

10⁻⁷ - 10⁻¹⁰ m/s: Ziel erreicht - Erfolgreicher Abschluss der Injektionen Anhydrit für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21

**Dr.-Ing. Martin Wittke, Dipl.-Ing. Dieter Schmitt
M.Eng. André Reinhardt LL.M**

Zusammenfassung

Die Abdichtung von klüftigem Fels zur dauerhaften Ver- bzw. Behinderung von Wasserzutritten hat beispielsweise beim Bau von unausgekleideten oder nur teilweise ausgekleideten Stollen eine erhebliche Bedeutung, um Grundwasserentnahmen zu reduzieren. Auch beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge ist es entscheidend, Wasser vom Gebirge fernzuhalten, um Quellvorgänge zu behindern oder sogar zu unterbinden. In diesem Zusammenhang wurden in den letzten Jahrzehnten theoretische Überlegungen zu möglichen Injektionsverfahren und -mitteln angestellt und sowohl im Labor als auch im Feldversuch getestet. Auch die baupraktische Anwendung wurde umfangreich erprobt. Eine der größten Injektionsmaßnahmen der letzten Jahre wurde dabei für das Projekt Stuttgart 21 erfolgreich durchgeführt. Im Beitrag werden sowohl die theoretischen Überlegungen als auch die Erfahrungen der baupraktischen Umsetzung erläutert.

1. Einleitung

Im Rahmen des Projekts Stuttgart 21 wurden verschiedene Injektionsmaßnahmen zur Abdichtung von klüftigem Fels durchgeführt. Dabei kamen sowohl Zementpasten, Zementsuspensionen, Polyurethane und Acrylatgele zum Einsatz. Auf der Grundlage der Erfahrungen, die WBI über einen Zeitraum von 6 Jahren sowohl in der Planung als auch in der Ausführung der Injektionsmaßnahmen im Projekt sammeln konnte, werden im vorliegenden Beitrag, die Gründe und Kriterien für die Auswahl der verschiedenen Injektionsverfahren und Injektionsmittel bei den unterschiedlichen Anforderungen und Randbedingungen erläutert.

2. Spaltströmung im Fels

Die Gesteine sind im technischen Sinne in den meisten Fällen undurchlässig. Eine Sickerströmung im Fels erfolgt somit nur innerhalb des Trennflächensystems. Für die Abdichtung des Fels in einem Bereich sind also die hier vorhandenen Trennflächen zu verschließen. Die Sickerströmung im Fels kann über die Gesetze der Spaltströmung, die in den 60er und 70er Jahren entwickelt wurden, beschrieben werden. Die Geschwindigkeit des strömenden Wassers in einem Spalt wird dabei mit einer parabolischen Geschwindigkeitsverteilung modelliert. Am Rand, also am Übergang zwischen Spalt und Fels, ist die Geschwindigkeit aufgrund der dort wirkenden Schubspannung null. In der Mitte des Spalts ist sie bei den betrachteten laminaren und parallelen Strömungen maximal. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in einer Schar von Spalten mit konstanter Öffnungsweite $2a_i$ kann nach dem Gesetz von Darcy, das aus der Bodenmechanik bekannt ist, durch einen linearen

Ansatz beschrieben werden, der vom wirkenden hydraulischen Gefälle, d. h. Druckunterschied dividiert durch die Länge des Fließweges, und dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f abhängig ist (Bild 1).

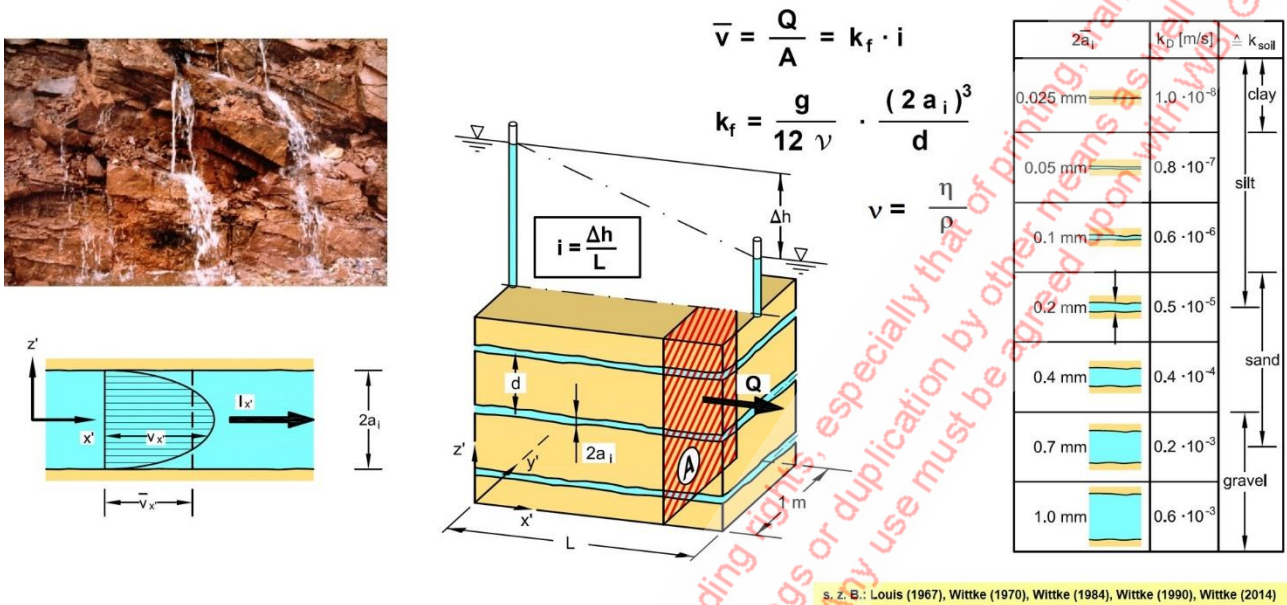


Bild 1: Sickerströmung in klüftigem Fels, laminare und parallele Strömung

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist von der 3. Potenz der Spaltweite bzw. der Trennflächenöffnungsweite $2a_i$ sowie von den Kehrwerten des Trennflächenabstandes d und der Viskosität ν abhängig (Bild 1). Die Abhängigkeit von der 3. Potenz der Spaltweite macht deutlich, dass dieser Parameter von entscheidender Bedeutung für die Durchlässigkeit ist. Dies bedeutet, dass ein Fels, der 1 Trennfläche je m mit einer Spaltweite von nur 1 mm besitzt, bereits eine Durchlässigkeit aufweist, die der Größenordnung eines Kiesel entspricht (10^{-3} bis 10^{-4} m/s).

3. Verpressen von Zementpasten

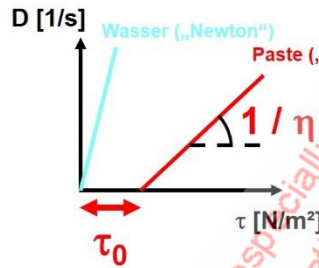
Im Tunnel- und auch im Talsperrenbau kann es erforderlich sein, Trennflächen mit Öffnungsweiten von 1 mm und größer abzudichten. Das kann beispielsweise mit Hilfe von Zementpasten erfolgen, die in der Vergangenheit vielfach erfolgreich eingesetzt wurden. Entsprechende Konzepte und Arbeiten gehen zurück bis in die 70er und 80er Jahre. Das Bild 2 zeigt einen aktuellen Anwendungsfall beim Projekt Stuttgart 21.

Im Bild 2, links ist zu erkennen, wie die verwendete Zementpaste zähflüssig aus einem Dichtemessgerät herausfließt. Die Paste weist einen Wasser-Zement-Wert von $w/z = 0,45$ auf. Sie enthält somit kein Überschusswasser. Pasten werden i. d. R. unter Verwendung eines Stabilisators angemischt, der die Fließfähigkeit sicherstellt. Die Dichten der Mischungen betragen ca. 1,8 bis 1,9 g/cm^3 . Diese sind ca. 7 bis 8 Stunden verarbeitbar und binden anschließend ab.

Im Unterschied zu Wasser, das eine Newton'sche Flüssigkeit darstellt, sind Zementpasten sogenannte Bingham'sche Flüssigkeiten. Die Fließeigenschaften einer Bingham'schen Flüssigkeit sind in einem Scherspannungs-Diagramm in Bild 2 dargestellt. Zementpasten

gehen danach erst in einen Fließzustand über, wenn die sogenannte Fließgrenze τ_0 infolge des wirkenden Schergefälles D überschritten wird. Bei weiter steigendem Schergefälle verhalten sie sich ähnlich wie eine Newton'sche Flüssigkeit. D. h. das Fließverhalten ist linear abhängig von der dynamischen Viskosität η . Die Viskosität der Paste, die in Stuttgart verwendet wurde, beträgt ca. $\eta = 300$ bis $500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (Bild 2, Mitte). Sie sind damit etwa um den Faktor 300 bis 500 größer als die Viskosität von Wasser.

- Zement (z): CEM III/B 32.5 N-LH/SR/NA
- Stabilisator (s): Sika UW-Compound-100
- Wasser (w)



w/z	[-]	~0,45
s/z	[-]	~0,01
ρ	[g/cm ³]	~1,8 – 1,9
τ_0	[N/m ²]	~20 → 50
η	[mPa*s]	300 – 500
Verarbeitungszeit		mehrere Std.

$2a_i$	k_D [m/s]	Δk_{soil}
0,025 mm	$1,0 \cdot 10^{-8}$	clay
0,05 mm	$0,8 \cdot 10^{-7}$	
0,1 mm	$0,6 \cdot 10^{-6}$	silt
0,2 mm	$0,5 \cdot 10^{-5}$	
0,4 mm	$0,4 \cdot 10^{-4}$	sand
0,7 mm	$0,2 \cdot 10^{-3}$	
1,0 mm	$0,6 \cdot 10^{-3}$	gravel

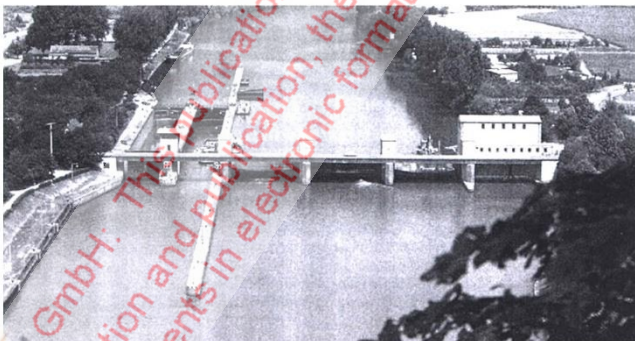
und größer

Bild 2: Abdichten von Klüften mit großer Spaltweite, Zementpaste

Die Anwendungen von Pasten gehen zurück auf das Projekt Sarrod im Saarland oder auch auf die Sanierung der Staustufe Hessigheim (Bild 3, links). Im Projekt Stuttgart 21 wurden Zementpasten für die Abdichtung der Auslaugungsfront im Gipskeuper erfolgreich eingesetzt. Darüber wurde im Rahmen des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages am 07.06.2018 in Weinheim berichtet.

Staustufe Hessigheim

Abdichtung Gipskarst im Mittleren Muschelkalk



Tunnel Obertürkheim (Stuttgart 21)

Abdichtung Auslaugungsfront Gipskeuper

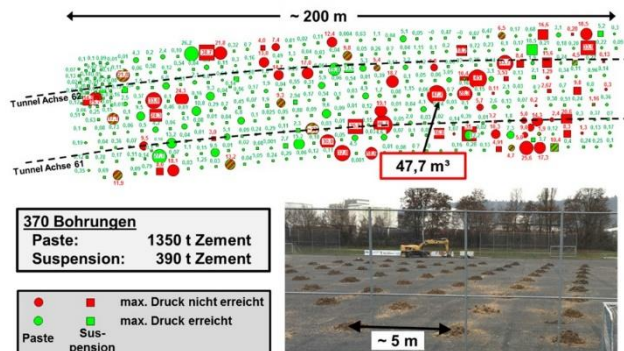
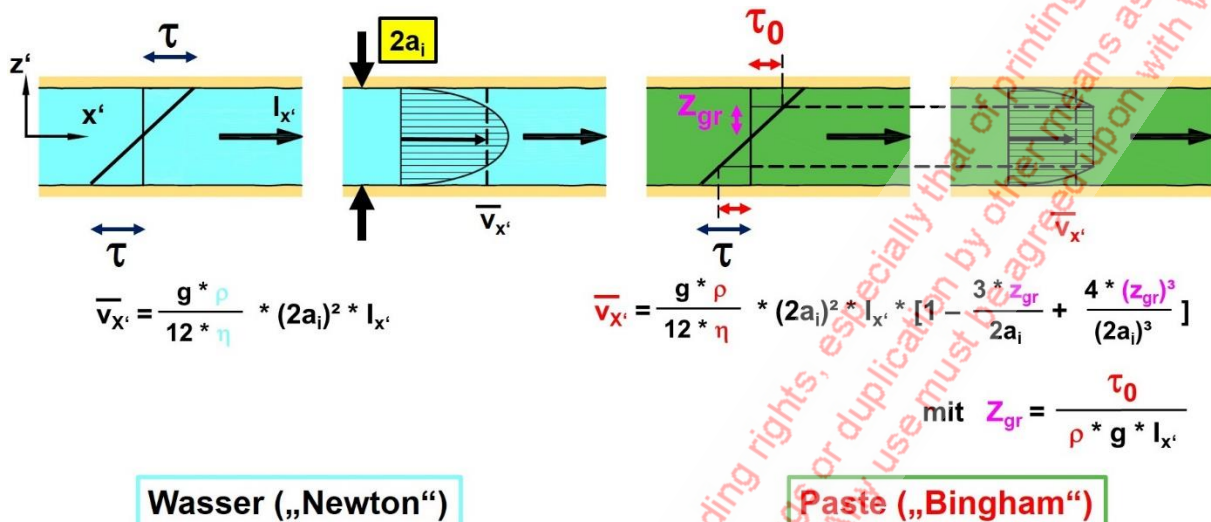


Bild 3: Projektbeispiele

Die Geschwindigkeitsverteilung bei der Spaltströmung von Wasser ist parabolisch. Im Unterschied dazu bildet sich bei Pasten mit Bingham'schen Eigenschaften im zentralen Abschnitt des Spalts ein Bereich aus, in dem die Fließgeschwindigkeit konstant ist. Da das Schergefälle hier kleiner ist als die Fließgrenze der Paste, wird die Paste einfach "vorgesoben" (Bild 4).



Modellvorstellung und FE-Berechnungsverfahren gehen zurück auf die 1960/1970er Jahre

s. Wittke (1968), Wallner (1973)

Bild 4: Ausbreitung von Zementpasten in Klüften, Modellvorstellung und Berechnungsverfahren

Diese sogenannte Pfropfenbildung hat zur Folge, dass der Durchfluss einer Paste - gleiche Viskositäten vorausgesetzt - kleiner ist als der einer Newton'schen Flüssigkeit. Die Modellvorstellung und ein zugehöriges Berechnungsverfahren wurden bereits in den 60er und 70er Jahren entwickelt und 1968 und 1973 veröffentlicht. Dies sei hier ausdrücklich erwähnt, da die betreffenden Veröffentlichungen in Arbeiten der wissenschaftlichen Fachwelt verschiedener Universitäten in Deutschland aus den letzten 10 bis 20 Jahren nicht berücksichtigt wurden.

Das Bingham'sche Fließverhalten hat zur Folge, dass die Verpressung einer Paste in einem Spalt - unabhängig von der Viskosität - zum Erliegen kommt, wenn die wirksame Scherspannung kleiner ist als die Fließgrenze der Paste.

Die Reichweite bei einer Pastenverpressung hängt somit nur ab von der Druckdifferenz aus Verpressdruck und Wassergegendruck, der Spaltweite $2a_i$ und der Fließgrenze τ_0 . Im Beispiel in Bild 5 ist dieser Zusammenhang für die Paste veranschaulicht, die beim Projekt Stuttgart 21 in Obertürkheim eingesetzt wurde. Für eine angenommene Verpressdruckdifferenz von 5 bar, einer Spaltweite von 1 mm und die Fließgrenze der eingesetzten Mischung $\tau_0 = 300 \text{ N/m}^2$ beträgt die mögliche Reichweite der Verpressung ca. $R = 80 \text{ cm}$.

Pasten können zur Abdichtung auch in fließendes Grundwasser verpresst werden und dort aushärten. Dies wurde beispielhaft in Versuchen im Rahmen der Planung und Sanierung

der Staustufe Hessigheim nachgewiesen (Franzius 1990). Dabei wurde Zementpaste in ein Rohr, in dem Wasser mit einer Geschwindigkeit von 30 cm/s strömt, injiziert. 435 Sekunden nach Beginn der Injektion war der Spalt bzw. das Rohr gefüllt. Die Fließgeschwindigkeit des Wassers wurde im Zuge der Injektion von 30 cm/s auf 0 reduziert. Die Paste konnte vor Ort aushärten (Bild 5).

sedimentationsstabil ▪ mehrere Stunden verarbeitbar ▪ kein/wenig Überschusswasser

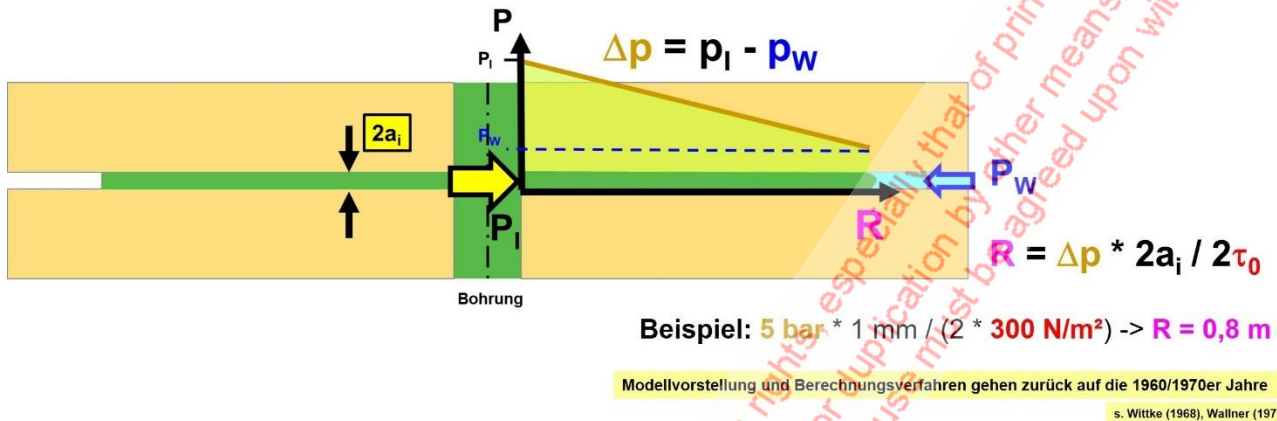


Bild 5: Ausbreitung von Zementpasten in Klüften, Reichweite

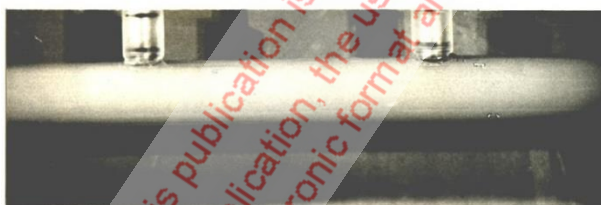
Bei Verhältnissen mit größeren Spaltweiten und Fließgeschwindigkeiten des Wassers der vorgenannten Größenordnung ist somit der Einsatz von Pasten zur Abdichtung möglich. Wenn die Fließgeschwindigkeiten größer sind oder wenn das Abbinden der Paste nicht abgewartet werden kann, kommt die Verwendung von Polyurethan-Harzen in Betracht. Solche Polyurethan-Harze wurden in Stuttgart vielfach für vorausseilende Injektionen im Tunnelbau eingesetzt.



Versuchsbeginn:

$t = 0 \text{ s}$

$v_{\text{Wasser}} = 30 \text{ cm/s}$



Versuchsende:

$t = 435 \text{ s}$

verfülltes Rohr

$v_{\text{Wasser}} \equiv 0$

Versuche im Zuge der Planung der Sanierung Staustufe Hessigheim

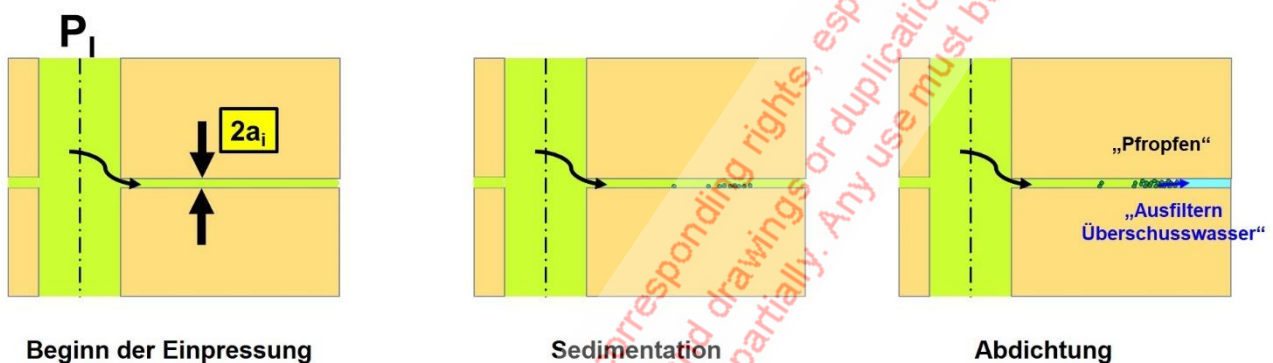
s. z. B. Franzius (1990)

Bild 6: Ausbreitung von Zementpasten in Klüften, Versuche zur Berücksichtigung einer Grundwasserströmung

4. Zementsuspensionen

In Fällen, in denen Trennflächen im Fels mit geringeren Öffnungsweiten zu verpressen sind, können keine Pasten mehr eingesetzt werden. Hier kommt die Verwendung von Wasser-Zement-Suspensionen in Frage. Zementsuspensionen weisen Wasser-Zement-Werte von $w/z = 0,6$ und deutlich mehr auf. Sie sind somit immer wasserreich, nicht sedimentationsstabil und besitzen z. T. erhebliche Mengen an Überschusswasser. Das Fließverhalten kann auf der Grundlage von Literaturangaben und eigenen Erfahrungen bis zu einem w/z -Wert von 2,0 analog den Pasten durch eine Bingham'sche Flüssigkeit beschrieben werden (Bild 7).

- $w/z \geq 0,6$ -> wasserreich und nicht sedimentationsstabil
- Fließverhalten entsprechend „Bingham“ ca. für $w/z \leq 2,0$

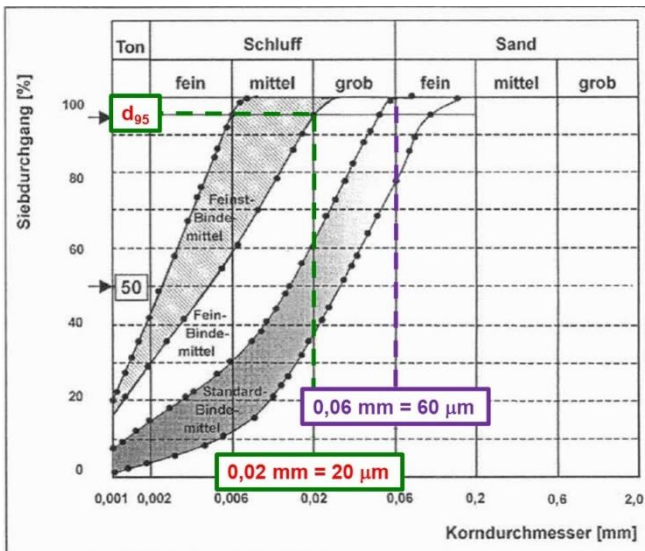


s. z. B. Wittke (1985), Kutzner (1991), Idel (1996)

Bild 7: Wasserreiche Zementsuspensionen, Phasen der Injektion

Beim Verpressen von Zementsuspension in einen Spalt kann bei den üblicherweise herrschenden Drücken ein laminares Fließen angenommen werden. Da Zementsuspensionen nicht sedimentationsstabil sind, sedimentieren die Zementkörner in einem Abstand vom Bohrloch aus, bis sich schließlich ein Pfropfen im Fließweg bildet. Durch diesen Pfropfen wird Überschusswasser aus der Suspension ausgefiltert. Anschließend härtet der Zement zu Zementstein aus.

Bei Injektionsaufgaben im Fels, der Trennflächen mit geringen bis sehr geringen Öffnungsweiten besitzt, muss dementsprechend zunächst überprüft werden, ob ein Zement mit einer hinreichend kleinen Korngröße verfügbar ist. Der Literatur kann man entnehmen, dass eine Trennfläche mit einem Zement injiziert werden kann, wenn die Spaltweite in etwa 3 bis 5 mal größer ist als der d_{95} -Siebdurchgang des Zementkorns. Das bedeutet, dass mit Standardzementen, die ein Größtkorn in der Größenordnung von 0,06 mm bzw. 60 μm besitzen, Spaltweiten $< 0,18$ bis 0,30 mm nicht mehr verpresst werden können (Bild 8).



Perbix&Teichert (1995), Schulze (2002)

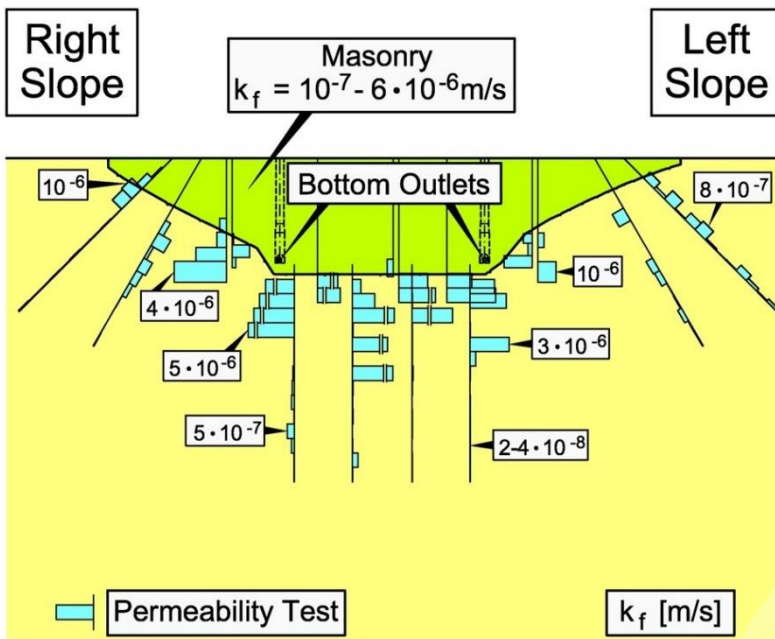
Bild 8: Kriterien für die Verwendung von Feinstbindemitteln für Klüftinjektionen

5. Feinstbindemittel

Feinstbindemittel, deren Größtkorn nur bis ca. 20 µm betragen, können dagegen auch noch beim Verpressen von Trennflächen mit Öffnungsweiten der Größenordnung $2a_i = 0,06$ mm bis 0,1 mm eingesetzt werden. Zwar liegen diese Werte bereits in einer Größenordnung, die auch für die Injektionen Anhydrit des Projektes Stuttgart 21 von Relevanz war. Feinstbindemittel konnten jedoch aus anderen Gründen nicht für die Verpressungen im Anhydrit verwendet werden.

Standardmäßig werden Zementinjektionen im Talsperrenbau vielfach durchgeführt. Nachfolgend wird das Beispiel der Diemeltalsperre erläutert. Hier wurde vor der Sanierung und vor der Herstellung des Injektionsschleiers die Durchlässigkeit des Gebirges mit Hilfe von WD-Tests bestimmt. Die ermittelten Werte betragen maximal $k_f = 5 \times 10^{-6}$ m/s. Nimmt man an, dass der Trennflächenabstand ungefähr 1 m beträgt, dann würde dies einer Spaltweite von $2a_i = 0,2$ mm entsprechen. Spaltweiten dieser Größe können, wie oben erläutert, mit Suspensionen unter Verwendung von Feinstbindemitteln verpresst und abgedichtet werden (Bild 9).

Die Herstellung des Verpressschleiers an der Diemeltalsperre erfolgte entsprechend auf der Basis eines Feinstbindemittels. Die Mischung, deren Wasser-Zement-Wert $w/z = 1,5$ betrug, wurde mit effektiven Verpressdrücken von 10 - 20 bar in das Gebirge injiziert. In den Lu-geon-Versuchen, die nach Abschluss der Injektionen durchgeführt wurden, konnte nachgewiesen werden, dass die Durchlässigkeit des Fels auf Werte von $k_f = 2 \times 10^{-7}$ m/s reduziert und somit ein Abdichtungserfolg erzielt wurde. Ein k_f -Wert dieser Größe entspricht in etwa einer Trennflächenöffnungsweite von $2a_i = 0,07$ mm. Zur Verdeutlichung dieses geringen Wertes ist in Bild 10, rechts unten ein Stück einer dünnen Kunststoffeinstechhülle aus einem Ordner dargestellt, deren Dicke nach Messung mit der Schieblehre ebenfalls 0,07 mm beträgt.

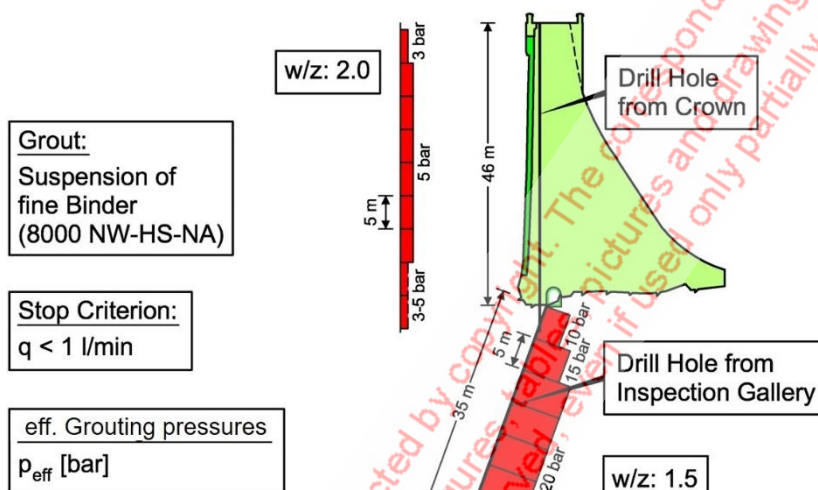


$$k_f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Annahme: $d = 1 \text{ m}$

$$\rightarrow 2a_i = 0,2 \text{ mm}$$

Bild 9: Diemeltalsperre, Durchlässigkeit Mauerwerk und Fels vor Herstellung des Injektionschleiers



Erzielte Durchlässigkeit:

$$k_f = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

Annahme: $d = 1 \text{ m}$

$$\rightarrow 2a_i = 0,07 \text{ mm}$$



Bild 10: Diemeltalsperre, Einpressarbeiten, Vorgaben und Ergebnisse

Mit Suspensionen auf der Basis hydraulischer Bindemittel ist es somit möglich, Durchlässigkeiten im Fels in der Größenordnung von 10^{-7} m/s zu erreichen. Das ist im Talsperrenbau üblicherweise ausreichend.

6. Injektionen Anhydrit

6.1 Anforderungen

Höhere Anforderungen an die zu erzielenden Durchlässigkeiten bestehen allerdings bei den Injektionen Anhydrit in den Tunneln des Projektes Stuttgart 21. Hier geht es darum, über

einen Zeitraum von 100 Jahren, der der angenommenen Lebensdauer der Tunnel entspricht, den Wasserzutritt in das quellfähige Gebirge nach Möglichkeit vollständig zu unterbinden oder - wenn das nicht möglich ist - zumindest weitestgehend zu behindern (Bild 11). Dementsprechend muss man mit den Injektionen hier nach Möglichkeit den Ursprungszustand des Gebirges vor dem Auffahren der Tunnel wiederherstellen. Der unausgelaugte Gipskeuper weist im Ausgangszustand Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-9}$ bis 10^{-10} m/s auf. Dies entspricht aus bodenmechanischer Sicht den Werten eines Tons. Die Rückrechnung dieser Werte mit dem oben erläuterten Spaltmodell für den Fels führt zu Öffnungsweiten der Trennflächen von ca. 0,005 mm. Die Abdichtung von Trennflächen mit Spaltweiten bis 0,005 mm ist somit Zielgröße der Injektionen Anhydrit.

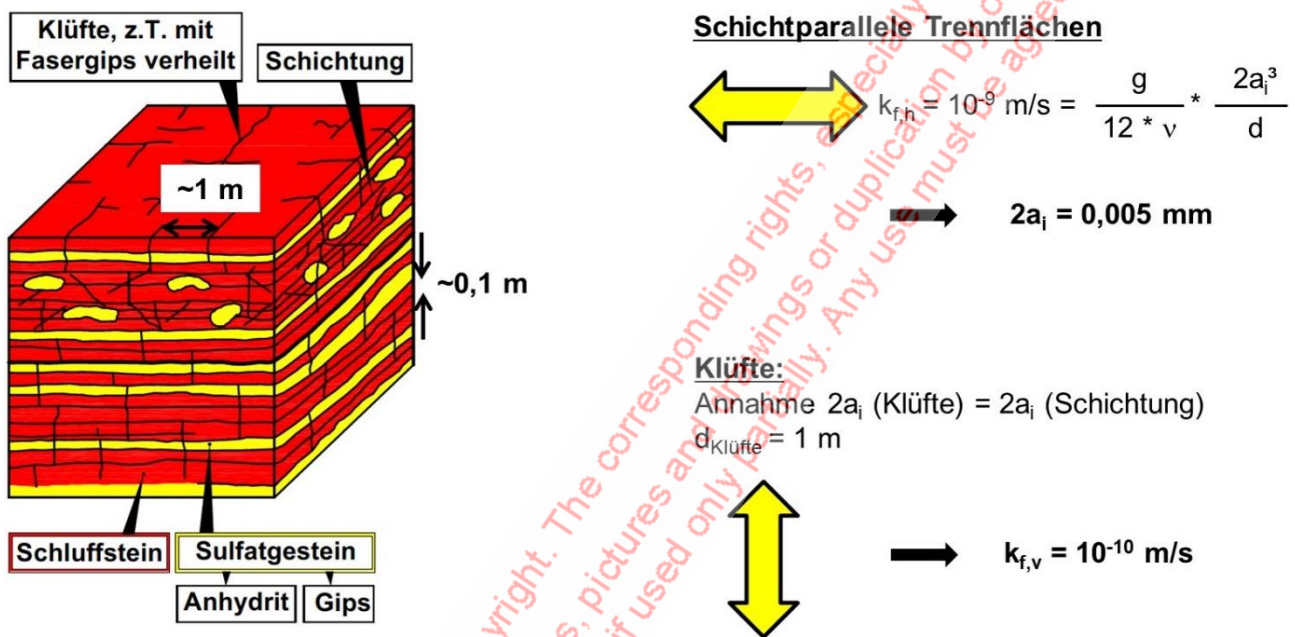


Bild 11: Anhydritführender unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell, Durchlässigkeitsbeurteilung und Trennflächenöffnungsweiten

6.2 PU-Harz und Acrylatgele

Mit Verwendung von Feinstbindemitteln ist dies nicht zu erreichen. Zudem darf Überschusswasser aufgrund der Quellproblematik nicht in das anhydrithaltige Gebirge ausgepresst werden. Daraus folgt, dass hydraulisch gebundene Suspensionen für die Injektionen im Anhydrit nicht verwendet werden können. Stattdessen kommen chemische Injektionsmittel in Frage. Eingesetzt werden können grundsätzlich Acrylatgele und Polyurethan-Harze. Diese beiden Typen von Injektionsmitteln verhalten sich näherungsweise wie eine Newton'sche Flüssigkeit. Das heißt, die Geschwindigkeit des Injektionsmittels in einem Spalt ist abhängig vom hydraulischen Gefälle, von der Spaltweite, von der Viskosität (dynamische Viskosität) sowie der Dichte des Injektionsmittels.

Das wirkende Gefälle kann bei der Verpressung über den Verpressdruck gesteuert werden. Je höher der Druck, desto größer ist das resultierende Gefälle und umso schneller kann das Injektionsgut während der Verpressung in den Spalt eindringen. Zu beachten ist jedoch, dass durch den Druck ein Aufreißen des Gebirges (Fracking) nicht herbeigeführt werden

darf. Der mögliche Injektionsdruck ist daher nach oben begrenzt. Für die Tunnel in Stuttgart wurde von WBI ein zulässiger Wert von 5 bar ermittelt. Das heißt, der maximale effektive Verpressdruck im Gebirge durfte 5 bar nicht überschreiten (Bild 13).

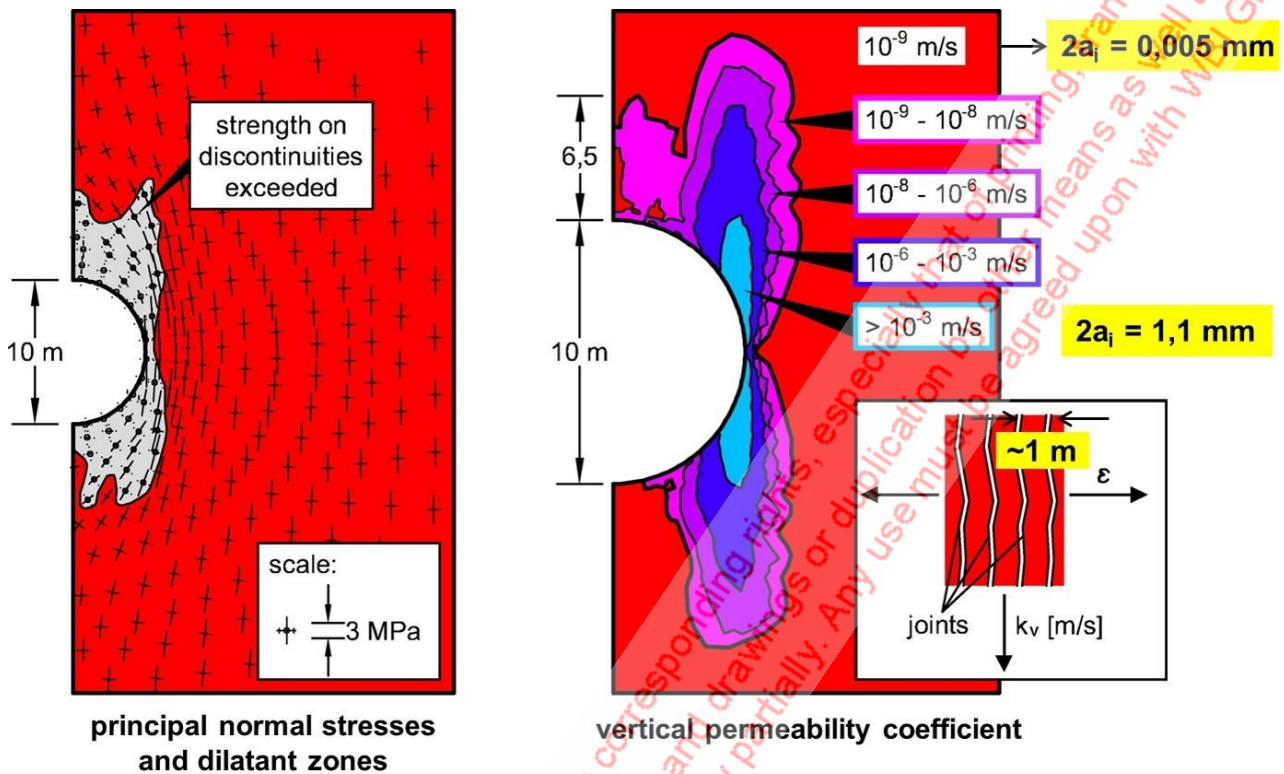


Bild 12: Spannungumlagerung im Gebirge und Erhöhung der Durchlässigkeit, Berechnungsbeispiel

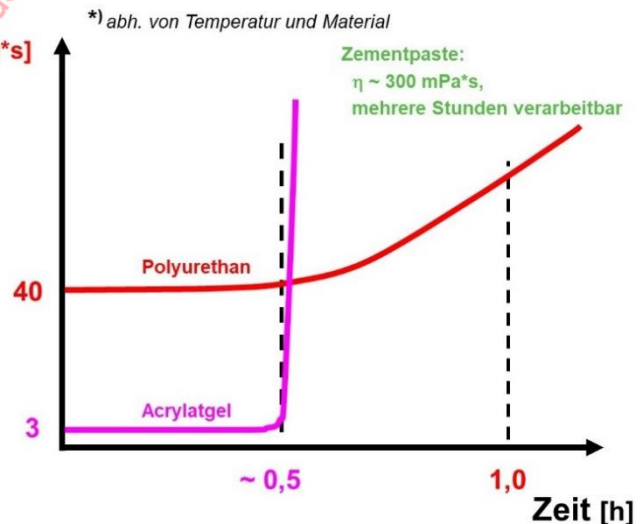
$$\bar{v}_{x'} = \frac{g \cdot \rho}{12 \cdot \eta} \cdot (2a_i)^2 \cdot l_{x'}$$

• $l_{x'}$:

- abhängig von Injektionsdruck und Reichweite
- Druck: **max. 5 bar** (kein „Fracking“)

• ρ :

- Acrylatgel: ca. 1,03 g/cm³
- Polyurethan: ca. 1,1 g/cm³



Entwicklung der Viskosität für ausgewählte Einpressmittel *)

Bild 13: Einpressen von Acrylatgelen und Polyurethanen in Klüfte, Mögliche Einflussfaktoren

Ein zweiter Parameter, der die Injektionen beeinflusst, ist die Dichte des Injektionsmediums. Nach den Angaben in den Datenblättern verschiedener Hersteller von Acrylatgelen und Polyurethanen variieren die Dichten in gewissen Grenzen. Näherungsweise betragen die Dichten von Acrylatgelen ca. 1,03 g/cm³, die Polyurethane besitzen eine etwas größere Dichte

mit Werten von ca. $1,1 \text{ g/cm}^3$. Der Unterschied dieser Werte ist jedoch nicht so groß, um anhand dieses Parameters eines der beiden Injektionsmittel bevorzugen zu können.

Anders verhält es sich dagegen mit der dynamischen Viskosität. Die zeitliche Entwicklung der Viskositäten von Acrylatgelen und PU-Harzen ist im rechten Diagramm des Bildes 13 qualitativ auf der Grundlage von Messwerten für 2 ausgewählte Produkte dargestellt. Hier weist das Acrylatgel gegenüber den Polyurethanen sehr große Vorteile auf. Die Viskosität des frischen Acrylatgels beträgt ungefähr 2 bis 3 bzw. 4 $\text{mPa}\cdot\text{s}$. Sie ist damit lediglich 2 bis 3 mal so groß wie die von Wasser. Diese Viskosität bleibt auch über die Verarbeitungszeit, die bis zu einer halben Stunde gewählt werden kann, nahezu konstant. Mit dem Erreichen und Überschreiten der Topfzeit erfolgt dann ein schneller quasi schlagartiger Anstieg der Viskosität. Ein weiteres Verpressen des Acrylatgels ist dann nicht mehr möglich.

Die niedrigsten viskosen Polyurethane, die z. Z. am Markt verfügbar sind, weisen eine Viskosität von ca. $40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ auf. Auch bei diesen Injektionsmitteln bleibt die Viskosität zu Beginn der Reaktion zunächst konstant, steigt dann aber infolge der Kettenbildung der Moleküle im Zuge der chemischen Reaktion kontinuierlich an. Im Falle des in Bild 13 hinterlegten Produktes sollte die Injektion daher innerhalb einer Stunde abgeschlossen sein. Andernfalls würde die Injektion "gegen" die stetig weiter ansteigende Viskosität und mit entsprechend rückläufigen Aufnahmeraten erfolgen.

6.3 Injektionskonzept

Die Viskosität des Acrylatgels ist deutlich kleiner als die von Polyurethanen. Sie weisen damit eine deutlich bessere Penetrationsfähigkeit auf als die PU-Harze. Aus dieser Sicht ist dem Acrylatgel grundsätzlich der Vorzug zu geben, wenn es darum geht, Trennflächen mit sehr geringen Öffnungsweiten abzudichten. Das war insbesondere auch beim Projekt Stuttgart 21 die Aufgabe. Hier liegen 17 km der Tunnel im Einflussbereich von Anhydrit. Der längste Abschnitt davon wurde mit den Röhren des Fildertunnels aufgefahren. Der zweitlängste Abschnitt wurde mit den Röhren des Tunnels nach Ober- und Untertürkheim durchgefahren. Es folgen der Tunnel nach Feuerbach und der Tunnel nach Bad Cannstatt, in dem der kürzeste Abschnitt im Anhydrit aufgefahren wurde (Bild 14). Neben den "flächigen" Injektionen Anhydrit wurden im Rahmen dieses Projektes insgesamt auch Injektionen bei 70 Dammringen durchgeföhrt.

Die Regelinjektionen in einer Bohrung erfolgten in 2 Stufen (Bild 15). In der ersten Stufe wurde der Fels mit Acrylatgel verpresst. Dabei wurde der Packer an der Außenseite der Spritzbetonschale festgesetzt. Diese Position wurde gewählt, da der Spritzbeton in der Regel eine größere Durchlässigkeit aufweist als der Fels und Umläufigkeiten des niedrig viskosen Acrylatgels über den Spritzbeton zu vermeiden waren. Im Falle von Umläufigkeiten hätte der gewünschte Druckaufbau im Gebirge nicht stattfinden können. Die betreffende Injektion hätte ohne den gewünschten Abdichtungserfolg abgebrochen werden müssen.

Natürlich gab es im Projekt auch viele Details, bei denen auf Grund der speziellen Randbedingungen teilweise vom generellen Konzept abgewichen werden musste. Darauf wird jedoch an dieser Stelle nicht eingegangen.

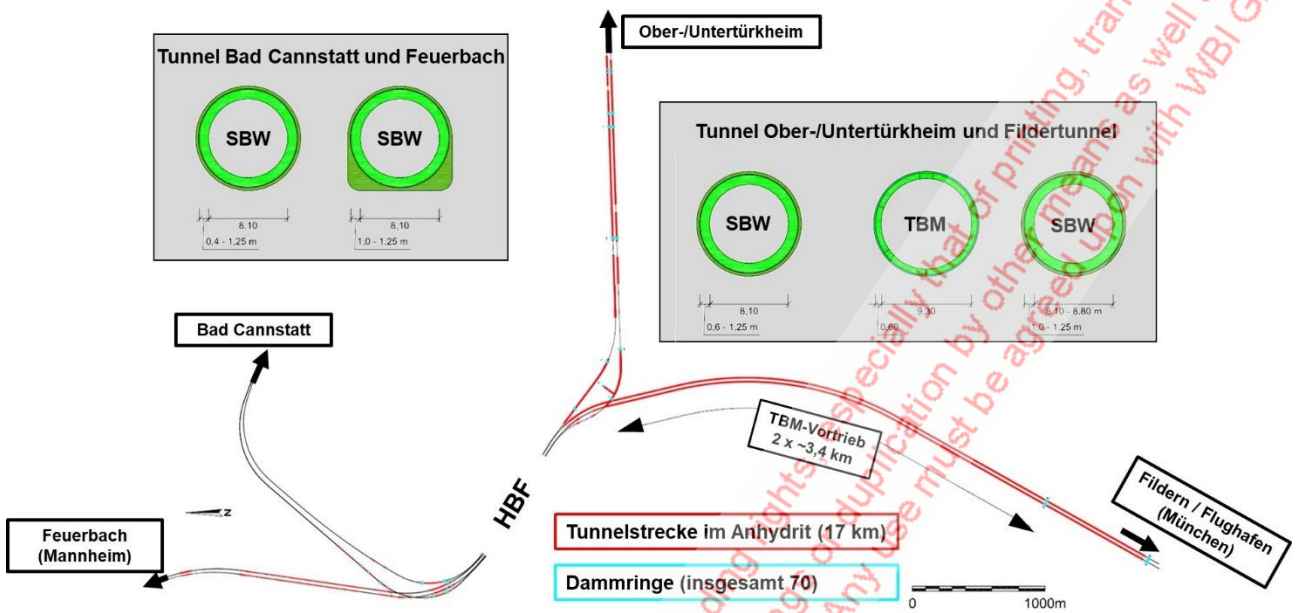
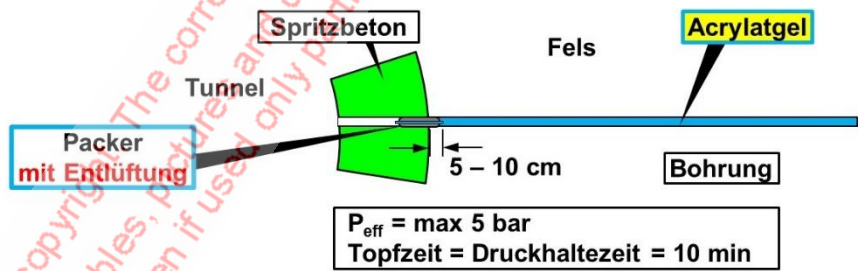
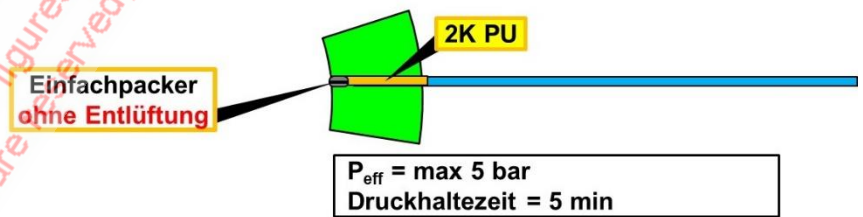


Bild 14: Stuttgart 21 - Tunnelstrecken im Anhydrit

Stufe 1:
Injektion des Fels mit **Acrylatgel**



Stufe 2:
Injektion des Spritzbeton und des Übergangs zum Gebirge mit **PU-Harz**



wasserführende Bohrungen: Injektion in einer Stufe mit **PU-Harz**

Bild 15: Regelinjektion in 2 Stufen und Packerpositionen

Nach den Injektionen der Stufe 1 wurde der Packer ausgebaut. Der verbleibende Bohrlochabschnitt wurde in einer zweiten Stufe mit einem 2-Komponenten Polyurethan-Harz verpresst. Der Packer wurde dabei am inneren Rand der Spritzbetonschale gesetzt (Bild 15). Diese Verpressung hatte noch einen zusätzlichen Effekt. Der beim Abbinden des Acrylatgels entstehende Volumenverlust von bis 4 % konnte durch die nachlaufende Injektion der Stufe 2 ausgeglichen werden. Dadurch konnte das Bohrloch immer vollständig verfüllt und abdichtet werden.

Der maximale effektive Verpressdruck betrug, wie bereits erwähnt, 5 bar. Die bei den Regelinjektionen verwendeten Topf- und Druckhaltezeiten sind im Bild 15 dargestellt. Da die Injektionen häufig im Randbereich vom wasserführenden ausgelaugten Gipskeuper zum anhydritführenden Gipskeuper ausgeführt werden mussten, wurden teilweise auch wasserführende Bohrungen angetroffen. In solchen Fällen wurden die betreffenden Bohrungen direkt mit PU-Harz verpresst. Bei Verwendung von Acrylatgels als Injektionsmittel hätte bei starker Wasserführung einer Bohrung sonst das Problem der Entmischung bestanden. Das Risiko, dass dann kein Abbinden des Acrylatgels mehr stattfindet, war zu groß.

Die Injektionen erfolgten nach dem Pilgerschrittverfahren. Im Beispiel in Bild 16 wurden die Injektionen in der oberen Querschnittshälfte ausgeführt. Zunächst wurden Bohrungen der a-Serie mit einem Abstand von 4 m in Umfangsrichtung und mit einem Abstand von 3 m in Längsrichtung des Tunnels hergestellt und injiziert. Das Raster wurde in der zweiten Phase durch die Bohrungen der b-Serie ergänzt. In der 3. und in der 4. Phase wurden die Injektionsbohrungen weiter verdichtet. In der letzten Phase wurde schließlich durch die Herstellung der Bohrungen der c-Serie ein gegenseitiger Abstand der Bohrungen in Umfangsrichtung von 1 m erreicht. In Tunnellängsrichtung betrug der Abstand der Bohrungen bzw. der Injektionsquerschnitte im betrachteten Beispiel 0,75 m (Bilder 16 und 17).

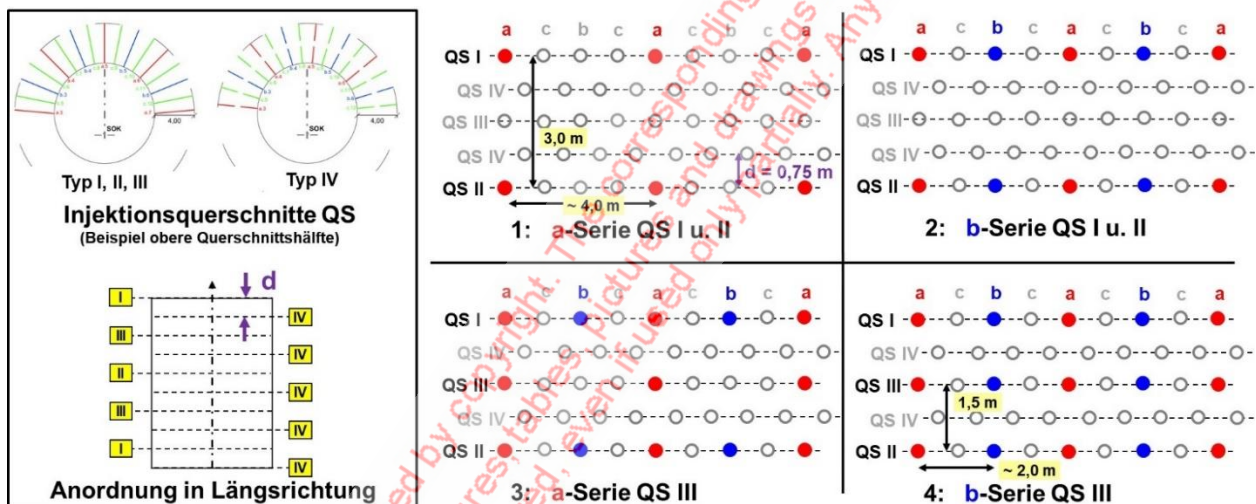


Bild 16: Herstellreihenfolge „Pilgerschritt“, Phasen 1 bis 4

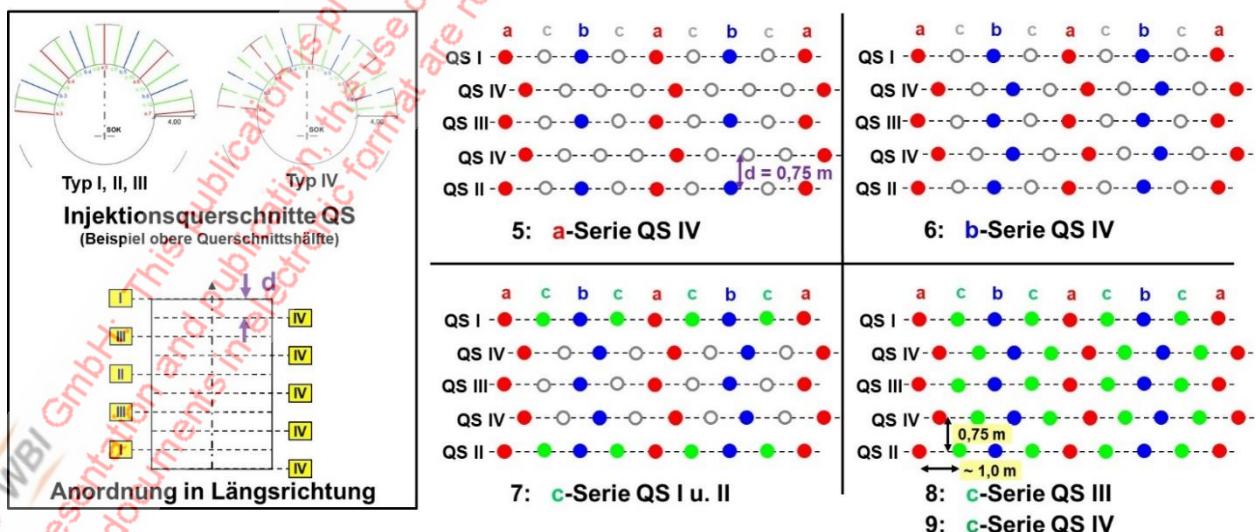


Bild 17: Herstellreihenfolge „Pilgerschritt“, Phasen 5 bis 9

Innerhalb des Projektes wurde der Abstand der Injektionsquerschnitte in den verschiedenen Injektionsfeldern zwischen 0,5 m und 1,25 m gewählt. Dies erfolgte in den verschiedenen Tunneln unterschiedlich und war abhängig von den jeweils angetroffenen geologischen Verhältnissen (Bild 16 und 17).

Insgesamt wurden über 600 km Bohrungen hergestellt, die dann auf die oben beschriebene Weise verpresst wurden.

6.4 Ergebnisse der Injektionen und Erfolgskontrolle

In Bild 18 sind ausgewählte Ergebnisse der Injektionen zusammengestellt. Im Tunnel nach Obertürkheim wurden die geringsten Abstände der Injektionsquerschnitte gewählt mit Werten von 0,5 bis 0,75 m. Im Unteren Fildertunnel betragen die Abstände der Querschnitte zwischen 0,75 m und örtlich 1,0 m. Im Tunnel nach Bad Cannstatt wurde mit Abständen der Querschnitte von 1,0 m gearbeitet. Auch im Feuerbacher Tunnel betrug der Abstand der Injektionsquerschnitte i. d. R. 1 m, örtlich jedoch auch 1,25 m.

Aus den Daten der Tabelle in Bild 18 ist zu erkennen, dass grundsätzlich bei allen Tunneln eine Abnahme der Injektionsgutaufnahme im Zuge der Verdichtung der Bohrungen von der a-Serie zur c-Serie erzielt wurde. Beim Tunnel Bad Cannstatt erfolgte ein Rückgang der mittleren Aufnahmemenge je Meter Bohrung von 8,0 (a-Serie) auf 4,6 l/m (c-Serie). Beim Tunnel Feuerbach war ein Rückgang von i. M. 10,0 auf 5,8 l/m zu verzeichnen. In den Röhren des Tunnels nach Obertürkheim gingen die Aufnahmen von i. M. 7,5 auf 1,7 l/m zurück und im Unteren Fildertunnel betragen die mittleren Aufnahmen 7,8 in der a-Serie bzw. 3,5 l/m in der c-Serie. Diese Rückgänge der mittleren Aufnahmemengen weisen aus, dass bei allen Tunneln ein Abdichtungserfolg erzielt wurde. Im Vergleich der Bauwerke konnte beim Tunnel nach Obertürkheim infolge der hier gewählten geringen gegenseitigen Abstände der Injektionsquerschnitte das Gebirge am besten abgedichtet werden. Dies weisen die im Vergleich der Tunnel geringsten mittleren Aufnahmen in der c-Serie von 1,7 l/m aus (Bild 18).

Tunnel	Regelabstand Querschnitte [m]	$\sum n$ Stufen [Stck]	$\sum l$ Bohrmeter [m]	$\sum q / \sum l$				$\sum t / \sum n$ Verpresszeit je Stufe [min]
				[l/m]				
				Total	a-Serie	b-Serie	c-Serie	
Bad Cannstatt	1,0	47.926	157.435	6,1	8,0	6,8	4,6	28,4
Feuerbach	1,0 (1,25)*	135.140	304.520	7,5	10,0	7,6	5,8	20,7
Obertürkheim	0,75 (0,5)*	46.485	101.972	4,2	7,5	4,8	1,7	19,9
Unterer Filder	0,75 (1,0)*	34.221	77.629	5,3	7,8	5,2	3,5	23,9

*) örtlich

Bild 18: Ergebnisse Injektionen Anhydrit

Als Grundlage für Bauzeitschätzungen sind die erforderlichen Verpresszeiten von besonderer Bedeutung. In der Tabelle in Bild 18 sind daher auch die mittleren Verpresszeiten, die bei den Injektionen Anhydrit in den verschiedenen Tunneln erforderlich wurden, zusammengestellt. Sie betragen zwischen 20 und 30 Minuten pro Verpressstufe.

Der Verpresserfolg wurde in allen Tunneln mit Hilfe von Abpressversuchen im Gebirge überprüft. Diese wurden mit Acrylatgel als Testmedium durchgeführt. Insgesamt wurden mehr als 500 Versuche ausgeführt. In Bild 19 sind die in den Versuchen gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte in Form von Histogrammen für jeden Tunnel dargestellt. Die Tabelle im Bild 19 rechts zeigt die zugehörigen geometrischen Mittelwerte. Auch aus dieser Darstellung ist zu erkennen, dass das beste Ergebnis der Injektionen im Tunnel nach Obertürkheim erzielt wurde. Der aus den Versuchen abgeleitete Durchlässigkeitsbeiwert des injizierten Gebirges betrug hier i. M. $k_f = 1,8 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dieser Wert entspricht ungefähr der Ausgangsdurchlässigkeit des Fels. Mit den von WBI konzipierten Injektionen wurden somit auch Trennflächen im Fels mit sehr geringen Öffnungsweiten wirksam abgedichtet.

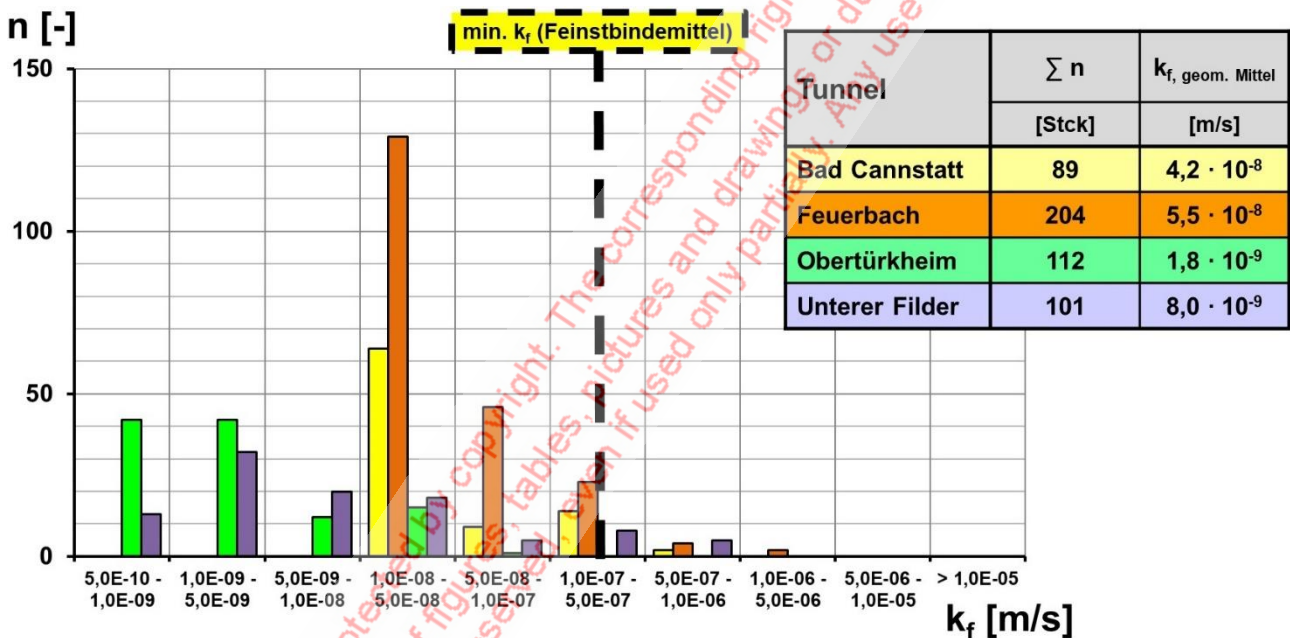


Bild 19: Erzielte Durchlässigkeitsbeiwerte in den Tunneln Stuttgart 21

Bei den anderen 3 Tunneln, in denen die Abstände der Injektionsquerschnitte im Vergleich zum Tunnel Obertürkheim etwas größer gewählt wurden, betragen die mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte des injizierten Fels zwischen $8 \cdot 10^{-9}$ m/s (Unterer Fildertunnel), $4 \cdot 10^{-8}$ m/s (Tunnel Bad Cannstatt) und $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Tunnel Feuerbach). Festzustellen ist, dass auch bei diesen 3 Bauwerken eine deutliche Abdichtung der Auflockerungszone im Gebirge erzielt wurde, die bei Einsatz von Feinstbindemitteln - die Zulässigkeit des Auspressens von Überschusswasser vorausgesetzt - nicht hätte erreicht werden können.

Die im Projekt Stuttgart 21 ausgeführten Injektionen Anhydrit waren somit erfolgreich. Das Ziel der Injektionen wurde erreicht.

Hinzuweisen ist auf ein Detail der Injektionen, das auch für zukünftige Planungen von Injektionsmaßnahmen wichtig und von Interesse ist. Es hat sich herausgestellt, dass es für die Effektivität der Gesamtmaßnahme und letztendlich auch für die Bauzeiten zweckmäßig und zielführend ist, die Bohrungen der ersten Phasen mit PU-Harzen zu verpressen. In Bild 20 ist dieses Vorgehen beispielhaft skizziert. Mit Polyurethan-Harz, das eine höhere Viskosität besitzt als Acrylatgel, können zunächst Trennflächen mit größeren Öffnungsweiten verschlossen werden. In den darauffolgenden Phasen der Injektion können dann mit dem Acrylatgel Trennflächen mit kleineren Öffnungsweiten wirksam erreicht und mit Druckaufbau verpresst werden. Ein solcher Druckaufbau ist für eine erfolgreiche Injektion von Acrylatgel von besonderer Bedeutung.

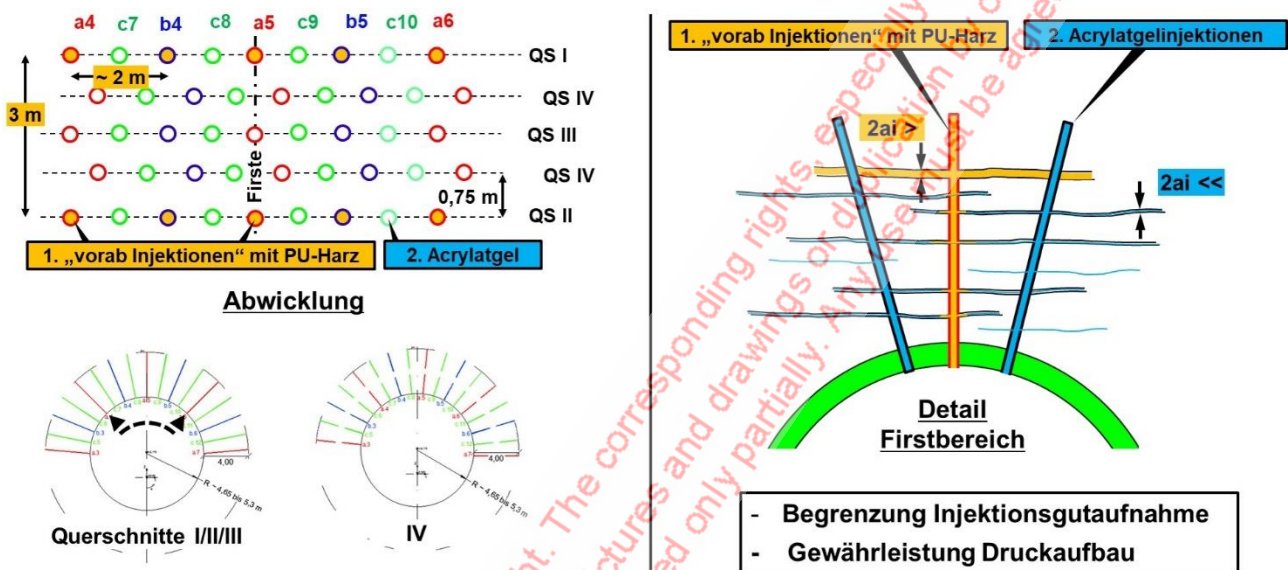


Bild 20: Verpressen Fels mit PU-Harz und Acrylatgel

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Abdichtung von Fels, dessen Trennflächen größere Spaltweiten aufweisen, kann gut durch das Verpressen von Zementpasten erfolgen. Dies ist auch bei strömendem Grundwasser auf den Klüften möglich (Bild 21). Wenn die Fließgeschwindigkeiten größer werden oder eine ausreichende Zeit bis zum Aushärten der Paste nicht zur Verfügung steht, kommt der Einsatz von Polyurethanen in Frage.

Sind kleinere Spaltweiten abzudichten kann dies grundsätzlich durch den Einsatz von Zement und Feinstbindemitteln erfolgen. Dies setzt jedoch voraus, dass das Auspressen des Überschusswassers in den Untergrund zulässig ist. Die durch das Verpressen hydraulischer Einpressmittel erzielbaren Durchlässigkeiten sind jedoch nach unten auf Werte der Größenordnung von $k_f = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ beschränkt.

Für den Talsperrenbau sind diese Durchlässigkeiten i. d. R. ausreichend. Auch für übliche Anwendungen im Tunnelbau besitzen die Zemente und Feinstbindemittel ein breites Einsatzspektrum.

Große Spaltweiten:

- Zementpasten, auch in strömendes Grundwasser
- Bei großen Fließgeschwindigkeiten und wenn nicht ausreichend Zeit für Abbinden: PU

Kleine Spaltweiten:

- Feinstbindemitteln für Injektionen in Klüfte -> min. $k_f = 2 \cdot 10^{-7}$ m/s (Talsperrenbau)
- Besondere Anwendung: Injektionen Anhydrit
 - Einsatz von Acrylatgel ermöglicht Abdichtung auf 10^{-8} bis 10^{-9} m/s im großen Maßstab
 - Kombination von PU (erste Phase) und Acrylatgel zur Erhöhung der Effektivität
- Weitere Anwendungsmöglichkeiten:
 - z. B. unausgekleidete Stollen zur Begrenzung Grundwasserentnahmen

➤ **Dank an alle Beteiligten: DB PSU, WBI, Argen ATCOST21, ATC, ATF, Materiallieferanten**

Bild 21: Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine besondere Anwendung stellen die Injektionen im Anhydrit dar, der im Ausgangszustand sehr gering durchlässig ist. Hier hat sich nachweislich im Projekt Stuttgart 21 gezeigt, dass bei entsprechender Konzeption und Ausführung der Injektionsarbeiten eine Abdichtung der vortriebsbedingten Auflockerungszone auf Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 10^{-8}$ bis 10^{-9} m/s im großen Maßstab sicher erreicht werden kann. Eine Kombination von PU-Harz-Injektionen in den ersten Phasen mit einer Verpressung von niedrigviskosem Acrylatgel in den nachfolgenden Phasen hat sich dabei als zweckmäßig und sinnvoll erwiesen.

Die Anwendung, der im Zuge der Injektionen Anhydrit entwickelten und eingesetzten Methoden und Verfahren ist nach Meinung der Autoren nicht nur auf die speziellen Anforderungen des Projektes Stuttgart 21 beschränkt. Vielmehr werden auch Anwendungsmöglichkeiten gesehen, wenn es darum geht, gering durchlässige Zonen um Tunnelbauten zu erreichen. Ein Beispiel dafür sind unausgekleidete Stollen im Wasserbau, bei denen die Grundwasserentnahme soweit zu reduzieren ist, dass auf den Einbau einer Auskleidung tatsächlich verzichtet werden kann.

Wir freuen uns, dass durch den Einsatz innovativer Methoden das Ziel einer Abdichtung der Auflockerungszone im anhydritführenden Gestein bei den Tunneln des Projektes Stuttgart 21 erfolgreich erreicht wurde. Von Seiten WBI bedanken wir uns bei allen Beteiligten. Es wurde gemeinsam viel geschafft und dabei vertrauensvoll zusammengearbeitet. Allen voran zu nennen ist hier die DB PSU - unser Auftraggeber - aber auch den drei ausführenden Argen ATCOST21, ATC und ATF mit ihren Subunternehmern BeMo, DMI und Renesco sowie den Materiallieferanten gilt unser Dank. Auf das gemeinsam Erreichte kann stolz zurückgeblückt werden.

Literatur

Franzius, L.: Verpressung durch Gipsauslaugung bedingter Hohlräume im Untergrund der Staustufe Hessigheim/Neckar. Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. 1990.

Idel, K.-H.; Smolczyk, U. (Editor): Injektionsverfahren. In: Grundbautaschenbuch, 5. Auflage, Teil 2. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996.

Kutzner, C.: Injektionen im Baugrund. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1991.

Louis, C.: Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. Dissertation am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, TH Karlsruhe, Heft 30, 1967.

Perbix, W.; Teichert, H.-D.: Feinstbindemittel für Injektionen in der Geotechnik und im Betonbau. Taschenbuch für den Tunnelbau 1995, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Verlag Glückauf, Essen, 1994.

Schulze, B.: Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. Bau-technik 79, Hefte 8 und 9, 2002.

Wallner, M.: Ausbreitung von sedimentationsstabilen Zementpasten in klüftigem Fels. Dissertation Universität Karlsruhe, 1973.

Wittke, W.: Durchströmung von klüftigem Fels. Dissertation, 1968. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik, Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Universität Fridericiana Karlsruhe; 155. 1969.

Wittke, W.: Rechnerische und elektroanaloge Lösung dreidimensionaler Aufgaben der Durchströmung von klüftigem Fels. Proceedings 2nd ISRM Congress, Vol. 3, Belgrade, 1970.

Wittke, W.: Felsmechanik - Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.

Wittke, W.; Breder, R.: Injektionsverfahren zur Abdichtung von Fels- und Lockergestein unter Verwendung von Zementpasten. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1985, Verlag Glückauf, Essen 1984.

Wittke, W.: Rock mechanics - Theory and application with case histories. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Ernst & Sohn, Berlin, 2014.