

66. GEOMECHANIK KOLLOQUIUM
11.-14. OKTOBER 2017
SALZBURG CONGRESS, ÖSTERREICH



ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK



Tagungsband zum Spezialseminar INJEKTIONEN

ABGEHALTEN IM ZUGE DES
66. GEOMECHANIK KOLLOQUIUM

HERAUSGEBER W. SCHUBERT & A. KLUCKNER

TAGUNGSBÄNDER ZU DEN SPEZIALSEMINAREN
ABGEHALTEN IM ZUGE DES

66. GEOMECHANIK KOLLOQUIUM

11.-14. Oktober 2017
Salzburg, Österreich

Herausgegeben von

W. Schubert

*Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz
Graz, Österreich*

A. Kluckner

*Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz
Graz, Österreich*

Organisiert von

Österreichische Gesellschaft für Geomechanik

INJEKTIONEN

11. Oktober 2017
Salzburg, Österreich

Organisiert von

Oliver Kai Wagner

ÖBB-Infrastruktur AG

Griesgasse 11/1, 8020 Graz, Österreich

oliverkai.wagner@oebb.at

Alois Vigl

viglconsult ZT

Batloggstrasse 52a, 6780 Schruns, Österreich

alois.vigl@viglconsult.at

Andreas Walter

viglconsult ZT

Batloggstrasse 52a, 6780 Schruns, Österreich

andreas.walter@viglconsult.at

Moderiert von

Oliver Kai Wagner

ÖBB-Infrastruktur AG, Graz, Österreich

Alois Vigl

viglconsult ZT, Schruns, Österreich

Titelbild: <https://de.fotolia.com/id/38163825>, Nejrion Photo

Der Inhalt der Beiträge in dieser Ausgabe wurde gesondert und in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Autoren gesetzt.

© Copyright 2017: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Innsbrucker Bundesstraße 67, 5020 Salzburg, Österreich,
P.: +43 662 875519, F.: +43 662 886748, E.: salzburg@oegg.at, Web: www.oegg.at

Gedruckt in Österreich: Medienfabrik Graz GmbH, Dreihackengasse 20, 8020 Graz, Österreich

1. Auflage: 140 Stück

Inhalt

Agenda	IV
Vorwort	V
Was treibt das Injektionsgut an – und wohin? <i>Stadler, G. & Reichl, I.</i>	1
Rheologische und mechanische Eigenschaften von zementgebundenen Injektionsstoffen <i>Kainrath, A., Hornich, W. & Wannemacher, H.</i>	13
Baugrundverbesserung durch chemische Injektionen mit Acrylatgelen <i>Tintelnot, G. & Hoiser, S.</i>	17
Chemische Injektionen – Schäume und Harze auf PU und PUS Basis <i>Mayr, R. & Wyink, U.</i>	23
Baulos SBT3.1: Planung und Vertragsgestaltung für Injektionsmaßnahmen beim Schacht Sommerau 2 <i>Wagner, O.K., Walter, A. & Druckfeuchter, H.</i>	29
Baulos SBT3.1: Bohr- und Injektionsarbeiten für den Schacht Sommerau 2 <i>Wannemacher, H., Pfeffer, R., Christöphl, B. & Walter, A.</i>	35
Injektionsplanung und Vertragsgrundlagen bei Wasserkraftanlagen – Druckstollen und Druckschächten <i>Bonapace, P.</i>	41
Die Anwendung der Injektion im Druckstollenbau <i>Gerstner, R.</i>	49

Agenda

Uhrzeit	Programmpunkt / Beitragstitel	Autoren / Vortragende / Moderatoren
10.30 – 10.40	EINFÜHRUNG SEMINAR	Wagner, Vigl
10.40 – 11.10	Was treibt das Injektionsgut an – und wohin?	Stadler, Reichl
11.10 – 11.30	Rheologische und mechanische Eigenschaften von zementgebundenen Injektionsstoffen	Kainrath, Hornich, Wannemacher
11.30 – 11.50	Baugrundverbesserung durch chemische Injektionen mit Acrylatgelen	Tintelnot, Hoiser
11.50 – 12.10	Chemische Injektionen – Schäume und Harze auf PU und PUS Basis	Mayr, Wyink
12.10 – 13.00	MITTAGESSEN	
13.00 – 14.30	Anwendungsparcours zu zementgebundenen und chemischen (Gele, Schäume) Injektionen	Kainrath, Hornich, Wannemacher, Tintelnot, Hoiser, Mayr, Wyink
14.30 – 14.50	KAFFEIPAUSE	
14.50 – 15.10	Baulos SBT3.1: Planung und Vertragsgestaltung für Injektionsmaßnahmen beim Schacht Sommerau 2	Wagner, Walter, Druckfeuchter
15.10 – 15.30	Baulos SBT3.1: Bohr- und Injektionsarbeiten für den Schacht Sommerau 2	Wannemacher, Pfeffer, Christöphl, Walter
15.30 – 15.50	PAUSE / DISKUSSION	
15.50 – 16.10	Injektionsplanung und Vertragsgrundlagen bei Wasserkraftanlagen – Druckstollen und Druckschächten	Bonapace
16.10 – 16.30	Die Anwendung der Injektion im Druckstollenbau	Gerstner
16.30 – 17.00	DISKUSSION / RESÜMEE / SCHLUSSWORTE	Wagner, Vigl

Vorwort

Injektionen sind als bautechnische Maßnahme im Grundbau gleichermaßen wie im Untertagebau zunehmend nicht mehr wegzudenken. Die Möglichkeit die Baugrundeigenschaften von Böden und des Gebirgsverbandes im Sinne eines beabsichtigten bautechnischen Konzeptes beeinflussen zu können, eröffnet wirtschaftlich und technisch bedeutende Perspektiven.

Sosehr man allerdings mit den Möglichkeiten, welche Boden- und Gebirgsinjektionen bieten, oft übertriebene Erwartungshaltungen verknüpft, sosehr wird mitunter die Komplexität der Interaktion zwischen dem zu injizierenden Medium, dem Injektionsgut und dem Injektionsvorgang sowie dem damit einhergehenden Bauablauf unterschätzt. Wesentliche Elemente für eine realitätsnahe Erfassung der oben beschriebenen Komplexität stellen zweifelsohne ein gutes chemisches und physikalisches Grundverständnis, ein Bezug zum Verhalten und zur Handhabung von Injektionsmitteln, ein praktischer Zugang zu Injektionsvorgängen sowie allem voran ein offener Erfahrungsaustausch über diese Elemente dar.

Dies hat die ÖGG dazu bewogen, in Fortsetzung des erfolgreichen Workshops Injektionen im Jahr 2015, bei dem es vornehmlich um das Verständnis der „Injektionsnorm“ ÖNORM EN 12715 ging, auch 2017 einen Workshop Injektionen durchzuführen. Der Schwerpunkt liegt diesmal beim Verkehrstunnelbau sowie beim Bau von Hochdruck-Wasserkraftanlagen und der Anwendung der dort gängigsten Injektionsmittel. Speziell wird dabei auf die Technologie zementgebundener und chemischer Injektionsmittel sowie auf deren Anwendung im Untertagebau wie folgt eingegangen:

- Einführung in die Anwendung der Injektionsmittel hinsichtlich Grundlagen, Einsatzbereich und Materialtechnologie.
- Anwendungsparcours, bei dem die wichtigsten Materialeigenschaften sowie deren Prüfung in einem Stationsbetrieb für die einzelnen Injektionsmittel vorgeführt und erläutert werden.
- Erfahrungsberichte zur Anwendung unterschiedlicher Injektionstechnologien und Injektionsmittel aus dem Anwendungsbereich des Verkehrstunnelbaus sowie des Baus von Hochdruck-Wasserkraftanlagen.

Der vorliegende Tagungsband zum Workshop Injektionen gibt in gekürzter Form die Inhalte der Impulsreferate wieder. Der Anwendungsparcours lässt sich durch Beiträge nicht ersetzen, stellt er doch einen komplementären Teil für das Verständnis von Injektionsanwendungen dar.

Die Organisatoren des Workshops möchten sich auf diesem Wege bei der ÖGG für die Idee zu diesem Workshop und für die Verknüpfung mit dem 66. Geomechanik Kolloquium bedanken. Dies trägt wesentlich dazu bei, die Inhalte einem breiten Fachpublikum zugänglich machen zu können. Den Vortragenden und den Instruktoern sei herzlich für ihre Bereitschaft gedankt, eine derart fokussierte Wissensvermittlung erst zu ermöglichen. Zuletzt sei ganz herzlich dem Sekretariat der ÖGG und Herrn Dipl.-Ing. Alexander Kluckner dafür gedankt, dass dieser Tagungsband in dieser Form rechtzeitig erscheinen konnte.

Oliver Kai Wagner, Alois Vigl und Andreas Walter

Was treibt das Injektionsgut an – und wohin?

Gedanken zu den Grundlagen der Injektionstechnik:
„Ausbreitungsgesetze“, Injektions-Regeln/Abbruchkriterien, Erfolgskontrolle

Gert Stadler
Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Ignaz Reichl
Turner & Townsend, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Injektionsarbeiten gehören auch heute noch - trotz der allgemeinen hohen Wissensstandards - zu den wenigen technischen Leistungen, die immer noch mit vielen offenen Fragen und Unsicherheiten behaftet sind. Der Anschein der schwarzen Magie, welcher dieses Bauverfahren in einen Nebel einhüllt, spiegelt komplexe und komplizierte Folgen von Ausführungsschritten in Kombination einem nicht im letzten Detail erkundbaren Untergrund und mit komplexen theoretischen Grundlagen wider. Was treibt das Injektionsgut an, die Hohlräume und in welcher Reichweite zu verfüllen? Gibt es Gesetze dafür? Wo gelten sie? Wichtige Aspekte von Planung zur Umsetzung bis hin zur Erfolgskontrolle werden in diesem Artikel beschrieben.

1 GRUNDSÄTZLICHE ZU INJEKTIONEN

Die Angemessenheit und Erfolgchance eines Injektionsprojektes wird von Experten im Vorfeld jeweils abweichend beurteilt - je nach persönlicher Übung, eigenen Erfahrungen mit unterschiedlichen Mitteln oder je nach Übernahme der Vertriebsmeinung von Herstellern. Die Kenntnis von **vergleichbaren Projekten** ist dabei dann hilfreich und von großem Nutzen, wenn man konkret die **relevanten Eigenschaften** der eingesetzten Mittel, des Untergrunds und der Verarbeitung vergleicht.

Dafür sind gewisse **Grundkenntnisse zu den „Gesetzen der Ausbreitung“** des Injektionsgutes im Untergrund hilfreich. Und obwohl diese „Gesetze“ keine wirklichen Gesetze sondern eher „Gesetzmäßigkeiten“ (also Leitsatz und Richtschnur) sind, helfen diese doch, die Injektionsvorgänge quasi argumentierbarer, nachvollzieh- und vergleichbarer zu machen. In unserem Fall erfolgt diese „Berechenbarkeit“ im Wege geohydraulischer Modellierung, und darüber soll hier eingangs etwas ausgeführt werden.¹

Cambefort (1969) und insbesondere Lombardi (1993) und später Stille, Stille, Gustafson & Kobayashi (2009), aber auch schon Hassler (1977) haben für den Bereich des **Bauingenieurwesens** mit ihren Betrachtungen zu rechnerischen Lösungen für die Ausbreitungs-Gesetzmäßigkeiten des Injektionsgutes in Felsklüften wichtige Beiträge geleistet. Houlby, Warner, Littlejohn und Bruce sind pragmatischere, in dieser Hinsicht weniger penible englischsprachige Pendanten dazu.

¹ Zusätzlich zu diesen „Gesetzmäßigkeiten“ ist es allerdings erforderlich, eine realitätsnahe Vorstellung der Hohlraumstruktur und der hydraulisch, mechanischen Eigenschaften des Gebirges zu modellieren. Danach erst sind Mittel und Verarbeitungsparameter zu wählen.

Allerdings fehlt immer noch die (interdisziplinäre) Berücksichtigung von Erfahrungen etwa der **Erdölwissenschaften**, die dazu schon seit einem knappen Jahrhundert - motiviert durch schwerwiegende wirtschaftliche Zwänge - sich mit Fließvorgängen im Gebirge (zum Bohrloch hin und vom Bohrloch weg) über einen ganz anderen Zugang befassten.

Um es aber vorwegzunehmen: das Ergebnis dieser theoretischen Auseinandersetzung muss in der Regel leider deutlich hinter den Erwartungen der Praxis zurückbleiben. Ursache dafür: **zu viele Unbekannte im System**.

Weil man mit **vielen Unbekannten aber schlecht planen** kann, wird heute in manchen Projekt-spezifikationen - vermutlich in der (allerdings trügerischen) Hoffnung, dass Vereinfachung zu mehr „Planungssicherheit“ führt - auf die vergleichsweise einfacheren „tools“ der 50-er Jahre zurückgegriffen, oder es wird gar mit mutigen, neuartigen Annahmen experimentiert. Der für den österreichischen Fels- und Tunnelbau aber so typische „**Dialog mit dem Gebirge**“ geht dabei oft gänzlich verloren.

Daher zurück zur „Theorie“, in der übrigens dieser NÖT-typische Dialog mit dem Gebirgsverhalten in allen Abbruchkriterien, außer in der GIN und RTGC Methodik, eine Rolle spielt und betrachten wir zu diesem Zweck das Fließen des Injektionsgutes beginnend vom Bohrloch weg. Es beginnt nämlich einigermaßen „regulär“, über den **blanken Verschnitt** Bohrloch/Kluft, kann dann aber

1. die Kluft mit Zerreibsel oder Verwitterungsprodukten teilweise gefüllt vorfinden, unterschiedlich weit und rau
2. oder es sind die Strömungswege nur in Form von „Rinnsalen“ in der Kluftebene ausgebildet, womit nur lineares statt ebenes Ausbreiten möglich wird. Andererseits können
3. Klüfte queren/verschneiden, sodass über diese Art der Vernetzung quasi „räumliches“ 3-dimensionales Fließen stattfindet.

Die drei aufgezeigten Fälle sind praktisch nie - weder im Fels noch im Lockerboden - **radialsymmetrisch**. Es bildet sich weder ein Kreis noch eine injizierte Kugel um die Injektionsstelle aus, und führen diese drei Fälle - für das gleiche Injektionsvolumen - auch zu drei vollkommen unterschiedlichen Reichweiten. Das ist wieder für den zu wählenden Bohrlochabstand essenziell, und für die Bauzeit und Kosten insgesamt in hohem Masse relevant. Wie also den Unterschied erkennen?

Für die Interpretation der **Entölung von Lagerstätten** etwa, werden dafür mittels sog. *well-testing* vorrangig **instationäre** Zustände des Zuflusses zum Bohrloch analysiert (Quelle: <http://petrowiki.org/Type-curves>). In den dafür verwendeten radialen Diffusionsgleichungen werden (neben Druck, Zeit und Viskosität) die allgemeine Kompressibilität (B und c_i) und die im Bohrloch, mit gelösten Gasen belasteten, eingeschlossenen Volumina (*Wellbore storage*, C_d) ebenso berücksichtigt, wie die (auch durch den Bohrvorgang veränderten) Durchlässigkeitsverhältnisse um das Bohrloch (*skin factor*).

Über eine Umformung in dimensionslose Parameter gelingt die Darstellung von **Typenkurven**, in denen die gemessenen realen Daten (des **Druckanstieges oder -abfalls** nach *shut-in*, vgl. später dazu TPA und PSG beim Injizieren!) durch Übereinstimmung zu Lösungen für die Lagerstättendurchlässigkeit, das Lagerstättenvolumen und die *boundaries* (Lagerstättengrenzen, Störungen, Verwerfungen) gebracht werden können.

Verwendet man in der Darstellung dieser Typenkurven die erste Ableitung der gewählten Parameterdaten werden dadurch Mehrdeutigkeiten weiter reduziert (<http://petrowiki.org/Type-curves>: Gleichung (7), Bourdets weiterentwickelte Gleichung nach Gringarten):

$$p_i - p_{wf} = -70,6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\ln \left(\frac{1688\phi\mu c_t r_w^2}{kt} \right) - 2s \right] \quad (1)$$

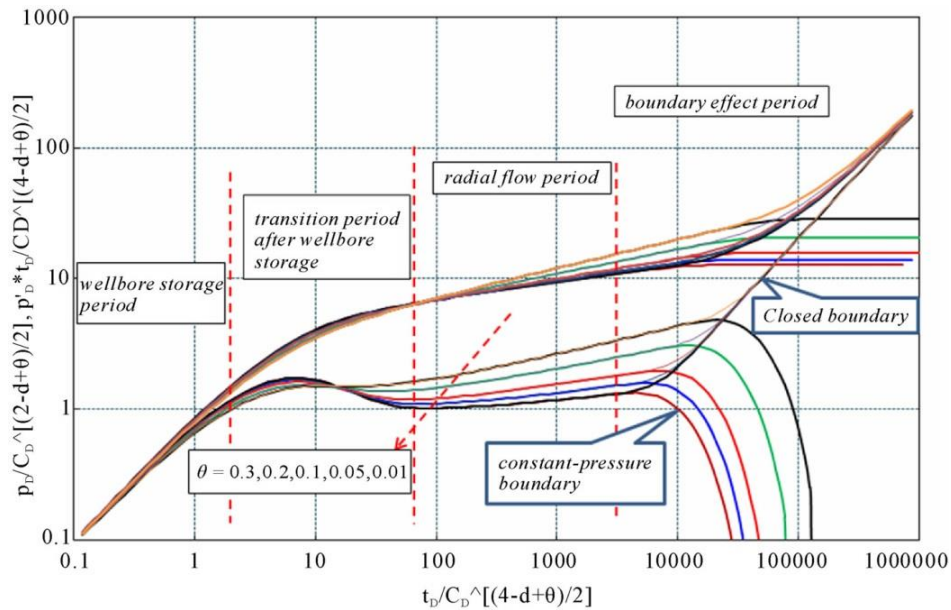


Abbildung 1. Beispiele für Bourdets „DerivativeCurves“, hier für poröses Gestein, [mittels Ansätzen für die „fractal dimension (θ)“ und den „fractal index (d)“ werden von der Homogenität des Reservoirs abweichende Bedingungen simuliert].

Die vorhin gestellte Frage „Wie also den Unterschied erkennen?“ lässt sich demnach z.B.: mithilfe dieser Interpretationstechniken einigermaßen zuverlässig dann erkennen, wenn man den signifikanten Parameter (Druck) über den zeitlichen Verlauf verfolgt und - etwa in Form von log/log Plots - auswertet. Natürlich findet man auch zu dieser Methodik kritische Meinungen, u.a. dass die Fluide sich grundsätzlich unterscheiden, etc.

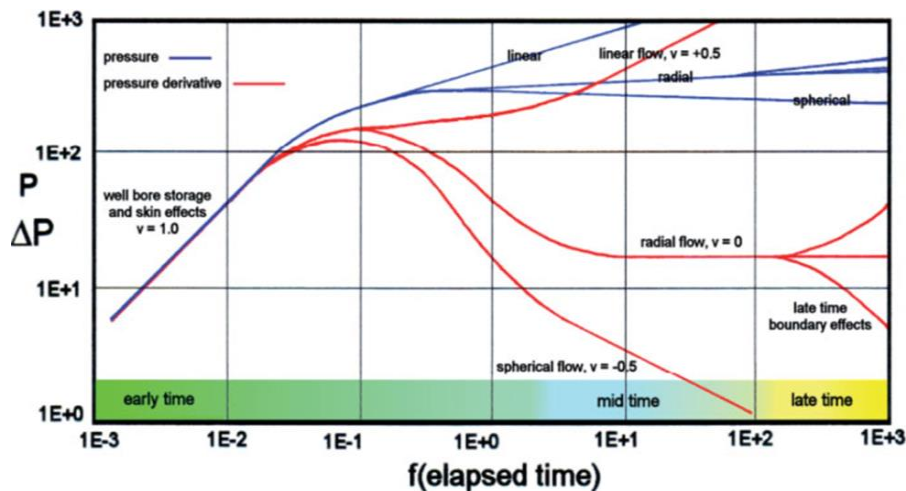


Abbildung 2. Dimensionsanalyse der Flüssigkeitsausbreitung: die rot dargestellten Kurven für linearen „Kanalfloss“, radial-ebenes Ausbreiten und sphärisch-räumliches Fließen.

Ganz anders dagegen die Lösungen mithilfe von Strömungsgleichungen wie sie im **Bauingenieurwesen** üblich sind, wo die Darstellung der Ausbreitung des Injektionsgutes vor allem über **stationäre Strömungszustände** gesucht wird; sich dazu also ein Gleichgewicht einstellen muss zwischen Injektionspumpendruck auf die Injektionsmenge und den Strömungs- und Haftwiderständen. Bei Begrenzung des Drucks führt dies rechnerisch zur sog. Stagnationsreichweite:

$$R_{max} = \frac{P_{eff} \times a}{\tau_0} \quad (2)$$

Die maßgeblichen Parameter in diesen Gleichungen sind die hydraulischen Kluftweiten, in den Gleichungen dazu jeweils mit „thickness“, „width“ oder „aperture“ [t, w, a] bezeichnet, das Druckgefälle Δp , die Viskosität η , die Kluftrauigkeit, die Durchlässigkeit (als Leitfähigkeit in [m/s]) und die Fließgrenze des Fluids (über die Dicke des dadurch bestimmten „Kolbenfließens“ [e]). Die dabei gefundenen Lösungen folgen im Kern dem sogenannten *cubic law*, welches besagt, dass die Fließrate vor allem der dritten Potenz der Kluftweite proportional ist. Immer vorausgesetzt, dass eine planparallele Kluft bekannter Öffnungsweite, unendlicher Ausdehnung und bekannter Rauigkeit vorliegt.

Allgemeine Diffusionsgleichung:

$$\frac{\delta_p^2}{\delta_r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta_p}{\delta_r} = \frac{\Phi \mu c_\tau}{k} \frac{\delta_p}{\delta_t} \quad (3)$$

ISRM Commission on Rock Grouting: Report on Grouting, 1996.

$$q = \frac{\pi \omega^3 I \gamma}{6 \eta} \frac{1 - \frac{3}{2} \frac{e}{a_i} + \frac{1}{2} \left(\frac{e}{a_i}\right)^3}{1 + 8,8 K^{1,5}} \quad (4)$$

Lombardi (aus dem Design Report für die Kölnbreinsperre, unveröffentlicht)

$$q = \frac{2 \gamma t^3 I}{3 \eta} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{e}{a_i} + \frac{1}{2} \left(\frac{e}{a_i}\right)^3 + \frac{3 \delta}{2 t} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{e}{t}\right) \right] \quad (5)$$

Wir sehen daran, dass der Versuch, die Ausbreitungsgesetze mit eindeutigen Strömungsgleichungen zu belegen, nur unter stark vereinfachenden Annahmen gelingen kann. Immerhin führt aber die Beschäftigung mit diesen „Gesetzmäßigkeiten“ doch zu durchaus praxisrelevanten Erkenntnissen, wie etwa im folgenden Diagramm dargestellt:

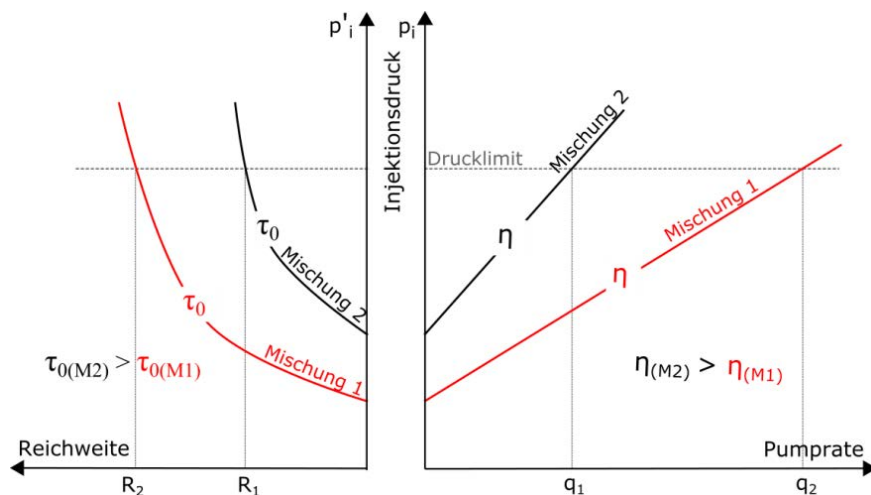


Abbildung 3. Schematische Darstellung der interaktiven Zusammenhänge zwischen Injektionsdruck, Fließgrenze, Reichweite und Pumprate (Hornich, Kogler & Stadler 2015).

Über dieses Diagramm wird es z.B. möglich, die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Fließgrenze und Viskosität einerseits und Druck und Reichweite andererseits schematisch aufzuzeigen. Die Festlegung eines begrenzten Injektionspumpendrucks etwa, nimmt danach offenkundig starken Einfluss auf die Reichweite, auf die zu wählende Rheologie der Mischung und auf die Verarbeitungszeit, also praktisch auf „alles“.²

² In der Praxis sollte in Zukunft übrigens nur mehr von **wirksamen Injektionsdrücken** im Gebirge die Rede sein (wie sie etwa nach der TPA Methode abgeschätzt werden können - siehe dazu EN 12715, Glossar, und ISRM Report on Grouting), weil der Druck an der Pumpe nicht die tatsächlichen Druckverhältnisse in den Klüften widerspiegelt.

Weil aber selbst diese Diagramme nur qualitativ besetzt sind, wird die „Flucht“ in das **Beobachten und Dokumentieren** der messbaren Parameter (Druck, Rate, Menge) gegen die Zeit und deren (empirische) Interpretation (ohne allzu viel Bezug auf die oben erwähnten Gesetzmäßigkeiten!) als ein durchaus logischer und für die Praxis ergiebiger und hilfreicher Ausweg verständlich.

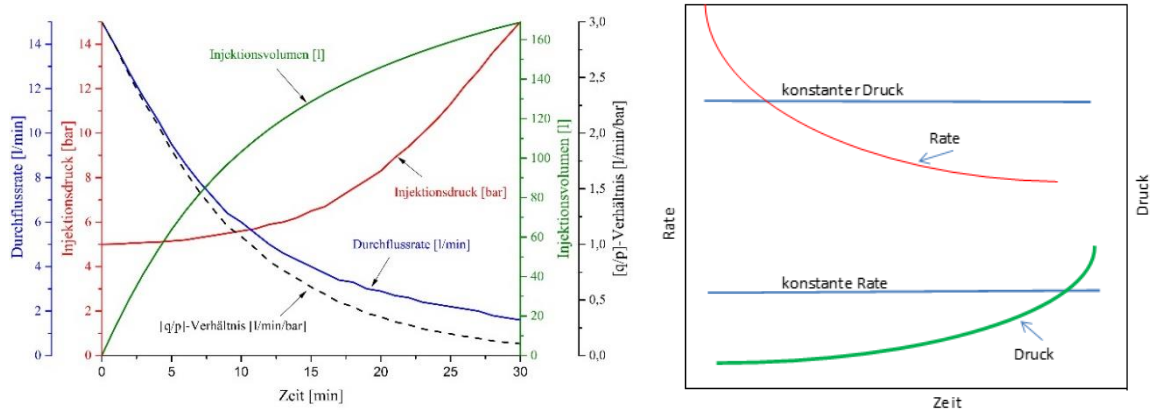


Abbildung 4. Links: Verlauf des q/p-Verhältnisses (Gabriel 2016; nach Stadler unveröffentlichte Mitteilung und Kutzner 1991); Rechts: Veränderung der Rate bei konstantem Druck und umgekehrt.

Man sieht an den beiden Graphiken (Abbildung 4, rechts), dass entweder Rate oder Druck konstant gehalten werden können, und dann der jeweilig andere Parameter zur Anzeige einer Poren-/Kluft-Sättigung indikativ wird. Oder man beobachtet den Verlauf spezifischer Werte, wie etwa das Verhältnis von Rate zu Druck gegen die Zeit (Abbildung 4, links). Die Folge dieser Interpretationsmethodik ist allerdings, dass jeweils unterschiedliche Methoden unterschiedliche Erfahrung fördern - aber die Vergleichbarkeit zwischen Projekten (mit unterschiedlichen Methoden ausgeführt) darunter leidet.

Bei diesen Interpretationen geht es grundsätzlich immer um die Frage, „wann ist es genug?“, „**wann sollte die Injektion (in der jeweiligen Passe) beendet werden?**“, „ist das Injektionsziel erreicht?“, oder ob die Injektion eventuell unter Änderung von Druck, Rate oder Mischung erfolgsversprechender fortgeführt werden kann.

Daher haben sich für die Beantwortung dieser (auch wirtschaftlich wichtigen) Frage unterschiedliche „**Abbruchkriterien**“ etabliert, etwa in einer Kombination des q/p-Verlaufes mit der in USA gebräuchlichen „*apparent Lugeon*“ Methode, oder der GIN Methode Lombardis in Kombination mit der TPA Druckinterpretation. Auf diese Kriterien soll hier in der Folge etwas detaillierter eingegangen werden.

2 ABRUCHKRITERIEN FESTGESTEIN

2.1 *Apparent Lugeon* – Methode

In den USA werden Felsinjektionen häufig nach der Amenity Theory unter Betrachtung des scheinbaren Lugeon-Werts (*apparent-Lugeon-Value*) gesteuert. Rate, Druck und Viskosität werden dabei auf den auf den Lugeon-Wert [l/min/m Bohrloch] mit Wasser und einen Versuchsdruck von 10 bar bezogen. Die Injektion wird als eine Art kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen und ins Verhältnis zum ursprünglichen Lugeon-Wert aus den Wasserabpressversuchen gestellt. Die Injektion wird abgebrochen, sobald der scheinbare Lugeon-Wert einen gewissen Zielwert erreicht hat.³

³ Der Mangel: Bei dieser Methode wird statt der dynamischen Viskositäten in [mPa·s] das Verhältnis der Marsh-Zeiten verwendet, was nur zu etwa 1/50-el (Wasser/Suspension) des „wahren“ Verhältnisses führt. Die „wahren“ Verhältnisse werden nämlich auf Basis der dynamischen Viskosität [mPa·s] beschrieben. Da im Regelfall mit einem höheren Injektionspumpendruck als 10 bar injiziert wird, werden die Effekte von Kluftaufweitungen bei dieser Methode ignoriert. Zusätzlich reflektiert die gewonnene Information nur die Verhältnisse der ersten dm Reichweite (also begrenzt auf die Durchlässigkeit im Nahebereich) um das Bohrloch.

$$LU_{app} = LU_{gr} = \frac{q(l/min)}{1(l/min)} \times \frac{1(m)}{L_{Abschnitt}(m)} \times \frac{10(bar)}{P_{eff}(bar)} \times \frac{V_{Marsh}(sec)}{28(sec)} \quad (6)$$

LU _{app}	scheinbarer Lugeon Wert	(l/min/m bei 10 bar)
V _{Marsh}	Marsh-Zeit der Suspension	(sec)
L _{Abschnitt}	Länge des Prüfabschnitts	(m)
P _{eff}	effektiver Druck	(bar)
	(Injektionspumpendruck minus hydraulischem Gegendruck im Bohrloch)	
q	Durchfluss	(l/min)

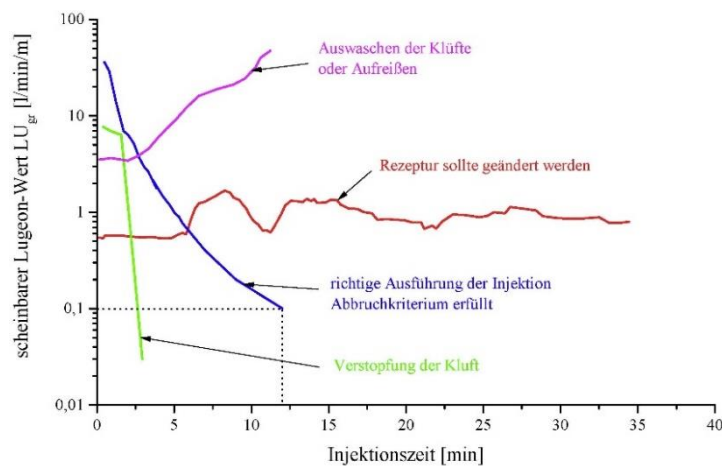


Abbildung 5. Mögliche Verläufe des scheinbaren Lugeon-Werts (Gabriel 2016).

2.2 [q/p] – Methode

Die o.e. Apparent Lugeon-Methode ähnelt der sehr aussagekräftigen Indikator-Funktion der [q/p]-spezifischen Raten-Entwicklung. Dabei wird die Rate [l/min] durch den Injektionspumpendruck [bar] dividiert und gegen die Q-Achse (Injektionsvolumen) aufgetragen (strichlierte Linie in der Abbildung 4 links). Eine Verhältniszahl von 3 bis 5 ist für den Beginn der Behandlung einer durchlässigen/aufnahmefähigen Masse typisch, ein Wert kleiner 0,2 dagegen zeigt das Erreichen einer - relativ auf die Rheologie der Mischung bezogenen - Sättigung der Masse beim jeweiligen Injektionsdruck an (siehe Abbildung 4).

2.3 Real Time Grouting Control (RTGC)

Aus den Differentialgleichungen der Bingham'schen Ausbreitung von Flüssigkeiten in einer Kluft kann die theoretische Soll-Pumpzeit bis zum Abbruch der Behandlung ermittelt werden. Die Injektion wird danach abgebrochen, sobald die rechnerisch ermittelte Reichweite in der kleinsten Kluft einen Zielwert (minimale Reichweite) oder die Reichweite in der größten Kluft einen Grenzwert (maximale Reichweite) erreicht ist. Das notwendige Injektionsvolumen wird aus der Analyse der Kluftweitenverteilung berechnet. Die Injektion nach der RTGC-Methode wird in der Regel druckgesteuert ausgeführt (keine konstante Rate).⁴

⁴ Kritiker der Methode führen an, dass die wesentlichen Kluftweiten einerseits nur ungenau erkundet/ abgeschätzt werden können, und andererseits die elastischen Kluftaufweitungen unter Injektions-Druck (z.B.: in Schweden üblichen 50 bar) unberücksichtigt bleiben. Diese Vorgangsweise eignet sich besonders für homogenes kompetentes Festgestein (Skandinavien), zeigt jedoch bei Inhomogenitäten und Anisotropien Schwächen.

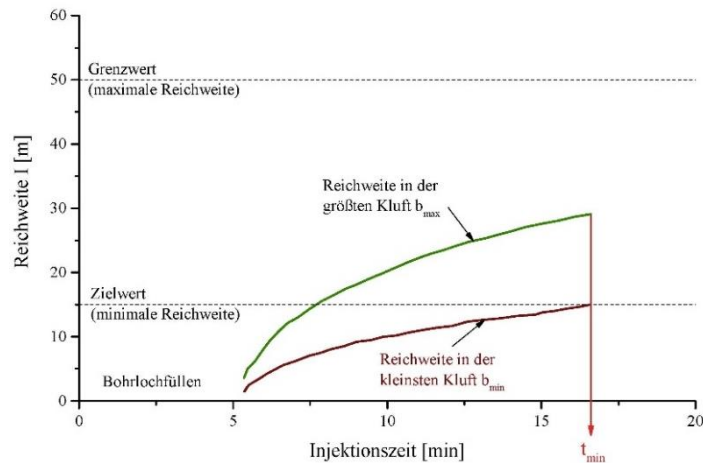


Abbildung 6. Beispiel einer Aufzeichnung für Real Time Grouting Control (RTGC) (Gabriel 2016; nach Stille et al. 2015).

2.4 Grouting Intensity Number (GIN)

Das Konzept der Begrenzung der Injektions-Energie/Laufmeter Bohrung ist auf Lombardi & Deere zurückzuführen (*“Grouting Intensity Number”, GIN*). Ermittelt wird diese Injektions-*“Intensität”* durch die Multiplikation der zum jeweiligen Zeitpunkt verpressten Menge mit dem Injektionsdruck - gemessen an der Pumpe, pro m Passenlänge, und ausgedrückt in [bar·l/m]. Um die Energie, die ins Gebirge eingebracht wird, richtiger beurteilen zu können, sollte der wirksame Injektionsdruck (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik 2016) als Eingangswert verwendet werden. Um es hier vorsichtig zu kommentieren: GIN verführt in gewisser Weise, sich - wegen der genialen Einfachheit des Ansatzes - etwas „zurückzulehnen“, obwohl GIN nicht wirklich eine Methode darstellt, bei der gedacht ist, die Reaktion des Gebirges flexibel in den jeweiligen Behandlungsverlauf zu integrieren. GIN-Werte werden nämlich im Planungsprozess festgelegt, und zwischen 500 (für inkompetentes Gebirge bzw. *soft rock*) und 2.500 (für kompetentes Gebirge bzw. *stiff, hard rock*) als empfohlen publiziert.⁵

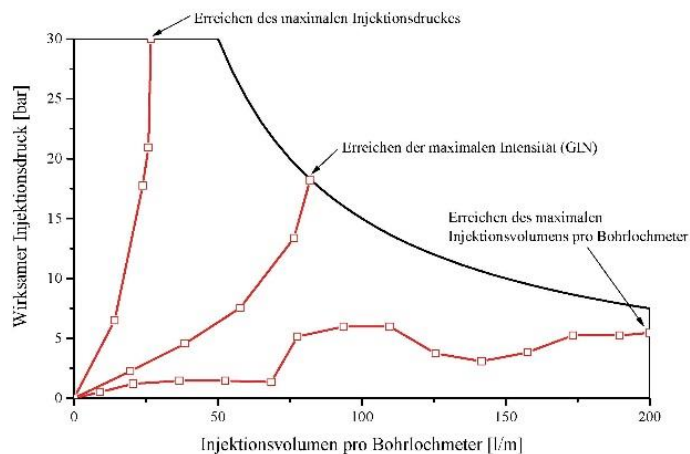


Abbildung 7. Beispiel einer Injektion nach der GIN-Methode (Gabriel 2016).

⁵ Obwohl die Methode den seltenen Hauch genialer Einfachheit besitzt, werden dennoch unter anderem folgende Fragen in (ingenieurgeologischen) Fachkreisen kritisch diskutiert: Warum die Energie etwa auf den lfm Bohrung und nicht auf das entsprechende Felsvolumen der Passe bezogen wird? Wie ermittelt man die Grenze zwischen der - für eine gute Injektionswirkung - notwendigen und einer „schädlichen“ Menge an Energie - für die jeweilige Kategorie Gebirge?

2.5 Aperture Controlled Grouting (ACG)

Diese, insbesondere von Trevor Carter (Golder Associates, beim Antamina Dam in Peru erstmals eingesetzt), empfohlene Kontrollmethode des Injektionsvorganges, setzt ebenfalls eine Klufthanalyse voraus. Über den graphischen Vergleich der Kluffstrukturen mit den Ergebnissen der Lugeontests wird eine Bandbreite von empfohlenen Suspensionen ermittelt. Abhängig von den Lugeon-Werten in den jeweiligen Passen wird dann eine passende Suspension gewählt, mit welcher ein Ziel-[q/p]-Wert optimal erreicht werden kann. Das Verhältnis Rate zu Injektionspumpendruck wird dabei laufend interpretiert.⁶

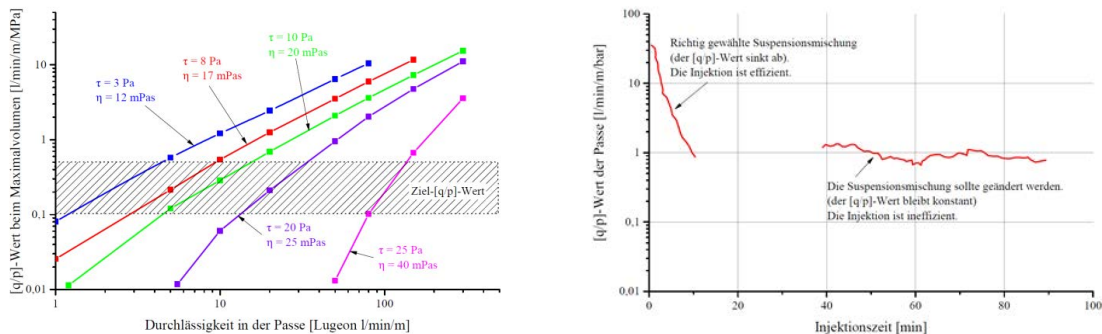


Abbildung 8. Links. Zuordnung von Suspensionsmischungen zu Durchlässigkeiten in den Passen (Carter et al. 2014); Rechts: q/p-Wert aufgetragen gegen die Injektionszeit (Gabriel 2016; nach Carter et al. 2014).

2.6 Transient Pressure Analysis (TPA)

Aus Druckabfallkurven lässt sich nach einem Pumpenstopp (*shut-in*) nicht nur der in situ wirksame Druck in der Passe abschätzen, sondern gibt die Form dieser Kurven (und deren relative Änderung bei mehrmaliger Wiederholung) auch Aufschluss über die erreichte Sättigung. Sie gibt - bei Verwendung gleicher *shut-in*-Zeiten (etwa 20“) - mit der relativen Entwicklung der Drücke zur Zeit $[t+t_{20}^*]$ selbst in analogen, linearen Diagrammen guten Hinweis auf evtl. Abfließen von Injektionsgut, auf Verklauen oder Verjüngung der Querschnitte, auf Sättigung, auf Auswaschung und Erosion oder auf Fracks.

Auch können quantitative Hinweise auf die relative Durchlässigkeit (ähnlich wie app. Lugeon, hier aber aus einer log-log-Interpretation der Druckabfallkurven) und auf das Vorliegen von „constrained“ oder „open boundaries“ - also auf sich verjüngende oder öffnende Querschnitte an der Injektionsfront - mit TPA deutlicher als mit anderen Methoden erkannt werden. (vgl. R. Pollard 2009 und EN 12715, Injektionen, Glossar).⁷

⁶ Diese Methode erlaubt es, einerseits die Suspension und die Injektionsrate laufend zu optimieren, um das Injektionsziel möglichst rasch zu erreichen und andererseits ein übermäßiges unerwünschtes Aufweiten der Klüfte (*jacking* bzw. *fracking*) zu vermeiden. In Summe also quasi ein Hybrid aus einigen der übrigen, hier vorgestellten Abbruchkriterien und Methoden. Daher erntet die Methode auch nur wenig Kritik aus der Fachwelt - vorausgesetzt die fachliche Betreuung der Baustelle folgt und entspricht dem komplexen Anspruch der Methode.

⁷ Die Feldtauglichkeit der Methode wurde unter anderem bei den Projekten Kölnbreinsperre, Österreich und Dounreay, UK bewiesen. Die Ableitung absoluter Werte für die Durchlässigkeit, Kluffaufweitung, oder der Entfernung eines festgestellten Phänomens vom Bohrloch ist wegen der Bingham'schen Rheologie des Injektionsgutes nur beschränkt, jedoch ausreichend genau, möglich.

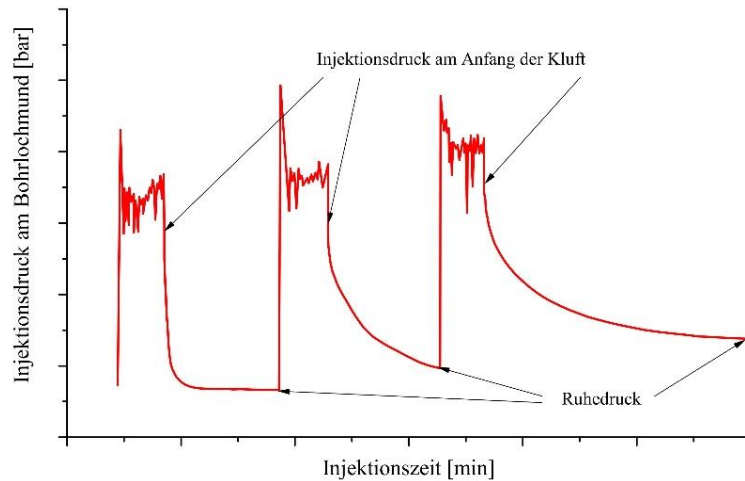


Abbildung 9. Schematische Darstellung von Druckabfallkurven (Gabriel 2016; nach Stadler 1992).

2.7 Pressure Sensitive Grouting (PSG) – Methode

Eine Weiterentwicklung von TPA macht von der Möglichkeit Gebrauch, die vier Parameter: Druckabfallgradient, Ruhedruck (nach definierter Zeit, etwa 20“), und die Differenz der aufeinanderfolgenden Messungen über eine Fuzzy Logic Programmierung zu verknüpfen, was der Injektion quasi einen vorgeplanten Ablauf verleiht.

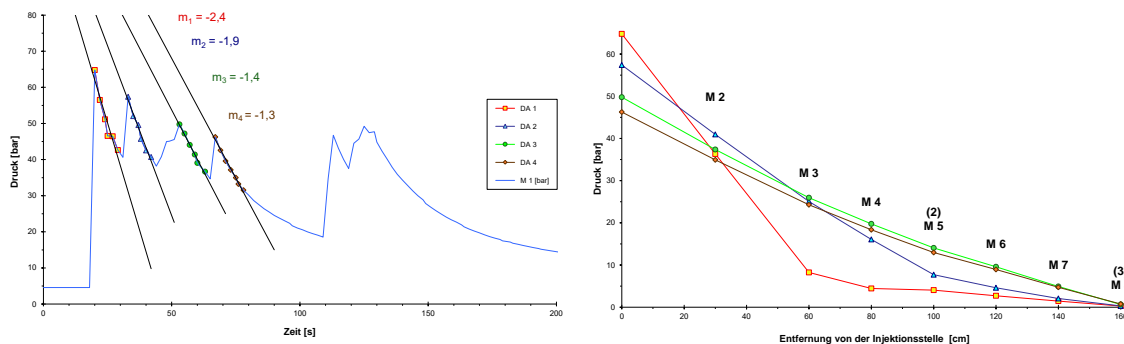


Abbildung 10. Druckabfälle und die dazugehörige Druckverteilung in der Kluft (Reichl 2000).

Die Injektion einer Passe wird danach bei Erreichen der (vom Planer jederzeit an die Verhältnisse anpassbaren) Design-Annahmen selbsttätig abgebrochen (ähnlich der GIN oder der RTGC Methode) - und erübrigt so u.a. Auseinandersetzungen zur Mehrdeutigkeit anderer, vergleichbarer Abbruchkriterien. Im Semmering Pilotstollen wurde diese Methode bereits erfolgreich in mehreren Versuchsfeldern eingesetzt.

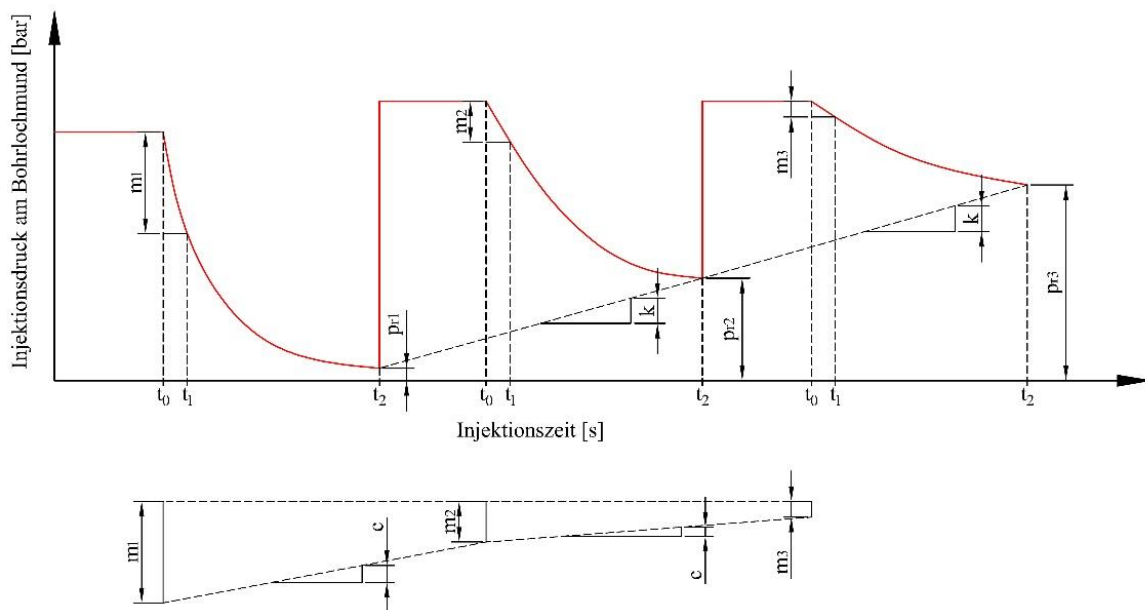


Abbildung 11. Parameter zur Steuerung der Injektion mit der PSG-Methode (Gabriel 2016; nach Reichl 2000); m ... Gradient des Druckabfalls, p_r ... Ruhedruck, c ... Änderung des Gradienten, k ... Änderung des Ruhedrucks.

2.8 Kombination der Systeme und Methoden

Alle oben angegebenen Kriterien (für den Abbruch einer Passe beim Injizieren in Fels) setzen eine **offene hydraulische Verbindung** zu den Klüften in situ voraus. Anders ist dieser „hydraulische Dialog“ mit dem Gebirge nicht möglich. Gleichzeitig bauen aber auch alle erwähnten Methoden der Parameterauswertung auf gleichartige Datensätze (Menge, Rate, Druck je Zeiteinheit, Ruhedruck etc.) auf, wie sie mittlerweile in Form von online-Aufzeichnungen auf jeder Baustelle vorliegen (müssen).

Eine kombinierte Anwendung dieser Kriterien (RTGC, app.Lug., q/p , GIN, ACG, TPA und PSG) bietet sich damit an. Diese gibt mehrfache Redundanz und Sicherheit, einen raschen und somit wirtschaftlichen Weg zur gewünschten Sättigung, zur Verhinderung schädlicher Aufweitungen (jacking) bzw. Auswaschungen, zum Erkennen von Abfließen von Injektionsgut in „open boundaries“ - und damit dem Erreichen des Injektionsziels.

3 ERFOLGSKONTROLLEN

Abbruchkriterien alleine garantieren den Erfolg (das Erreichen des Injektionszieles) jedoch noch nicht. Man kann nämlich beim Injizieren, wie in anderen Disziplinen des Bauingenieurwesens üblich, die Maßnahme im engeren Sinne nicht „bemessen“, man muss sie (stochastisch, in plausibler Schätzung) auf einen definierten Erfolg hin dimensionieren. Ähnlich wie bei der NÖT: ausbrechen - beobachten - Ausbau festlegen, wird hier auf Basis der Beobachtungen und Messungen während der Injektion diese immer wieder zu redimensionieren sein.⁸ Die Kontrolle der Mischungen und deren Verarbeitung bzw. Verarbeitungsparameter während der Ausführung bedeuten dabei nur eine **Kontrolle der Qualität der Arbeit** (Planungskonformität).

⁸ Wenn in der Planung z.B. festgelegt wird, dass nach der Injektion je lfm Stollen nur mehr 200 l/min/km (bei einem Bergwasserspiegel von 100 m über dem Ausbruch) zusictern dürfen, dann weiß man damit, dass es einen Dichtmantel um den Stollen von etwa 2,5 m Stärke mit 10^{-8} m/s braucht; aber das bedeutet eben noch nicht, dass ein GIN-Wert von so und so viel, oder ein appLug Wert von dot. oder ein TPA von 50% in 20“ nach shut-in, oder gar eine RTGC-Zeit von, sagen wir, 7 min diesen Erfolg garantieren.

Dennoch hier einige Hinweise zu diesen Erfolgskontrollen:

1. Die Wirkung und Zielerreichung kann u.a. mittels Wasserabpressversuchen, Ramm- bzw. Drucksondierungen im Lockerboden, oder Bohrlochaufweitungsversuchen nadelstichartig geprüft werden. Die Wirkung der Injektionsmaßnahme ist jedoch am zuverlässigsten **global zu prüfen**: der Damm wird eingestaut, der Tunnel ausgebrochen, und danach jeweils die Durch- bzw. Zusickerung gemessen.
2. Die Wirkung tritt in jedem Fall aber erst nach **> 90% der Leistungserbringung** ein - es besteht während der Ausführung, damit praktisch keine Möglichkeit einer Kontrolle der Gesamtwirkung.
3. Die Kontrolle des **Erfolges mittels WAP** in Kontrollbohrungen ist zu empfehlen, hat idR jedoch zwei Nachteile: es sind nur Stichproben, und sie sind nur für kleine Volumina repräsentativ.

Die Interpretation der Ausführungsdaten und der Vergleich verschiedener Abbruchkriterien hilft allerdings dennoch, die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung deutlich zu erhöhen. Insofern erhält die online- und stete Beschäftigung mit diesen Daten (gemeinsam mit ÖBA, Planungsvertretern, Injektionsexperten) auf der Baustelle besondere Bedeutung.

LITERATUR

- Fransson, A., Zetterlund, M., Gustafson, G., Funehag, J., Hernqvist, L. & Butron, C. 2002. A Swedish grouting design concept: hydraulic testing and selection of grout. *4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans.
- Bourdet, D., Whittle, T.M., Douglas, A.A. & Pirard, Y.M. 1983. A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis. World Oil 1995.
- Cambefort, H. 1969. Bodeninjektionstechnik, Bauverlag.
- Gabriel, P. 2016. Abbruchkriterien bei Felsinjektionen - Eine vergleichende Analyse. Diplomarbeit, Technische Universität Wien - Institut für Geotechnik, 2016.
- Carter, T. 2002. Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock. *4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans.
- Hassler, L. & Forhaug, M. 1977. Experience of grouting works at the Arlanda train project. *Proceedings of the Rock Mechanics Day, 1977*. Swedish Rock Engineering Research Foundation, Stockholm.
- Hornich, W., Kogler, K. & Stadler, G. 2015. EUROCK 2015, 64.es Geomechanik Kolloquium, W/S on Grouting.
- Lombardi, G. & Deere, D. 1993. Grouting design and control, using the GIN principle. *International Water Power and Dam Construction*, June 1993.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. 2016. *Kommentar zur EN 12715 - Injektionen*. Eigenverlag: Salzburg.
- Pollard, R., Jones, W. & Whitfield, J. 2009. The use of transient pressure analysis at the Dounreay Shaft Isolation Project. *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 2, Issue 5.
- Reichl, I. 2000. *Fuzzy Logic Steuerung von Injektionen auf der Basis von Modellversuchen*. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien.
- Stadler, G. 1992. *Transient Pressure Analysis of Rodur Epoxy grouting at Kölnbrein Dam, Austria*. Montanuniversität Leoben, Dissertation.
- Stille, B., Stille, H., Gustafson, G. & Kobayashi, S. 2009. Experience with the real time grouting control method. *Geomechanics and Tunnelling*, no.5: 3-14.

Rheologische und mechanische Eigenschaften von zementgebundenen Injektionsstoffen

Adrian Kainrath
TB Kainrath, Judenburg, Österreich

Wolfgang Hornich
ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H., Wien, Österreich

Helmut Wannemacher
GGE GmbH, Widnau, Schweiz

KURZFASSUNG: Zementbasierte Suspensionen zählen zu den am häufigsten eingesetzten Injektionsmitteln. Dem Anwender steht dabei eine Vielzahl an unterschiedlichen Bindemitteln und Zusätzen zur Verfügung. Die Auswahl und Zusammenstellung einer geeigneten Mischung für die Ausführung erfolgt in der Regel anhand projektspezifischer Vorgaben und Randbedingungen. Dabei sind fundierte Kenntnisse über die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Stoffe, sowie Möglichkeiten zur Gewinnung aussagekräftiger und vergleichbarer Kennwerte notwendig. Der gegenständliche Beitrag gibt einen Überblick über die mechanischen, physikalischen und rheologischen Eigenschaften zementbasierter Suspensionen.

1 ALLGEMEINES

In der Injektionstechnik kommt der Wahl einer geeigneten Injektionsmischung besondere Bedeutung zu. Schon Henri Cambefort (Cambefort 1969) schreibt in seinem Werk „Bodeninjektionstechnik“: „Wird diese Wahl schlecht getroffen, so ist die Injektion zu einem Fehlschlag verurteilt, unabhängig von den Maßnahmen im Verlauf der Arbeiten und von der Menge des eingepressten Injektionsgutes“. Neben der Baugrundbeschaffenheit, der Eindringfähigkeit, den physikalischen und rheologischen Kennwerten spielt auch der Preis, die Materialverfügbarkeit, die Umweltverträglichkeit, die klimatischen Bedingungen auf der Baustelle sowie die baupraktische Anwendung eine große Rolle. Zementbasierte Suspensionen kommen überall dort zur Anwendung, wo ein Eindringen der im Wasser aufgeschlämmten Zementkörner in das Kluftsystem oder das Porensystem des Bodens möglich ist. Bei zementgebundenen Injektionsmitteln kann grundsätzlich zwischen Normzementen gemäß ÖNORM EN 197-1, Mischbindern (herstellerspezifische Injektionsmischungen) und Feinstbindemitteln unterschieden werden (ÖGG *Kommentar zur EN 12715 – Injektionen* 2016). Zur Anpassung und Optimierung der Suspension an die projektspezifischen Anforderungen können noch Zusatzstoffe und Zusatzmittel beigemischt werden, durch deren Beigabe die nachfolgend beschriebenen Eigenschaften der Suspension gezielt gesteuert werden können.

2 EIGENSCHAFTEN ZEMENTBASIERTER SUSPENSIONEN

2.1 Korngrößenverteilung

Wesentliches Kriterium für die Injizierbarkeit von Zementsuspensionen in Fels oder in Lockergesteinsböden ist, dass die im Wasser aufgeschlämmten Zementkörner ungehindert in die Klüfte eindringen können bzw. die Porenstruktur des Bodens durchwandern können, ohne abgefiltert zu werden. Für die Beurteilung der Injizierbarkeit anhand der gängigen Injektionskriterien (N-Kriterium bzw. Porenengstellenverteilung für Lockergesteinsböden; Transmissivität, Leitfähigkeit, geometrische und hydraulische Kluftweiten für Fels) ist daher die Kenntnis des Größtkornes bzw. der gesamten Korngrößenverteilung des Zementes wichtig, um die Injizierbarkeit abschätzen zu können.

2.2 Suspensionsdichte

Die Dichte von Suspensionsmischungen zeigt, ob die Mischungen den Mischungsvorgaben entsprechen und ob unerwünschte Einflüsse durch den Mischvorgang (bspw. Luftertrag) entstehen. Eine Verringerung des W/Z-Wertes bewirkt höhere Suspensionsdichten, was wiederum zu einer Erhöhung der Viskosität, aber auch zu einer Verbesserung der Stabilität der Suspension im flüssigen Zustand führt. Die Suspensionsdichte beschreibt als Kennwert im Grunde den Feststoffanteil, bezogen auf ein Volumen. Eine Erhöhung des Feststoffanteils führt somit in der Regel zu höheren Druckfestigkeiten und auch zu geringeren Durchlässigkeiten des Zementsteins, verbunden mit einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Erosionsstabilität. Nach Kutzner (1991) sind nur stabile Suspensionen mit einem W/Z-Wert unter 2,0 hinreichend erosionsbeständig.

2.3 Viskosität / Fließverhalten / Fließgrenze

Die zwei grundlegenden Kennwerte für eine rheologische Charakterisierung von zementbasiertem Injektionsgut sind die Fließgrenze und die (scheinbare) Viskosität. Wird nun eine Suspension in ein Poren- oder Kluftsystem injiziert, so verringert sich der Druck in der Suspension mit zunehmender Entfernung von der Injektionsstelle. Je geringer der Druck und je kleiner der Porenkanal, desto geringer die effektive Schubspannung in der Suspension. Unterschreitet die Schubspannung im Porenkanal bzw. der Kluft die Fließgrenze τ_0 , so kommt es zum Stillstand der Flüssigkeit im Injektionskanal, welche nur durch Erhöhung des Injektionsdrucks wieder in den Zustand des Fließens gebracht werden kann. Die Fließgrenze ist daher ein wichtiger Kennwert für das Eindringverhalten bzw. die Reichweite des Injektionsgutes im Poren- oder Kluftsystem. Die Viskosität, der innere Widerstand des Fluids gegen das Fließen, entscheidet über die Eindringfähigkeit und den für das Eindringen benötigten Druck. Die Viskosität und deren zeitliche Entwicklung ist i.d.R. abhängig von Druck, Konzentration, Misch- bzw. Stehzeit, Temperatur und bei Suspensionen zudem von der mechanischen Beanspruchung. Eine klare Definition und Vorgabe der Randbedingungen für die Prüfung der Viskosität ist daher unumgänglich.

In Abbildung 1 sind unterschiedliche Fließkurven von Fluiden dargestellt. Suspensionen verfügen im Gegensatz zu *Newtonschen* Flüssigkeiten (z.B. Wasser, Acrylatgele, Silikatgele etc.) über eine Fließgrenze und weisen ein strukturviskoses (scherverdünnendes) Verhalten auf. Das bedeutet, dass erst eine Schubspannung τ_0 (Fließgrenze) überschritten werden muss, um Fließen einzuleiten. Im Bewegungszustand nimmt die Viskosität mit der mechanischen Beanspruchung (Schergefälle $\dot{\gamma}$) ab. Das bedeutet, dass die Viskosität zementbasierter Suspensionen kein einzelner konstanter Wert ist, sondern immer von der mechanischen Beanspruchung, dem Schergefälle abhängt. Man spricht hier von einer scheinbaren Viskosität η' , nicht zu verwechseln mit der (dynamischen) Viskosität η bei *Newtonschen* Fluiden. Um das Fließverhalten zementbasierter Suspensionen auf einfache Weise mathematisch zu beschreiben kann die nichtlineare Fließkurve vereinfachend durch eine lineare Fließfunktion nach *Bingham* angenähert werden. Man spricht hier auch von *Binghamschen* Fluiden, wobei τ_0 die Fließgrenze und η_p die plastische Viskosität ist. Zu beachten ist dabei, dass die plastische Viskosität keine Viskosität im herkömmlichen Sinne ist, sondern nur die Steigung der Gerade angibt.

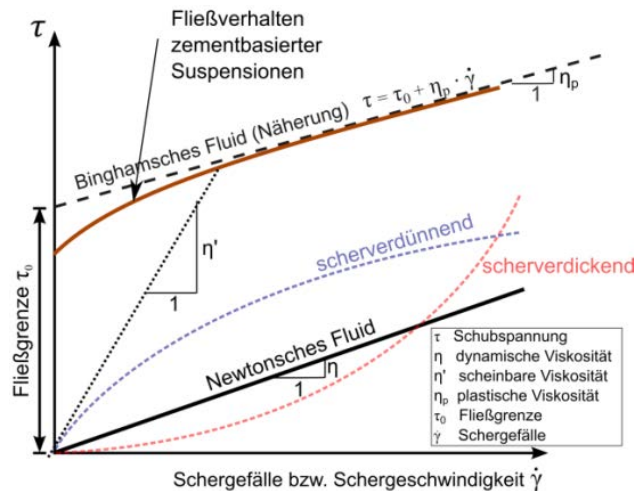


Abbildung 1. Fließkurven unterschiedlicher Fluide (Kainrath 2017).

Die Fließkurve charakterisiert die Suspensionsmischung und zeigt deren spezifisches Fließverhalten auf. Anhand dieser Kurve können eindeutig Qualitätsunterschiede unterschiedlicher Injektionsmischungen und Zusatzstoffe quantifiziert werden und grundlegende Aussagen über die Injizierbarkeit getroffen werden. Ziel dabei ist es, eine möglichst niedrige Viskosität und Fließgrenze zu erzielen, ohne andere physikalische Eigenschaften negativ zu beeinflussen.

2.4 Stabilität

Die in der Injektionstechnik üblichen Suspensionen verfügen in der Regel über einen hohen W/Z-Wert ($> 0,8$), wodurch die im Wasser aufgeschlämmten Zementpartikel infolge der Schwerkraft im Ruhezustand zur Sedimentation neigen. Als stabile Suspensionen werden Suspensionen bezeichnet, die ein Wasserabsetzmaß gemäß ÖNORM EN 12715 nach 2 Stunden von unter 5% aufweisen. Suspensionen mit hohem Wasserabsetzmaß können die Injektionseinrichtung verstopfen und tendieren selbst im Untergrund zu einer Sedimentation und Verlegung der Fließwege durch Abgabe von Überschusswasser. Die Effizienz, Reichweite und Qualität einer Suspension hängt daher auch stark von der Suspensionsstabilität ab. Neben der Sedimentationsstabilität wird auch die Filtrationsstabilität der Suspension nach API RP-13b-1 unter Druck getestet und als Kennwert herangezogen. Je weniger Wasser aus der Suspension ausgepresst wird, desto besser geeignet ist die Suspension zur Injektion. Durch die Zugabe von Zusätzen (Bentonit, Stabilisatoren etc.) kann die Stabilität einer Suspension wesentlich erhöht werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass die Dosierung der Zusätze von einer Vielzahl an Faktoren (insbes. Chemismus des Anmachwassers, Temperatur, Zementart etc.) abhängt. Als Optimum können für eine normale Zementsuspension mit $W/Z = 1,0$ ein Sedimentationsmaß von unter 2% und eine Filtratwasserabgabe von unter 120 ml nach 7 Minuten bei $7 \pm 0,5$ bar angesehen werden.

2.5 Festigkeit und Festigkeitsentwicklung

Die Zustandsänderung von der Suspension hin zum festen Zementstein ist ein zeitlicher Prozess, der von einer Vielzahl an Faktoren insbesondere der Zusammensetzung des Zementes und der Temperatur abhängt. Für die Praxisanwendung ist im Hinblick auf die maximale Verarbeitungszeit und das Verhalten der Suspension im Untergrund (Abfließen, Auswaschen) der Zeitpunkt, ab dem sich eine Eigenfestigkeit der Suspension ausbildet, von Relevanz. Diese Änderung in der Konsistenz wird in der Betontechnologie als Erstarrungsbeginn bezeichnet. Die ÖNORM EN 12715 schlägt zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns neben Kippversuchen im Becher auch das Vicatverfahren nach ÖNORM EN 196-3 vor, das jedoch bei Suspensionen nicht wirklich anwendbar ist. Wesentlich sinnvoller ist demgegenüber die Messung des Verlaufs der Scherfestigkeit mittels Messflügel. Das kann entweder mit einer Laborflügelsonde oder mittels eines am Viskosimeter montierten Mess-

flügels erfolgen. Ab rund 1 Tag Erhärtungszeit können bei ausreichender Eigenfestigkeit der Proben Druckversuche zur Bestimmung des Erhärtungsverlaufs zur Anwendung kommen. Die Endfestigkeit erhärteter Suspensionen hängt im Wesentlichen vom Feststoffanteil ab. Je höher der Feststoffanteil (Zementanteil) der Suspension, desto höher sind die zu erwartenden Festigkeiten. Der W/Z-Wert beschreibt das Verhältnis von Wasser zu Feststoff zum Initialzeitpunkt der Mischungsherstellung, berücksichtigt jedoch nicht Vorgänge die danach im Ruhezustand (Sedimentation) oder während der Injektion (Filtration) auftreten. Wesentlich aussagekräftiger und besser zur Abschätzung der Druckfestigkeit geeignet ist die Trockendichte des erhärteten Zementsteins. Anhand von Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass zwischen der Trockendichte des Zementsteins und der Druckfestigkeit ein eindeutiger Zusammenhang besteht, der versuchstechnisch, wie auch anhand von Versuchen nachgewiesen werden konnte (Kainrath 2017). Abbildung 2 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen W/Z-Wert, Trockendichte und Druckfestigkeit von erhärteten Portlandzementsuspensionsproben. Als Eingangsparameter kann der W/Z-Wert oder die wesentlich aussagekräftigere Trockendichte herangezogen werden.

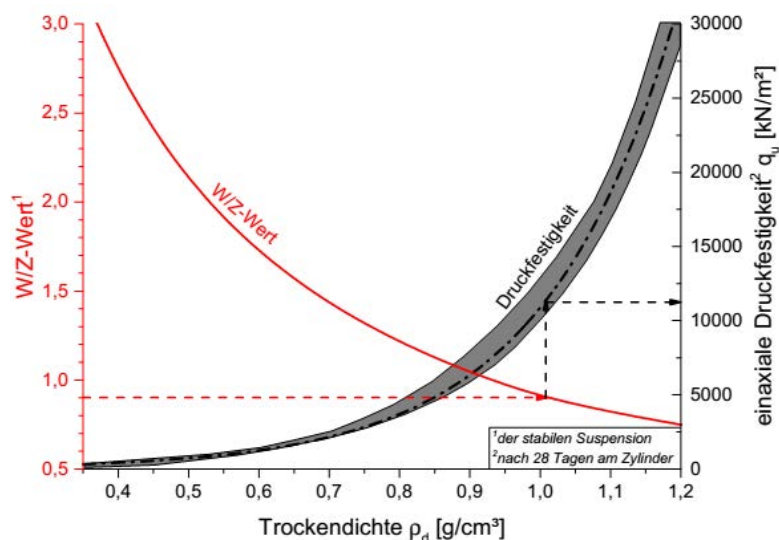


Abbildung 2. Diagramm zur Abschätzung der 28d-Druckfestigkeit von stabilen Portlandzementsuspensionen (CEM I) in Abhängigkeit vom W/Z-Wert (Kainrath 2017).

LITERATUR

- API RP13b-1. 2009. Field Testing of Drilling Fluids - Part 1 - Water based fluids, American Petroleum Institute.
- Cambefort, H. 1969. Bodeninjektionstechnik - Einpressungen in Untergrund und Bauwerke. Bauverlag Wiesbaden.
- Kainrath, A. 2017. Injektionen im Lockergestein - Prüfverfahren für zementbasiertes Injektionsgut und injizierte Böden. (Dissertation), Technische Universität Wien.
- Kutzner, C. 1991. Injektionen im Baugrund. Enke Verlag, Stuttgart
- ÖGG. 2016. Kommentar zur EN 12715 - Injektionen. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg.
- ÖNORM EN 197-1. 2011. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normal-zement.
- ÖNORM EN 196-3. 2016. Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit.
- ÖNORM EN 12715. 2001. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen.

Baugrundverbesserung durch chemische Injektionen mit Acrylatgelen

Götz Tintelnot
TPH Bausysteme, Hamburg, Deutschland

Sven Hoiser
TPH Bausysteme, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Verschiedene Injektionsmittel sind geeignet, trockene und feuchte Kiesschüttungen, Sande usw. zu verfestigen und somit eine Bodenstabilisierung / Bodenverfestigung zu erzeugen. In diesem Beitrag werden grundsätzliche Fragen zu Acrylatgel, die herausragenden Eigenschaften, Forschungsfelder zur Schaffung numerischer Berechnungsgrundlagen sowie diverse Einsatzmöglichkeiten behandelt.

1 GRUNDSÄTZLICHE FRAGEN ZU ACRYLATGEL

Acrylatgele sind extrem niedrigviskose Injektionsstoffe aus Derivaten der Acryl- und Methacrylsäure sowie Aminen und Salzen, welche zu einem gummiartigen, flexiblen Produkt aushärten. Die Reaktionszeit lässt sich zwischen 90 Sekunden und 90 Minuten, in Abhängigkeit der Bauteil-, Umgebungs- sowie Bodentemperatur einstellen. Moderne Gele sollen aus technischer und umwelttechnischer Sicht zwingend der sogenannten 5. Generation entsprechen. Diese Gele basieren weder auf Wasserglas, noch enthalten sie Acrylamide. Sie sind dauerbeständig, hochflexibel, grundwasserneutral. Darüber hinaus sind mit Acrylatgel durchsetzte Böden und Tunnelausbruchsmaterialien (TUA) weit weniger kritisch zu deponieren als das z. B. bei der Verwendung von Polyurethanen oder Silikaten der Fall ist, da im Acrylatgel keine Isocyanate, Lösemittel oder Weichmacher zum Einsatz kommen.

1.1 Welche herausragenden Eigenschaften hat Acrylatgel im Vergleich zu anderen Injektionsmaterialien?

Die folgende Tabelle zeigt die Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Injektionsstoffe abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens. Zusätzlich haben die Wasserverhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahl des Injektionsstoffs. So können z. B. zementöse Injektionsstoffe im Falle einer Durchströmung des Baugrunds mit hohen Fließgeschwindigkeiten nicht angewendet werden, weil zementöse Injektionsstoffe im Wasserstrom eluieren und nicht abbinden können. Außerdem besteht die Gefahr, dass durch zementöse Injektionsstoffe weiteres

Wasser in den Baugrund eingetragen wird, was beispielsweise bei quellfähigen Böden kritisch beurteilt werden müsste.

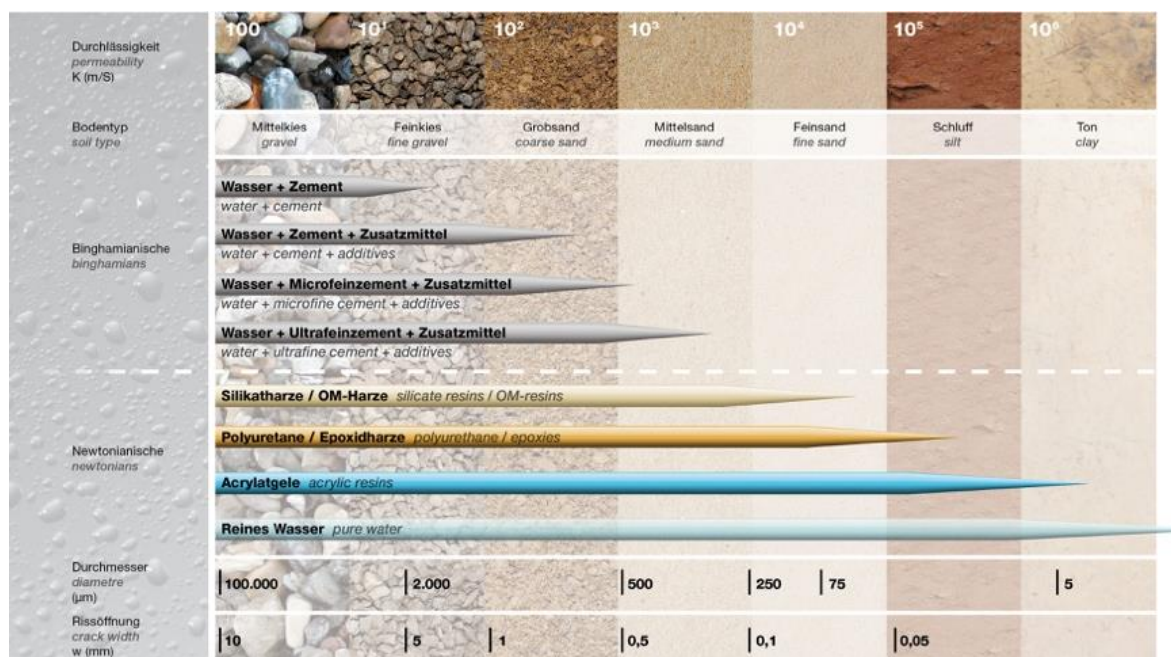


Abbildung 1. Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Injektionsstoffe abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens. (Quelle: TPH)

1.2 In welchen Bereichen wird Acrylatgel bevorzugt eingesetzt?

- Zur Rissverfüllung bei Innenschalen und Tübbing
- Zur Innenschalensanierung (z.B. Blockhinterlegung)
- Zum abdichtenden Injizieren von Fugenbändern mit Injektionsschlauch-Systemen und Blockfugen (gemäß ÖBV-RL Tunnelabdichtung)
- Zur Sanierung von Dehnfugen
- Zur vorausseilenden Geoinjektion
- Zur Verfüllung und Abdichtung von feinen Wasserwegigkeiten (z.B. in Anhydrit)

1.3 Wie wird Acrylatgel üblicherweise injiziert?

Üblicherweise werden pneumatisch betriebene Kolbenpumpen verwendet, die zur Vermeidung von Mischfehlern vorzugsweise zwangsfördernd ausgerüstet sein sollten und mittels eines Luftmotors beide Kolben gleichzeitig bedienen (Abb. 2). Der Injektionsstoff wird direkt aus den Behältern abgesaugt. Anders als bei Zementpumpen sind bei solchen Injektionsgeräten Förderleistungen von 10 bis 20 l/min aufgrund der hohen Effektivität der Injektionsstoffe ausreichend. Über ein Anschlussstück werden die Einzelkomponenten des Injektionsstoffs zusammengeführt und über Packer in das Bauteil, bzw. über Injektionslanzen in den Baugrund, eingebracht. Um die Anwendungssicherheit der chemischen Injektionsstoffe und Wirkung der Maßnahme zu gewährleisten, sollte, gerade bei größeren Injektionskampagnen, eine geeignete Mischtechnik (Abb. 4) eingesetzt werden. Die Mischtechnik unterstützt den Anwender in der sicheren Handhabung und gewährleistet die korrekte Einhaltung der Mischvorgabe des Herstellers. Mittlerweile obligatorisch, wird von den meisten Bauherren eine digitale Datenerfassung während des Injektionsvorganges gefordert (Abb. 2 und 3). Diese Aufzeichnung erkennt ungleichmäßige Förderraten, die von der Sollrate 1:1 abweichen und

schützt den Anwender damit vor Problemen und Gefahren. Gleichzeitig dient die Datenaufzeichnung als Arbeitsnachweis und damit auch als Erfolgskontrolle für die Bauherren.



Abbildung 2. Pneumatisch betriebene Zweikomponenten-Kolbenpumpe. (Quelle: TPH)



Abbildung 3. Datenaufzeichnungsgerät zur digitalen Überwachung und Dokumentation der Injektionsvorgänge. (Quelle: TPH)

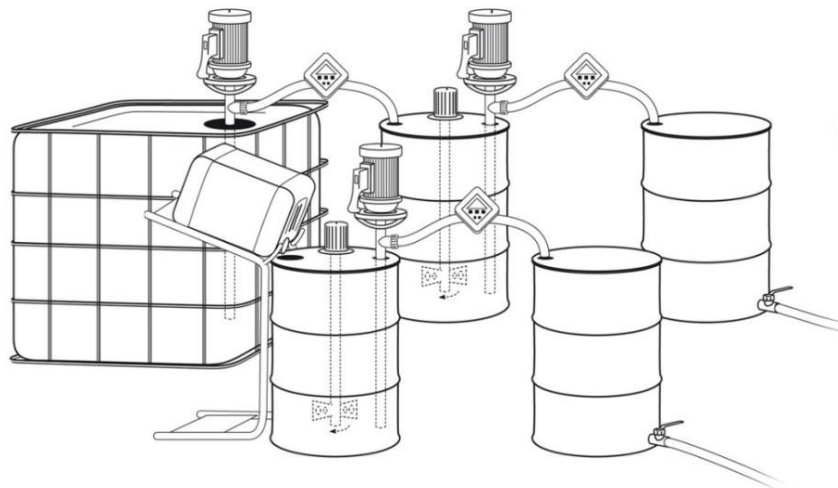


Abbildung 4. Acrylatgel-Mischanlage. (Quelle: TPH)

2 FORSCHUNGSFELDER

Zur Schaffung von Anwendungsgrundsätzen und planbaren Vorgehensweisen mit chemischen Injektionsgütern müssen durch F&E-Projekte Grundlagen wie Penetrations- und Ausbreitverhalten, Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit ermittelt werden. Zusätzlich sind Grundlagen der Handhabungs- und Reaktionssicherheit zu betrachten, die bei chemischen Füllgütern gänzlich andere Eigenschaften aufweisen, als das bei mineralischen Produkten der Fall ist. Deshalb ist die TPH Bausysteme an folgenden F&E-Projekten beteiligt:

- Abdichtung von Damm- und Deichkörpern mittels kunststoffbasierter Dichtungssysteme (TU Dresden, Abb. 5)
- Grundlagenuntersuchungen zur Festigkeitsentwicklung und zum Ausbreitverhalten von Acrylatgelen (UniBW München, Institut für Bodenmechanik und Grundbau)
- Langzeitbeständigkeits-Prüfung von Acrylatgel-Boden-Proben (MFPA Leipzig)
- Untersuchungen zur Beurteilung der Auswirkung auf das Grundwasser unter Verwendung des Säulenversuches mit umgekehrter Fließrichtung
- Untersuchung des Elutionsverhaltens (AbZ)
- Prüfung auf Normalentflammbarkeit (Baustoffklasse B2) DIN 4102 Teil 1



Abbildung 5. Versuchsaufbau mit unterschiedlichen Lanzenanordnungen im Versuchsfeld.

3 ERFOLGREICHE BEISPIELE FÜR DEN EINSATZ VON ACRYLATGEL

Im nachfolgenden Teil werden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Acrylatgel als Injektionsstoff anhand einiger Referenzobjekte beschrieben.

3.1 ARGE S21 Stuttgart

Um Wasser von dem angrenzenden Anhydrit fernzuhalten wurden Umlagerungen, die während des Vortriebs entstanden sind, mit dem sehr niedrigviskosen Acrylatgel Rubbertite® verfüllt und verfestigt. In den Umlagerungen wurde eine durchschnittliche Rissbreite von 0,1 mm diagnostiziert. Zudem war es notwendig im Vorfeld durch genaue Prüfungen die Unbedenklichkeit des Acrylatgels im Kontakt mit dem Anhydrit nachzuweisen.

3.2 Jagdbergtunnel

Um das Eindringen von Wässern aus dem Deckgebirge (Muschelkalk) in den Rötbereich zu verhindern, wurden eine Abschottung bzw. eine Absperrung und die gezielte Fassung möglicher sickernder Bergwässer veranlasst. Untersuchungen waren zu der Bewertung gekommen, dass mögliche Wasserzutritte äußerst stark betonangreifend (sulfathaltig) sind. Zur gezielten Fassung und schadlosen Ableitung möglicher sickernder Bergwässer wurden Injektionsschleier mit Sperrbauwerken geplant und ausgeführt (Abb. 6).

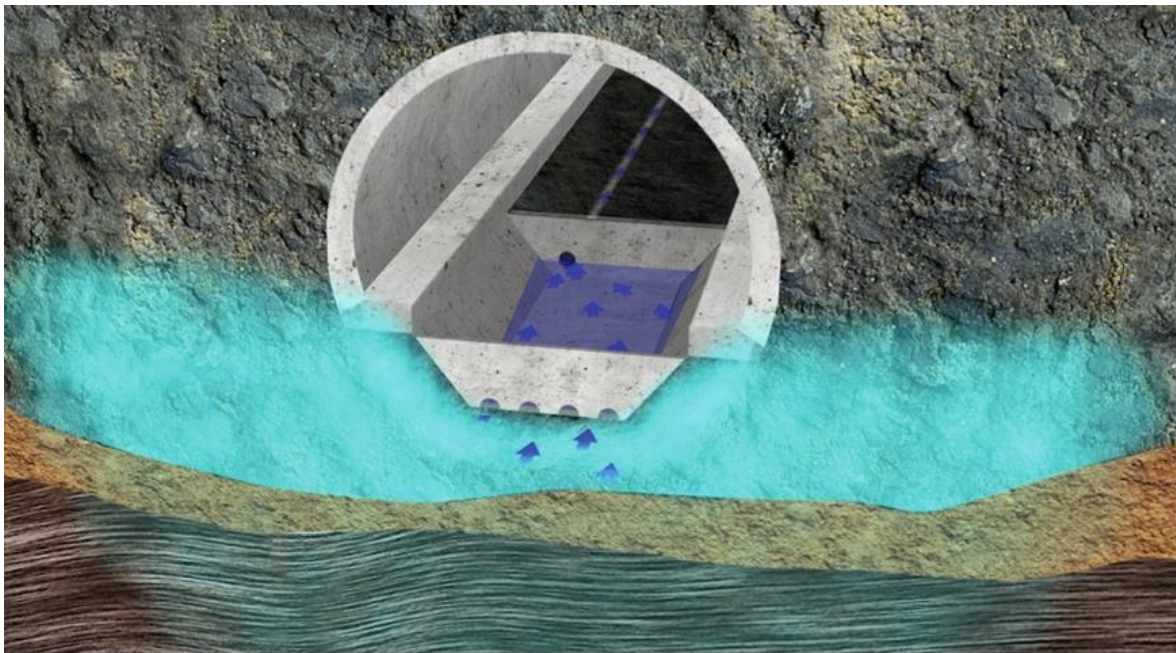


Abbildung 6. Injektionsschleier mit Sperrbauwerken zur gezielten Ableitung möglicher aggressiver Bergwässer. (Quelle: TPH)

3.3 Neubau eines Sickerwasserstollen im Staudamm Sylvensteinspeicher

Trotz der schwer einzuschätzenden Bodenverhältnisse im Start- und Zielbereich konnten die gestellten technischen und ökologischen Anforderungen ohne Vereisung erfüllt werden. Die angestrebten Festigkeiten wurden erreicht, der Sickerwasserstollen konnte auch unter diesen Bedingungen in Micro-Tunneling-Bauweise erstellt werden. (Abb.7)

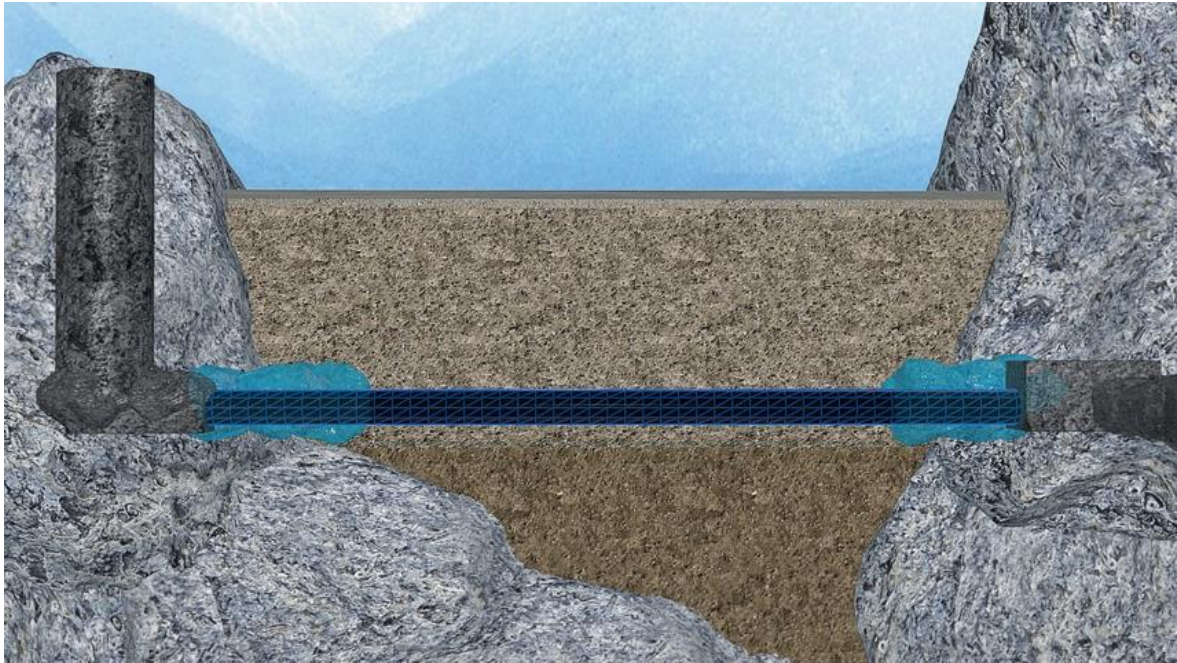


Abbildung 7. Der unsichere Übergangsbereich zwischen Fels und geschüttetem Damm wurde durch Hartgel-Injektionen stabilisiert und abgedichtet. (Quelle: TPH)

3.4 Dresdner Zwinger

Für die Besucher wurde ein unterirdischer Tunnel erweitert. Aus geotechnischer Sicht ein sehr anspruchsvolles Unterfangen. Eine nötige Baugrundverbesserung unter erschwerten Umständen konnte durch Injektionen erreicht werden. Dabei stellten der Denkmalschutz, vorhandene Leitungen, der laufende Museumsbetrieb sowie der schwierige Baugrund besondere Herausforderungen dar. (Abb. 8)

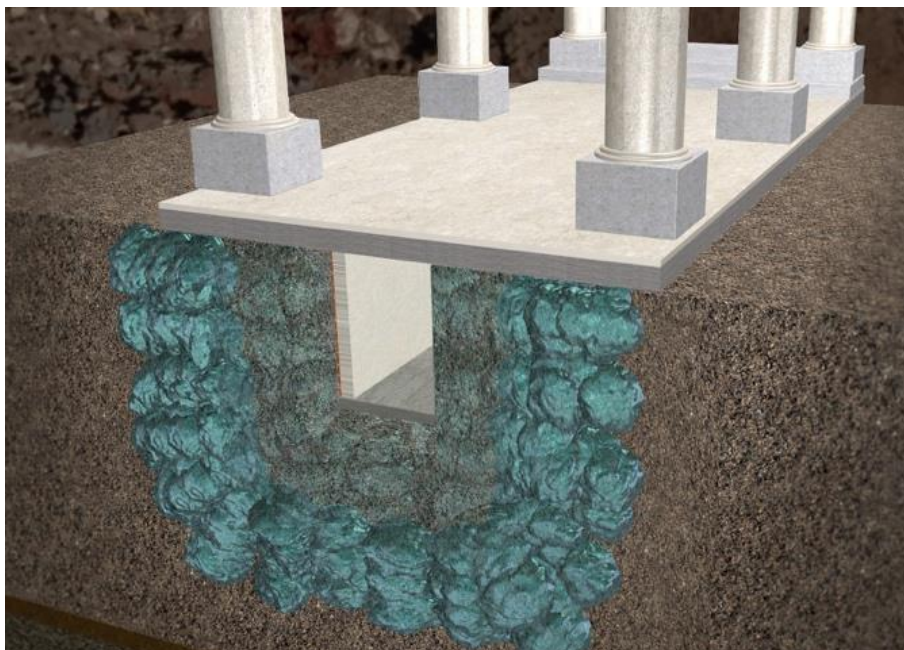


Abbildung 8. Ein durch Injektion erzeugter stabilisierender Bodenkörper mit einer angestrebten Festigkeit von 4 N/mm^2 zur Sicherung des Abbruchbereichs. (Quelle: TPH)

Chemische Injektionen – Schäume und Harze auf PU und PUS Basis

Roland Mayr

BASF Performance Products Austria GmbH, Krieglach, Österreich

Uwe Wyink

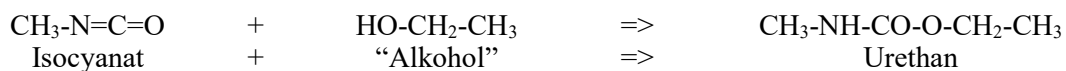
BASF Construction Solutions GmbH, Mannheim, Deutschland

KURZFASSUNG: Reaktive Kunstharze auf Polyurethan (PU) Basis werden seit über 40 Jahren im Kohlebergbau zur Gebirgsverfestigung eingesetzt. Etwas neuer ist der Einsatz von Organo-Mineralharzen (Harze auf Polyurea-Silikatbasis PUS). Es wird ein Überblick über die aktuellen Systeme gegeben. Für den Einsatz dieser Injektionsmittel sind zwei Anwendungsbeispiele angeführt. Am Raingrubentunnel der Tunnelkette Perschling wurden mittels Injektionen von schäumendem PUS Harz die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Abschluss der Vortriebsarbeiten geschaffen. Am Kraftwerksprojekt Karahnjúkar in Island kam es beim Auffahren des Triebwasserstollens zu extrem starken Wasserzutritten. Diese konnten mittels eines schnell reagierenden PU Harzes weitgehend abgedichtet werden.

1 ALLGEMEINES

1.1 Polyurethane (PU)

Polyurethan-Injektionsgut (PU-Injektionsgut) besteht aus reaktiven plastischen Polymeren mit einer breiten Palette von Eigenschaften für verschiedene Anwendungen. Polymere sind lange Moleküle, die erzeugt werden, indem kleinere Moleküle (Monomere) bei der so genannten Stufenpolymerisation (oder Kondensationspolymerisation) verbunden werden, z.B. zu Polyurethanprodukten. Produkte mit NHCO_2 -Wiederholungseinheiten werden Polyurethan (PU) genannt. Im Folgenden wird eine einfache Beispielreaktion gezeigt:



Die Reaktionsprodukte können starr, weich oder porenfrei sein oder auf das 30-fache des Volumens der flüssigen Komponenten aufgeschäumt werden. Die Reaktionszeit kann, abhängig von der Formulierung, zwischen wenigen Sekunden und mehreren Stunden betragen. Die Viskosität des Mischprodukts vor Beginn der Reaktion und auch die Geschwindigkeit der Reaktion ab ihrem

Beginn sind temperaturabhängig. Es gibt Produkte die als Einzelkomponenten injiziert werden, aber auch Zwei-Komponenten-Systeme. Die Eigenschaften eines Produkts werden hauptsächlich durch die Wahl der unterschiedlichen Grundrohstoffe bestimmt. Einige Systeme können durch den Einsatz zugesetzter Katalysatoren, die das Verhalten des Produkts beeinflussen, modifiziert werden.

Der sehr breite Umfang möglicher PU-Injektionsguteigenschaften bietet dem Spezialisten Vorteile beim Maßschneidern eines Materials für spezielle Anwendungszwecke. Für die meisten Endnutzer kann diese Komplexität ziemlich frustrierend sein, da es schwierig ist, das Beste im Handel erhältliche Produkt für eine gewünschte Anwendung auszuwählen. Hier sollte man auf die Empfehlungen eines Fachmanns von einem Produkthersteller oder einer ausführenden Fachfirma zurückgreifen.

Polyurethane werden durch die Reaktion von zwei Komponenten gebildet:

1. Polyisocyanat (Diphenylmethandiisocyanat oder abgekürzt «MDI»). Es sind auch noch andere Isocyanate verfügbar, aber diese sind jedoch gesundheitsgefährdend und sollten nicht zur Injektion bei Projekten unter Tage verwendet werden.
2. Polyalkohole (kurz „Polyole“).

Ein sehr interessanter Teil der Reaktion ist die Wirkung von Wasser. Wenn zur Polyolkomponente etwas Wasser hinzugefügt wird oder die gemischten Komponenten nach der Injektion auf Wasser treffen, reagiert ein Teil des Isocyanats zu Polyurea und Kohlendioxid (CO₂). Diese Reaktion erfolgt parallel zu der Bildung von PU und das Gas erzeugt eingeschlossene Blasen, was wiederum die Bildung geschlossenzelligen Schaumstoffs bewirkt.

Bei den meisten Fällen unter Tage sind kombinierte Wirkungen einer Injektion erforderlich, wie zum Beispiel Wasserabdichtung und Bodenverfestigung. Auch die Materialkosten sind von Bedeutung. Die beste Verfestigung wird erreicht, wenn nur eine sehr geringe Schaumreaktion vorliegt. Dies führt auf Grund des höheren Materialbedarfs zu höheren Kosten bezogen auf den zu injizierenden Hohlraum. Im anderen Extremfall entsteht durch sehr rasches Aufschäumen auf ein Mehrfaches des ursprünglichen Volumens ein Injektionsgut niedriger Festigkeit, das beim anfänglichen Sperren von fließendem Wasser sehr wirksam sein kann, jedoch nur eine geringe Verfestigungswirkung hat. Ein sehr poröses Injektionsgut dichtet ebenfalls nicht vollständig ab und durch nachfolgenden Aufbau von Wasserdruck kann der Schaum zusammengedrückt werden und das Leck erneut zunehmen. Die Kosten nehmen mit steigendem Schaumfaktor in Bezug auf den zu verfüllenden Hohlraum ab. Die Schaumbildung hat weiters den Effekt der Selbstinjektion des PU-Injektionsguts, da der entwickelte CO₂-Druck 50 bar erreichen kann (temperaturabhängig). Das Eindringen des Injektionsguts wird daher nicht nur durch den Förderdruck und die Produktviskosität bestimmt, sondern auch in sehr starkem Maß durch den Aufschäumdruck beeinflusst (Garshol 2003).

Die Eigenschaften des erzeugten Schaums sind von den Bedingungen vor Ort, wie verfügbares Volumen und entstehender Druck, abhängig. Wenn freies Aufschäumen zu einem Volumenanstieg auf das 30-fache führt, hat der beschränkte Volumenanstieg im Boden Gegendruck und geringere Ausdehnung zur Folge. Bei der Gesteinsinjektion mit niedrigem Druck ist es wahrscheinlicher, dass ein typischer mittlerer Volumenanstieg das 5- bis 10-fache beträgt.

Polyurethanprodukte weisen typischerweise eine hohe Viskosität auf. Dies ist ein beschränkender Faktor für das Eindringen in den Boden. Zwar liegt eine typische Produktviskosität bei 200 mPa·s, aber es sind auch niedrigere Werte bis zu 100 mPa·s möglich.

1.2 Polyurea Silikate (PUS)

Organo-mineralische-Kunststoffe auf Basis von Polyisocyanaten und Alkalisilikatlösungen sind seit längerem bekannt. Zur Entwicklung reaktiver Systeme mit optimalen Eigenschaften kam es erst in den letzten 15 Jahren. Bei PUS Systemen besteht die Komponente A aus einem modifizierten Wasserglas und die Komponente B (wie bei einem PU System) aus einem Isocyanat (Gomulka et al. 2008). Das Vermischen der beiden Komponenten führt zuerst zur Bildung einer Emulsion (Wasser in Öl), wobei zuerst das Wasser mit dem Isocyanat unter der Abspaltung von CO₂ reagiert und dann dieses mit der Wasserglaslösung. Die optimale Abstimmung dieser parallel verlaufenden Polymerisierungsreaktionen mittels Additiven ist wesentlich für die Produkteigenschaften.

1.3 Vergleich von PU und PUS

PU – Polyurethan-Technologie	PUS – Polyurea Silikat-Technologie
exothermische Reaktion ~135 °C Wasser kann die Temperatur um 20% steigern	exothermische Reaktion ~100 °C Wasser hat keinen Einfluss auf Temperaturentwicklung
Komponente A (Polyol) ist organisch nicht selbstverlöschend höhere Zähigkeit (schwierig schneidbar) grundsätzlich nicht antistatisch langsamere Festigkeitsentwicklung (Haftung)	Komponente A („Wasserglas“) ist anorganisch selbstverlöschend schneidbar antistatisch schnellere Festigkeitsentwicklung (Haftung und Druckfestigkeit)
Anwendungssysteme: 1 K Systeme durch Wasser/Feuchtigkeit aushärtend (hydrophil) 2 K Systeme für komplexere Anwendungen stark schäumend für Wasserstop Injektionen schwach schäumend auch zur Verfestigung	Anwendungssysteme: 2 K Systeme stark schäumend als Hohlraumfüller und zur Verfestigung nicht schäumend zur Verklebung von Gebirgsschichten

2 INJEKTIONSTECHNIK

Für Zwei-Komponenten-PU-Produkte muss eine spezielle Zwei-Komponenten-PU-Pumpe eingesetzt werden. Diese sind normalerweise für ein Verhältnis der Komponenten A und B (nach Volumen) von 1:1 eingerichtet. Eine typische Pumpe (Perforator GX 45) für den Einsatz unter Tage ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1. Komplette 2 K Injektionspumpe mit Zubehör und Details der Mischarmatur.

Die zwei Komponenten kommen über 2 Schlauchleitungen mit Rückschlagventil und Kugelhahn am Ende in einem Y-Stück (oder T-Stück) zusammen und werden im Statikmischer intensiv vermischt. Nach Abschluss der Injektion oder bei Unterbrechungen muss der Statikmischer mit der A Komponente durchgespült werden.

3 ANWENDUNGSBEISPIELE

3.1 Erfahrungsbericht „Tunnelkette Perschling“

Beim Raingrubentunnel der Tunnelkette Perschling (ÖBB) kam es im September 2008 zu einem Stillstand der TBM. Infolge progressiver Schlotbildung über den Bohrkopf wurde dieser blockiert und konnte nicht mehr gedreht werden. Erst nach umfangreichen Interventionsmaßnahmen konnte der Vortrieb fortgesetzt werden. Die noch verbliebene Vortriebslänge von etwa 700 m wurde mittels Bohrungen von obertage injiziert. Dabei wurden abwechselnd 3 bzw. 4 verrohrte Bohrlöcher auf das Niveau der Tunnelfirste abgeteuft und mit Injektionsschläuchen ausgerüstet. Die Injektion erfolgte nach der obersten "Verdämmungsinjektion" in zwei Stufen (siehe Abbildung 2). Als Injektionsmaterial kam ein stark schäumendes PUS (MasterRoc MP 367 Foam) zum Einsatz. Der freie Schaumfaktor dieses Produktes liegt bei etwa 30, wobei der Schaumfaktor im Gebirge aufgrund von Injektionsweg und Druckverhältnissen meist wesentlich geringer ist. Wegen des eher spröden Materialverhaltens ist das Injektionsmaterial gut mit der TBM schneidbar. Der Vortrieb konnte nach diesen Injektionsmaßnahmen erfolgreich abgeschlossen werden.

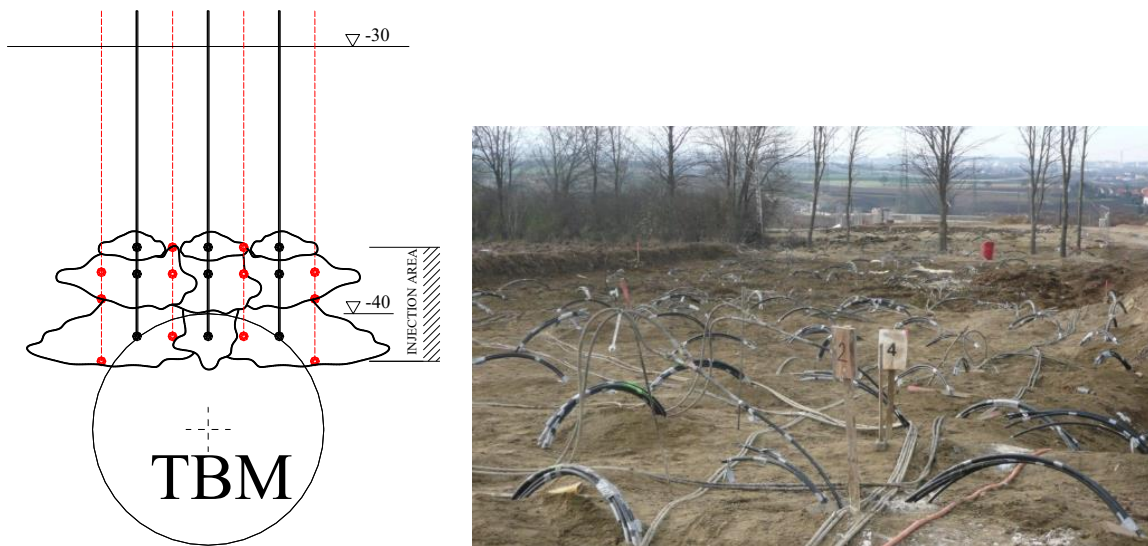


Abbildung 2. Injektionsschema und Injektionsleitungen obertage beim Raingrubentunnel.

3.2 Erfahrungsbericht „Kraftwerk Karahnjukar“

Beim Wasserkraftwerk Karahnjukar im Osten von Island wurde der Triebwasserweg mittels einer Hartgesteins TVM mit 7,2 und 7,6 m Durchmesser aufgeföhren. Die geologischen Verhältnisse sind geprägt von Basalten und Andesiten mit signifikanten Störungszone. Es kam zu einzelnen Wasserzutritten von 200 l/s und Gesamtwassermengen im Stollen von 1.500 l/s. Einerseits führte dies zu einer Erosion in den Störzonen mit einer Gefährdung der Standsicherheit und andererseits wurden die nachfolgenden Arbeiten, wie der Einbau der Sohle durch das Wasser behindert. Aus diesem Grund wurde ein PU Injektionssystem eingesetzt, um die Wasserzutritte zu reduzieren.

Ausgewählt wurde ein zwei-komponentiges PU System, mit Anpassungsmöglichkeiten an Reaktionsgeschwindigkeit und Thixotropie (MasterRoc MP355 Thix). In den Bereichen der großen Wasserzutritte (siehe Abbildung 3) musste mit einer höheren Produkttemperatur (Heizeinheiten für beide Komponenten – siehe Abbildung 4) gearbeitet werden, um eine entsprechend rasche Reaktion zu erzielen. Erschwerend für die Anwendung kam hinzu, dass die Temperatur des eintretenden Wassers nur 4 °C betrug. Die Gesamtwassermenge konnte mit diesen Maßnahmen signifikant reduziert werden.



Abbildung 3. Signifikante Wasserzutritte (100 l/s).



Abbildung 4. Injektionssetup für 2 K PU System (Pumpe /Heizer).

LITERATUR

- Gomulka, G., Trieflinger, C. & Wyink, U. 2008. Entwicklung und Anwendung von Polyharnstoff-Silikat-Kunstharzen zur Stabilisierung gebrächen Gesteins. S.625-631, *Glückauf 144 (2008) Nr.11*
- Garshol, K. 2003. *Pre Excavation Grouting in Hard Rock Tunnelling*, 5th edition, March 2016, BASF Construction Chemicals Europe Ltd.

Baulos SBT3.1: Planung und Vertragsgestaltung für Injektionsmaßnahmen beim Schacht Sommerau 2

Oliver Kai Wagner
ÖBB-Infrastruktur AG, Graz, Österreich

Andreas Walter
viglconsult ZT, Schruns, Österreich

Hubert Druckfeuchter
IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH, Salzburg, Österreich

KURZFASSUNG: Im westlichsten Baulos des Semmering-Basistunnels liegen laut Prognose im Schachtfußbereich und den angrenzenden Streckenröhren im Bereich der Talquerung des Fröschnitztales stark zerlegte und entfestigte Grobgneise vor, die teils erosionsgefährdete Gebirgsanteile aufweisen, welche bei entsprechendem Bergwasserdruck zum Ausfließen neigen. Das vordringliche Ziel der für diesen Bereich vorgesehenen Injektionen ist daher eine Verbesserung des Gebirgsverbandes. Dafür wurden beispielsweise für den Schacht Sommerau 2 gerichtete Injektionsbohrungen mit rd. 110 m Länge vorgesehen. Für die Ausschreibung wurde ein Injektionsbohrschema geplant, welches die laut Prognose zu injizierenden Bereiche abdeckt. Mit den Ergebnissen der Vorauserkundung werden die einzelnen Injektionskampagnen schließlich in der Ausführung festgelegt. Im Zentralbereich des Tunnelquerschnittes werden abschnittsweise Injektionsversuche durchgeführt, um verschiedene Rezepturen (i.W. Feinstbindemittel, Silikate, Acrylate) des Injektionsgutes zu testen und auf das Gebirge abzustimmen. Zur Verifizierung des Injektionserfolges werden nach den Injektionsversuchen zusätzliche Erkundungsbohrungen ausgeführt. Der komplexe Bauablauf erforderte für die Ausschreibung spezielle vertragliche Regelungen.

1 EINLEITUNG

Das Baulos SBT3.1, das westlichste Baulos des 27,3 km langen Semmering-Basistunnels, umfasst ausgehend vom Zwischenangriff Grautschenhof zwei je etwa 3,2 km lange, steigende zyklische Vortriebe Richtung Mürzzuschlag, und zwei je etwa 3,8 km lange, fallende zyklische Vortriebe Richtung Gloggnitz.

Der Zwischenangriff Grautschenhof selbst besteht aus zwei temporären Bauschächten (Schächte Sommerau 1 und 2) und 3 Querkavernen im Schachtfußbereich, welche i.W. für die Logistik in der Bauphase erforderlich sind.

Beim 100 m tiefen Schacht Sommerau 2 sind umfangreiche Injektionsmaßnahmen erforderlich. Dies ergab eine Erkundungsbohrung im Schachtbereich, welche vorgängig zur Ausschreibung abgeteuft und intensiv beprobt wurde.

Mit der Ausschreibungsplanung wurde im Sommer 2013 begonnen. Die Veröffentlichung der Ausschreibungsunterlagen erfolgte Anfang September 2015. Der Baubeginn fand im Mai 2016 statt.

2 GEOLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN SCHACHT SOMMERAU 2 UND DARAUSS FÜR DIE AUSSCHREIBUNG ABGELEITETE BAUMASSNAHMEN

Gemäß der Baugrundprognose der Ausschreibung (Geotechnische Prognose Untertage) wird das Gebirge, unter einer 8 m mächtigen Lockergesteinsschicht aus Hangschutt, im oberen Schachtabschnitt bis in eine Teufe von ca. 40 m von Störungsgesteinen aufgebaut. In diesem Schachtabschnitt werden Bergwasserzutritte im Vortriebsbereich von bis zu 10 l/s erwartet. Der untere Schachtabschnitt wird von weitgehend massigem bis schwach geschiefertem Grobgneis mit wechselnder, vielfach starker bis mäßiger Zerlegung aufgebaut. Zudem sind Störungsgesteine sowie grusig entfestigte Zonen mit teils fließenden Übergängen zu sandig-kiesigem Kataklasit prognostiziert, welche bei entsprechendem Bergwasserdruck zum Ausfließen neigen. Für diesen Abschnitt werden Bergwasserzutritte im Vortriebsbereich mit bis zu 25 l/s prognostiziert, mit einem Bergwasserdruck von bis zu 10 bar. Um diese Baugrundverhältnisse für die Vortriebsarbeiten zu beherrschen sind daher vorausseilende Injektionen erforderlich, mit dem Ziel, den Gebirgsverband zu verbessern und die Wasserdurchlässigkeit zu reduzieren.

Der Schacht Sommerau 2 wird im Lockergesteinsbereich als Vorschacht in Form einer dichten Bohrpfahlwand (überschnitten, DM 1,5 m) hergestellt, die rd. 3,5 m in das Festgestein einbindet. Darunter erfolgt der Vortrieb zyklisch mit einer an die Baugrundverhältnisse angepassten Abschlagslänge von 1,7 bzw. 1,3 m sowie einem Stützmittelmix aus Spritzbeton (20 bzw. 25 cm, zweilagig bewehrt) und einer Systemankerung (Rohrreibungs-, SN- oder Selbstbohr-Anker) mit 3 bzw. 4 m Länge, um den Injektionsring nicht zu durchdringen.

Vorgängig zum Abteufen sind die Injektionen von Obertage aus durchzuführen. Dazu wurde folgende Vorgangsweise geplant:

- Vorauserkundung mit einer Rotationskernbohrung (RKB)
- Injektionsversuche an ausgewählten Abschnitten der RKB mit unterschiedlichen Injektionsmitteln und -rezepturen
- Bohren und Injizieren Lochraster ZB (Zentralbohrungen) mit unterschiedlicher Einfärbung zur Verifizierung der Injektionsausbreitung
- Aushärten Injektion
- Überprüfung des Injektionserfolges mittels RKB, geophysikalischen Bohrlochmessungen und Wasserabpressversuchen (WAPs)
- Bohren Lochraster 1 (SB1) und injizieren mit FB-Suspension
- Bohren Lochraster 2 (SB2) und injizieren mit chemischen Injektionsmitteln

Für die jeweiligen Lochraster wurde ein gleichzeitiges Injizieren von jeweils zwei gegenüberliegenden Bohrlochpaaren mit vier getrennten Injektionspumpen, vom Bohrlochtiefsten in Richtung Bohrlochmund, versetzt um jeweils eine freibleibende Bohrung, vorgesehen.

Es wurden gerichtete Vollbohrungen mit bis zu 120 m Länge gefordert, welche unverrohrt (DM mind. 84 mm) und verrohrt (Innendurchmesser Verrohrung und Ringkrone mind. 76 mm) abzuteufen sind, mit einer zul. Abweichung von 30 cm radial.

Die Bohrungen für die Vorauserkundung und die Injektionen sind u.a. mittels Bohrdatenschreiber zu dokumentieren.

Für die Injektionen über Doppelpacker mit einer Passenlänge von 3 m wurden 2“ Manschettenrohre aus Stahl (gezogene Rohre, entgratet) vorgesehen. Diese können mit mehreren Durchgängen, bei einem Bergwasserdruck bis zu 20 bar und Injektionsdrücken bis zu 50 bar, beaufschlagt werden.

Eine Übersicht über den prognostizierten Baugrund, die Bauwerkskonfiguration sowie die vorgesehenen Injektionsmaßnahmen ist in Abbildung 1 dargestellt.

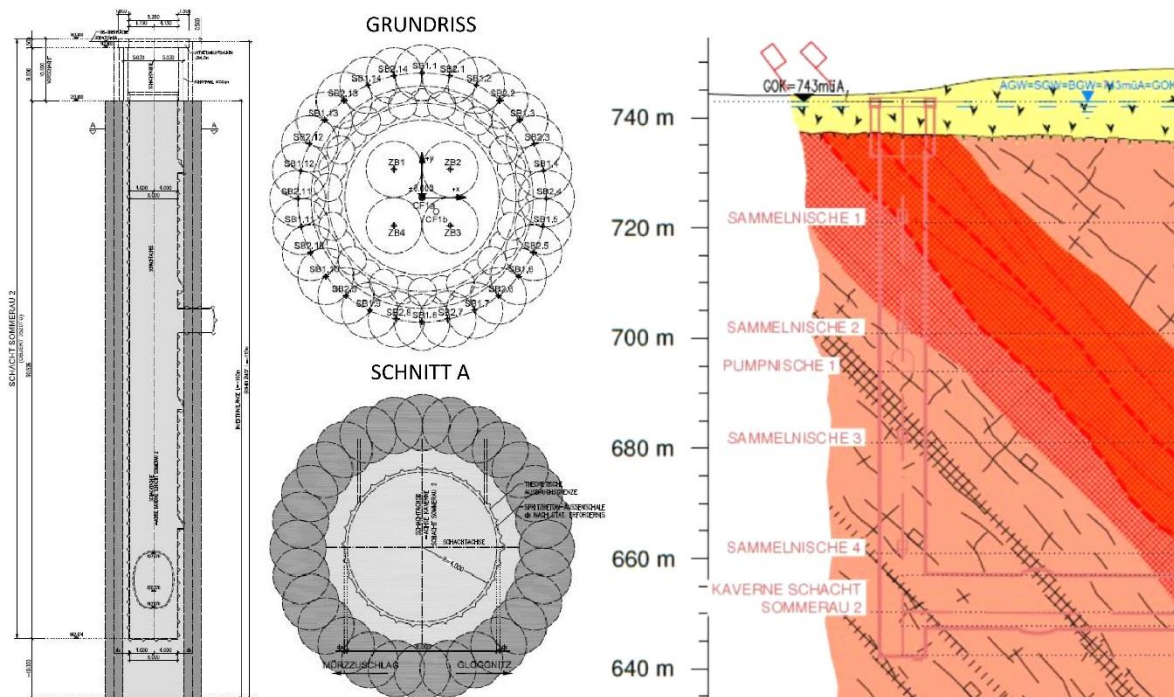


Abbildung 1. Schacht Sommerau 2 – Baugrundprognose und Injektionsmaßnahmen.

3 INJEKTIONSGÜTER

3.1 Allgemein

Für die Injektionsarbeiten wurden bauvertraglich folgende Injektionsgüter vorgesehen:

- Portlandzement (PZ): PZ-Suspension
- Feinstbindemittel (FB) hochfeiner Zement: FB-Suspension
- Silikatgel: kolloidale Silikatsuspension
- Acrylatgel: wasserquellfähiges Hydrogel auf Acrylat- bzw. Methacrylatbasis

Durch die hohe Bandbreite der zur Verfügung stehenden Injektionsstoffe mit den entsprechend unterschiedlichen rheologischen und mechanischen Eigenschaften kann für das Erreichen des Injektionserfolges gezielt auf die wechselhaften Bedingungen des Baugrundes eingegangen werden.

Die Regelungen für die Auswahl von geeigneten Produkten und deren Rezepturen sowie erforderliche Prüfungen wurden in den Technischen Vertragsbestimmungen (TV) der Ausschreibung definiert.

3.2 Spezifikationen Injektionsgut

3.2.1 Funktionale Anforderungen

Bei der Spezifikation der Injektionsgüter ist allgemein zwischen den zementgebundenen und den chemischen Injektionsgütern zu unterscheiden. An beide wurden folgende funktionale Anforderungen gestellt:

- Gesichertes Eindringen in das jeweils zu injizierende Gebirge bei technisch vertretbarem Injektionsdruck

- Injektion bei ruhendem Kluftwasser und Verdrängen des Kluftwassers weitestgehend ohne Entmischung (stabiles Injektionsgut)
- Reaktion und Aushärten unter dem jeweiligen Haltedruck
- Erhalt der Wirkung bei den jeweils im Zuge des nachfolgenden Vortriebes erwarteten Verformungen des injizierten Gebirges
- Bedenkenlose Anwendung hinsichtlich schädlicher Umweltauswirkungen

Vor dem Einsatz der Injektionsgüter wird im Zuge vorgängiger Injektionsversuche eine Optimierung auf der Baustelle vorgenommen (Eignungsprüfung). Der Umfang dieser Versuche erfolgt einvernehmlich zwischen AN und AG.

Gemäß den Bescheidaufgaben aus dem UVP-EB-Einreichprojekt ist der Nachweis der Wassergefährdungsklasse 1 für alle Komponenten in allen Verarbeitungszuständen zu erbringen.

3.2.2 Chemische Injektionsgüter

Neben den funktionalen Anforderungen wurden für die chemischen Injektionsgüter Grundsatzanforderungen an die rheologischen Eigenschaften vertraglich vorgegeben. Zudem wurde eine Bandbreite der zulässigen Topfzeiten (Gelzeiten) angegeben (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1. Anforderungen an chemische Injektionsmittel.

	Eigenschaft	Einheit	Wert
Silikat-Gel	lösungsmittelfrei		
	hydrophil		
	keine toxischen Bestandteile		
	dyn. Viskosität Gemisch *	[mPa·s]	≤ 5
	Gelzeit / Topfzeit	[min]	250 – 100
Acrylat-Gel	dreikomponentiges, wasserquellfähiges Hydrogel		
	dyn. Viskosität Gemisch *	[mPa·s]	≤ 2,5
	Gelzeit / Topfzeit (reduziert)	[min]	45 – 5
	*... bei +20 °C		

3.2.3 Zementgebundene Injektionsgüter

Bei den zementgebundenen Injektionsmitteln wurden bei der Angabe der Grundsatzanforderungen zwischen den Komponenten (Grundwerkstoff, Zusatzmittel) und dem Gemisch unterschieden (siehe Tabelle 2).

Die Anforderungen an den Grundwerkstoff umfassen die Spezifikation des Zementtyps und die Mahlfineinheit. Für das Gemisch (Injektionsgut) wurden die rheologischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Anforderungen an die Stabilität des Injektionsgutes definiert.

Bei den Zusatzmitteln (Stabilisierungszusatz, Fließhilfe, Füller, Anti-Washout ...) wurde angegeben, welche Zusatzstoffe dem Injektionsgut beigemischt werden dürfen. Dabei sind die geforderten Eigenschaften des Gemisches weiterhin einzuhalten.

Tabelle 2. Anforderungen an zementgebundene Injektionsmittel.

Eigenschaft		Feinstbindemittel	PZ-Suspension
Grundwerkstoff	Zementtyp	[-]	CEM I 42,5 R/C3A-frei CEM I 52,5 N/C3A-frei
	Mahlfeinheit	[µm]	d95 < 90
		[µm]	d50 < 20
[m ² /kg]		> 400	
Gemisch	W/B-Wert	[-]	0,7 – 1,4
	Viskosität *	[Pa·s]	0,03
	Grenzscherungsspannung *	[Pa·s]	15
	Marsh-Zeit	[s]	< 50
	Absetzmaß nach 2 h	[%]	< 5
	Festigkeit nach 24 h	[N/mm ²]	> 2
	*... bei +20 °C		

3.3 Prüfungen

Die vorgesehenen Prüfungen der Injektionsgüter wurden in Anlehnung an die ÖNORM B 4454 vorgesehen und im Prüfbuch (Teil der TV) festgelegt. Die Prüfungen umfassen die gemäß Norm angegebenen *Grundsatz-, Eignungs- und Güteprüfungen*.

In der Grundsatzprüfung, welche in einer akkreditierten Prüfanstalt erfolgt, wird die grundsätzliche Eignung der ausgewählten Produkte unter Berücksichtigung der gemäß TV angegebenen Mindestanforderungen untersucht.

Nach Vorliegen der Ergebnisse werden für jedes Injektionsgut (2x zementgebundenes und 2x chemisches Injektionsgut) jeweils fünf Rezepturen im Zuge der Eignungsprüfung unter Baustellenbedingungen (Baustellenlabor) auf deren rheologische und mechanische Eigenschaften sowie deren Stabilitätsverhalten geprüft. Die Festlegung der Rezepturen erfolgt dabei einvernehmlich zwischen den Fachexperten des AG und des AN.

Im zweiten Teil der Eignungsprüfung (Injektionsversuche in situ) erfolgt eine Auswahl der jeweiligen Rezepturen auf Grundlage der Laborergebnisse. Die Qualitätssicherung der Injektionsgüter erfolgt durch die vorgegebene Güteprüfung während der Durchführung der Injektionsarbeiten.

4 VERTRAGSGESTALTUNG

Für die Bauzeitermittlung wurden Leistungsansätze für das Auf-/Umstellen und Umrüsten der Geräte, das Bohren selbst sowie die durchzuführenden Bohrlochversuche abgefragt. Für die Dauer der Injektionsarbeiten wurde seitens AG eine Abschätzung berücksichtigt. Die Ermittlung der tatsächlich gebührenden Bauzeit erfolgt entsprechend der festgelegten Injektionsregeln nach tatsächlichem Erfordernis.

Um auf den komplexen Bauablauf besonders flexibel reagieren zu können und seitens AN erfahrene, spezialisierte Ansprechpartner zu bekommen, wurde ein Koordinator für Versuchsarbeiten sowie ein Koordinator für Injektionsarbeiten auf Seiten AN gefordert, welche über entsprechende Erfahrungen verfügen müssen.

Für das Leistungsverzeichnis wurden die einzelnen Maßnahmen und Arbeitsschritte möglichst genau als Einzelpositionen dargestellt, um auf Änderungen in der Bauausführung flexibel reagieren zu können und die Risiken in der jeweiligen Sphäre zu belassen.

Diesbezüglich wurden beispielhaft die nachfolgenden vertraglichen Regelungen getroffen.

- Das Setzen von Packern wird abhängig von der jeweiligen Tiefenstufe und unterschieden nach chemischen und zementgebundenen Injektionsmitteln vergütet.

- Feststoffe sowie Zuschlagstoffe und Zusatzmittel für zementgebundene Injektionen wurden in ihren Einzelkomponenten ausgeschrieben.
- Für Fließhilfe, Stabilisierer und Stabilisator wurden dabei jeweils spezielle Produkte definiert und im Bauvertrag auch ein Vergleichsversuch aufgenommen, um den Einsatz eines anderen Produktes zu ermöglichen und vertraglich abwickeln zu können.
- Für das Einpressen des Injektionsgutes wird die tatsächliche Zeit aufgrund der Aufzeichnungen der Druck-Mengenschreiber je Pumpanlage, unterschieden nach der Anzahl der gleichzeitig im Betrieb befindlichen Pumpen einer Injektionseinrichtung, herangezogen.

LITERATUR

ÖNORM B 4454. 2001. *Erd- und Grundbau, Injektionen in Fest- und Lockergestein, Prüfungen*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.

Baulos SBT3.1: Bohr- und Injektionsarbeiten für den Schacht Sommerau 2

Helmut Wannenmacher
GGE GmbH, Widnau, Schweiz

Robert Pfeffer
Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H. Wien, Österreich

Bernd Christöphl
Marti GmbH, Graz, Österreich

Andreas Walter
viglconsult ZT, Schruns, Österreich

KURZFASSUNG: Der zentrale Zugang des Bauloses SBT 3.1 des Semmering-Basistunnels erfolgt mittels zweier paralleler Schächte im Talbereich der Mürztalquerung. Der Schacht Sommerau 2 mit einem lichten Durchmesser von 8,0 m und einer Teufe von rd. 100,0 m ist ein redundanter Versorgungsschacht im Nahbereich des Hauptzugangsschachtes mit einem lichten Durchmesser von 14 m und selbiger Tiefe. Die Mürztalquerung ist eine tektonisch aktive Seitenverschiebung mit einer Wechsellagerung von kleinräumig gestörten und wechselnden massigen Gneisen und Quarziten. Das Abteufen des Schachtes Sommerau 2 erforderte zur Sicherstellung der Standsicherheit ein hohes Maß an vorauseilender Verbesserung und Abdichtung des Baugrundes. Die volatilen geologischen Verhältnisse mit kleinräumigen wechselnden Eigenschaften von Kataklasiten, bis zu stark zerlegten, fließenden und untergeordnet massigen Verhältnissen erforderte ein abgestimmtes Injektionsprogramm zum Erreichen der Injektionsziele. Infolge von Abweichungen bei den Bohr- und Injektionsarbeiten wurde zum Erreichen der Injektionsziele und zur Minimierung von potentiellen Injektionsfehlstellen eine Reihe von Anpassungen im Zuge der Injektionsarbeiten erforderlich.

1 ALLGEMEINES

Das Auffahren von Schächten unter geologisch erschwerten Bedingungen bedingt ein hohes Maß an vorauseilender Gebirgsabdichtung, Verbesserung und Konsolidierung des Baugrundes. Wasserzutritte, vor allem in Kombination mit ungünstigen Baugrundeigenschaften, können zu einem lokalen Ausfließen gestörter Bodenschichten, in erweiterter Folge zu einem hydraulischen Grundbruch der Schachtsohle, als auch zu einer Flutung des Schachtes während des Vortriebes führen. Durch Einsatz von Manschettenrohrinjektionen mit Unterteilung der Injektionsstrecke in mehrere Injektionsabschnitte können diese Bereiche gezielt erfasst werden. Zudem kann durch Variation der Injektionsgüter sowie durch eine individuelle Festlegung der Injektionsregeln je Passe der Injektionserfolg erhöht werden. Im Falle festgestellten Bohrabweichungen kann durch eine dynamische Anpassung der Bohransatzpunkte sowie Anpassung der Injektionsregeln (z.B. Erhöhung der Injektionsmenge) sowie Umstellung auf ein niederviskoses Injektionsgut der Injektionsradius erhöht werden und somit das Potential von möglichen Injektionsfehlstellen minimiert werden. Zuletzt sind noch die Möglich-

keiten beim Einsatz unterschiedlicher Injektionsgerätschaften zu erwähnen. Als Beispiel sei hier der Einsatz von Packern mit unterschiedlichen freien Verpresslängen angeführt, um gezielt auf inhomogene und heterogene Baugrundverhältnisse einzugehen.

2 BESCHREIBUNG DER ANLAGE

2.1 Geologisch, geotechnische Verhältnisse

Die geologischen Verhältnisse des Schachtes Sommerau 2 bestehen aus einer Wechsellagerung von tektonisch stark überprägten bis hin zu massigen, spröden, phyllonitischen Grobgneisen. Das Grundgebirge wird von einem ca. 8 m starken Lockergesteinshorizont überlagert. Der Bergwasserspiegel liegt nur knapp unter der Geländeoberfläche.

Die Störungsgesteine bilden eine Block-in-Matrix Struktur mit den unterschiedlich ausgeprägten Gneisen. Die Störungsgesteine weisen eine geringe Durchlässigkeit mit einer Bandbreite von 10^{-9} bis 10^{-10} m/s auf, während die Gneise Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-7} m/s aufweisen. Die maßgeblichen geologischen Strukturen streichen in etwa talparallel ($230^\circ - 50^\circ$) und fallen mit einem steilen Einfallen ca. 80° nach NW ein. Die Block-in-Matrix Struktur zeigt einen stark heterogenen Aufbau mit einem kleinräumigen Wechsel der geringfesten Kataklasite und Scherbänder innerhalb der kompetenteren Schichten. Diese Dualität von geringfesten, partial wassergesättigten Kataklasiten und Gneisen von unterschiedlicher tektonischer Beanspruchung erfordert den spezifischen Einsatz von speziell niederviskosen Injektionsstoffen.

2.2 Ausführungsplanung

Der Schacht Sommerau 2 weist einen Innendurchmesser von 8,0 m auf (siehe Abbildung 1). Zum Abbau einer hydraulischen Gradienten wurde eine minimale Stärke von 3,0 m des peripher angeordneten Injektionsring berücksichtigt. Der Injektionsring weist einen Achsabstand von 6,65 m zur Schachtachse auf. Als Abstand der Innenkante des theoretischen Injektionsringes zum Ausbruch des Schachtes wurde ein Abstand von ca. 1,0 m berücksichtigt. Der Injektionsring wurde in zwei getrennte, jedoch überlappende Injektionsringe von jeweils 14 Bohrungen unterteilt. Die Bohrungen des zweiten Durchgangs erfolgten auf Lücke, um etwaige Bohrabweichungen des ersten Durchgangs kompensieren zu können. Die ungünstigen Baugrundverhältnisse mit zufallenden Bohrlöchern erfordern zudem eine durchgängige Injektion mit Manschettenrohren. Die Passenabstände der Manschettenrohrinjektionen wurden mit 3 m begrenzt.

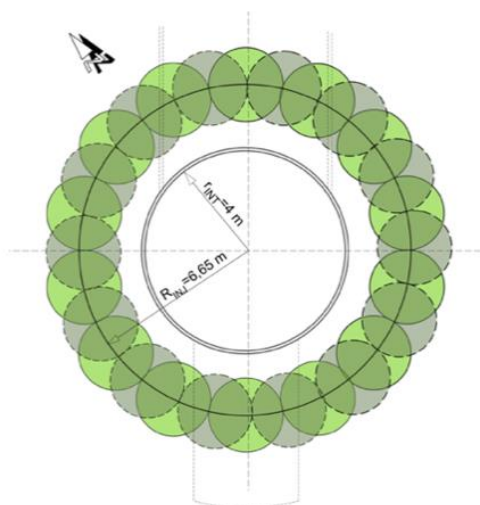


Abbildung 1. Schematische Darstellung Schacht Sommerau 2 mit peripherem Injektionsring.

Der Injektionsprozess sieht einen optimierten Zugang der Bohrgenauigkeit versus Ausbreitmass der Injektion vor. Die Injektionsplanung mit einem singulären Schirm bedingt hierbei ein hohes Maß an Bohrgenauigkeit, welches bei einem Nichterreichen durch zusätzliche Injektionsmaßnahmen (z.B. Erhöhung des Injektionsvolumens) oder einer Anpassung der Kriterien im Rahmen des zweiten Injektionsringes erfolgen kann.

Das Bohrverfahren mit Manschettenrohren bedingt eine zusätzliche Verfüllung des Ringspaltes mit einer Mantelmischung zum Erhalt der Bohrlochstabilität zwischen Baugrund und Manschettenrohr sowie der Bewerkstellung einer gezielten, sektionierten Injektion.

Für die gezielte Injektion wurden im Wesentlichen drei Injektionsstoffe (Feinstbindemittel „FB“, Colloidal Silica „SK“ und Acrylat Gel „AC“) hinsichtlich ihrer Viskosität und der damit verbundenen Fähigkeit einer Konsolidierung des Baugrundes vorgesehen. Die typischen Anfangsviskositäten und Topfzeiten der eingesetzten Injektionsmittel sind wie folgt:

Tabelle 1. Zusammenfassung der typischen rheologischen Kennwerte der eingesetzten Injektionsstoffe.

Rheologische Parameter		AC	SK	FB1	FB2
Salzgehalt / WB-Wert	[%/-]	0,2	5,0	1,5	1,0
rheologischer Typ	[-]	Newton	Newton	Bingham	Bingham
plastische Anfangsviskosität	[cP]	1,6	2,0	14,7	7,5
Scherfestigkeit 100 Pa nach	[h]	0,25	n.a.	n.a.	n.a.
Topfzeit	[h]	0,15	12,0	n.a.	n.a.
n. a.	nicht anwendbar				

3 AUSFÜHRUNG DER BOHR UND INJEKTIONSARBEITEN

3.1 Bohrarbeiten

Die Bohrungen für den Schacht Sommerau 2 wurden als verrohrte und gerichtete Bohrungen ausgeführt. Die Bohrungen wurden mit einer außenliegenden Verrohrung mit einem Durchmesser von 139,7 mm und mit einer Ringbohrkrone von 145 mm sowie einem innenliegenden Gestänge mit einem Durchmesser von 101,6 mm gebohrt. Das innenliegende Gestänge treibt einen hydraulischen Imlochhammer mit einer MaxBit® Klappkrone 115/152 mm an (siehe Abbildung 2).

Für die Lenkung einer Bohrung mit Außenverrohrung stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Abgestimmt auf die geologischen Verhältnisse kommt entweder ein Knickstück mit einem definierten Knickwinkel oder ein Führungsrohr mit außenliegenden, einseitigen Führungsleisten zur Anwendung. Das Knickstück erwies sich im Rahmen von Vorversuchen für die steil zur Bohrachse stehenden geologischen Verhältnisse als ungeeignet. Die Führungsschienen erlaubten hingegen ein definiertes Gegensteuern zur Schichtung der Formationen.

Das hydraulisch angetriebene Bohrsystem mit einem Wassarahammer erlaubt einen raschen gleichbleibenden Bohrfortschritt mit steigender Tiefe. Der Wassarahammer wird mit Klarwasser betrieben. Der Bedarf der Wassermengen liegt zwischen 150 und 250 Liter pro Minute, bei Drücken zwischen 60 und 180 bar. Das Wasser fungiert hierbei gleichzeitig als Bohrlochspülung. Aufgrund des hohen Wasserbedarfs kann nicht standfestes Gebirge im Zuge des Bohrkleintransportes ausgewaschen werden. Limitationen des Systems liegen insoweit vor, dass bei stark entfestigten Gebirgsstrukturen kein Gegendruck des Gebirges ansteht um die Schlagfrequenz zu erzeugen.

In den o.a. stark entfestigten Gebirgsbereichen, bei welchen die Schlagfrequenz des Imlochhammers nicht aufgebracht werden konnte, wurde das Innengestänge gezogen und der Imlochhammer durch ein abstoßbares Bohrsystem ersetzt. Dieses System erlaubt wahlweise den Einsatz eines Rollmeißels oder einer Steuerschaukel als Bohrkrone und schließt zudem das Innengestänge dicht ab. Nach Erreichen der Endteufe wird im Zuge des Einbaus des Produktionsrohres der Bohrkopf abgestoßen und die Verrohrung gezogen. Das Produktionsrohr verbleibt inklusive der jeweiligen Krone im Bohrloch.

Die Bohrungen folgten unwillkürlich der Einfallrichtung des Gebirges und mussten durch immer wiederkehrende Messungen und darauffolgenden Steuerungsmanövern auf die Zielrichtung korrigiert werden. Die mittlere Bohrabweichung betrug rd. 2,9%. Sämtliche 33 Zentral- und Peripherbohrungen erreichten eine Endteufe von rd. 110 m.



Abbildung 2. Beispiel Hammerkrone Exzentrisch und Ringbohrkrone Neu mit Knickrohr.

Die Vermessung der Bohrungen wurde mittels dem Drill-Pilot® System ausgeführt (siehe Abbildung 3). Der Drill-Pilot® beruht auf der Verwendung von faseroptischen Kreiseln und Beschleunigungssensoren, unbeeinflusst von umweltspezifischen und elektromagnetischen Einflüssen. Die Bohrlochvermessung erfolgt intermittierend zum Bohrprozess mit einer Genauigkeit von < 0,3% bezogen auf die Bohrlänge.

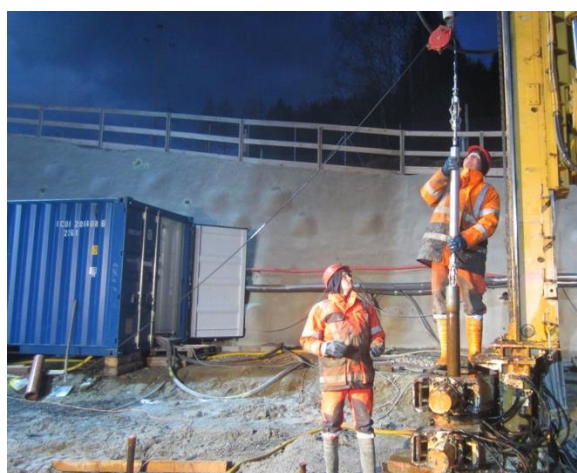


Abbildung 3. Einbau Messsonde in das Bohrgestänge.

3.2 Injektionsarbeiten

Die Injektionsarbeiten können, bezogen auf die Schachttiefe, in drei unterschiedliche Bereiche hinsichtlich der Erfordernisse einer Konsolidierung und Abdichtung unterteilt werden. In dem obersten Bereich bis ca. -10,0 m unter GOK wurden gezielte Injektionen zur Abdichtung des Oberflächenwassers gegen den Untergrund ausgeführt. In diesem Bereich konnte bei einem geringen effektiven Injektionsdruck eine Injektion mit Portlandzement sowie mit nachfolgendem Feinstbindemittel erzielt werden (siehe Abbildung 4, Passe 34).

Zwischen einer Teufe von 40 m bis einschließlich 70 m unter GOK wurden hauptsächlich stark gestörte Gneise mit intermittierenden Kataklastitbändern angetroffen. Das Eindringverhalten von Feinstbindemittel ohne Claquage (Aufreißen des Gebirges und Entstehen von Injektionswegen, hervorgerufen durch einen hohen Injektionsdruck) zeigte nur eine beschränkte Aufnahme, während das niederviskose Silikatgel ein hohes Eindringverhalten selbst bei einem geringeren effektiven Druck zeigte. In dem mittleren Abschnitt betrug das Injektionsvolumen im Mittel ca. 5.000 l/Ring.

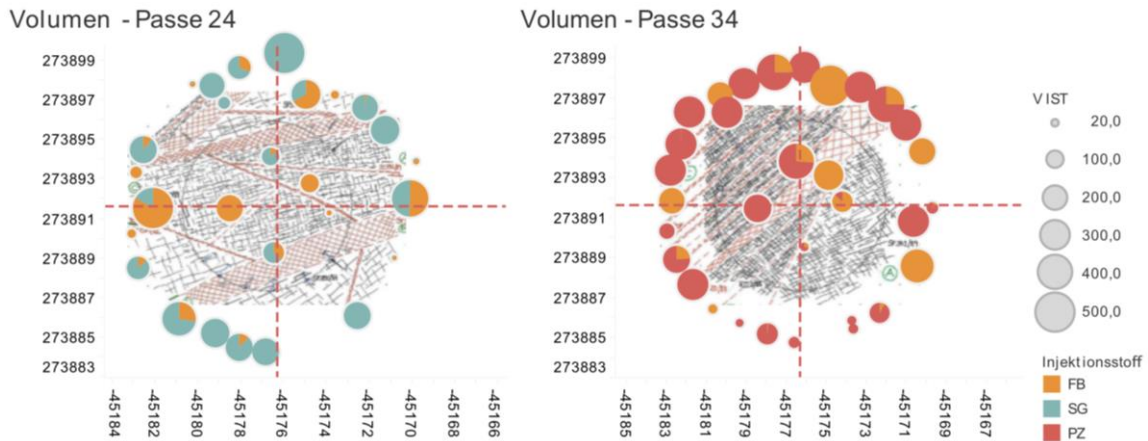


Abbildung 4. Idealisierte Darstellung der Injektionsgutaufnahme der Passe 24 (-72 m unter GOK) und der Passe 34 (-102 m unter GOK).

Mit fortschreitender Tiefe nimmt auch die Entfestigung des Baugrundes mit steigendem Wassergehalt zu. Der fließende Charakter des Baugrundes erlaubt eine Verdrängungsinjektion mit bewussten Claquagen im Zuge der Injektion. Das Injektionsvolumen zur Stabilisierung des Baugrundes wurde kontinuierlich von 10.000 auf 20.000 l/Ring gesteigert. Die Injektionsdrücke für das Aufreißen des Baugrundes stiegen über die Schachttiefe betrachtet nahezu linear von 15 bar (Referenz oberste Passe) mit einer Steigungsrate von 1,2 bar je Meter in diesem Bereich an. Der verhältnismäßig hohe Injektionsdruck wird einerseits durch das Erfordernis der Claquagen, als auch durch den zum Teil stark aufgeweiteten und mit steifer Mantelmischung gefüllten Ringraum begründet.

3.3 Modifikationen im Zuge der Bohr- und Injektionsarbeiten

Zum Erreichen der Injektionsziele und Minimierung des Potentials von Injektionsfehlstellen erfolgten im Zuge der Ausführung zusammenfassend folgende Modifikationen:

- Anpassung des Bohrprogrammes der peripheren Injektionsbohrungen zur Erhöhung der Bohrgenauigkeit (drei Injektionsringe; zweiter und dritter Injektionsring jeweils auf Lücke)
- Verschiebung einzelner Bohransatzpunkte zur Minimierung der Abstände zwischen den Bohrachsen
- Einsatz einer PZ-Suspension im Bereichen mit hoher Durchlässigkeit (Teufe bis 40 m)
- Z.T. zweistufiger Injektionsdurchgang mit unterschiedlichen Injektionsgütern und entsprechend unterschiedlichen viskosen Eigenschaften
- Einsatz eines Packers mit kurzer Verpresslänge von 0,5 m in Bereichen mit heterogenen und inhomogenen Baugrundeigenschaften
- Anpassung der Injektionsmengen zum Erreichen einer ausreichenden Sättigung
- Fortlaufende Anpassungen der Injektionsparameter zum Erreichen der Injektionsziele

LITERATUR

Stille, H. 2015. Rock Grouting – Theories and Applications, BeFo, Stockholm, ISBN 978-91-637-7638-0

Injektionsplanung und Vertragsgrundlagen bei Wasserkraftanlagen – Druckstollen und Druckschächten

Paul Bonapace

TIWAG - Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck, Österreich

KURZFASSUNG: Im Tiroler Oberland werden seit 2012 bei verschiedenen Kraftwerksprojekten unterirdische Druckstollen und Druckschächte im Durchmesserbereich von 3 m bis 14 m und mit Innendruckbelastungen von 10 bar bis 100 bar neu errichtet. Bei diesen Kraftwerksanlagen wird die Auskleidung mit Stahl oder Beton ausgeführt. Um einen dauerhaften Betrieb zu gewährleisten, wird auf einen zuverlässigen Verbund mit dem Gebirge großer Wert gelegt. Die kraftschlüssige Verbindung der Auskleidung mit dem umliegenden Gebirge wird mit Hilfe von Injektionsmaßnahmen sichergestellt. Es werden zumindest mehrstufige Gebirgsinjektionen über systematische Bohrlochinjektionen durchgeführt. Nach dem Einbau der Auskleidung aus Beton oder Stahl werden zumeist auch Kontakt- und Spaltinjektionen (in gepanzerten Abschnitten) bzw. Kontakt- und Vorspanninjektionen (in Bereichen mit Betonauskleidung) ausgeführt. Das Injektionskonzept für diese verschiedenen Injektionsarten, das auch als Grundlage für den Bauvertrag dient, wird im Beitrag näher erläutert.

1 EINLEITUNG

Durch den Vortrieb eines Druckstollens oder Druckschachtes wird das Gebirge zumeist aufgelockert und hat einiges an Potential für ein technisch dichtes, dauerhaftes, höchst tragfähiges Verbundsystem mit der Auskleidung eingebüßt. Es ist daher ein Ziel der Injektion die ursprüngliche Steifigkeit, Dichtheit und Tragfähigkeit des Gebirgstragringes, die der Bemessung der Stollen und Schächte zugrunde liegen, wieder herzustellen. Mit Injektionen wird außerdem die für den Einbau der Panzerung erforderliche Trockenlegung der Stollen und Schächte erleichtert. In den flachen Stollen wird der herstellungsbedingte Firstspalt zwischen Auskleidungsbeton und Ausbruch verfüllt. Im Falle einer Betonauskleidung wird mit Hochdruckinjektion eine Vorspannung erzeugt, die unter Betriebsdruck die rechnerische Rissfreiheit im Auskleidungsbeton sicherstellt. Bei einer Stahlpanzerung wird, um den Kraftschluss zwischen Panzerung und Hinterfüllbeton herzustellen, der Temperatur- und Schwindspalt zwischen Hinterfüllbeton und Stahl verpresst.

Die beschriebenen Injektionsmaßnahmen werden mit unterschiedlichen Injektionsverfahren, die vorgesehene Injektionsziele erfüllen sollen, durchgeführt. Die Planung dieser Injektionsmaßnahmen

wird am Beispiel des Neubauprojekts für den Druckschacht des Kaunertalkraftwerks (KD) der TIWAG näher beschrieben.

2 INJEKTIONSKONZEPT

2.1 *Injektionsmaßnahmen*

Um eine ausreichende Bettung der Auskleidung sicherzustellen, sowie die Abdichtung und Tragfähigkeit des umliegenden Gebirges zu verbessern, sind beim Referenzprojekt Gebirgsinjektionen, Kontaktinjektionen und Spaltinjektionen vorgesehen.

Mit den Gebirgsinjektionen werden die ursprünglichen gebirgsmechanischen Eigenschaften wiederhergestellt und eine Reduktion der Durchlässigkeit des Gebirges erreicht. Außerdem wird durch die Herstellung des vollflächigen Kontaktes zwischen Gebirge und Spritzbetonsicherung (oder Tübbingauskleidung) bei Innendruckbelastung die Tragfähigkeit des Gebirges aktiviert. Die Gebirgsinjektion wird über Bohrlöcher in mehreren Phasen als sogenannte Dichtschott-, Primär-, Konsolidierungs- und Zusatzinjektion noch vor Einbau der endgültigen Auskleidung durchgeführt.

Für die Herstellung des kraftschlüssigen Kontaktes zwischen Ausbruchsicherung und Betonauskleidung wird die Kontaktinjektion (i.e. Firstspaltinjektion oder Blockhinterlegung) ausgeführt. Sie erfolgt mittels Packer über Verpressöffnungen in der Firste.

Für die Herstellung der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Stahlpanzerung und Hinterbetonierung oder zwischen Dichtfolie und Abdichtungsträger, wird als dritte Injektionsmaßnahme die Spaltinjektion ausgeführt. Wird diese dritte Injektionsmaßnahme genutzt, um eine Druckvorspannung der Betonauskleidung zu erzielen, spricht man von Vorspanninjektion. Sie erfolgt je nach Auskleidungstyp weitgehend über Manschetteneinjektionsschläuche und untergeordnet über Injektionsstutzen. Auch das Verpressen der Bergwasserabschlauchungen und Drainagen erfolgt im Zuge der Spaltinjektion.

2.2 *Injektionsanlage*

Beim Referenzprojekt wird eine sehr einfache Injektionsanlage verwendet, die ohne Aufwand manuell nachjustierbar ist. Die Anlage besteht aus zwei Einheiten mit Injektionspumpen, Turbomischer, Rührwerk und Registriersystem, die nahe dem Einpressort aufgestellt sind. Die Suspension wird im Turbomischer angerührt und nach Bedarf ins Rührwerk abgelassen. Dort wird die Mischung in Bewegung gehalten, bis sie von den Pumpen über Hydraulikschläuche und Packer in die Bohrlöcher oder mittels passenden Anschlüssen in die Manschettenschläuche gepresst wird.

Für die Gebirgsinjektion werden mechanische Packer mit für die Verpressöffnungen (Bohrloch oder Injektionsöffnung im Tübbing) passenden Durchmesser verwendet. Jede Anlage ist mit einer automatischen Durchflussmessung ausgestattet. Die Daten werden digital in das Registriersystem übertragen, mehrmals täglich vom Aufzeichnungscomputer auf einen USB-Stick übertragen und im Baubüro ausgewertet.

2.3 *Injektionsgut*

Das Injektionsgut muss nicht nur Stabilität gewährleisten, sondern ist beim Referenzprojekt auch auf den hohen Sulfatgehalt des Gebirges einzustellen. Als Bindemittel wird erhöht-sulfat-beständiger Portlandzement verwendet. Besonderes Augenmerk wird bei den Labortests nicht nur auf den Blaine-Wert des Bindemittels, sondern auch auf seine Sieblinie (d_{85} , d_{95}) gelegt. Auf Grundlage der Labortests wird eine Suspension mit geringerem W/B-Wert und Verflüssiger für geeignet empfunden, um die hohe Anforderung an das Absetzmaß auch vor Ort verlässlich zu erreichen. Diese Rezepturen werden in den Planungsunterlagen als Richtrezeptur empfohlen:

Tabelle 1. Richtrezepturen für Injektionsgut

		Normalzement- suspension	Mikrozement- suspension
Bindemittel	[-]	CEM I 42,5 R-SR 0 C3A-frei	Dyckerhoff Microdur ultrafein
Blaine-Wert	[cm ² /g]	4.180	-
Rohdichte	[kg/m ³]	1.504	-
Sieblinie	[µm]	26 (d ₈₅)	9,5 (d ₉₅)
W/B-Wert	[-]	0,7	0,95
Verflüssiger (BASF Glenium SKY 707)	[% Susp.]	0,4	1,5
Absetzmaß nach 2 h	[%]	< 5	-
Marsh-Zeit	[s]	30 – 35	40 – 45
Druckfestigkeit nach 24 h	[N/mm ²]	> 1,2	-

2.4 Injektionsversuche

Injektionsversuche werden ausgeführt, um die grundsätzlichen Injektionsparameter festzulegen und Auswirkungen der geplanten Injektion auf das Gebirge beurteilen zu können. Als erste Maßnahme werden im Referenzgebirge WD-Tests mit unterschiedlichen Druckstufen (5, 10, 15, 20, 25 bar) durchgeführt. Dabei sollte sich zeigen, wann das Gebirge aufzureißen beginnt und schlagartig größere Wassermengen in den Gebirgskörper eindringen. Mit Hilfe der WD-Tests werden Lugeon-Werte ermittelt und die Heterogenität des Gebirges beurteilt. In weiterer Folge werden Versuchsfelder von rd. 20 m Länge für Gebirgsinjektionen ausgewählt. Die Stollenlaibung wird im vorgesehenen Raster von unten nach oben verpresst und der Injektionserfolg wiederum mit WD-Tests überprüft. Dabei sollte festgestellt werden, ob sich nach der Injektion, abhängig vom gewählten Druck oder GIN-Wert („Grout Intensity Number“ nach Lombardi), die Durchlässigkeit des Gebirges verändert. Ziel ist es, das ausgewählte Injektionsgut auf seine Eignung zu überprüfen und den max. Injektionsdruck, sowie den GIN-Wert für die Gebirgsinjektion (Konsolidierungs- und Abdichtungsinjektion) so festzulegen, dass ein Aufreißen des Gebirges vermieden wird.

3 GEBIRGSINJEKTION

Die Gebirgsinjektionen erfolgten noch vor dem Einbau der Auskleidung über Bohrlochinjektionen durch die Spritzbetonschale, oder wie im Falle des Referenzprojekts durch den Tübbingausbau des mittels Schildmaschine vorgetriebenen Schrägschachts. Grundsätzlich werden für einen Querschnitt mit rd. 5 m Durchmesser Injektionssterne mit 4 Bohrlöchern am Umfang gewählt, die im Abstand von 3 m um 45° verdreht angeordnet sind. Das Injektionskonzept sieht vier Injektionsphasen vor. Bei jeder nachfolgenden Injektionsphase wird das Injektionsraster immer weiter verdichtet:

1. Phase – Dichtschotts (D) werden mit dem Ziel, ein unkontrolliertes Vorlaufen des Injektionsgutes in Längsrichtung zu verhindern und den Stollen oder Schacht in einzelne Injektionsabschnitte zu unterteilen, über einen Doppel-Injektionsstern mit 5 m Bohrlochtiefe alle rd. 50 m angeordnet und mit einem Injektionsdruck von $p_{\max} = 15$ bar verpresst. Kann die Gefahr einer allzu weiten Längsläufigkeit ausgeschlossen werden, wird auf diese Dichtschotts verzichtet.

2. Phase – Die Primärinjektion (P) wird mit dem Ziel ausgeführt, vorhandene Hohlräume zwischen Spritzbetonschale/Tübbing und Gebirge mit geringem Druck von $p_{\max} = 5$ bar zu verfüllen. Primärinjektionen werden mit einer Bohrlochtiefe von rd. 1 m ausgeführt, damit auch die mit Spießschirmen durchhörte Stollenumgebung sicher mit Injektionsgut verfüllt wird.

3. Phase – Die Konsolidierungsinjektion (K) wird mit dem Ziel ausgeführt, Klüfte in der unmittelbaren Umgebung des Hohlraumes zu verpressen und die gebirgsmechanischen Eigenschaften zu verbessern. Sie erfolgt im Referenzprojekt mit einem Injektionsdruck von $p_{\max} = 15$ bar und einer maximalen Injektionsmenge von 150 l/Bohrlochmeter. Konsolidierungsinjektionssterne werden mit einer Bohrlochtiefe von 3 m und gegenüber den Primärinjektionen längsversetzt ausgeführt.

4. Phase – Wird das Injektionsziel in einem Bohrloch nicht erreicht, werden über 4 weitere Bohrlöcher mit 3 m Länge Zusatzinjektionen (Z) mit einem Injektionsdruck von $p_{\max} = 15$ bar und einer maximalen Injektionsmenge von 150 l/m um dieses Bohrloch herum ausgeführt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Injektionsziel in allen Bohrlöchern erreicht ist.

Zu Beginn der Injektion wird der Injektionsdruck in jedem Bohrloch langsam bis zum Maximalwert gesteigert, wobei anfänglich der max. Durchfluss mit 10 l/min begrenzt wird. Erst nach Erfahrungen mit entsprechenden Injektionsgutaufnahmen kann der Durchfluss auf bis zu 15 l/min erhöht werden. Zum Abschluss der Injektion gelten grundsätzlich für alle Gebirgsinjektionsphasen dieselben Abbruchkriterien:

- Injektionserfolg bei 5-minütigem Halten des maximalen Injektionsdrucks ($p = p_{\max}$)
- Injektionsabbruch bei Erreichen der maximalen Injektionsmenge ($V = V_{\max}$)

Für die Konsolidierungs- und Zusatzinjektion wird zusätzlich das Erreichen der GIN-Kurve als Abbruchkriterium eingeführt. Das Grundprinzip der GIN-Methode besteht darin, dass nicht nur der Injektionsdruck (p) und die Menge (V), sondern auch die Intensität der Injektion ($p \cdot V = \text{GIN-Wert} = 500$ beim Referenzprojekt) begrenzt ist. Der Durchfluss und der Injektionsdruck werden in diesem Fall soweit reduziert, bis bei Erreichen des GIN-Werts der Durchfluss quasi Null ist. Dadurch wird verhindert, dass sich große Injektionsmengen mit hohem Injektionsdruck überlagern, und ein Aufsprengen des Gebirges vermieden. Als Injektionserfolg wird in diesem Fall zumindest das Erreichen des halben Maximaldruckes gewertet. Wird die Injektion unterhalb dieses Wertes abgebrochen, werden Zusatzinjektionen angeordnet. Jede Injektionsphase ist durch die Volumenbegrenzung gut planbar und weit reichende „Endlosinjektionen“ an einzelnen Injektionsanschlüssen werden dadurch vermieden.

4 KONTAKTINJEKTION

4.1 Firstspaltinjektion

Die Kontaktinjektion wird auch als Firstspaltinjektion oder Blockhinterlegung bezeichnet. Sie dient dem Verschließen des Absetzspaltes zwischen dem Auskleidungsbeton und der Ausbruchssicherung, der vornehmlich in der Firste von flachen Stollen auftritt. Darüber hinaus werden Betonierfugen geglättet und Betoniermester an der Hinterseite der Auskleidung verfüllt. Daher wird die Kontaktinjektion im Referenzprojekt im Firstbereich der flachen Stollen, aber nicht im schrägen Druckschacht ausgeführt. Vertraglich gesehen gehört die Kontaktinjektion zu den Betonarbeiten und wird dort zumeist eingerechnet. Im Ablauf jedoch ist die Kontaktinjektion kaum von der Spaltinjektion zu trennen und wird auch genauso detailliert geplant.

Bei den betonausgekleideten Stollen wird das Injektionsgut über Injektionsöffnungen in die Kontaktfuge an der Hinterseite der Auskleidung gepresst. Im Regelfall sind entlang der Firste konische oder zylindrische Injektionsöffnungen mit rd. 50 mm Durchmesser im Längsabstand von rd. 3 m angeordnet.

Im Falle von gepanzerten Stollen werden Manschetteninjektionsschläuche in einer Schleife entlang der Firste des Ausbruchquerschnitts angeordnet. Die mit Hüllschläuchen umwickelten Ventilöffnungen werden an den Hochpunkten der Ausbruchssicherung fixiert, damit das Injektionsgut auch austreten kann. Beide Enden der Injektionsschläuche werden nebeneinander an Öffnungen in der Panzerung angeschlossen, damit die Injektion am Rückfluss des Injektionsguts überprüft werden kann.

Der Injektionsvorgang wird im Regelfall mit Normalzement durchgeführt. Nur bei keiner initialen Aufnahme von Injektionsgut wird auf Mikrozzementinjektion umgestellt. Injektionsöffnungen werden auf einer Länge von mind. 200 m mit Packer und Kugelhahn bestückt. Bei Injektionsaustritt in benachbarten Injektionsöffnungen wird der Kugelhahn geschlossen und der Injektionsdruck gesteigert. Der maximale Injektionsdruck für die Kontaktinjektion beträgt 5 bar. Die Injektion gilt als beendet, wenn der vorgesehene Injektionsdruck von 5 bar gemäß Druck-/Mengenschreiber erreicht ist und die Injektionsgutaufnahme unter 0,5 l/min für mindestens 5 Minuten absinkt. Der Druck an der Pumpe kann für die Kontaktinjektion als Injektionsdruck gewertet werden, wenn der

Standort der Pumpanlage nicht allzu weit vom Einspeisepunkt der Injektion entfernt ist. Injektionsaustritte an der Oberfläche der Betonauskleidung oder in Betonierfugen werden mit Fortschreiten der Injektion abgedichtet. Nach dem Aushärten des Verpressgutes und dem Entfernen der Packer wird der verbleibende Teil der Injektionsöffnungen mit schwindkompensiertem Mörtel verfüllt und die Öffnungen in der Panzerung mit Stopfen verschlossen.

4.2 Fugenausbildung

Es gibt verschiedene Arten von Fugenabdichtung, die bei der Kontakt- oder Spaltinjektion Verwendung finden. Bei der Tübbingauskleidung im Druckschacht wird beim Referenzprojekt eine Kombination aus Ringspaltmörtel und Fugendichtungsband zur Abdichtung eingesetzt. Bei den Ortbetonabschnitten werden Injektionsschläuche (e.g. SikaFuko mit 6 mm Injektionskanal) in den Blockfugen eingebaut. Diese werden vor Beginn der Kontaktinjektion mittels Verdämmung und Kunstharz (e.g. SikaDur 52, Typ N) verfüllt. Bei einer einfacheren Fugenabdichtung z.B. mittels Dichtungsband, muss ein größerer Abdichtungsaufwand während der Injektion in Kauf genommen werden.

5 SPALTINJEKTION

5.1 Verpressen der Bergwasserdrainagen

Die Bergwasserableitungen werden vorlaufend im Zuge der Spaltinjektion verpresst, da andernfalls entweder die Drainagen ungewollt verschlossen werden, oder kein ausreichender Druck für die Spaltinjektion aufgebaut werden kann. Sie werden mit demselben Druck verpresst, der auch für die Spaltinjektion vorgesehen ist. Zumindest wird jener Druck aufgebracht, der es erlaubt, das Injektionsgut bei der höher gelegenen Ableitung in den Stollen oder Schacht zu beobachten. Injektionsöffnungen werden rd. 200 m weit vorlaufend mit Packer bestückt. Bei Injektionsaustritt an der nächst höher gelegenen Injektionsöffnung wird dort der Kugelhahn geschlossen und der Injektionsdruck gesteigert. Es ist zu beachten, dass ab Verschluss der untersten Ausleitung, der Bergwasserdruck in den Drainageleitungen schnell ansteigt und diese gegen den Bergwasserdruck verpresst werden müssen. Die Injektion einer Bergwasserableitung gilt als beendet, wenn der vorgesehene Pumpendruck wie bei der Kontaktinjektion für die definierte Zeit gehalten wird. Die Injektion der Bergwasserableitung sollte möglichst ohne Unterbrechung in die Vorspanninjektion/Spaltinjektion übergehen (Injektion frisch in frisch).

5.2 Vorspanninjektion der Betonauskleidung

5.2.1 Auslegung

Die Berechnung von Druckstollenauskleidungen aus Beton infolge der Innendruckbelastung wird anhand des analytisch-grafischen Verfahrens nach Seeber durchgeführt. Diese setzt eine dichte Auskleidung voraus, an welcher der Innendruck als hydrostatischer Druck angreift. Die Bemessung der Betonauskleidung erfolgt nach der Theorie des dickwandigen Rohres. Der Innendruck wird anteilig von der Auskleidung und vom Gebirge in Abhängigkeit der jeweiligen Steifigkeiten aufgenommen. Die unbewehrte Betonauskleidung kann wegen der geringen Zugfestigkeit des Betons nur einen kleinen Innendruck aufnehmen. Durch die Vorspanninjektion wird sichergestellt, dass die Auskleidung im Betriebszustand weitgehend spannungsfrei bleibt, oder unter leichter Druckvorspannung steht. Eine Entlastung des Innendrucks durch den Bergwasserdruck wird bei der Auslegung nicht berücksichtigt.

Nach Seeber kann der Betonring für den Lastfall Injektionsdruck auf etwa 75 % – 85 % der Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Injektion belastet werden. Das übersteigt den im Hochbau üblichen Rahmen der Betondruckfestigkeit, ist aber für eine ausreichende Deformation des Querschnitts zur dauerhaften Vorspannung unabdingbar. Die technische Antwort ist daher ein empirisches Herantasten an die berechneten Grenzen durch Monitoring. Berechnet wird

- die dauerhaft vorhandene Injektionsvorspannung unter Berücksichtigung des Temperatur-, Schwind- und Kriechverhaltens bei der keine Radialzugspannungen in der Betonauskleidung zu erwarten sind,
- der maximale Injektionsdruck und die maximale Ovalisierung mit denen die Auskleidung belastet werden kann (idealerweise am 3-dimensionalen Modell mit den tatsächlich gemessenen Wanddicken anhand eines vergleichenden Oberflächenscans vor und nach dem Einbau der Betonauskleidung), sowie
- ein erforderlicher Injektionsdruck und eine erforderliche durchschnittliche Radialverformung, die während der Vorspanninjektion gemessen werden sollten, um den Injektionserfolg für eine dauerhaft rissefreie Betonauskleidung nachzuweisen.

5.2.2 *Detailausführung und Einbau*

Für die Vorspanninjektion werden Manschetteninjektionsschläuche im Abstand von rd. 3 m als Ringschläuche über den Umfang des Spritzbetongewölbes / der Felsoberfläche verlegt. Diese bestehen aus einem ½ Zoll PE Schlauch, der alle 1,5 m mit einem Schlauchventil (Manschette aus EPDM, Shorehärte A 70°, 15 cm lang mit 10 Bohrungen, Durchmesser 4 mm im Schlauch) ausgestattet ist. Die Injektionsschläuche werden jeweils mittels vorgefertigten Schlauchdurchführungen (Formstücke) durch eine eventuell vorhandene Dichtfolie geführt. Im Bereich der Durchführungen werden die Schläuche dicht verklebt und mit Schlauchklemmen fixiert.

Die Injektionsschläuche werden in Hüllschläuchen (PVC-Folie, Dicke 0,15 mm, Umfang 600 mm) verlegt. Die Hüllschläuche werden in 20 cm Abständen perforiert und ebenflächig mitsamt den Injektionsschläuchen alle 1,5 m befestigt. Die offenen Enden der Hüllschläuche werden mit Dichtungsband an die Injektionsschläuche geklebt und verschlossen.

Falls im Sohlbereich keine Injektionsschläuche angeordnet sind (wegen z. B. Betonfertigteilen oder Schwerverkehr), werden dort vertikale Injektionsstutzen in ähnlichem Abstand vorgesehen. Jeder Injektionsstutzen besteht aus einem ½ Zoll Rohr, das an einem Folienlappen (rd. 300 mm x 300 mm) endet, damit sich das Injektionsgut initial verteilen kann.

Gemeinsam mit den Injektionsschläuchen werden Injektionssperren im Längsabstand von rd. 10 m (eine Injektionssperre je Betonierabschnitt) an der Spritzbetonschale / Felsoberfläche befestigt, damit sich das Injektionsgut nicht ungehindert in Längsrichtung verteilen kann. Als Injektionssperren werden Vlieswulste (rd. 200 mm breit) vollumfänglich und satt anliegend an die Spritzbetonschale angeschossen.

5.2.3 *Injektionsablauf*

Die Einpressarbeiten für die Vorspanninjektion selbst werden zwingend im Durchlaufbetrieb, möglichst ohne Unterbrechung, in eine Richtung fortschreitend, ausgeführt, da die Vorspannwirkung davon wesentlich abhängt. Die Injektionsanschlüsse werden vor Ausführung der Vorspanninjektion mind. 200 m weit vorlaufend mit Kugelhähnen bestückt. Diese werden während der Injektion zur Beurteilung des Injektionsfortschrittes offen gehalten und bei Austritt von Zementsuspension sukzessive verschlossen, um Injektionsdruck aufbauen zu können. Vor dem Verpressen wird der Wasserdruck an wasserführenden Injektionsanschlüssen gemessen und ein Injektionsdruck gewählt, der den gemessenen Druck übersteigt. Der gewählte Injektionsdruck wird durch den von der Auskleidung bestimmten zulässigen Injektionsdruck begrenzt.

Die Injektion beginnt mit dem Verpressen der Sohle. Dieser Injektionsvorgang erfolgt gemeinsam mit dem Verpressen der Bergwasserableitungen vorlaufend zur Vorspanninjektion im Gewölbe, damit größere Mengen an Injektionsvolumen den Fortschritt der Vorspannung nicht allzu sehr aufhalten. Der Vorlauf des Verpressens der Bergwasserableitungen und der Sohlinjektion zu der im Gewölbe durchgeführten Vorspanninjektion kann abhängig von den Injektionsmengen 1 bis 10 Blocklängen betragen. Der maximale Pumpendruck für die Sohlinjektion beträgt rd. 5 bar weniger als der für die Vorspanninjektion vorgesehene Maximaldruck, damit sich der Injektionsfluss nicht in die Gegenrichtung kehrt. Die Injektion jeder Bergwasserableitung und eines jeweiligen Sohlinjektionsstutzens gilt als beendet, wenn der vorgesehene Pumpendruck erreicht ist, und soll möglichst ohne Unterbrechung in die Vorspanninjektion des Gewölbes übergehen (frisch in frisch). Allfällig

noch vorhandene Injektionsaustritte an der Oberfläche der Betonauskleidung oder über Betonierfugen müssen mit fortschreitendem Injektionsvorgang abgedichtet werden.

Der initiale Injektionsvorgang für die Vorspanninjektion im Gewölbe wird bei trockenen Injektionsanschlüssen mit Mikrozement durchgeführt. Nach dem Verpressen einer bestimmten Suspensionsmenge pro Schlauch (begrenzt mit z.B. 200 l) wird die Injektion auf Normalzement umgestellt. Bei wasserführenden Injektionsanschlüssen, oder solchen, die leicht durchgängig sind, kann die Injektion sofort mit Normalzement begonnen werden. Die Injektion beginnt mit dem Füllen zweier aufeinander folgender Ringschläuche. Bei Injektionsaustritt am anderen Ende wird der Kugelhahn geschlossen und der Injektionsdruck gesteigert. Der initiale Druck kann für geringe Injektionsmengen und kurze Zeit auf einen festgelegten Aufreißdruck (der ein Vielfaches des gewählten Enddrucks beträgt) gesteigert werden bis Injektionsgut zu fließen beginnt. Bei sehr geringen Durchflussraten wird der Schlauch regelmäßig gespült und die Injektionspumpe gegebenenfalls auch am anderen Ende des Injektionsschlauches angeschlossen.

Es kann vorkommen, dass Austritte des Injektionsguts bei offenen Packern bis zu 200 m vor der Injektionsstelle erfolgen. Eine solche Übertrittsstelle muss ohne die Injektion zu unterbrechen geschlossen oder abgedichtet werden. Sind Injektionsschläuche von Übertritten betroffen, werden diese regelmäßig mit Wasser gespült, um ein vorzeitiges Verstopfen zu vermeiden. Eine längere Unterbrechung etwa infolge von Leitungsstopfern oder eines Pumpenausfalls muss durch entsprechende Vorkehrungen vermieden oder schnellstens behoben werden. Wenn die Injektion trotzdem unterbrochen werden muss, wird der Injektionsschlauch mit Wasser gespült, sowie eine geringe Menge Wasser eingepresst (rd. 5 l), um den Nahbereich der Manschetten freizulegen, damit die Injektion zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden kann. Beim Fortsetzen der Injektion nach initialem Aushärten des Injektionsguts wird, wie beim Beginn eines neuen Injektionsvorgangs, zuerst mit Mikrozementsuspension injiziert.

Bis eine Reaktion der Betonauskleidung in Form von geringen Verformungen gemessen wird, kann der Injektionsdruck bei 15 bis 20 bar liegen und eine hohe Durchflussrate von 10 bis 15 l/min zugelassen werden. Zusätzlich zur Druckmessung am Manometer beim Injektionsanschluss und an der Pumpe, wird in regelmäßigen Abständen über die „Passive Injektionsdruckmessung“ der wirk-same Injektionsdruck ermittelt (Injektionspumpe abstellen, 20 s warten, Druckabfall ablesen), um den Injektionsverlauf zwischenzeitlich abschätzen zu können. Das Ziel der Vorspanninjektion ist es, die festgelegte Mindestradialverformung in jedem Injektionsabschnitt zu erreichen. Für eine herkömmliche Spaltinjektion (ohne Vorspannungskriterium) reicht es, den festgelegten maximalen Injektionsdruck nach Unterschreiten einer Suspensionsaufnahme von 0,5 l/min mindestens 5 Minuten zu halten. Wenn die Injektion beim letzten der aufeinander folgenden Ringschläuche beendet ist, wird der Injektionsanschluss auf den nächsten freien Ringschlauch umgestellt, ohne die bereits angeschlossenen Injektionen zu unterbrechen (überlappender Injektionsfortschritt).

Die eingepressten Injektionsmengen (Mengenschreiber), der Injektionsdruck und der Durchfluss werden bei der Vorspanninjektion aufgezeichnet und für jeden einzelnen Injektionsabschnitt ausgewertet. Um sicher zu gehen, dass die Vorspannung der Stollenauskleidung überall wirksam ist, werden injektionsbegleitend Verformungsmessungen durchgeführt. Dabei wird die mittlere Radialverformung und die Ovalisierung in mehreren Querschnitten (idealerweise mit einem Oberflächen-scanner) gemessen. Die Wiederholungsgenauigkeit der Deformationsmessung sollte bei rd. 0,1 mm liegen, die Messdaten alle 10 min zur Verfügung stehen. Beim Erreichen der festgelegten Radialverformung wird die Vorspanninjektion erfolgreich beendet. Bei Erreichen der maximal zulässigen Ovalisierung wird die Injektion abgebrochen und individuell bewertet.

5.3 Spaltinjektion der Panzerung

5.3.4 Auslegung

Die Auslegung der Panzerung beruht auf der Bemessung für ein Stahlrohr, das in Fels gebettet ist. Der Raum zwischen Stahlpanzerung und Felssicherung wird mit Beton hinterfüllt. Der verbleibende Schwindspalt zwischen Panzerung und Beton wird mit Injektionsgut verpresst. Die Felssbettung des Verbundsystems Stahl-Beton-Fels wird nach Seeber mit einem im Großversuch (Radialpresse) bei Betriebsbelastung ermittelten Verformungsmodul V_f^* berücksichtigt. Für die Bemessung wird bis zu 60 % der Dehngrenze des Rohrstahts ausgenützt. Der Stahl darf beim Referenzprojekt auch ohne

Berücksichtigung der Felsbettung rechnerisch nicht plastifizieren. In der Berechnung wird sicherheitshalber ein Spaltmaß von $(0,001 \cdot \text{Rohrradius } r)$ vor der Spaltinjektion und immerhin noch $(0,0003 \cdot r)$ nach der Spaltinjektion berücksichtigt. Die Dicke der Panzerung wird auf Grundlage von Innendruck und Bergwasserdruck bestimmt. Zusätzlich wird untersucht, ob der zulässige Injektionsdruck in einer sinnvollen Größenordnung (z.B. ≥ 10 bar) liegt.

5.3.5 Detailausführung und Einbau

Die Spaltinjektion zwischen Panzerung und Hinterfüllbeton erfolgt über Manschettenschläuche. Bei jedem 9 m bis 15 m langen Rohrschuss werden vier Injektionsschläuche spiralförmig an der Rohraußenseite angebracht. Diese werden nach einer Vierteldrehung am Rohrumfang über verschraubbare Injektionsöffnungen jeweils am Ende des Rohrschusses wieder an $\frac{1}{2}$ Zoll Öffnungen in der Rohrwand angeschlossen. Wie bei der Vorspanninjektion bestehen die Injektionsschläuche aus $\frac{1}{2}$ Zoll PN 16 Schläuchen, die alle 1,5 m mit Schlauchventilen versehen sind. Jeder Injektionsschlauch ist nahe dem Schlauchventil mit einer Befestigungsglasche aus Stahl an die Rohrwand geklebt, um beim Betonieren in Position gehalten zu werden. Eine zusätzliche Firstöffnung in der Panzerung am Ende eines jeden Rohrschusses dient als Kontrollöffnung, über welche der Injektionsfortschritt beobachtet wird.

5.3.6 Injektionsablauf

Die Injektion wird blockweise durchgeführt, d.h. alle vier Schläuche werden jeweils mit einer eigenen Pumpe druckbeaufschlagt. Dabei wird der Druck bei allen vier Pumpen möglichst gleichzeitig erhöht. Je nach Beulfestigkeit der Panzerung werden beim Referenzprojekt Injektionsdrücke bis zu 25 bar erreicht. Der Injektionserfolg wird über 5 min Haltedauer des vorgesehenen Maximaldruckes bei Durchfluss $< 0,5$ l/min nachgewiesen.

Bei trockenen Injektionsanschlüssen wird die Injektion wiederum mit Mikrozetement begonnen. Nach größeren Suspensionsaufnahmen (> 200 l/Injektionsschlauch) erfolgt die Umstellung auf Normalzetement. Wird für den zu injizierenden Bereich insgesamt jedoch eine geringe Aufnahme prognostiziert (z.B. in Bereichen mit dichter Tübbing-Vorauskleidung) so kann die gesamte Injektion mit Mikrozetement durchgeführt werden. Mikrozetement bringt gegenüber einer Normalzementsuspension den Vorteil, dass ein vollständiges Verfüllen des Spaltes mit geringerem Druck möglich ist.

Unter den Sohlbereich der Panzerung wird aufgrund der Einbausituation (Auflagersättel, Hohlstellen etc.) mehr Zementsuspension eingebracht als in Firste und Kämpfer. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Injektionsdauern von 1 h bis 7 h pro Injektionsanschluss.

6 FAZIT

Auf Grundlage einer 100-jährigen Erfahrung mit der Erhaltung, wird bei der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) ein umfassendes Injektionsprogramm beim Bau von Triebwasserwegen bevorzugt durchgeführt, das im Falle des Neubaus des Druckschachtes für das Kaunertalkraftwerk, aus Gebirgsinjektion, Kontaktinjektion, Spaltinjektion der Panzerung und Vorspanninjektion der Betonauskleidung besteht. Trotz des großen Aufwands macht sich die Injektion für den Betreiber der Kraftwerksanlagen durch eine Erhöhung der Dichtheit der Druckstollen, geringen Erhaltungsaufwand im Betrieb und lange Lebensdauer des Auskleidungssystems bezahlt.

LITERATUR

- Bonapace, P. 2014. *Injektionsarbeiten beim Neubau des Druckschachts für das Kaunertalwerk – Erfahrungsberichte*, BHM, 159. Jg. (2014) Heft 12, S. 481-489, Springer Verlag: Wien.
- Lombardi, G. & Deere, D. 1993. *Grouting design and control using the GIN principle*, Water Power & Dam Construction, June 1993, pp. 15-22.
- Seeber, G. 1999. *Druckstollen und Druckschächte*, ENKE, Georg Thieme Verlag.

Die Anwendung der Injektion im Druckstollenbau

Reinhold Gerstner

Vorarlberger Illwerke AG, Vandans, Österreich

ERWEITERTE KURZFASSUNG

1 GRUNDSÄTZLICHES

Im Druckstollenbau sind Injektionen unterschiedlicher Art von grundlegender Bedeutung, um eine funktionstüchtige und dauerhafte Stollenauskleidung zu erhalten. Der Beitrag beschäftigt sich mit zementgebundenen Injektionen bei der Herstellung der Stollenauskleidung aus Ortbeton oder Betonfertigteilen (Tübbing), spezifische Aspekte bei Folien oder Panzerungen werden nur am Rande einbezogen. Die Ausführung von Interventionsinjektionen ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.

Als Druckstollen wird im Rahmen dieses Beitrages der Niederdruckabschnitt der Triebwasserführung von Wasserkraftanlagen verstanden, der vor dem Kraftabstieg liegt und in der Regel einen Innendruck bis zu 200 m WS (20 bar) aufweist.

Ein wichtiges Prinzip des alpinen Druckstollenbaus ist, das Gebirge in das Funktionskonzept des Druckstollens einzubeziehen. Mit der Injektion wird angestrebt, die Verbundwirkung zwischen Auskleidung und Gebirge zu erzielen und das Gebirge, wenn erforderlich, zur Erreichung der gewünschten Eigenschaften zu behandeln.

2 INJEKTIONSZIEL

Die Injektionsziele sind im Allgemeinen mit der dauerhaften Bettung der Auskleidung und, meistens auf Teilstrecken, mit der Konsolidierung abgesteckt. In manchen Fällen ist zudem die teilweise oder weitgehende Abdichtung des Gebirges erforderlich, eine besondere Injektion ist beim Injektionsziel der Vorspannung der Auskleidung gegeben.

Das Injektionsziel ist aufgrund der Gebirgsverhältnisse und der Betriebsbedingungen des Druckstollens individuell zu definieren. Bei den Gebirgsverhältnissen sind die Gesteinsart, die Gebirgsart, der Zerlegungsgrad, die Bergwasserverhältnisse und die Gebirgsspannungsverhältnisse von Bedeu-

tung. Bei den Betriebsbedingungen sind vor allem der Innendruck und die Betriebsweise im Hinblick auf Wechselbeanspruchungen zu berücksichtigen.

3 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Planung und Ausführung der Injektion von Druckstollen stehen vor der Herausforderung, die technisch richtige Herstellung der Auskleidung mit der Wirtschaftlichkeit in Einklang zu bringen. Dieses Spannungsfeld wird umso größer, je länger der Druckstollen ist.

4 AUSFÜHRUNG

In der Regel erfolgt die Injektion über radiale Bohrungen, zum Teil aber auch über Injektionsschläuche, die im Spalt zwischen Auskleidung und Gebirge bzw. Sicherungsschale verlegt werden. Insbesondere bei der Ausführung über Bohrungen ist ein Injektionsraster zu wählen, der durch das Injektionsziel und die Reichweite der Injektion bestimmt ist, ohne dass dabei die Wirtschaftlichkeit aus dem Auge verloren werden darf. Ähnliches gilt für die Tiefe der Injektionsbohrungen.

5 INJEKTIONSGUT

Im Allgemeinen wird die Injektion von Druckstollen mit zementgebundenem Injektionsgut ausgeführt, sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen. Meistens wird dabei Normalzement verwendet, in manchen Fällen kommen Feinzemente oder andere Injektionsmittel zum Einsatz. Die Injektion erfolgt gewöhnlich mit stabilen Mischungen, deren Herstellung in der Praxis, unter den Einschränkungen einer fernab gelegenen oder exponierten Position, manchmal eine Herausforderung sein kann, wie an Beispielen gezeigt wird.

6 INJEKTIONSVORGANG

Der Injektionsvorgang ist durch klare Injektionsanweisungen festzulegen, die umso einfacher sein müssen, je beschränkter die technischen Möglichkeiten und die Qualifikation des Personals sind. Dies betrifft sowohl die Vorgangsweise bei der Mischung des Injektionsgutes als auch den anzuwendenden Druck, vor allem aber die Pumprate, wie an Beispielen gezeigt wird.

7 KONTROLLE

Zum Erfolg der Injektion trägt in entscheidendem Maße die Kontrolle der Injektionsarbeiten bei, die unter anderem aus der Prüfung der Plausibilität der Injektionsgutaufnahmen, der Überprüfung des Injektionserfolges und der Festlegung der erforderlichen Nachinjektionen besteht. Auch dafür werden Beispiele gegeben.

8 RÉSUMÉ

Bei der Anwendung der Injektion im Druckstollenbau gilt es, das auf der Basis der theoretischen und empirischen Grundlagen entwickelte Injektionskonzept so umzusetzen, dass es unter den Bedingungen der Praxis umgesetzt werden kann, um eine technisch einwandfreie und dauerhafte Stollenauskleidung zu schaffen.



PEFC certified

This product is from sustainably managed forests and controlled sources.

www.pefc.org



ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Innsbrucker Bundesstrasse 67
5020 SALZBURG, ÖSTERREICH
www.oegg.at