

Dokumentation
D 0229

s i a

Band 7

Swiss Tunnel Congress 2008

Fachtagung für Untertagbau

10. Juni 2008 in Luzern (Colloquium)

11. Juni 2008 in Luzern (Fachtagung)



FGU Fachgruppe für Untertagbau

GTS Groupe spécialisé pour les travaux souterrains

GLS Gruppo specializzato per lavori in sotterraneo

STS Swiss Tunnelling Society



Injektionen als Bauhilfsmassnahmen – Teil 1: Grundlagen

Dr. Roger Bremen
Lombardi AG

1 Einleitung

Es sind fast 200 Jahre vergangen seitdem zum ersten Mal Zementinjektionen zur Verbesserung der Bodeneigenschaften eingesetzt wurden. Seitdem hat eine bedeutende Entwicklung der Injektionsverfahren stattgefunden und Injektionen wurden bei unzähligen Bauwerken mit unterschiedlichem Erfolg angewendet. Injektionen in Boden und Fels bleiben aber weiterhin eine im wesentlichen empirische Angelegenheit. Nur in den letzten zwei Jahrzehnten wurde versucht von einigen „Injektionsdogmen“ und unnötig aufwendigen Vorgehensweisen abzukommen.

Im ersten Teil des Vortrages wird versucht einige wesentliche Grundlagen der Anwendung von Injektionen im Untertagebau darzustellen. Dabei werden einige leider immer noch weit verbreitete Modellvorstellungen kritisch hinterfragt. Im zweiten Teil werden dann spezifisch Injektionen als Bauhilfsmassnahme behandelt wobei einige aktuelle Beispiele betrachtet werden. Spezielle Injektionsverfahren wie Jetting oder Kompensationsinjektionen werden in der Folge zwar nicht behandelt werden.

Wie in den meisten Bereichen des Bauwesens, beruhen Entwicklungen in der Injektionsproblematik nur selten auf theoretische Überlegungen sondern sind meistens aus praxisbezogene Erfahrungen abgeleitet worden. Dies hat insbesondere bei Injektionen zur Folge dass fast dogmatische „Regeln“ über Jahrzehnte die Angewendeten Injektionsverfahren bedeutend beeinflusst haben. Dabei handelt es sich nicht selten um willkürliche und oberflächliche Generalisierungen einzelner Erfahrungen welche durch der meistens indirekten und somit schwierigen Qualitätskontrollen z. T. noch gefördert werden.

Weiter ist zu berücksichtigen dass eine umfassende Behandlung der Injektionsproblematik vielfältige Kenntnisse in sehr unterschiedliche Fachbereiche voraussetzt. Zur umfassenden Behandlung der Injektionsproblematik sind Grundkenntnisse in der Fels- und Bodenmechanik,

Fließhydraulik sowie Materialtechnologie eine notwendige Voraussetzung. Weiter muss der „Injektionsspezialist“ mit den auf dem Markt vorhandenen unzähligen Produkten vertraut sein und die Möglichkeiten sowie Grenzen der heutigen Bohrgeräte und Injektionsinstallationen kennen. Schliesslich ist zur angemessenen Projektierung von Injektionsmassnahmen eine gewisse praktische Erfahrung unerlässlich, welche aber in keinem Fall die einzige Grundlage des „Injektionsfachmannes“ sein sollte.

2 Problemstellung

Das Ziel jeglicher Injektion liegt in der Verbesserung der mechanischen und/oder der hydraulischen Eigenschaften des injizierten Körpers. Dies geschieht durch Verfüllung bestehender Klüfte oder Hohlräume deren Geometrie im wesentlichen unbekannt ist aber durch die Injektion allenfalls beeinflusst werden kann. Weiter ist zu erwähnen dass praktisch alle im Bauwesen angewendeten Injektionsmethoden darauf beruhen ein möglichst flüssiges Mittel zu injizieren dessen physikalische Eigenschaften sich innert einer gegebenen Zeitspanne ändern müssen.

Grundsätzlich geht es somit darum, die Zielsetzung der Verbesserung der mechanischen und/oder hydraulischen Eigenschaften in optimaler Weise zu erreichen. Was unter optimaler Weise zu verstehen ist, wird in der Folge noch erläutert. Zur Erfüllung dieser Zielsetzung sind meistens nur die Eigenschaften des injizierten Körpers im Endzustand von Bedeutung, während das Injektionsverfahren nur das Mittel darstellt um das angestrebte Ziel zu erreichen. Leider wird vom Projektingenieur oft ungenügend zwischen Zielsetzung der Injektion und Lösungsaufbau sowie der entsprechenden Massnahmenplanung unterschieden. Es handelt sich hierbei um einen wesentlichen Aspekt welcher beim Angriff jeglicher Injektionsmassnahme unmittelbar zu behandeln ist, dies um u.a. die Verantwortlichkeiten aller involvierten Parteien klar abzugrenzen.

Die generelle Abwicklung einer Injektionsmassnahme kann somit in folgende allgemein geltenden Hauptphasen unterteilt werden:

- Festlegung der Zielsetzungen und der Verantwortlichkeiten,
- Lösungsaufbau,
- Vorversuche und Massnahmenplanung,
- Injektionsausführung unter allfälliger Anpassung/Optimierung der baulichen Massnahmen, und
- Kontrolle der Zielsetzungen.

Es wird oft festgestellt dass eine oder mehrere der oben erwähnten Phasen nicht mit der notwendigen Aufmerksamkeit betrachtet werden. Ich bin überzeugt das eine systematische Projektabwicklung gemäss der oben erwähnten Unterteilung die meisten Missverständnisse zwischen den üblicherweise bei Injektionen involvierten Parteien (Bauherr, Projektingenieur, Unternehmung, Materiallieferant) verhindern könnte.

Bevor die verschiedenen Phasen etwas näher untersucht werden, erscheint es mir leider notwendig einige wesentliche Grundkonzepte und Modellüberlegungen festzuhalten welche öfters vernachlässigt werden.

3 Grundkonzepte und Modellüberlegungen

Konzepte und Modellüberlegungen stellen zwar eine Idealisierung und damit Vereinfachung der Realität dar, erlauben aber die wesentlichen Zusammenhänge und Faktoren welche die Injektion beeinflussen festzuhalten.

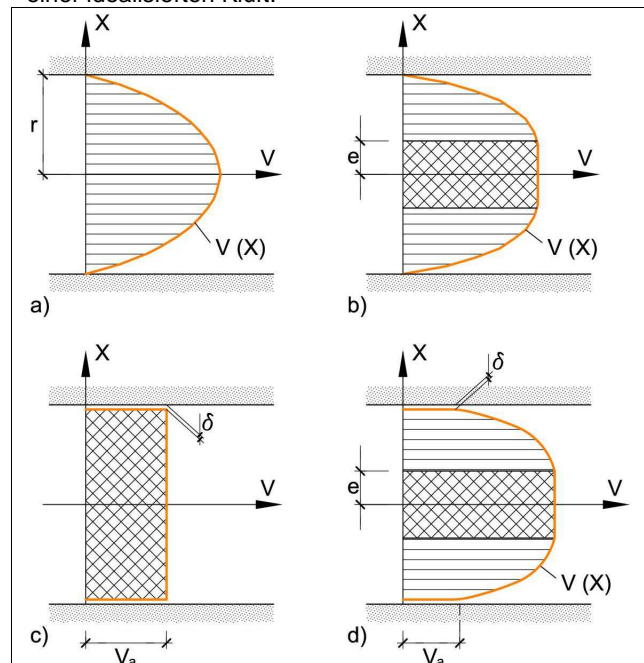
Es ist zweifellos zu bedauern dass zwar Erdöl- oder Lebensmittelingenieure sehr gut um die Rheologie bescheid wissen, während sich Bauingenieure normalerweise damit begnügen die Fliesseigenschaften des Wassers in etwa zu beherrschen. Das Verhalten von flüssigen Injektionsmassen unterscheidet sich aber oft bedeutend von dem des Wassers.

Das Fliesen eines Injektionsgutes innerhalb einer idealisierten Kluft kann grundsätzlich unter vier möglichen

Fliezzuständen stattfinden wie dies in Bild 1 dargestellt wird. Grundsätzlich sind folgende Fälle zu unterscheiden.

- a) rein viskoses Verhalten einer Newtonschen Flüssigkeit, wie z. B Wasser. Dabei ist die Geschwindigkeitsverteilung parabelförmig.
- b) viskosplastisches Verhalten einer Bingham'schen Flüssigkeit wie z. B Injektionsgut auf Zementbasis. Bei diesem Verhalten entsteht ein steifer Kern der sich geschlossen verschiebt und seitliche Schichten in welchen die Geschwindigkeitsverteilung parabelförmig verläuft.

Bild 1: Mögliche Fliezzustände eines Injektionsgutes in einer idealisierten Kluft.

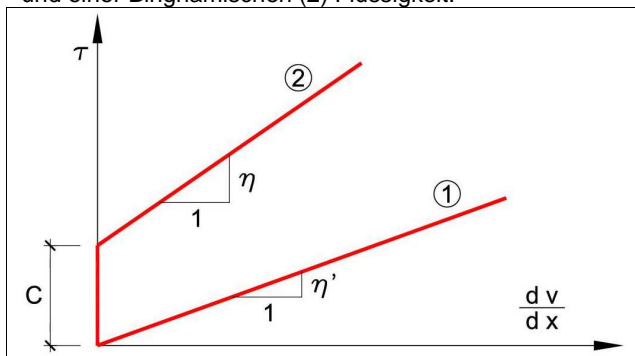


- c) Die Fliesspressung findet statt wenn die Haftung an den Glatten wänden geringer ist als die innere Kohäsion der Flüssigkeit.
- d) und schliesslich der allgemeine Fall bei welchem eine Fliesspressung zusammen mit einem Steifen Kern auftritt. Der Übergang vom Kern zur Wand ist durch eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung charakterisiert.

In Bild 2 ist das rheologische Verhalten einer rein viskosen oder „newtonischen“ Flüssigkeit (wie z. Bsp. Wasser, Öl, Silikate, usw.) sowie einer viskosplastischen

oder „Binghamischen“ Flüssigkeit (Zementsuspension, Blut, usw.) dargestellt. Ausser einer bestimmten Viskosität weisen diese Flüssigkeiten eine Plastizität oder Kohäsionsschwelle auf welche deren Fließverhalten bedeutend beeinflussen kann. Insbesondere ist auf einer Binghamischen Flüssigkeit eine bestimmte Scherkraft noch vor Einsetzen der Bewegung oder der relativen Verschiebung aufzubringen. Aufgrund der bedeutenden Fließunterschiede zwischen Wasser und die meisten Injektionsmittel besteht somit keine quantitative Beziehung zwischen der Wasseraufnahme (Lugeon) und der Aufnahme eines Injektionsgutes. Diese Tatsache ist unbedingt zu berücksichtigen.

Bild 2: Rheologisches Verhalten einer Newtonischen (1) und einer Binghamischen (2) Flüssigkeit.



Werden Zementschlämme betrachtet, ist zu berücksichtigen dass es sich eigentlich um Suspensionen handelt bei welchen die Granulometrie der suspendierten Körper eine wesentliche Rolle beim Injektionsablauf spielt.

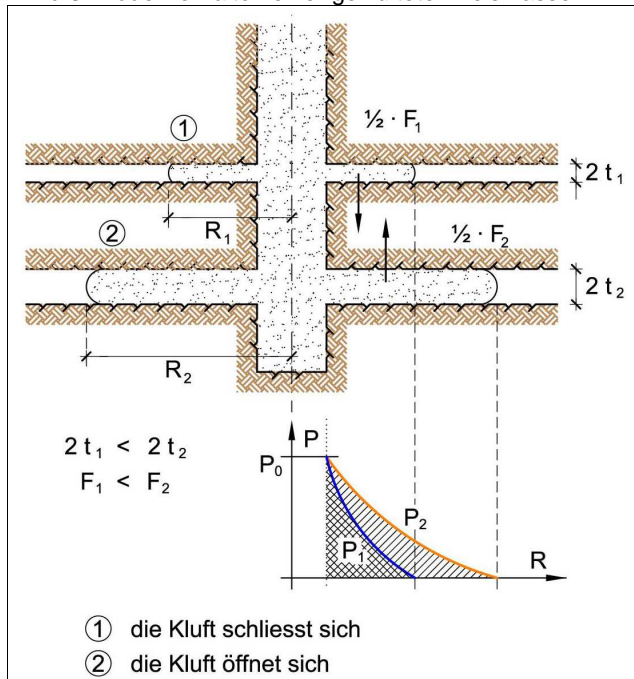
In erster Linie ist zu erwähnen dass die grössten Körner des Zementes die minimale Weite der Injizierbahnen Klüfte bestimmen unabhängig von der beigefügten Wassermenge. Wird somit ein gewöhnlicher Zement eingesetzt mit einer maximalen Korngrösse von etwa 100-150 μ ergibt sich eine minimale Weite der Injizierbahnen Klüfte von etwa 0.3-0.4 mm. Falls kleinere Klüfte oder Hohlräume zu verfüllen sind müssen andere Produkte verwendet werden, entweder Suspensionen mit kleinerer Korngrösse, Silikate oder Harze verschiedener Art. Das Beifügen von jeglichen Zusatzmitteln oder höhere Injektionsdrücke ändern zwar den Injektionsradius aber nicht die Injizierbarkeit feiner Klüfte.

Aus dieser Grundlage beruht auch die Tatsache dass ausschliesslich stabile Zementsuspensionen einzusetzen sind, also Suspensionen mit einem recht beschei-

denem Absetzmass. Trotz der unzähligen Gründe welche den Einsatz von stabilen Suspensionen rechtfertigen kommt es nicht selten vor dass weiterhin nichtstabile Suspensionen eingesetzt werden. In diesem Fall werden somit nur ein Teil der Klüfte oder Hohlräume im Endzustand mit Zement gefüllt sein während der obere Teil mit Wasser gefüllt wird.

Schliesslich möchte ich zur Einleitung noch auf die Grenzen der mechanischen Verbesserung der Felskennwerte anhand von Injektionen hinweisen. Diesbezüglich werden die Möglichkeiten die Felsverformbarkeit und oder Scherfestigkeit zu verbessern oft überschätzt. Wird ein geklüfteter Fels wie in Bild 3 betrachtet, so ist zu berücksichtigen dass nur die Breiteren Klüfte injiziert werden während die feineren Klüfte, im besten fall zusammengesprengt werden. Je nach geologischen Verhältnissen kann es somit sein das nur ein sehr geringer Prozentsatz der Klüftanzahl mit Injektionsgut verfüllt wird.

Bild 3: Modellverhalten einer geklüfteten Felsmasse



Zur Bewertung einer allfälligen Verbesserung der Scherfestigkeit ist weiterhin eine gute Bindung zwischen Injektionsgut und Felsoberfläche notwendig. Dies setzt aber grundsätzlich saubere und Tonfreie Klüfte voraus. Etwas vereinfacht ausgedrückt ist festzuhalten dass Injektionen in einer geklüfteten Felsmasse zwar die Durchlässigkeit aber nur sehr bedingt die mechanischen Eigenschaften

verbessern können. In einem Boden oder in einer Strukturlosen Störzone können Injektionen eine bedeutende Verbesserung der mechanischen Parameter erzeugen.

4 Zielsetzungen der Injektionen und Verantwortlichkeiten

Aufgrund meiner bisherigen Erfahrungen bei Injektionsarbeiten erscheint mir dieser erste Punkt von wesentlicher Bedeutung weil er meistens vernachlässigt wird.

Bevor überhaupt über mögliche Lösungsansätze nachgedacht wird, erscheint es mir wichtig die Problemstellung und die Zielsetzung möglichst klar und umfassend zu untersuchen. Nur eine klare Vorstellung des oder der zu erreichenden Ziele erlaubt auch die entsprechenden Kontrollmethoden während und nach den Injektionen zu bestimmen. Die Ziele sind quantitativ zu bestimmen wie eine angestrebte Reduktion der Durchlässigkeit oder eine maximale Verformbarkeit eines Bodens. Nur quantitativ ausgedrückte Zielsetzungen können während oder nach Abschluss der Injektionskampagne überprüft werden.

Eine zweite wesentliche Grundsatzfrage welche unmittelbar zu behandeln ist betrifft die Aufteilung der Verantwortlichkeiten der Injektionsmassnahmen. In dieser Hinsicht muss ich gestehen dass sich der Projektgenieur seiner Verantwortung oft unterzieht. Um spätere Konfliktsituationen zu vermeiden ist es unerlässlich dass die Verantwortlichkeiten bei der Festlegung und Ausführung der Injektionsmassnahmen allen Parteien bewusst sind. Es sind natürlich verschiedene organisatorische Abwicklungsmöglichkeiten denkbar und jede weist Vor- und Nachteil auf. Die Erfahrungen und Kenntnisse jeder Partei, können natürlich zu einer optimalen Projektierung und Abwicklung der Injektionstätigkeiten beitragen, dürfen aber in keinem Fall die entsprechenden Verantwortlichkeiten abändern. Weil die bestehenden Normen diesen teil nicht abdecken ist der Bauherr gut beraten wenn er unmittelbar nach Beschlussnahme einer Injektionsmassnahme die Verantwortungen für Projektierungstätigkeiten, Ausführung und Kontrolle zwischen allen beteiligten Parteien eindeutig aufteilt und allfällige Risiken bewertet.

5 Lösungsaufbau

Sind einmal die Zielsetzungen klar definiert ist in erster Linie ein Lösungskonzept zu erstellen. Ziel dieses Konzeptes ist die Zielsetzungen unter optimalen Bedingungen zu erfüllen. Je nach Situation ist somit das Lösungskonzept den Prioritäten anzupassen. Falls eine Injektionskampagne innerhalb eines Tunnelvortriebes auszuführen ist, erweist sich der benötigte Zeitaufwand oft als wesentlicher Faktor, während die Kosten des Injektionsgutes oft von untergeordneter Bedeutung sind. Beim Lösungsaufbau sind somit nicht nur die Zielsetzungen sondern ebenfalls die projektbezogenen Prioritäten mit dem Bauherrn abzuklären.

Zur Erstellung des Lösungskonzeptes sind in erster Linie die Randbedingungen möglichst umfassend zu bestimmen oder wenigstens zu umschreiben. Dabei sind folgende Aspekte von besonderer Bedeutung:

- Kenntnisse des zu injizierenden Körpers, insbesondere, geologische Verhältnisse, Kluftebildung und Lage, Grundwasserspiegel und allfällige Fließzustände
- Baustellenrandbedingungen (Platzzustände, Konfliktsituationen mit anderen Bautätigkeiten, usw.

Aufgrund von diesen Angaben sowie der bekannten Zielsetzungen und Prioritäten, kann ein Lösungskonzept erstellt werden. Dieses Konzept sollte im allgemeinen folgende Aspekte umfassen

- Die Abmessung des zu behandelnden Körpers
- Provisorische Lage und Anzahl der allfälligen Drainagebohrungen und der Injektionsbohrungen.
- Erste Wahl des Injektionsgutes sowie der Injektionsmethode und der Injektionsabwicklung.
- Bestimmung der Kontrollmethoden während und zum Abschluss der Injektionsmassnahme inkl. Abbruchkriterien.
- Bewertung allfälliger Folgen der Injektionen auf das Bauwerk.

- Bestimmung aller Untersuchungen welche zur Festlegung der Injektionsabwicklung notwendig sind.

Mit Ausnahme von Spezialfällen muss man sich seit Beginn der Lösungsentwicklung bewusst sein dass keine ernste Injektionsmassnahme ohne Vorversuche und spezifische Abklärungen sowie Optimierungen während des Injektionsablaufes erfolgreich durchgeführt werden kann. Eine Projektierung der Injektionsmassnahmen ohne die notwendigen örtlichen Anpassungen führt kann in keinem Fall als optimal angesehen werden. Diese Tatsache sollte seitens der Projektingenieure bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen vermehrt berücksichtigt werden.

Nicht selten führt der Mangel von Vorversuche dazu dass die ganze Injektionsmassnahme zum Versuch wird was unweigerlich zu Mehrkosten und Verzögerungen führt.

Je umfangreicher die Kenntnisse des zuständigen Projektingenieurs in dieser Phase sind desto gezielter können die Vorversuche geplant und ausgeführt werden.

6 Vorversuche und Massnahmenplanung

Nach der Erstellung des Lösungskonzeptes sind im Normalfall Vorversuche auszulösen. Dabei sind alle Aspekte zu untersuchen welche die definitive Massnahmenplanung beeinflussen können. Grundsätzlich sollte mit Versuche des oder der Injektionsgute begonnen werden. Die rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen sind unter Berücksichtigung der örtlichen Bedingungen (Wasser, Temperatur, Zement, allfällige Zusatzmittel) zu untersuchen um alle Anforderungen im flüssigen und ausgehärteten Zustand zu erfüllen.

Beim Einsatz von Harzen oder Silikaten kann in den meisten Fällen auf Laborversuche verzichtet werden da die rheologischen Eigenschaften dieser Produkte von den Herstellern regelmässig geprüft werden.

Nur Injektionsgute welche die grundsätzlichen Anforderungen Einhalten sollten in einer zweiten Phase innerhalb eines Injektionsversuches erprobt werden. Diese Injektionsproben sind ebenfalls beim Einsatz von Silikaten und Harzen unbedingt notwendig. Ziel dieser Vor-

versuche ist im wesentlichen die Detailplanung der Injektionsmassnahme festzulegen. Dabei handelt es sich um folgende Hauptaspekte:

- Bestimmung der Zusammensetzung des Injektionsgutes.
- Lage, Länge und Eigenschaften allfälliger Drainagebohrungen.
- Lage, Länge und allfällige Phaseneinteilung der Injektionsbohrungen.
- Injektionsmethode, Abbruchkriterien jeder Injektionsetappe.
- Bestimmung der aufzunehmenden Bohr- und Injektionsparameter und Kontrollen beim Injektionsvorgang.
- Abschliessende Kontrollen zur Überprüfung der Zielsetzungen.

Zu den Bohr und Injektionsparameter ist zu erwähnen dass heute mit wenig Aufwand eine bedeutende Anzahl von Bohr und Injektionsparameter aufgenommen werden können. Leider ist oft der Aufwand der Auswertung dieser Parameter aufwendiger als deren Erfassung so dass die Nutzen dieser Messwerte meistens nicht oder nur sehr beschränkt wahrgenommen werden.

7 Injektionsausführung und Optimierungen

Im Falle dass Vorversuche sowie die Massnahmenplanung vollständig ausgeführt wurden sollten bei der Ausführung keine grundsätzlichen Anpassungen oder unvorhergesehene Schwierigkeiten auftreten.

Man muss sich aber bewusst sein dass normalerweise ein nicht homogener Körper injiziert wird und diese örtliche Änderungen sind bei der Ausführung der Injektionsmassnahme zu berücksichtigen. Es sei hier eindeutig darauf hinzuweisen dass Injektionsmassnahmen nicht nach strikten Spezifikationen oder Rezepte auszuführen sind. Nur eine kontinuierliche Auswertung des beobachteten Verhaltens seitens erfahrener Injektionsspezialisten sowie eine

Enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Parteien erlaubt eine optimale Abwicklung der Injektionsmassnahmen. Eine ausschliesslich aufgrund von Spezifikationen ausgeführte Injektionskampagne stellt im besten Fall einen unnötigen Kostenaufwand dar.

8 Kontrolle des Injektionserfolges

Wegen nicht quantifizierter Injektionsziele erweist sich oft die Kontrolle des Injektionserfolges, wenn überhaupt, schwierig. Die Möglichkeit einer Kontrolle sollte schon in der Projektierungsphase berücksichtigt werden. Als Kontrollparameter sind natürlich soweit wie möglich integrale Werte vorzuziehen, also z. Bsp. bei einer Tunnelabdichtung die gesamte Ausfliessmenge infolge der Abdichtungsmassnahmen. Werden örtliche Werte wie die Permeabilität in einer Bohrung oder die Steifigkeit einer Kernentnahme als Kontrollparameter definiert so ist eine genügende Anzahl von Proben zu entnehmen damit diese auch einen repräsentativen Charakter aufweisen.

Schliesslich ist auch in diesem Fall darauf hinzuweisen dass eine schrittweise Reduktion der injizierten Volumen infolge einer progressiven Verfeinerung des Injektionsrasters zwar eine Angabe des Injektionserfolges darstellt, diese Angabe aber keine quantitative Ableitung auf Permeabilitätsreduktion oder erhöhter mechanischer Parameter erlaubt.

9 Schlussbemerkungen

In der vorliegenden Einleitung wurden einige Grundlagen zur Injektionsproblematik zusammengefasst. Die praktische Umsetzung der angedeutenden Konzepte sowie die allgemein gültige Projektabwicklung sind in der Praxis nicht immer einfach umzusetzen.

Es erscheint aber andererseits notwendig die Injektionsproblematik aus verschiedenen Standpunkten zu betrachten und die Injektionsmassnahmen möglichst systematisch abzuwickeln.

Im zweiten Teil der Präsentation werden die hier erläuterten Konzepte in praktische Anwendungsme-

thoden umgewandelt und anhand von verschiedenen Beispielen erläutert.

10 Referenzen

- [1] G. Lombardi „The role of cohesion in cement grouting of rock“, CIGB 15 Congrès des Grands Barrages, Lausanne 1985, Q.58, R.13, pp 235.261.
- [2] G. Lombardi, D. Deere. „Grouting design and control using the GIN principle“, Water power and Dam construction , June 1993, pp 15-22.
- [3] R. Bremen „Use of additives in cement grouts“, The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 4, Issue 1, 1997, pp71-76.
- [4] G. Lombardi. „Considérations générales sur l'injection des massifs rocheux“, Symposium sur l'injection, Rabat février 2007.

Injektionen als Bauhilfsmassnahmen – Teil 2: Injektionstechnische Massnahmen zur Herstellung, Sicherung und Sanierung von Tunnelbauwerken

Dr. Roger Bremen
Lombardi AG

1 Einleitung

Im ersten des Vortrages haben wir uns mit einigen wesentlichen Grundlagen der Injektionen im Bauwesen befasst sowie generelle Aspekte einer Injektionsmassnahme kurz beschrieben. Es erscheint mir hier noch einmal wichtig die Bedeutung dieser verschiedenen Phasen zu unterstreichen um häufig auftretende Missverständnisse bei unbefriedigende Injektionsergebnisse möglichst zu vermeiden.

In diesem zweiten Teil werden wir gewisse Aspekte etwas vertieft behandeln und die praktische Umsetzung gewisser Konzepte darstellen. Es ist dabei in erster Linie zu erwähnen dass bei der Anwendung von Injektionen glücklicherweise praktisch keine Normengrundlage zur Verfügung steht und das die Anwendung von Kochbuchrezepten immer mit einer gewissen Skepsis zu beurteilen ist. Jede Injektionsmassnahme ob in Fels, Boden oder Beton muss immer aufs neue untersucht werden um das beste Lösungskonzept zu identifizieren. Dessen praktische Umsetzung muss im Voraus anhand von Vorversuchen überprüft und allenfalls optimiert werden. Erfahrung dient dabei höchstens um vergangene Fehler möglichst zu vermeiden.

2 Injektionsgut

2.1 Grundlagen

Auch wenn im wesentlichen der ausgehärtete Zustand des Injektionsgutes für die Erfüllung der Zielsetzungen in den meisten Fällen massgeblich ist, muss auch der flüssige Zustand berücksichtigt werden um das bestmögliche Injektionsgut identifizieren zu können und somit das angestrebte Resultat so gut wie möglich zu erreichen.

Das ideale Injektionsgut weist im flüssigen Zustand eines den Anforderungen entsprechende Durchdringungs-

vermögen („nicht zu viel, nicht zu wenig“), auf, wird nicht ausgewaschen, und weist sofort nach dem Abschluss der Injektion die angestrebten mechanischen Eigenschaften auf. Dabei ist nicht nur die Festigkeit von Bedeutung sondern ebenfalls die Haftung am Injektionskörper und die Dauerhaftigkeit. Schliesslich muss das Injektionsgut natürlich noch Kostengünstig sein.

Trotz bedeutender Fortschritte bei der Entwicklung von Injektionsprodukten sind wir leider von diesen idealisierten Eigenschaften noch weit entfernt. Die Wahl eines Injektionsgutes oder dessen Zusammensetzung stellt immer eine Kompromisslösung dar bei welcher die verschiedenen Anforderungen im flüssigen und im ausgehärteten Zustand abzuwiegen sind. Ohne in der Folge in einer detaillierten Beschreibung aller möglichen Anwendungen eingehen zu wollen, werden im Bauwesen grundsätzlich folgende Injektionsgutfamilien eingesetzt:

- Zementschlämme
- Harze
- Silikate

Jede der obenerwähnten Produktfamilie kann in sehr unterschiedlichen Formen eingesetzt werden. Insbesondere gibt es bei den Harzen unzählige Zusammensetzungen welche deren Eigenschaften während und nach der Injektion sehr bedeutend beeinflussen. Es ist somit unmöglich die Anwendungsbereiche und Einsatzmöglichkeiten zusammenfassend zu umschreiben. Grundsätzlich ist zu den Produktfamilien folgendes zu erwähnen:

- **Zementschlämme** sind bei weitem die meist angewendeten Injektionsgute. Sie sind kostengünstig und relativ einfach in der Verarbeitung. Im festen Zustand weisen sie normalerweise gute mechanische Eigenschaften auf. Die Haupteinschränkung in der Anwendung von

Zementschlämmen liegt in der Behandlung von feinen Rissen und Klüfte. Beim Einsatz von Normalzement sind Risse mit einer Weite unterhalb von 0.3 mm praktisch nicht injizierbar, während die untere Grenze bei etwa 0.1 mm liegt falls Feinstzemente eingesetzt werden.

- **Harze** werden in sehr unterschiedlichen Formen eingesetzt. Von Polyurethanharzen bis zu Epoxydharzen variieren die Eigenschaften im flüssigen sowie im festen Zustand sehr bedeutend. Im allgemeinen ist die Anwendung von Harzen aufwendiger und komplexer als Zementsuspensionen. Der Einfluss der Temperatur auf der Polymerisierung ist bedeutend und die Präsenz von Wasser kann in machen Fällen zur Emulsionierungen führen.
- **Silikate** werden im Bauwesen zur Behandlung von Böden oder stark zerklüfteten Felsen regelmässig eingesetzt. Sie verwandeln sich in Gele, die normalerweise so etwas wie ein Mitteilung zwischen Flüssigkeit und Festkörper sind. Im „festen“ Zustand sind somit die mechanischen Eigenschaften eher mittelmässig, hingegen wiesen sie ein sehr gutes Durchdringungsvermögen auf und sind eher kostengünstig. Bei Silikaten haben sich in der Vergangenheit Umweltverträglichkeitsprobleme ergeben welche heute wenigstens zum Teil gelöst wurden.

Bei der Wahl des geeigneten Injektionsgutes sind somit folgende Aspekte im flüssigen Zustand zu berücksichtigen:

- Eigengewicht sowie rheologische Parameter (Viskosität, Kohäsion),
- Durchdringungsvermögen im allgemeinen,
- Stabilität, Auswaschbarkeit, Reaktionszeit.

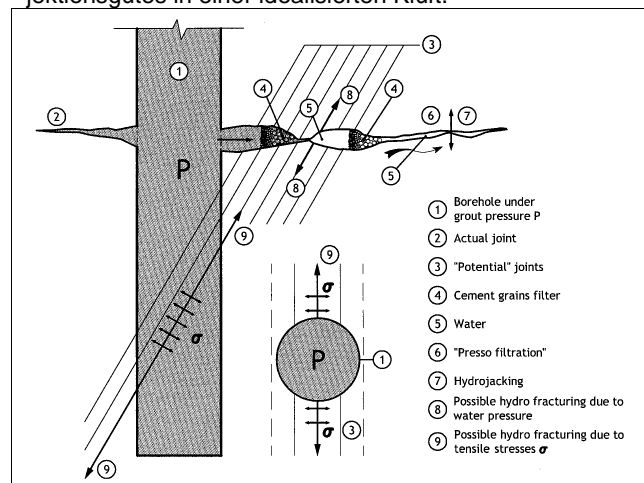
Diese Eigenschaften sind beim Injektionsvorgang von Bedeutung und sind somit bei der Bestimmung des Injektionsablaufes zu berücksichtigen. Im „festen“ Zustand sind hingegen folgende Eigenschaften von Bedeutung:

- Mechanische Eigenschaften und Haftungseigenschaften,
- Durchlässigkeit,
- Dauerhaftigkeit unter den verschiedenen Einflüssen (chemisch und mechanisch),
- Kosten.

Diese Eigenschaften sind gemäss den Projektanforderungen festzulegen und werden somit aufgrund der Zielsetzungen bestimmt.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Zementschlamm ist zu erwähnen dass nur die Verwendung von stabilen Suspensionen (weniger als 5% Absetzmass nach 2 Std.) zu qualitativ zufriedenstellenden Resultaten führt. Wasserüberschüssige Suspensionen wiesen allenfalls ein besseres Durchdringungsvermögen des Wassers auf, hingegen weist der Zementanteil kein besseres Durchdringungsvermögen auf. In Bild 1 sind die möglichen Fließzustände innerhalb einer Kluft unter Einsatz einer nichtstabilen Suspension dargestellt. Viele praktische Anwendungsbeispiele haben bestätigt dass die in einer Kluft injizierte Zementmenge vom W/C Faktor eher unabhängig ist. Hingegen muss beim Einsatz von nichtstabilen Suspensionen der Injektionsvorgang mehrmals wiederholt werden was die Gesamtdauer der Injektion wesentlich verlängert.

Bild 1: Mögliche Fließzustände eines nichtstabilen Injektionsgutes in einer idealisierten Kluft.



Weiter ist zu erwähnen dass stabile Suspensionen bedeutend bessere mechanische Eigenschaften im festen Zustand aufweisen als nichtstabile.

Es ist hier nochmals darauf hinzuweisen dass alle oben-erwähnten Anforderungen ausgewogen zu bewerten sind. Hohe mechanische Ansprüche des Injektionsgutes können z. Bsp. nur zu Lasten des Durchdringungsvermögens oder der Kosten erreicht werden. Bei der Festlegung der Anforderungen an das Injektionsgut im flüssigen und im festen Zustand darf somit kein Aspekt vernachlässigt weder bevorzugt werden. Es wird leider oft festgestellt dass gewisse Eigenschaften wie die Druckfestigkeit eines Injektionsgutes überbewertet werden was die Bestimmung einer optimalen Injektionsmischung wesentlich erschwert.

Schliesslich ist zu erwähnen dass dem Projektgenieur eine grosse Anzahl von fast „wunderwirkenden“ Zusatzmitteln angepriesen werden. Von Bentonit über Superverflüssiger bis hin zu Thixotropischen Zusatzmittel sind die Möglichkeiten fast grenzenlos. Wenn gewisse Zusatzmittel ohne Zweifel die Eigenschaften des Injektionsmittels insbesondere in der flüssigen Form wesentlich verbessern können muss man sich den „Nebenwirkungen“ bewusst sein. Weiter ist die Wirkungsdauer gewisser Zusatzmittel kritisch zu hinterfragen und auf jeden Fall im Voraus zu prüfen. Ein Injektionsschlamm mit einer möglichst einfachen Zusammensetzung kann vielleicht etwas unwissenschaftlich erscheinen, hat aber oft den Vorteil dass der Einfluss der verschiedenen Komponenten überschaubar bleibt.

3 Injektionsprinzipien

3.1 Injektionsvorgang

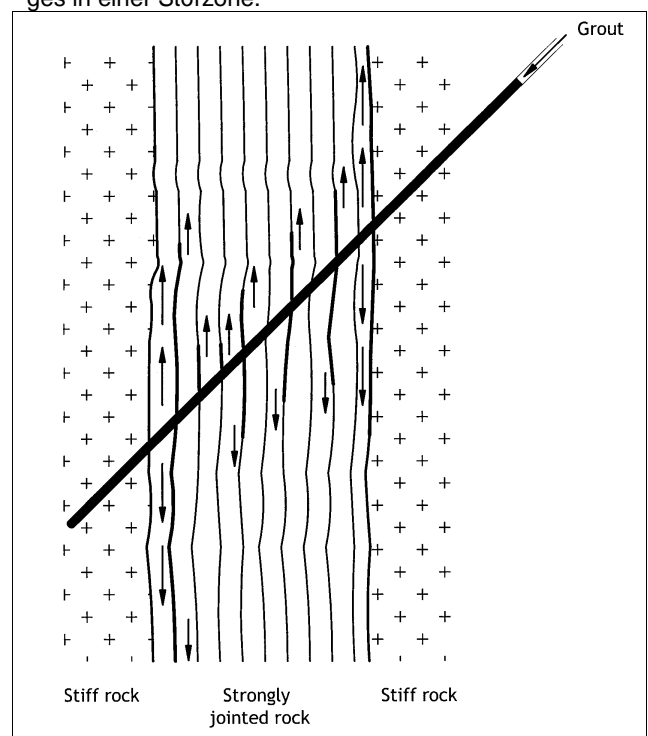
Das Injektionsprinzip besteht darin in Hohlräume oder Felsklüfte eine Flüssigkeit einzupressen welche dann im weitem Verlauf Ihre physikalischen Eigenschaften ändert und die gewünschte Verbesserung der mechanischen und/oder hydraulischen Eigenschaften herbeiführt. Dieses relativ einfache Prinzip ist in der Wirklichkeit nicht immer ohne Probleme umzusetzen.

Soll die Festigkeit des Gebirges verbessert werden, so muss das Injektionsgut nicht nur erhöhte Festigkeiten

erreichen, sondern auch mit genügend Kraft an den Oberflächen haften. Mit anderen Worten, Injizieren heisst teilweise die sich aus dem Zusammenpressen der Fugen und dem Herausdrücken des Wassers ergebende Verformbarkeit verhindern. Die Beschaffenheit des Felsgesteins ist hingegen kaum veränderbar, ebenfalls wie das Verfüllen von feinen Klüften nur ausnahmsweise möglich ist. Bild 2 veranschaulicht wie nur die grösseren Klüfte injiziert werden. Um ebenfalls die feineren Klüfte mit Injektionsgut zu verpressen sind mehr als ein Injektionsgang notwendig.

Um den Fortschritt der Verfüllung einer Kluft etwas näher zu untersuchen müssen einige Modellannahmen herangezogen werden welche nur teilweise der Realität entsprechen.

Bild 2: Schematische Darstellung des Injektionsvorganges in einer Störzone.



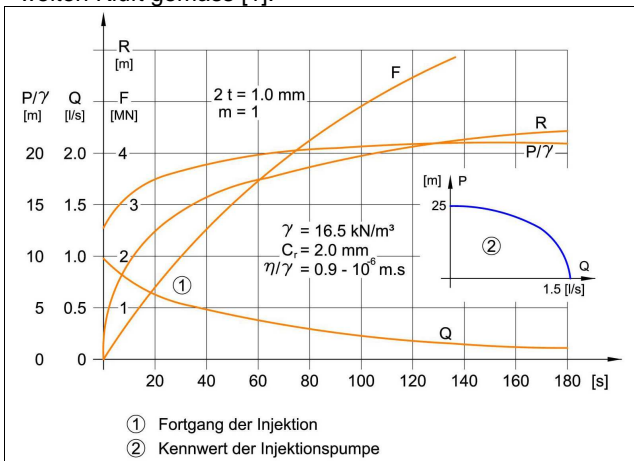
Ohne hier in den numerischen Berechnungen eingehen zu wollen wird in Bild 3 als Beispiel der theoretische Injektionsvorgang einer stabilen Zementsuspension (Binghamische Flüssigkeit) in einer 1.0 mm breiten Kluft dargestellt. Dabei ist „Q“ die Fliessmenge, „R“ der Injektionsradius vom Bohrloch gemessen, „F“ die gesamte Auftriebskraft, und „P“ der Injektionsdruck. Alle Parameter werden als Funktion der Zeit dargestellt. In Bild 4 wird für das gleiche Beispiel die Änderung der Druckver-

teilung im Verlauf der Zeit dargestellt. Es ist interessant zu bemerken dass für eine Zementsuspension ein maximaler Injektionsradius erreicht wird. Dieser Radius kann anhand der Gleichung:

$$R_{\max} = P_{\max} \cdot t / C \quad (1)$$

bewertet werden, wobei „t“ die Halbweite der Kluft“ und „C“ die innere Kohäsion des Injektionsgutes ist. Hierzu ist zu erwähnen dass wegen der Unregelmässigkeit realer Klüfte gegenüber den Modellannahmen der maximale Radius in der Praxis etwa 2 bis 10 mal geringer ist als nach Gl(1).

Bild 3: Beispiel des Injektionsvorganges in einer 1.0 mm weiten Kluft gemäss [1].

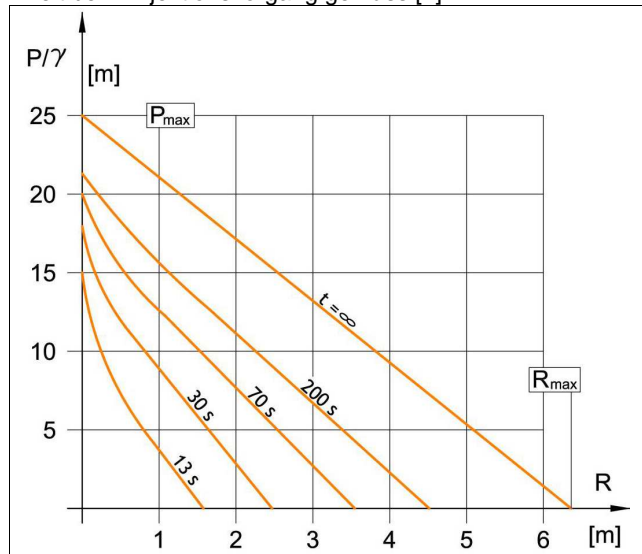


Zu bemerken dass bei einer Newtonischen Flüssigkeit wie Wasser die Distanz gemäss Gl(1) unendlich ist. Hingegen steigt die Aufreisskraft beim injizieren mit Wasser bedeutend mehr an als beim Injizieren von einer Zementsuspension.

Das Injektionsgut breitet sich somit schneller in breiten Klüften aus als in feineren was zur bekannten Schliessung der letzteren führen kann. Eine bessere Abdichtung, aber ebenfalls eine Konsolidierung des Gebirges kann somit nur in mehreren Arbeitsgängen vorgenommen werden, wobei der Abstand zwischen den Bohrlöchern ab- und die Injektionsdrücke von einer Bohrserie zur nächsten zunehmen müssen.

Die Anzahl der Arbeitsgänge hängt im wesentlichen von der Variabilität des Injektionskörpers ab sowie von zu erreichenden Zielsetzungen der Injektionsmassnahme.

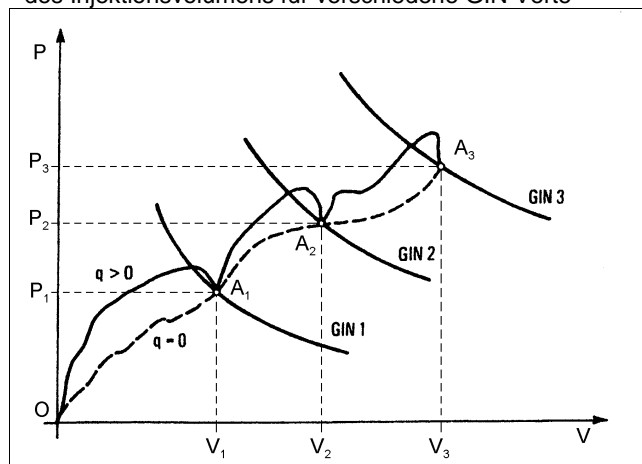
Bild 4: Druckverteilung als Funktion der Distanz und der Zeit beim Injektionsvorgang gemäss [1].



3.2 Das GIN Konzept

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen ergibt sich dass ein konstanter Injektionsradius für ein gegebenes Injektionsgut bei konstanter Injektionsintensität dass heisst bei konstantem Produkt der Injektionsmenge oder Injektionsvolumen „V“ mit dem Injektionsdruck „P“ erreicht wird. Dieses Produkt weist die Einheit der Energie auf. Mit anderen Worten ist für einen gegebenen Injektionsradius das Produkt des Injektionsvolumens mit dem Injektionsdruck immer das gleiche, unabhängig von der Rissweite. In Bild 5 wird das Produkt des Injektionsvolumens mit dem Injektionsdruck für verschiedene Konstanten dargestellt.

Bild 5: Darstellung des Injektionsdruckes als Funktion des Injektionsvolumens für verschiedene GIN Werte



Das Grundkonzept der GIN Methode (Grouting Intensity Number) beruht somit auf der Idee im wesentlichen nicht das Injektionsvolumen oder den Injektionsdruck, sondern deren Produkt zu begrenzen. Die Anwendung der GIN Methode beruht somit auf folgende einfache Grundregeln:

- Nur stabile Suspensionen einsetzen.
- Wahl des Injektionsgutes in erster Linie aufgrund der Zielsetzungen und nicht aufgrund der Anwendungseinfachheit.
- Möglichst nur eine Mischung einsetzen. Falls verschiedene Mischungen eingesetzt werden müssen diese unterschiedliche maximale Korngrösse aufweisen. Der W/C Faktor hat auf das Durchdringungsvermögen des Zementes keinen bedeutenden Einfluss.
- Permanente Kontrolle des Injektionsvorganges um die progressive Reduktion der injizierten Mengen zu prüfen.

Bei der GIN Methode ist es somit notwendig drei Parameter zu bestimmen:

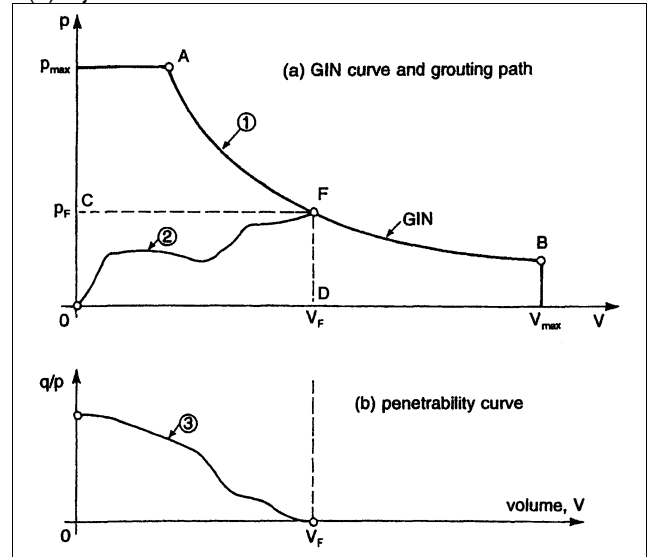
- Der maximale Injektionsdruck
- Das maximale Injektionsvolumen pro Laufmeter Bohrloch,
- Die Injektionsintensität als Produkt des Injektionsvolumens und des Injektionsdruckes ebenfalls pro Laufmeter Injektionsbohrung.

In Bild 6 ist eine typische GIN Kurve mit den drei Grenzbereichen Grenzwerten (Druck und Volumen) dargestellt. Grundlagen zur Bestimmung der GIN Parameter sind in [2] behandelt. Es ist zu erwähnen dass bei der Anwendung der GIN Methode folgende Abbruchkriterien anzuwenden sind:

- Der maximale Injektionsdruck wird erreicht.
- Das maximale Injektionsvolumen pro Laufmeter Bohrloch wird erreicht, oder
- Die GIN Konstante wird erreicht.

Es ist aber eindeutig zwischen Abbruchkriterium und Erreichen der Zielsetzung zu unterscheiden.

Bild 6: Typische GIN Kurve mit Druck und Volumengrenze. (1) GIN-Grenzwert, und (2) Injektionsvorgang, und (3) Injektionsrate.



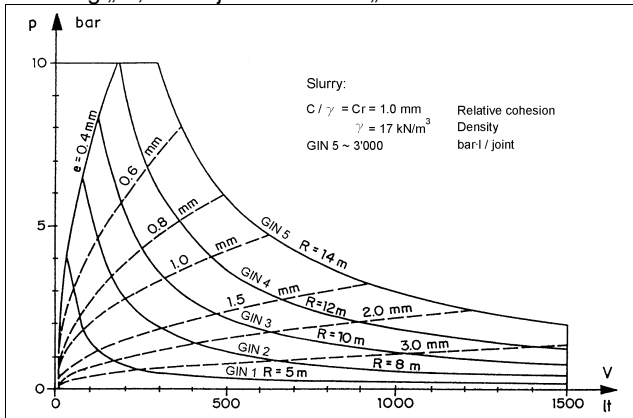
Wird der maximale Injektionsdruck erreicht, so ist dies ein Anzeichen einer bescheidenen Aufnahme des Injektionsgutes. Eine weitere Verbesserung des Injektionsresultates mit der eingesetzten Mischung ist somit nicht möglich.

Wird hingegen das maximale Injektionsvolumen bei geringem Druck erreicht so sind allenfalls Massnahmen zu treffen um das Durchdringungsvermögen anzupassen, ausser es werden karstähnliche Hohlräume mit dem Injektionsgut gefüllt.

Wird schliesslich der GIN Wert erreicht, so scheinen die gewählten Injektionsparameter angemessen zu sein. Im Idealfall wird natürlich in einem ersten Gang der GIN Wert eher bei geringen Drücken erreicht was bedeutet dass eher die breiteren Klüfte injiziert werden. In einem zweiten oder allenfalls dritten Gang wird der GIN Wert dann bei höheren Drücken erreicht was auf ein progressives injizieren der feineren Klüfte deutet. Bei gewissen Injektionsmassnahmen wurde z. Bsp. festgehalten dass eine Injektion als zufriedenstellend gilt wenn der GIN Wert bei mindestens halbem Maximaldruck erreicht wird. Sollte dies nicht der Fall sein ist ein weiterer Injektionsgang notwendig, dies um die feineren Klüfte auszupressen.

In Bild 7 wird als Beispiel die Injektion einer einzigen Kluft dargestellt. Dabei werden für verschiedene GIN Werte der Injektionsradius sowie die entsprechende Kluftweite angezeigt.

Bild 7: Beispiel der Injektion einer einzigen Kluft. Beziehung zwischen druck „P“, Injektionsvolumen „V“, Kluftöffnung „e“, und Injektionsradius „R“.



Wie schon erwähnt zeigt das Bild wie bei einem Konstanten GIN Wert der Injektionsradius konstant bleibt. Hingegen werden bei geringen Drücken die offenen Klüfte injiziert, während nur bei höheren Drücken ebenfalls die feineren bis zur gleichen Distanz ausgepresst werden.

4 Vorversuche

Mit wenigen Ausnahmen sind vor der Ausführung von Injektionen die anzusetzenden Injektionsmittel in einem Versuch zu prüfen.

Dabei ist grundsätzlich zwischen Injektionsgute auf Zementbasis und andere Injektionsmittel zu unterscheiden.

Bei Zementsuspensionen sind die Versuche immer in zwei Phasen abzuwickeln. In einer ersten Phase geht es darum die rheologischen Parameter zu prüfen. Diese Parameter können sich je nach Zementtyp, Wasserqualität und allenfalls Zusatzmittel wesentlich ändern. Es sind zwar Richtwerte bekannt [3], diese sind aber bei jeder spezifischen Anwendung unter den jeweiligen Bedingungen neu zu prüfen.

Da es sich bei der Anwendung von Harzen oder Silikaten normalerweise um Industrieprodukte handelt, sind deren rheologische Eigenschaften üblicherweise be-

kannt und müssen nur in Ausnahmefälle nochmals spezifisch ermittelt werden. Der Einfluss der Verschiedenen Faktoren wie Temperatur und Druck werden ebenfalls systematisch untersucht.

Die zweite Versuchsphase sollte bei allen Injektionsmassnahmen durchgeführt werden. Dabei geht es um die Überprüfung des Verhaltens des Injektionsgutes während der Injektion. Insbesondere sind bei diesem Versuch folgende Aspekte zu untersuchen:

- Die Bauinstallationen.
- Das Durchdringungsvermögen des Injektionsgutes.
- Das zeitliche Verhalten des Injektionsgutes.
- Die Eigenschaften des injizierten Körpers.

Leider wird oft aus verschiedenen Überlegungen auf Injektionsversuche verzichtet. Die Injektionsmassnahme wird dann oft als gesamtes zum Versuch was natürlich meistens zu Verzögerungen und qualitativ nicht unbedingt optimalen Resultaten führt.

Nur infolge der Auswertung aller Versuche ist es möglich das/die Injektionsmittel definitiv festzulegen und den Ablauf der Injektionsmassnahmen zu bestimmen.

5 Kontrollen während und nach dem Injektionsvorgang

5.1 Kontrollen während des Injektionsvorganges

Ziel der Kontrollen während des Injektionsvorganges ist einerseits zu prüfen ob die Eigenschaften des Injektionsgutes sowie der Injektionsablauf den gestellten Anforderungen entsprechen. Andererseits erlauben nur die Kontrollen des Injektionsvorganges gewisse Anpassungen vorzunehmen. Wie schon erwähnt ist aufgrund des Injektionsverhaltens zu beschliessen ob ein zweiter oder allenfalls ein dritter Injektionsgang notwendig ist. Die Grundlagen zu dieser Beschlussfassung beruhen nur auf das beobachtete Verhalten. Während des Injektionsvorganges werden somit normalerweise mindestens folgende Parameter aufgenommen:

- Die Bohrparameter.
- Die reologischen Parameter des Injektionsgutes inkl. Absetzmass bei Zementsuspensionen.
- Temperatur des Injektionsgutes sowie des zu injizierenden Körpers.
- Mechanische Eigenschaften des festen Injektionsgutes.
- Druck und Injektionsvolumen sowie GIN wert im falle das die GIN Methode angewendet wird.

Es wird leider oft festgestellt dass zwar eine Unmenge von Daten aufgenommen werden, diese aber nicht oder nur nach Abschluss der Injektionsmassnahme ausgewertet werden. In diesem fall ist natürlich eine Optimierung der Injektionsmassnahme nicht mehr möglich.

5.2 Kontrollen nach dem Injektionsvorgang

Das Ziel der Überprüfungen am Schluss der Injektionsmassnahme ist eindeutig das Erfüllen der Zielsetzung zu prüfen. Die anzuwendende Prüfmethode ist somit von den Zielsetzungen abhängig und sollte schon frühzeitig bei der Planung der Injektionsmassnahme bestimmt werden.

In gewissen Fällen wie z. Bsp. bei der Abdichtung eines Tunnelabschnittes erweist sich die Kontrolle relativ einfach da die im Tunnel austretende Wassermenge einfach gemessen werden kann.

In anderen Fällen wie z. Bsp. bei der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften einer Störzone erweist sich die Überprüfung schwieriger wenn nicht aus technischen und logistischen Gründen ganz und gar unmöglich.

Grundsätzlich sollten die Zielsetzungen der Injektionsmassnahme so bestimmt werden dass sie auch quantitativ und nicht nur qualitativ überprüfbar sind. Die Kontrolle von Integralwerte wie Wasserzufluss, Druckabbau oder allgemeine Verformungen sind dabei den lokalen Werten (Permeabilität, Spannungen, usw.) vorzuziehen.

6 Schlussbemerkungen

Im vorliegenden Beitrag wurden einige Grundprinzipien zur Injektionsproblematik zusammengefasst.

Insbesondere wurden einige wesentliche Konzepte dargestellt welche erlauben die Zusammenhänge sowie die Grenzen der Injektionen anhand von Modellüberlegungen darzustellen. Trotz der Komplexität der Vorgänge und der Schwierigkeit einer Voraussage des Verhaltens eines Injektionsgutes erscheint es möglich anhand einfacher Modellüberlegungen gewisse Schlussfolgerungen zu ziehen und diese bei der Projektierung von gewissen Injektionsmassnahmen anzuwenden.

Man muss sich natürlich auch den Grenzen dieser Modellüberlegungen bewusst sein, welche insbesondere mit den oft geringen Kenntnissen des zu injizierenden Körpers zusammenhängen.

7 Referenzen

- [1] G. Lombardi „Grouting of Rock masses“ 3th International Conference o Grouting and Grout Treatment, New Orleans, February 9-12, 2003.
- [2] G. Lombardi „Selecting the grouting intensity“, Grouting design and control using the GIN principle“, The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 3, Issue 4, 1996, pp62-66.
- [3] R. Bremen „Use of additives in cement grouts“, The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 4, Issue 1, 1997, pp71-76.
- [4] G. Lombardi. „Grouting of rock with cement mixes » ICOLD Syposium Antalya, September 1999.