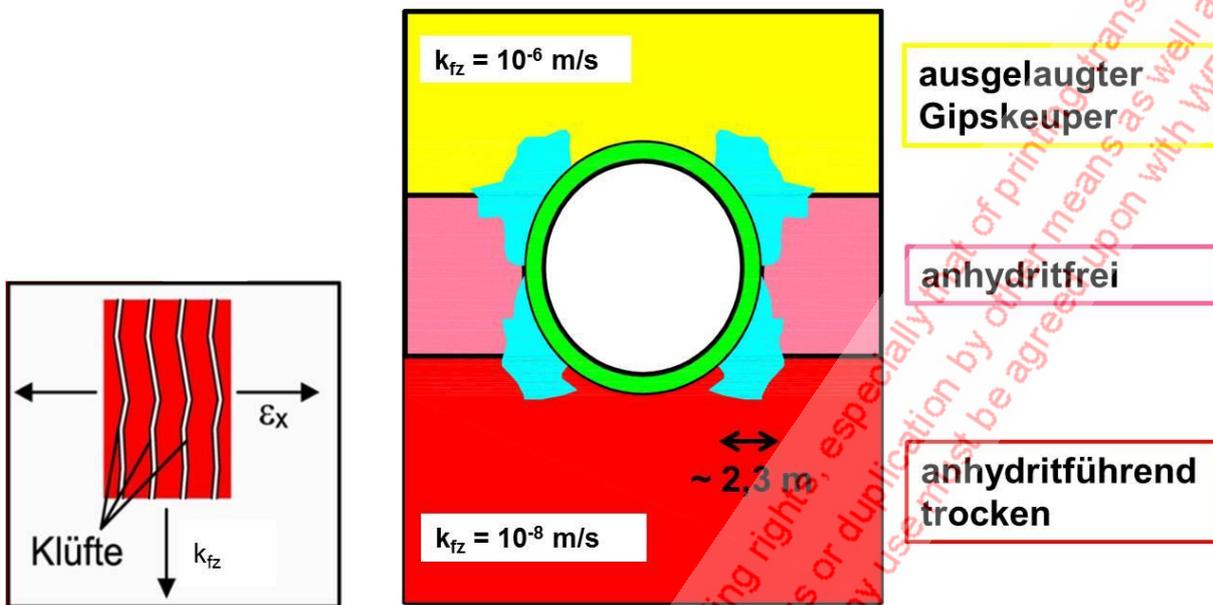


Bild 6: Auflockerungszonen durch Vortriebsarbeiten

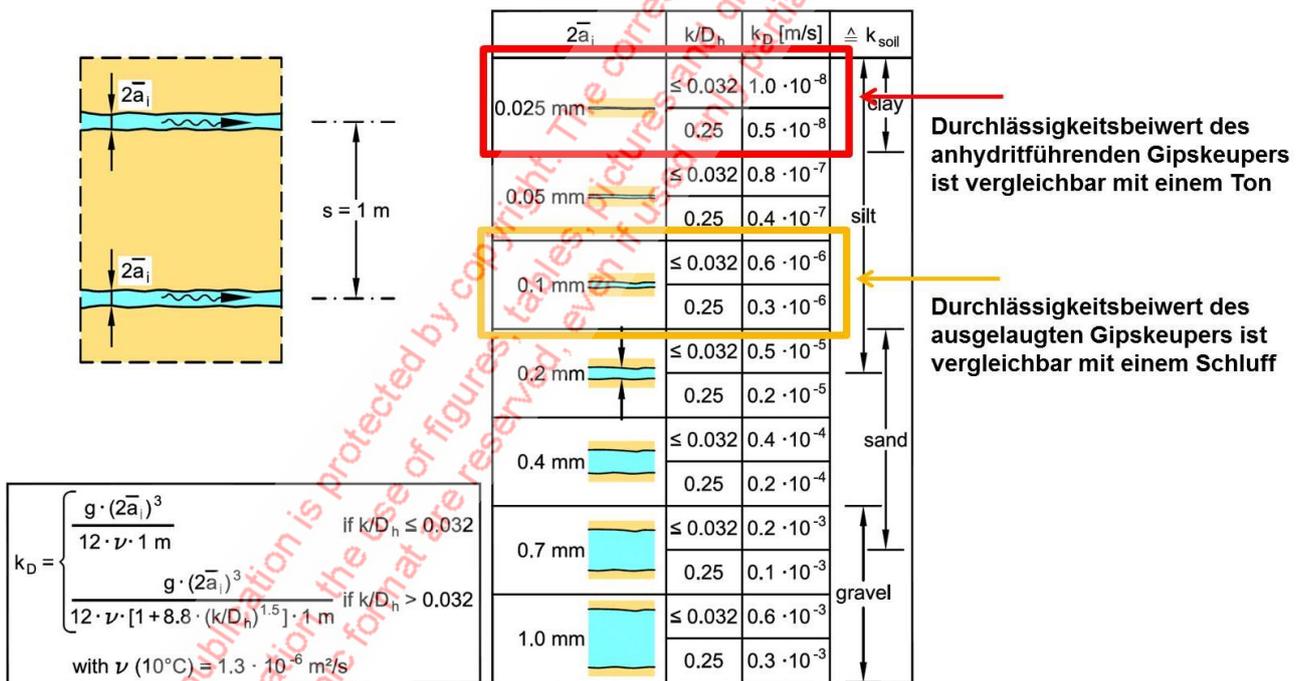
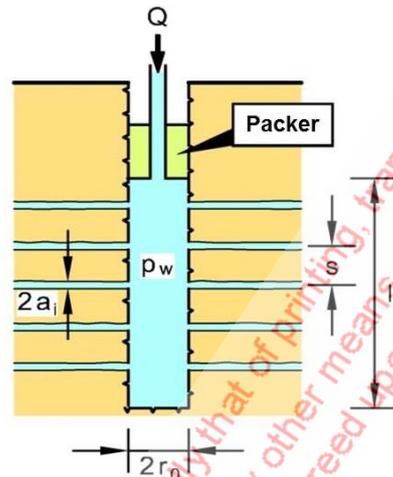


Bild 7: Vergleich Durchlässigkeitsbeiwerte, Fels und Boden

Da die Wasserdurchlässigkeit parallel zu den Trennflächenscharen mit der 3. Potenz der Trennflächenöffnungsweite anwächst, bewirken bereits geringe Auflockerungen große Zunahmen der Wasserdurchlässigkeit. Für einen Fels mit einer Trennflächenschar mit einem gegenseitigen Abstand von 1 m sind die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von der Trennflächenöffnungsweite in Bild 8 dargestellt (Witke 2014).

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

$$\nu = \eta / \rho$$



#### Annahmen:

- $s = 1 \text{ m}$
  - $2a_i = 0,1 \text{ mm}$
  - $Q = 1 \text{ l/min}$
  - $2 \times r_0 = 5 \text{ cm}$
  - $l = 1 \text{ m}$
  - $R = 1 \text{ m}$
- } Durchlässigkeitsbeiwert:  $10^{-6} \text{ m/s}$

#### Injektionsgut auf Acrylatgel-Basis

erf.  $p$  ( $\eta = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )  $\approx 6 \text{ bar}$

#### Injektionsgut auf PU-Basis

erf.  $p$  ( $\eta = 90 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )  $\approx 105 \text{ bar}$

Bild 8: Injektionsdruck in Abhängigkeit der Spaltweite

Die Abdichtung der o. g. Auflockerungszone erfolgt über Bohrungen, in denen der Verpressabschnitt mit einem Einfachpacker abgedichtet wird (Bild 8). Dargestellt ist in Bild 8 ein vertikales Bohrloch mit dem Radius  $r_0$  in einen Fels mit einer Schar horizontaler Trennflächen mit konstanten Öffnungsweiten ( $2a_i$ ) und Abstand ( $s$ ). Ebenfalls in Bild 8 (oben) dargestellt ist der Zusammenhang zwischen der Wasserdurchlässigkeit  $k_D$  eines solchen Felses, der zu verpressenden Menge an Injektionsgut ( $Q$ ) und dem effektiven Verpressdruck im Bohrlochabschnitt in Form einer Druckhöhe  $\Delta h$ .

Nimmt man eine Trennflächenöffnungsweite von  $2a_i = 0,1 \text{ mm}$  und einen Trennflächenabstand von  $s = 1 \text{ m}$  an, so ergibt sich für einen solchen Fels eine Wasserdurchlässigkeit von  $10^{-6} \text{ m/s}$  (Bild 8). Mit den anderen in Bild 8 dargestellten Annahmen ergibt sich für die Injektion eines Acrylatgels mit einer Viskosität von  $\eta = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  ein erforderlicher Verpressdruck von  $\approx 6 \text{ bar}$ , wenn man bei einer Menge von  $Q = 1 \text{ l/min}$  eine Reichweite von  $R = 1 \text{ m}$  erzielen will.

Eine Verpressung von Polyurethan mit einer Viskosität von  $\eta = 90 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  würde dagegen einen Verpressdruck von  $105 \text{ bar}$  erfordern. Dieser würde zum Aufreißen der Trennflächen führen (Fracking) und damit unkontrollierte Wasserwege ins Gebirge schaffen.

Da man mit den Injektionen der Wasserdurchlässigkeit des Felses im ungestörten Zustand möglichst nahe kommen muss, benötigt man im vorliegenden Fall ein Verpressgut mit einer geringen Viskosität.

### 3. Durchführung eines Injektionsversuchs im Tunnel Feuerbach

Vor Beginn der Verpressarbeiten wurde im Bereich der Linse 3 im Tunnel nach Feuerbach ein Injektionsversuch durchgeführt (Bild 9). Der Versuch diente der Erprobung der Verpresstechnik, der Ermittlung der erforderlichen Abstände und Tiefen der Bohrungen sowie der Festlegung der erforderlichen Verpressdrücke und Mengen.

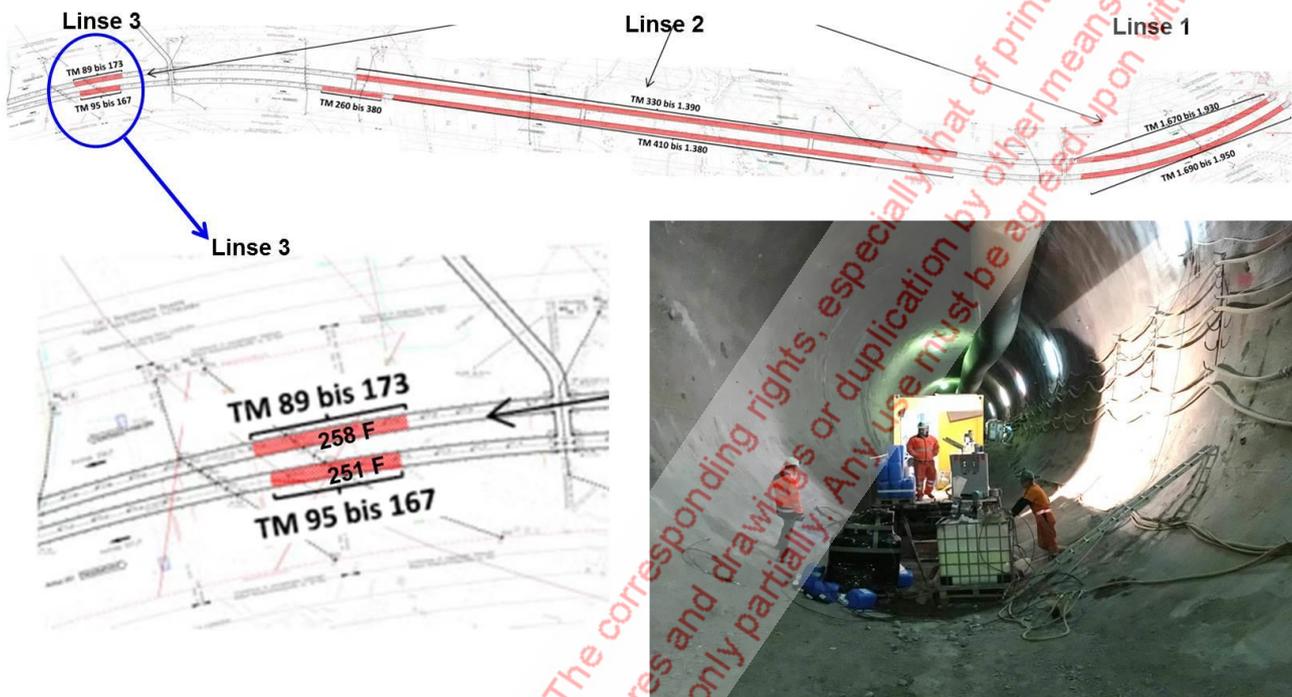


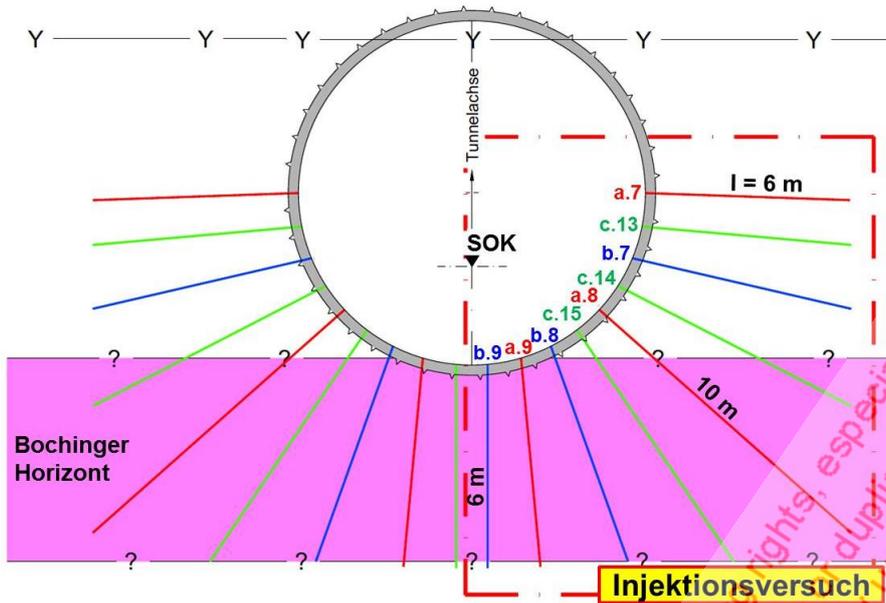
Bild 9: Injektionsversuch Linse 3, Tunnel Feuerbach, Vortrieb 258F

Der Tunnel liegt im Bereich des Versuchsfeldes in den Dunkelroten Mergeln. In Höhe der Firste steht ausgelaugter Gipskeuper an (Y-Y in Bild 10). Unterhalb der Sohle liegt der stärker durchlässige Bochinger Horizont. Vorgesehen ist hier, den Fels seitlich und unterhalb des Tunnels abzudichten (Bild 10). Das Versuchsfeld erstreckt sich auf den halben zu verpressenden Bereich rechts der Tunnelachse (Bild 10) und auf 4 Querschnitte mit insgesamt 37 Bohrungen mit einem Abstand der Ansatzpunkte innerhalb eines Ringes von 1 m (Bilder 10 und 11). Die Längen der Bohrungen betragen 6 bis 10 m, die Bohrdurchmesser 51 mm (Bild 10). Die Abstände der 4 Querschnitte, die in der Reihenfolge I bis IV verpresst wurden, beträgt 1 m bzw. 2 m zwischen den Querschnitten II und III.

Die Injektionen wurden nach dem sogenannten Pilgerschrittverfahren in den 3 Serien a bis c durchgeführt. Dabei wurde der Abstand der Ansatzpunkte der Bohrungen von 4 m schrittweise auf 1 m verringert (Bilder 10 und 11).

Eine Prinzipskizze der Verpressanlage ist in Bild 12 dargestellt. Der Packer ① ist mit einer Leitung zur Entlüftung ② des Verpressabschnitts verbunden. Eine solche Maßnahme ist bei der geringen Durchlässigkeit des Gebirges notwendig. Das Acrylatgel wird in der Mischanlage ⑤ aus der A-Komponente und der B-Komponente hergestellt und mit der

Injektionspumpe ④ mit dem Injektionsdruck über die Injektionsleitung ③ und den Packer ① in den Verpressabschnitt gefördert (Bild 12).



### Injektionsversuch TM 117 bis 121

- 4 Querschnitte
- Bohrraster 1 m x 1 m
- 37 Bohrungen  
I = 6 – 10 m, Ø 51 mm
- Blähpacker

#### Abfolge der Injektionen

1. a - Serie (a7, a8 ...)
2. b - Serie (b7, b8 ...)
3. c - Serie (c13, c14 ...)

Bild 10: Beispiel Querschnitt Linse 3 (TM 117, 121 und 119)

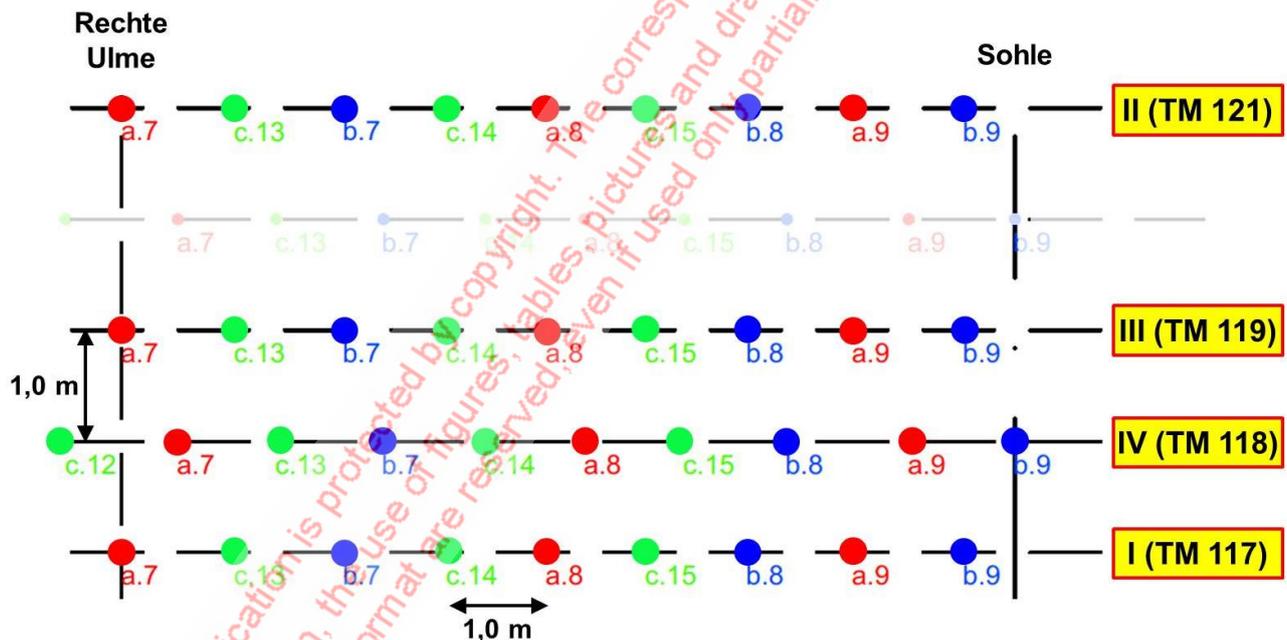


Bild 11: Abwicklung Innenkontur Spritzbeton mit Bohransatzpunkten

Einzeldarstellungen der Mischanlage, der Doppelkolbenpumpe mit Durchflussmesser sowie der Drucksensoren enthalten die Bilder 13 bis 15. Fotos des verwendeten Blähpackers sowie der Verpress- und Entlüftungsleitung sind in Bild 16 dargestellt.

Die Dokumentation der Verpressdrücke und der verpressten Mengen erfolgt digital. Außerdem wird der Vorspanndruck des Blähpackers gemessen (Bild 17). Bei dem im Versuch verwendeten Acrylatgel begann die Gelbildung nach ca. 5 Minuten, die Endaushär-

tion war nach ca. 10 Minuten abgeschlossen. Das erfordert eine Reinigung des Packers und der Verpressleitung nach jedem Verpressvorgang (Bild 18).

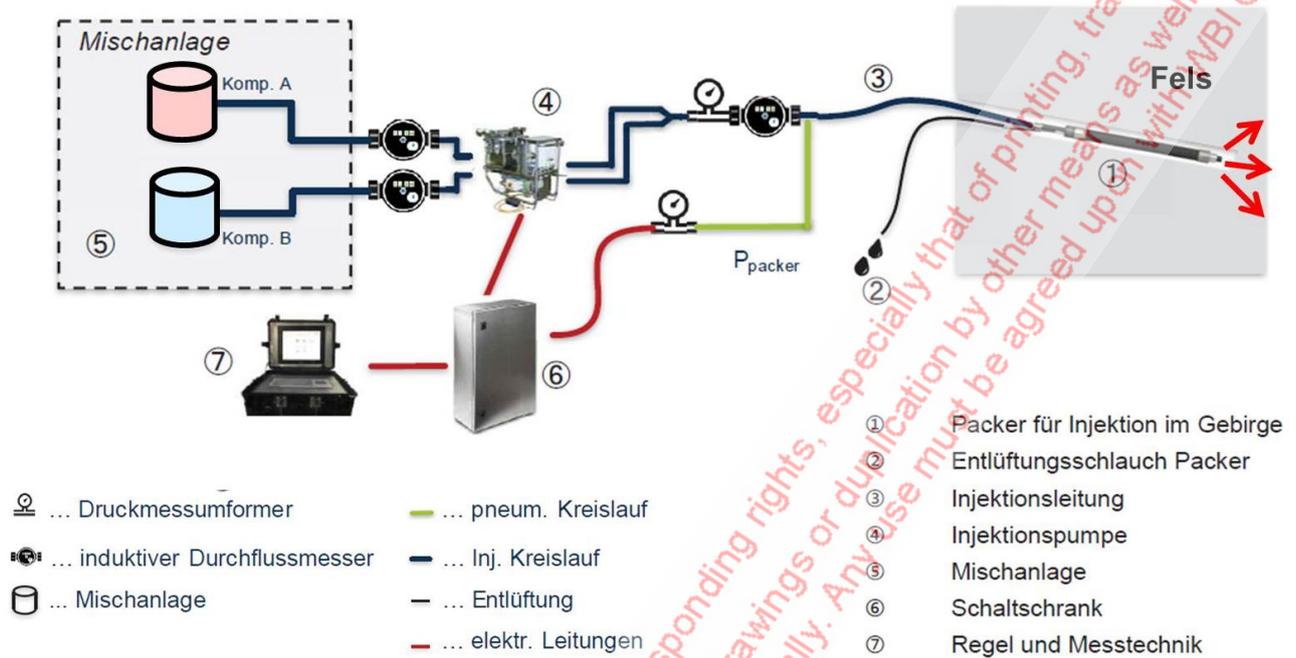


Bild 12: Systemaufbau Gerätetechnik

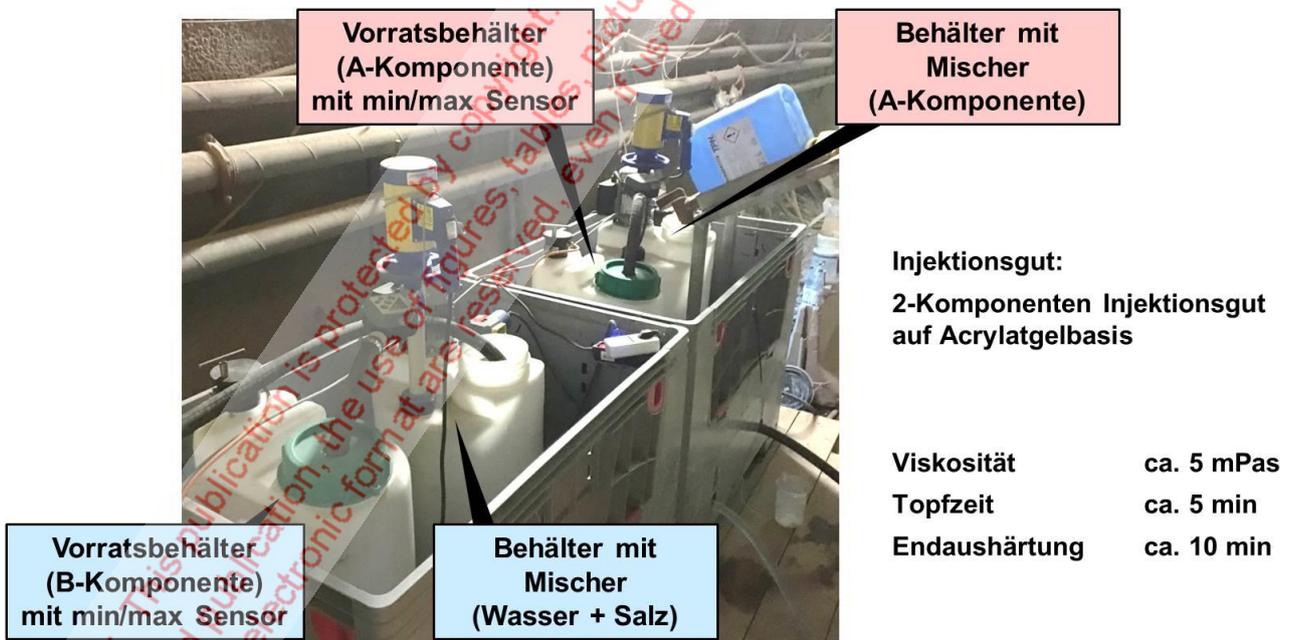


Bild 13: Mischanlage für A- und B-Komponente

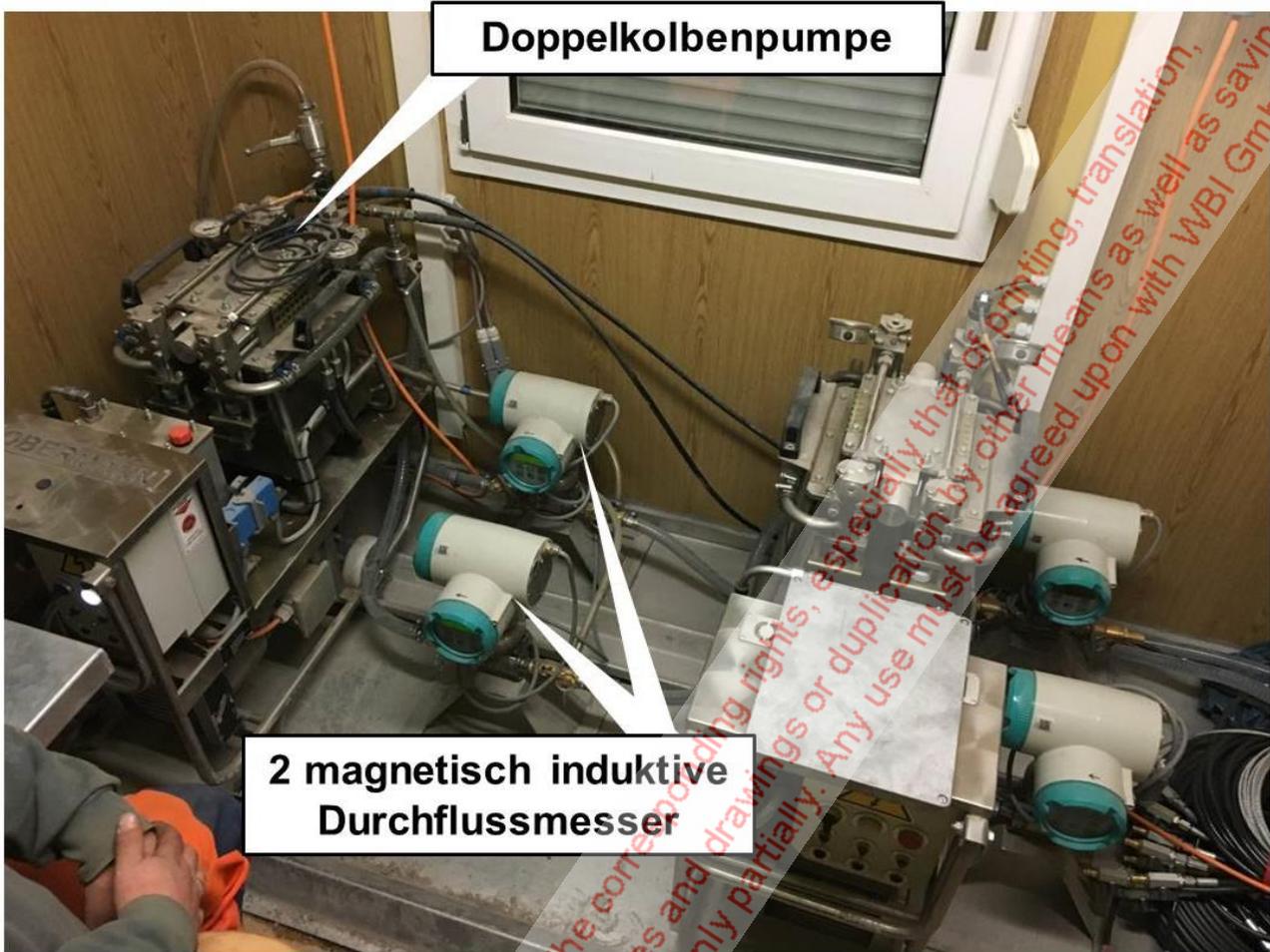


Bild 14: Pumpe sowie Durchflussmesser A- und B-Komponente

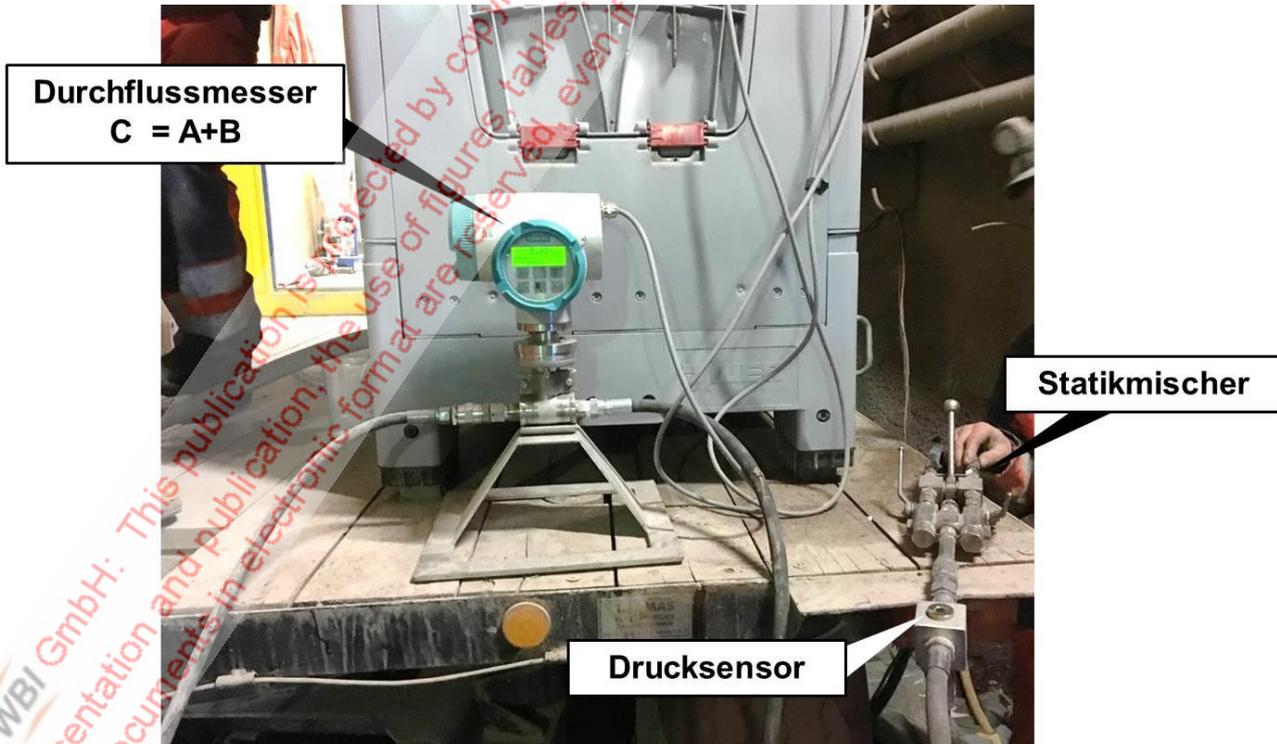
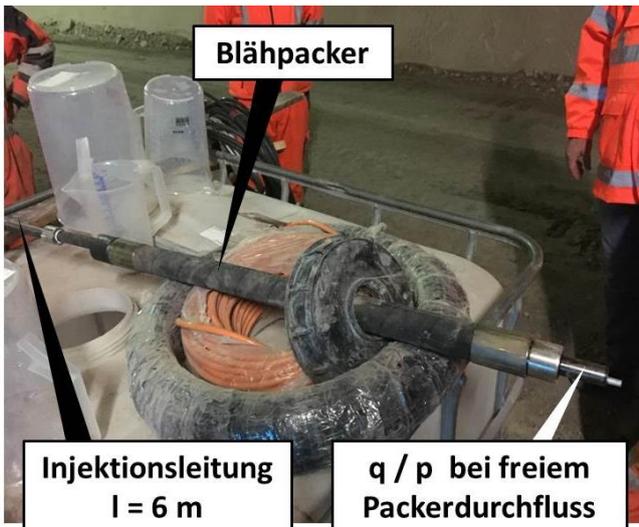


Bild 15: Statikmischer, Drucksensor und Durchflussmesser



**Anforderungen Blähpacker:**

- wiederverwendbar
  - pneumatisch vorspannbar
  - entlüftbar
  - 2 Packerstellungen (Fels = 50 cm, SPB = 20 cm)
  - Durchmesser der Zuleitung und des Packers möglichst groß
  - Länge der Zuleitung begrenzen
- } ⇒ Druckverlust minimieren

Bild 16: Blähpacker mit Zuleitung



**Dokumentation der Ergebnisse**

- Digitale Druck- Mengenschreiber
- Druckmessung
- Verpressmenge
- Vorspanndruck des Packers

**Regel- / Messtechnik**

Bild 17: Ergebnisdokumentation



Bild 18: Reinigung des Blähpackers

#### 4. Auswertung des Injektionsversuchs

Die in den oben beschriebenen Querschnitten I (TM 117), II (TM 121), III (TM 119) und IV (TM 118) verpressten Mengen sind in den Bildern 19 bis 22 getrennt für die Verpressabschnitte in Liter je Meter Bohrlochlänge (l/m) dargestellt.

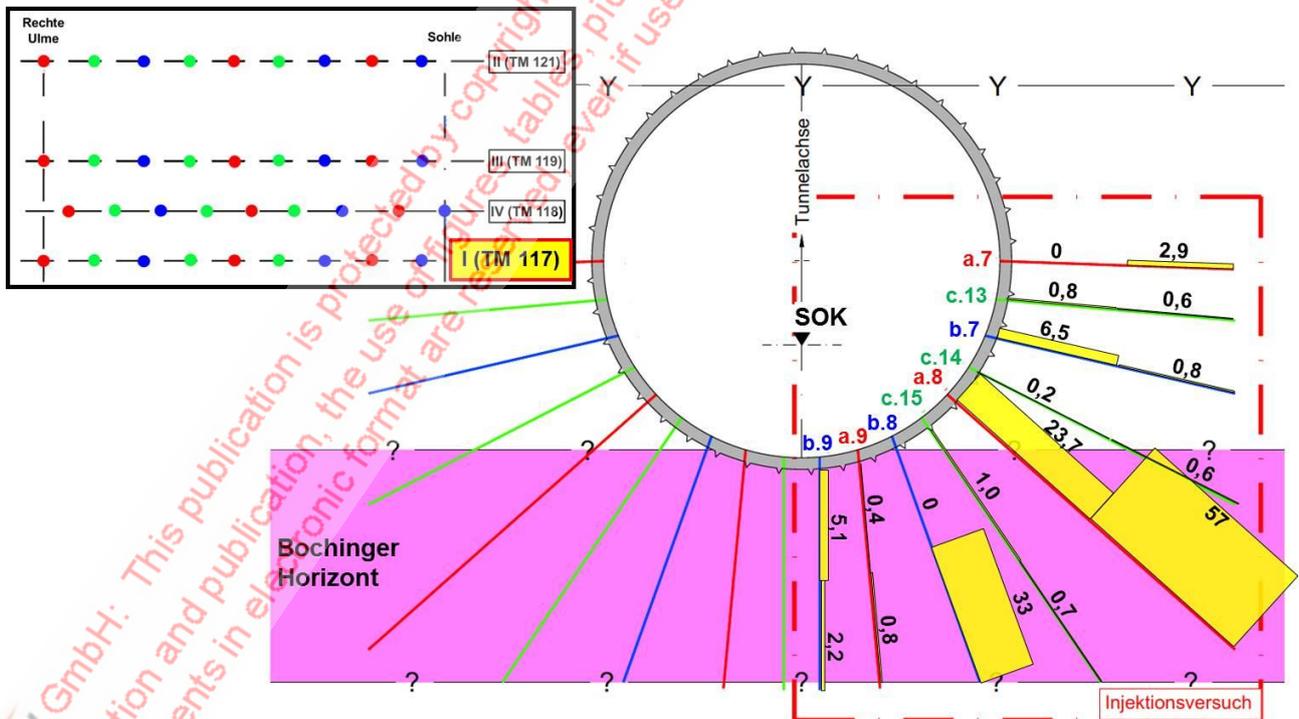


Bild 19: Aufnahmen des Gebirges [l/m], Querschnitt I (TM 117)

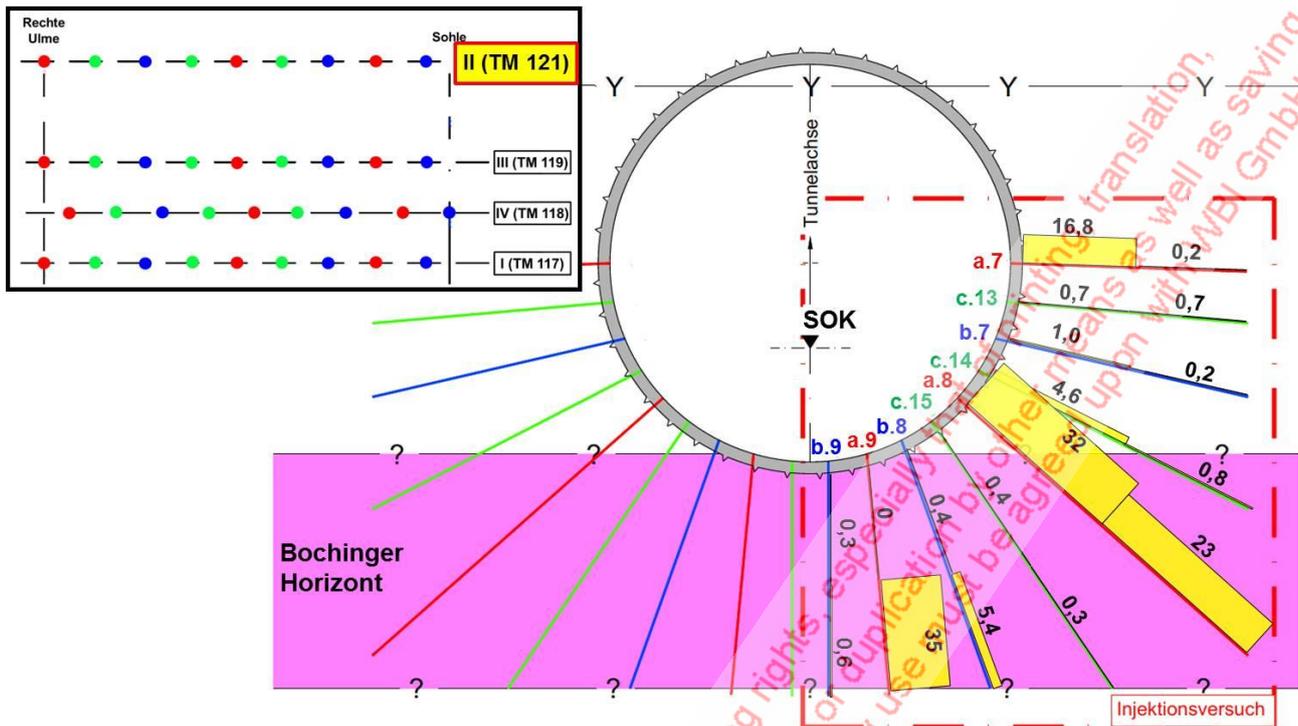


Bild 20: Aufnahmen des Gebirges [l/m], Querschnitt II (TM 121)

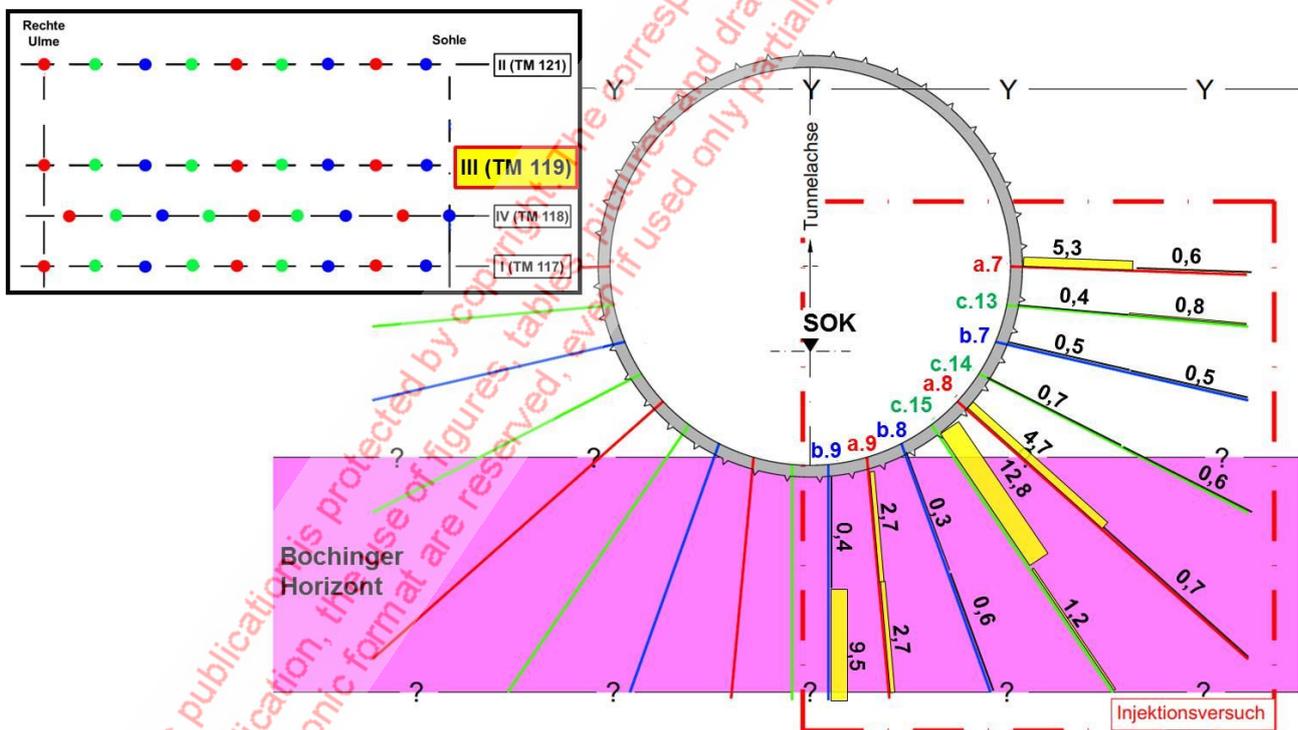


Bild 21: Aufnahmen des Gebirges [l/m], Querschnitt III (TM 119)

Man erkennt, dass die größten Mengen über die Bohrlöcher der a-Serie und in den Bochinger Horizont verpresst wurden. Außerdem wird deutlich, dass die verpressten Mengen von den Bohrlöchern der a-Serie bis zur c-Serie sowie von Querschnitt zu Querschnitt abnehmen (Bilder 19 - 24). Somit war die Vorgehensweise nach dem Pilgerschrittverfahren

ren erfolgreich. Auch die gewählten Bohrlochabstände haben sich als richtig herausgestellt.

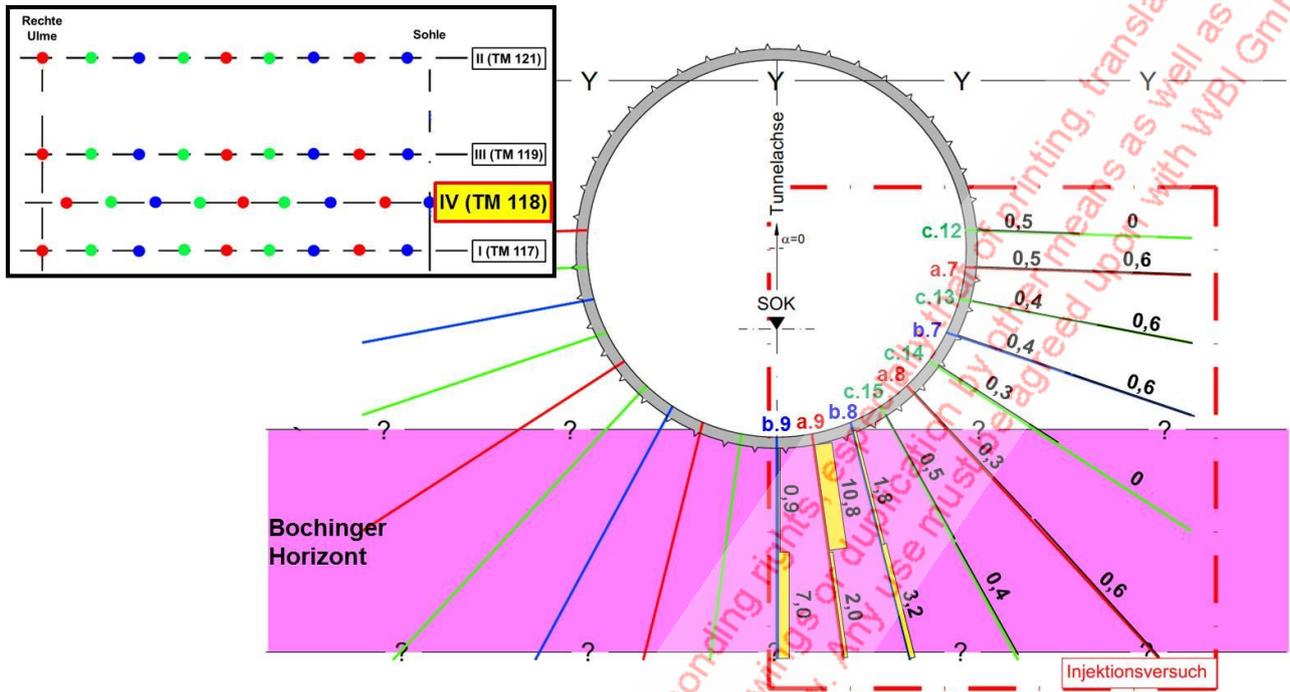


Bild 22: Aufnahmen des Gebirges [l/m], Querschnitt IV (TM 118)

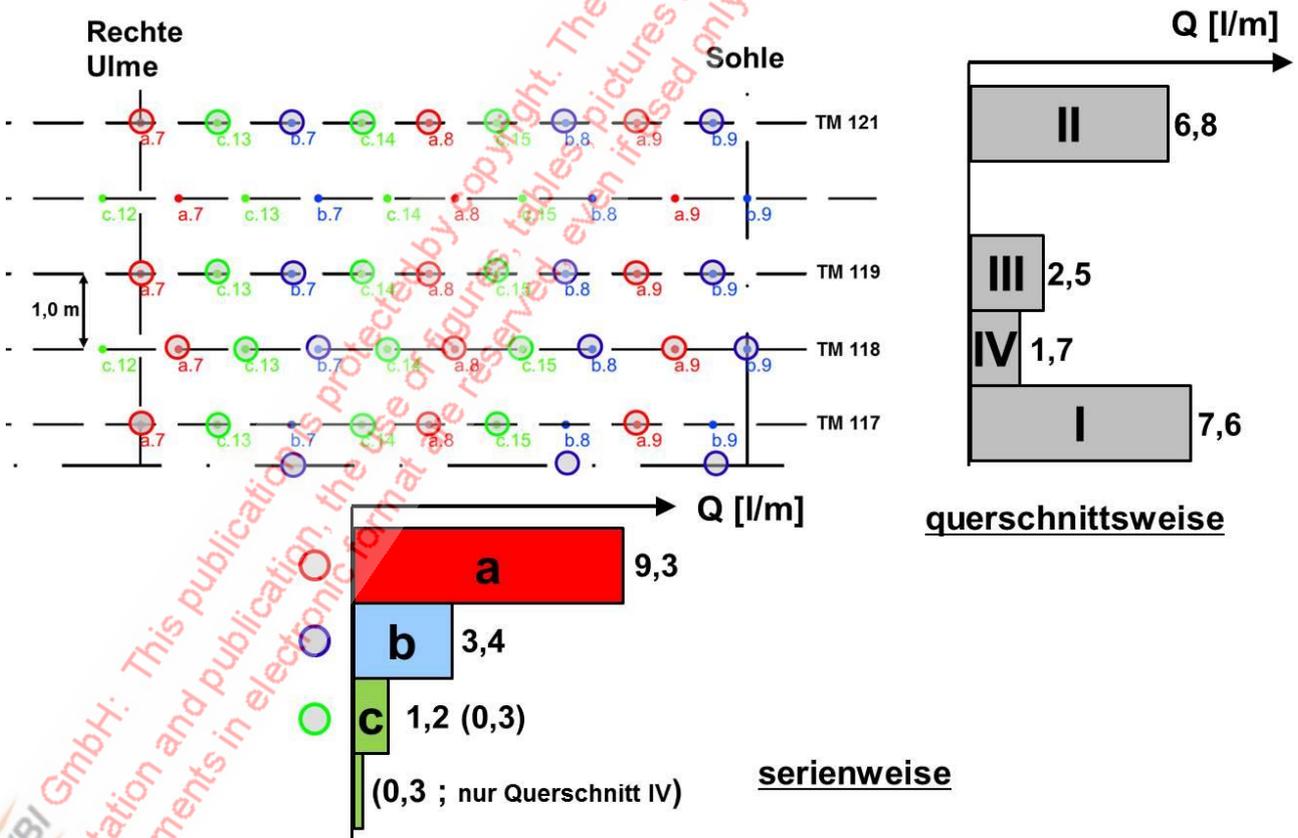
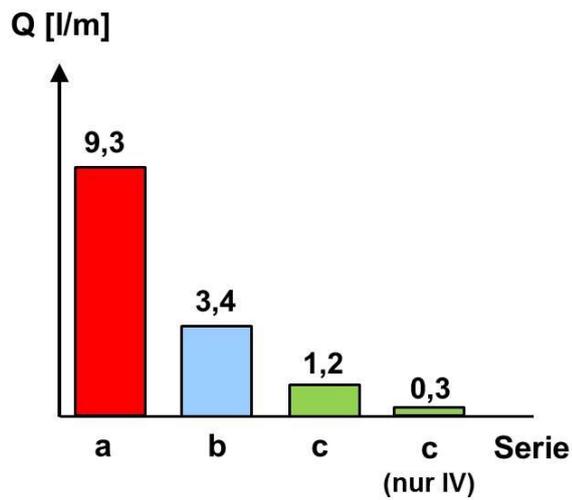
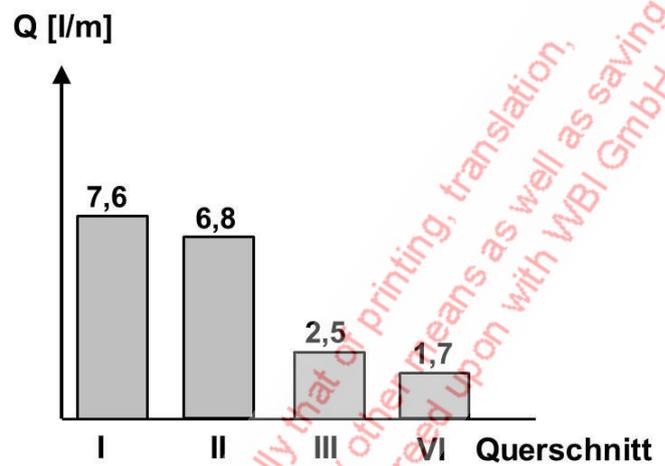


Bild 23: Auswertung



Rückgang Aufnahme  
mit "zunehmenden" Bohrungen



Rückgang Aufnahme  
mit "zunehmenden" Querschnitten

Bild 24: Auswertung

## Literatur

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

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.