



AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS



ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Kommentar zur EN 12715

Injektionen

2016



KOMMENTAR zur EN 12715

Injektionen

Mitarbeiter

(in alphabetischer Reihenfolge)

Eichner Hans Oliver
Furtmüller Gert
Hornich Wolfgang
Kainrath Adrian
Leitner Stefan
Palla Reinhold
Reichl Ignaz
Scheikl Manfred
Stadler Gert

Vigl Alois

Pöyry Infra GmbH
Pöyry Infra GmbH
Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H
TU Wien – Institut für Geotechnik
hbpm Ingenieure GmbH
hbpm Ingenieure GmbH
Turner & Townsend
alpinfra consulting + engineering gmbh
em. Univ. Prof. TU Graz
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Viglconsult ZT

Layout

Kluckner Alexander

Technische Universität Graz

Review

Dieser Kommentar wurde zum Zwecke des Reviews allen Mitgliedern der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik zur Verfügung gestellt. Sämtliche Rückmeldungen wurden bearbeitet und die Ergebnisse den Reviewern zur Verfügung gestellt.

Inhalt	Seite
0. Vorwort	1
1. Anwendungsbereich	2
2. Normative Verweisungen	4
3. Begriffe und Definitionen	5
4. Erforderliche Informationen zur Ausführung der Arbeiten	14
5. Geotechnische Untersuchungen	16
5.1. Allgemeines	16
5.1.1. Anforderungen an Baugrunduntersuchungen und Erkundungsziele	16
5.1.2. Umfang der Baugrunduntersuchungen	16
5.1.3. Erkundungsmethoden	17
5.1.4. Anforderungen an Erkundungsberichte	20
5.2. Geohydraulische Grundlagen	20
5.2.1. Geohydraulik im Lockergestein	22
5.2.2. Geohydraulik im Festgestein	23
5.3. Geomechanische Grundlagen	25
5.4. Ableitung injektionsspezifischer Parameter aus Erkundungsdaten	26
5.4.1. Informationen aus dem Bohrvorgang	26
5.4.2. Hydraulische und mechanische Parameter	27
5.5. Injektionsversuche vor Ort und im Laboratorium	27
6. Baustoffe und Bauprodukte	28
6.1. Allgemeines	28
6.2. Baustoffe für das Injektionsgut	28
6.2.1. Hydraulische Bindemittel und Zemente	28
6.2.2. Wasser	29
6.2.3. Zusatzstoffe	29
6.2.4. Tone	30
6.2.5. Zusatzmittel und Zusätze	30
6.3. Suspensionen als Injektionsmischung	31
6.4. Probenahme und Prüfung	31
6.4.1. Suspensionsprüfung im Labor	32
6.4.2. Kontrollprüfung auf der Baustelle	32
6.4.3. Prüfverfahren	33
7. Hinweise zu Entwurf und Bemessung	35
7.1. Vorbemerkungen	35
7.2. Grundlagen und Ziele der Planung	35

7.2.1.	Grundlagen der Planung	35
7.2.2.	Ziele der Planung	36
7.2.3.	Kriterien zur Injizierbarkeit im Lockergestein	37
7.2.4.	Kriterien für die Injizierbarkeit von Festgestein	39
7.3.	Injektionsprinzipien und –verfahren	41
7.3.1.	Injektionsverfahren	41
7.3.2.	Aufnahme von Injektionsgut und Reichweite	43
7.3.3.	Abbruchkriterien Lockergestein	45
7.3.4.	Abbruchkriterien Festgestein	46
7.3.5.	Überwachungs- und Kontrollkriterien	54
7.4.	Injektionsgut	54
7.5.	Einbringen des Injektionsgutes	54
8.	Ausführung	55
8.1.	Bohrungen	55
8.2.	Aufbereitung des Injektionsgutes	55
8.3.	Pumpen	55
8.4.	Anmerkungen zu dem Ablauf von Injektionen	56
9.	Bauüberwachung, Prüfungen und Kontrollen	58
9.1.	Überwachung und Kontrolle	58
10.	Aufzeichnungen	61
11.	Besondere Anforderungen	62
12.	Vergütungsmodelle	63
13.	Anhang	65
14.	Literaturhinweise	71
15.	Tabellenverzeichnis	73
16.	Abbildungsverzeichnis	74
17.	Formelverzeichnis	76

0. VORWORT

Injektionen im Bergbau und Bauwesen – als Mittel im Kampf gegen Gas, Wasser und Verformungen – haben eine über 200 Jahre lange Tradition. Aber erst ab den 1930er Jahren wurden sie ingenieurmäßig vertieft diskutiert und publiziert. Schleusenbauwerke in Holland, Kohlegruben im Ruhrgebiet und Dichtschürzen unter Staudämmen lieferten frühe Anwendungen und Erkenntnisse. Cambefort schrieb 1964 eines der ersten Standardwerke. Spätere Literatur kam für den deutschen Sprachraum u.a. von Kutzner (1991), Ewert und Lombardi, in den USA kürzlich von Bruce und Weaver. Die Standardisierung auf Europäischer Ebene kennt nun die beiden wesentlichen Richtlinien dazu, nämlich EN 12715: Injektionen (2001) und den ISRM-Report on Grouting (1996). Vor allem zu ersterer ist diese Broschüre als handbuchartiger Kommentar zum Zwecke der Vertiefung einiger Punkte der Norm gedacht.

Injektionen sind von der Planung bis zum Erfolgsnachweis ein **interaktiver** und **iterativer Vorgang**, der eine **interdisziplinäre Zusammenarbeit** von injektionserfahrenen Fachleuten erfordert. Dabei sind Erfahrung und theoretisches Wissen gleichermaßen unerlässlich.

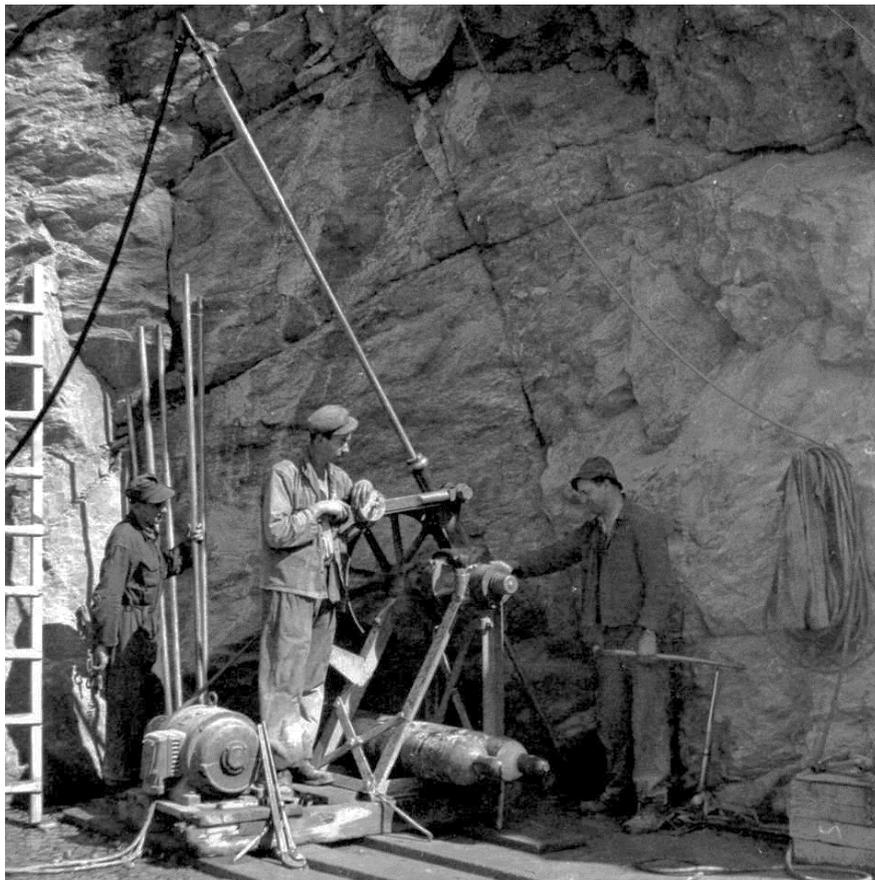


Abbildung 1. Injektionsarbeiten zu Pionierzeiten: Aufschlussarbeiten KW Kaprun, Bohrgerät CRAELIUS CX 42, INSOND (1950)

1. ANWENDUNGSBEREICH

In dem vorliegenden Dokument wird schwerpunktmäßig die Injektion mit Bindemittelsuspensionen in Fest- und Lockergestein behandelt.

Spaltinjektionen im Wasserbau (Druckstollen), Bauwerksinjektionen, Bodenverdrängungsinjektionen und damit auch Kompensationsinjektion werden in diesem Dokument nicht behandelt.

Um das Dokument kurz und gut lesbar zu halten, wird auf Wiederholungen im Wesentlichen verzichtet und auf die betreffenden Normen verwiesen. Das auszugsweise Lesen kann daher dazu führen, dass die Aussagen und Zusammenhänge des Werks verloren gehen.

Die Kapitelnummerierungen und Bezeichnungen entsprechen der EN 12715 (2001). Die Kapitel 0 und 12 sind zusätzlich zur EN 12715 in dieses Werk aufgenommen worden. Die Kapitel 13 bis 17 beinhalten den Anhang und Verzeichnisse.

Das Ziel geotechnischer Injektionen ist, die Baugrundeigenschaften hinsichtlich Durchlässigkeit boden- und felsmechanischer Parameter so zu verändern, dass der Baugrund den jeweiligen bautechnischen Erfordernissen entspricht.

Injektionen entfalten ihre Wirkung durch das Eindringen von Flüssigkeiten (Lösungen, Suspensionen etc.) in Hohlräume (z.B.: Klüfte, Poren) des Untergrundes, wo jene erstarren und aushärten. Dadurch steigern sie die Festigkeit des Bodens (Lockergestein oder Fels), die Durchlässigkeit wird vermindert und die Steifigkeit erhöht.

Lockergestein eignet sich generell für injektionstechnische Behandlung (Permeation) durch Bindemittelsuspension, wenn

- der Feinkornanteil ($< 0,063$ mm) der Siebkurve nicht mehr als 5-7% beträgt,
- das Verhältnis D_{15} Boden/ d_{85} Korngröße des Injektionsguts $\sim 20-24$ beträgt,
- die Zieldurchlässigkeit $> 5 \cdot 10^{-7}$ m/s ist und
- der in der Verbesserung zu erzielende Verformungsmodul nicht mehr als 250 MPa betragen soll.

Die effektiv wirksame Suspensionsaufnahme liegt bei Bindemittelinjektionen erfahrungsgemäß zwischen ca. 15% und 20% des Bodenvolumens.

Im **Festgestein (Fels)** sind Bindemittelinjektionen in der Regel ab Kluft-/Rissweiten > 50 μm möglich. Mit dem Eindringen kleinster Flüssigkeitsmengen unter Druck in die Kluft werden Eindringwiderstände und Filterprozesse, welche jeweils die Injektion erschweren, von Verformungsvorgängen (Aufweitung, besonders in von Trennflächen durchsetztem Gebirge) dominiert. Durch diese in der Regel kleinräumig elastischen und/oder plastischen Aufweitungen werden auch Kluftweiten $2_{ai} < 50$ μm injizierbar, und können in solchen Fällen daher auch Suspensionen mit Kluftweite $2_{ai} / d_{85}$ Korngröße in der Suspension ≤ 3 (siehe Abbildung 11) Verwendung finden. Selbst unter Berücksichtigung dieser Effekte bleibt in der Regel das injizierbare Kluftvolumen und damit der Suspensionsverbrauch – ohne Berücksichtigung der Bohrlochvolumina – unter 3% des Felsvolumens. Störungszonen und Karststrukturen stellen einen Sonderfall dar.

Injektionsziele für hydraulische Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^{-8}$ m/s sind nur unter gewissen Voraussetzungen erreichbar. Erzielbare Verbesserungen der Steifigkeiten in Störzonen hingegen bleiben jedenfalls unter einem Faktor von 3.

Bei hohen hydraulischen Gradienten des Berg- bzw. Grundwassers werden heute bereits erfolgreich thermoplastische Schmelzen eingesetzt. Haftfeste Zugverbindung von Rissflanken hat man schon mit besonderen Epoxidharzen erreicht.

Einer Entscheidung zum Injizieren ist allerdings immer auch eine technisch-wirtschaftliche Abwägung im Vergleich mit anderen Verfahren der Baugrundverbesserung voranzustellen.

2. NORMATIVE VERWEISUNGEN

ÖNORM EN 197-1: 2014-07-15 - Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.

ÖNORM EN 934 - Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel.

ÖNORM EN 1008:2002-10-01 - Zugabewasser von Beton - Festlegungen für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton.

ÖNORM EN 1997-2:2010-08-15 - Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds.

ÖNORM B 2203-1:2001-12-01 - Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb.

ÖNORM B 4400-1:2010-03-15 - Geotechnik - Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden - Regeln zur Umsetzung der ÖNORMEN EN ISO 14688-1 und -2 sowie grundlegende Symbole und Einheiten.

ÖNORM B 4400-2:2010-03-15 - Geotechnik - Teil 2: Benennungen und Definitionen, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN ISO 14689-1.

ÖNORM B 4415:2009-07-31 - Geotechnik - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-7.

ÖNORM EN 12715:2001-02-01 - Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) Injektionen.

ÖNORM EN ISO 14688-1:2013-11-15 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung.

ÖNORM EN ISO 14688-2:2013-11-15 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.

ÖNORM EN ISO 14689-1: 2004 05 01- Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2003).

ÖNORM EN 197-1: 2014-07-15 - Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.

ÖNORM EN 934 - Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel.

3. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Zur Erläuterung einzelner Phänomene bzw. Mechanismen werden mitunter Literaturbeispiele verwendet, die sich hinsichtlich Bezeichnungen und Indizes nicht unbedingt mit allgemeinen Definitionen decken. Dies ist bei der Interpretation der einzelnen Abbildungen und Formeln zu beachten.

Die folgenden Definitionen sind zusätzlich bzw. in Ergänzung zur EN 12715 zu sehen.

Adhäsions-Test von Feder

Der Adhäsions-Test ermittelt ein Maß für die Fließgrenze (yield stress, früher: Kohäsion) der Flüssigkeit. Bei diesem Adhäsions-Test wird ein Schleifpapier mit einer Körnung 100 µm in die Suspension getaucht. Das Gewicht der anhaftenden Suspensionsmenge je Fläche ist ein Maß für die Fließgrenze.

Agglomeration

Agglomeration von Teilchen (Flockung) kann u.a. als Folge von elektrostatischem Potential an der Grenzfläche zwischen Teilchen und Flüssigkeit ausgelöst werden. Dem Effekt kann durch Zugabe von Polymeren oder besonders intensiver, homogenisierender Aufschließung beim Mischvorgang (große Scherkräfte) entgegengewirkt werden.

Amenability Theory

Die Apparent-Lugeon-Methode ist in den USA unter dem Namen Amenability Theory bekannt. Die Amenability Theory beschreibt die Zugänglichkeit (Amenability) der Klüfte für eine bestimmte Suspensionsmischung. In der Apparent-Lugeon-Methode wird die Suspension im Allgemeinen so gewählt, dass 75% der Klüfte mit der Suspension zugänglich sind.

Bindemittelinjektionen

Bindemittelinjektionen sind Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln (vergleiche Zementinjektionen).

Constrained Boundaries

Darunter werden die sich an der Grenze der Injektionsausbreitung verengenden Öffnungsweiten verstanden. Im Gegensatz dazu beschreiben Open Boundaries die sich mit der Entfernung vom Bohrloch weitenden Kluftgeometrien.

Cubic Law

Dieses Strömungsgesetz lässt sich in exakter Form aus den Navier-Stokes Gleichungen nur für den stark vereinfachten Fall herleiten, dass die Kluft durch zwei glatte, planparallele Flächen begrenzt wird. Darin gilt für die Durchlässigkeit (k) der Einzelkluft

$$k = \frac{h^2}{12} \quad (1)$$

und für die Transmissivität (T)

$$T \equiv kA = \frac{wh^3}{12} \quad (2)$$

h:	(hydraulische) Kluftweite	[m]
w:	Breite der parallelen Strömung	[m]
k:	Durchlässigkeit	[m ²]
A:	durchströmte Fläche	[m ²]
T:	Transmissivität	[m ⁴]

Die (hydraulische) Kluftweite bestimmt zur dritten Potenz die Transmissivität, weshalb der Ausdruck Cubic Law dafür Verwendung findet (Witherspoon et al., 1980).

Filmerstarrungstest

Filmerstarrungstests werden in Ergänzung zur Probenahme für die üblichen Festigkeitsprüfungen vorgenommen, um den Einfluss von – im Flüssigkeitsfilm gegenüber größeren Probenvolumina – geringerer Reaktionswärme auf die (vergleichsweise längere) Abbindezeit zu prüfen.

Filterpresse

Die Filterpresse dient zur Ermittlung der Wasserabgabe einer Suspension unter Druck. Anhand dieser Messung kann die Stabilität der Suspension beurteilt werden.

Die Filterpresse ist ein in der Bohrspülungstechnik verwendetes, vom American Petroleum Institute (API) genormtes Gerät, bestehend aus einem verschließbaren Probengefäß (ca. 350 ml) mit Auslass im Boden (gesichert durch Gitterrost und Filterpapiereinsatz), in dem die Probeflüssigkeit durch CO₂-Gas unter 7 bar durch den Deckel von oben beaufschlagt werden kann. Der entstehende Gradient (in definierter Zeit) treibt überschüssiges, ungebundenes Anmachwasser aus der Mischung. Die Menge des anfallenden Filtrates ist ein Maß für die „Stabilität“ der Mischung unter Injektionsbedingungen. Der Versuch ergänzt den üblichen Sedimentationstest zur Ermittlung des Absetzmaßes im Standzylinder unter Schwerkraft.

Fließgrenze

Flüssigkeiten, die eine Fließgrenze besitzen, gehen erst in einen Fließzustand über, wenn eine Mindestschubspannung τ_0 überschritten wird. Diese Mindestschubspannung wird als Fließgrenze bezeichnet. In älteren Publikationen wird oftmals auch der Begriff Kohäsion verwendet.

Fließgrenzenbestimmung

Die Bestimmung der Fließgrenze kann anhand von unterschiedlichen Verfahren erfolgen. Nachfolgend sind einige in der Injektionstechnik verwendete Verfahren und deren Vor- bzw. Nachteile in der Tabelle 1 aufgezählt.

In der Tabelle 1 bedeuten:

- x: klein bzw. ja
- xx: mehr
- xxx: groß
- xxxx: sehr groß

Tabelle 1. Bestimmung der Fließgrenze anhand verschiedener Verfahren (unveröffentlicht Kainrath, 2016)

Methode	Versuchsdurchführung				Geeignet für		Messung	
	einfach	Fachwissen erforderlich	Aufwand	erforderliche Geräte	Absolutmessungen	Relativmessungen/Ab-schätzung	Messunsicherheit	Robustheit
Kugelharfe	x		x	Kugelharfe		x	xxx	xxx
Fließkurve (Bingham)		x	xxx	Viskosimeter, Messgeometrien	x		x	x
Messflügel	x		xx	Viskosimeter, Messflügel	x		x	x
Kasumeter	x		xx	Kasumeter		x	xxx	xx
Plattenkohäsionstest	x		xx	Vorrichtung nach Lombardi		x	xxx	xx
Adhäsionstest am Schleifpapier	x		x	Schleifpapier Körnung 100		x	k.A.	xxxx

Füller

Füllstoffe sind inerte Zusatzstoffe, die dem Injektionsgut beigemischt werden.

Geometrische Kluftweite

Die (mittlere) geometrische Kluftweite (Kohl, 1992) beschreibt den Wert des tatsächlich vorhandenen (mittleren) Abstandes der Kluftwandungen. Die geometrische Kluftweite ist damit für die Anwendung von Filterkriterien (Regeln) maßgebend.

In der Abbildung 2 bedeuten:

- a_h : hydraulische Weite
- a_m : (mittlere) geometrische Weite

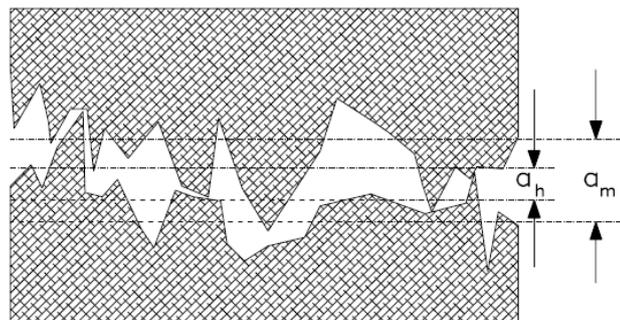


Abbildung 2. Schematische Darstellung der hydraulischen und der geometrischen Kluftweite (Kohl, 1992)

GIN

Die Grouting Intensity Number (GIN) ist ein Konzept der Begrenzung der Injektions-Energie/Laufmeter Bohrung, welche auf Lombardi (Lombardi et al., 1993) zurückgeht. Ermittelt wird diese „Injektionsintensität“ 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] (siehe Kapitel 7.3.4.4).

Glasplättchentest

Bei diesem Test werden mehrere Tropfen Injektionsgut (Suspension) – vergleichbar mit ähnlichen Tests im Blutlabor – zwischen zwei Glasplättchen gepresst und unter dem Mikroskop oder einer Lupe mit > 8-facher Vergrößerung (Fadenzähler mit 0,1 mm Skalierung) im Gegenlicht betrachtet. Sichtbar werden die Mineralverteilung und etwaige Agglomerationen von Feststoffen in der Mischung. Dieser Test stellt eine praxisnahe Untersuchung zur Prüfung der Kornbenetzung und Homogenität der Suspension dar.

Hohlraum

Siehe Trennfläche. Karsthohlräume sind das Ergebnis chemischer Lösungsprozesse.

Hydrofracking (Fracking)

Hydrofracking bedeutet ein hydraulisches Aufbrechen des Untergrundes. Die dabei ausgelösten Verformungen sind überwiegend dauerhaft (plastisch).

Hydrojacking (Jacking)

Hydrojacking bedeutet ein hydraulisches Aufspreizen, Aufzwängen und/oder Aufweiten von Trennflächen. Meist ist damit (im Zuge der Felsinjektion) die Rissflankendilatation unter wirksamen Injektionsdruck gemeint. Die damit verbundenen Verformungen haben mehrheitlich elastischen Charakter.

Hydraulische Kluftweite

Die hydraulische Kluftweite beschreibt den – aus hydraulischen Versuchen errechneten – Abstand zweier paralleler, die Kluft begrenzender Flächen. Die hydraulische Kluftweite ist damit eine rechnerische Größe, die jenen Strömungsquerschnitt darstellt, welcher dem Mengenstrom des Fluids unter Versuchsparametergrößen und -bedingungen (Druck, Gradient, Rate, Viskosität, Rauigkeit, etc.) entspricht. Da die hydraulische Kluftweite **engstellenbestimmt** ist, liegt ihr Wert immer deutlich unter dem der mittleren geometrischen Kluftöffnung (Abbildung 2). Die hydraulische Kluftweite ist zusätzlich insofern auch **druckabhängig**, als in ihr die Verformung der Kluft unter dem hydraulischen Versuchsdruck enthalten ist.

Injektionsdruck

Bei dem Injektionsdruck wird unterschieden zwischen:

- Injektionspumpendruck
- Injektionsdruck am Bohrlochmund
- wirksamem Injektionsdruck
- Ruhedruck

Der Injektionsdruck kann sich von der Pumpe bis in den zu injizierendem Hohlraum durch hydraulische Verluste sehr stark (bis zu 80% und mehr) reduzieren. Deshalb ist es unerlässlich anzugeben, welcher Druck jeweils gemeint bzw. wo der jeweilige Druck wirksam ist. Der Injektionsdruck ist einer der wesentlichen Parameter für die Steuerung des Injektionsprozesses und zur Beurteilung des Injektionsverlaufes. Der Begriff „Injektionsdruck“ ist also ohne nähere Spezifikation, wo und unter welchen Bedingungen er gemessen bzw. wirksam wird, alleine für eine Beurteilung des Injektionsvorganges unzureichend.

Injektionspumpendruck = Betriebsdruck

Dieser Druck wird während der Pumptätigkeit unmittelbar nach der Injektionspumpe gemessen (siehe Injektionsdruck).

Injektionsdruck am Bohrlochmund

Druck, der am Bohrlochmund gemessen wird.

Kluft

Siehe Trennfläche.

Open Boundaries

Siehe Constrained Boundaries.

Permeation

Permeation (Grouting) bedeutet so viel wie Durchdringungsinjektion im Sinne des Durchtränkens von Poren bzw. Klüften des Untergrundes mit Injektionsgut ohne maßgebliche Verformung. In der Regel wird damit eine für das Erreichen des jeweiligen Injektionszieles wirksame Teilsättigung erreicht, welche die Durchlässigkeit des Bodens reduziert und seine Festigkeit erhöht.

Pinholetest

Der Pinholetest ist ein Eluier- und Erosionsversuch, bei dem durch ein definiertes Loch in einer ausgehärteten Probe Injektionsgutes Wasser unter definiertem Gradienten über längere Zeit strömt. Ursprünglich wurde dieser Test für Dichtwandmischungen entwickelt. Der Materialverlust der Probe ist ein Maß für die Dauerbeständigkeit des Injektionsgutes.

Porenengstellenverteilung

Die Poren im Untergrund sind über Engstellen miteinander verbunden. Die Durchmesser der Engstellen hängen von der Korngrößenverteilung ab, aus welcher sich über ein statistisches Modell die Porenengstellenverteilung ableiten lässt. Aus der Porenengstellenverteilung können Rückschlüsse auf die Injizierbarkeit des Bodens und das zulässige Größtkorn des Injektionsgutes gezogen werden.

Porenzahl e

Die Porenzahl (auch Porenziffer) ist definiert als Verhältnis des Hohlraumvolumens (Porenvolumen) zum Feststoffvolumen.

Porenanteil n

Der Porenanteil eines Bodens ist definiert als Verhältnis des Hohlraumvolumens (Porenvolumen) zum Gesamtvolumen.

N-Kriterium

Das N-Kriterium (D_{15} Boden/ d_{85} Injektionsgut) dient zur Ermittlung der Injizierbarkeit von Lockergestein und basiert auf unterschiedlichen Erfahrungswerten mit Filterkriterien.

Mantelmischung

Die Mantelmischung ist eine Suspension mit geringer Festigkeit (etwa $< 1,5$ MPa einaxiale Druckfestigkeit). Sie wird zum Verfüllen des Ringraums zwischen Bohrlochwand und Manschettenrohr eingesetzt, um ein Ausbreiten nachfolgender Injektionen entlang des Ringraumes zu verhindern.

Marsh-Trichter, Marsh-Trichter-Zeit

Der Marsh-Trichter besteht aus schlagfestem Kunststoff und hat eine Auslaufdüse mit definiertem Durchmesser. Ein im Trichter befestigtes Sieb verhindert das Verstopfen der Auslaufdüse durch größere Partikel. Die Marsh-Trichter-Zeit ist die in Sekunden gemessene Zeitspanne, die 1 Liter Probenflüssigkeit benötigt, um aus einem Marsh-Trichter (bei einer Füllmenge von 1,5 Liter) durch die Auslaufdüse zu fließen.

Marsh-Viskosität

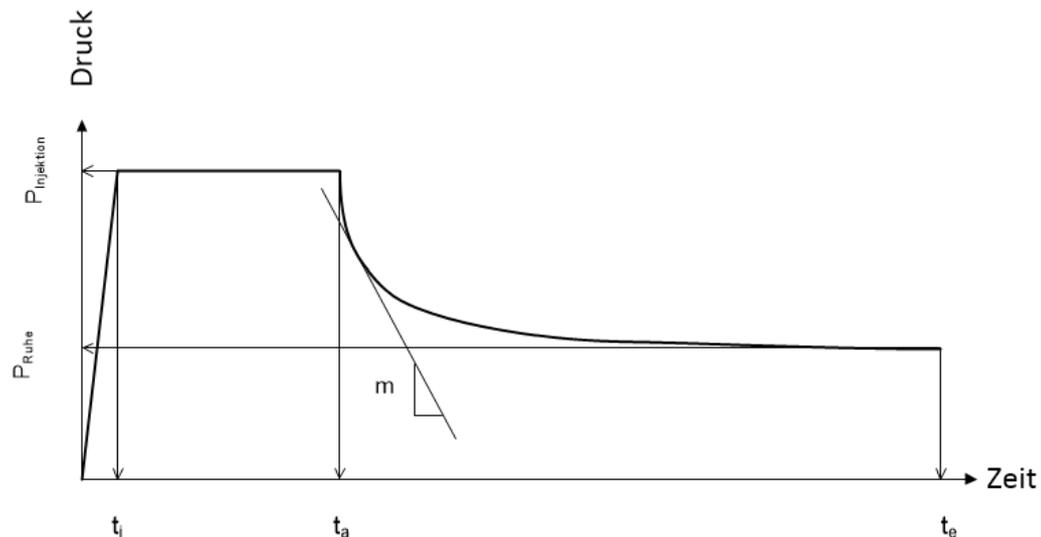
„Ihre Bestimmung erfolgt mit dem Marsh-Trichter. Die in Sekunden angegebene Durchflussrate für ein bestimmtes Flüssigkeitsvolumen wird als Marsh-Viskosität bezeichnet“ (EN 12715, S. 45).

Reservoir Pressure

Reservoir Pressure bedeutet jenen in situ Druck in einer Kluft oder im Porenraum des Untergrundes, welcher dort unter hydrostatischen (oder durch Gas oder artesischen Überdruck erhöhten) Bedingungen herrscht. Der Ausdruck stammt aus der Erdölindustrie und beschreibt dort den in der Lagerstätte (vergleichbar mit einem Aquifer) anstehenden Druck.

Ruhedruck

Ruhedruck ist der Druck, der in den Hohlräumen herrscht, wenn die Fließgeschwindigkeit der Suspension null ist und auch die instationäre Dissipation des Injektionsgutes (nach Einschließen des Bohrlochs bzw. Ende der Injektion) abgeschlossen ist. Um den Ruhedruck zu ermitteln, ist es notwendig, die Pumpe zu stoppen um damit den Rückfluss zu unterbinden, und zwischen Abschlussorgan und Untergrund den Druckabfall bis zum Ruhezustand (vgl. Reservoir Pressure) zu messen.



t_i ... Beginn der Injektion	P_{Ruhe} Ruhedruck
t_a ... Beginn des Druckabfalls	$P_{Injektion}$... Injektionspumpendruck
t_e ... Ende des Druckabfalls	m charakteristische Neigung der Druckabfallkurve

Abbildung 3. Schema einer Druckabfallkurve (Reichl, 2000)

Meist ist ca. 3 bis 5 min nach dem Pumpenstopp der Ruhedruck erreicht. In Abhängigkeit von der Viskosität des Injektionsgutes kann sich diese Zeit auch verlängern.

Steifigkeit

Die Steifigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung. Es ist dabei zwischen der Baugrundsteifigkeit/Gebirgsmodul und spezifischen, aus Versuchen ermittelten Steifigkeitskennwerten (Elastizitätsmodul, Steifemodul, Dilatometermodul etc.) zu unterscheiden. Die Steifigkeit ist dabei immer in Bezug zur Belastungsart zu setzen. Die im Labor an Proben ermittelten Kennwerte bilden das in situ Verformungsverhalten nur näherungsweise ab. Für die konstruktive Anwendung sind die Ergebnisse daher differenziert zu betrachten. Die Baugrundsteifigkeit bzw. der Gebirgsmodul spiegelt dagegen – im Unterschied zu Laborversuchen – das in situ Verformungsverhalten des Baugrundes im großen Maßstab wider, und kann durch Rückrechnungen aus gemessenen Verformungen bzw. durch in situ Versuche ermittelt werden.

Shut in

Mit Shut in wird jener Vorgang bezeichnet, bei dem ein Förder- oder Injektionsstrom (in Form von Gas oder Flüssigkeit) aus oder in ein Bohrloch durch Schließen eines Absperrventils unterbrochen wird. Das Förder- oder Injektionsgut wird so im Bohrloch und im Untergrund eingeschlossen.

Split Spacing

Mit Split Spacing wird das Bohren von sekundären tertiären etc. Injektionsbohrungen im halben Abstand der bereits bestehenden Bohrungen bezeichnet.

Trennfläche

Flächig ausgedehnte, im Allgemeinen vollständige Unterbrechung des mechanischen Zusammenhangs im Gestein. Die Ursachen sind mit der Entstehungsgeschichte der Gesteine verbunden und können sedimentären, tektonischen oder anderen mechanischen (z.B.: Schwundrisse) Ursprungs sein.

Häufig wird für Trennfläche auch der Begriff Kluftfläche verwendet. Der Begriff Kluft bezeichnet einen durch Trennflächen umgrenzten Hohlraum.

Top Down

Mit Top Down wird das abschnittsweise Bohren, Injizieren, Erhärtenlassen, Wiederaufbohren und das darauffolgende Abbohren eines weiteren Abschnittes unter dem injizierten Bereich – vom Bohrlochmund bis zum Bohrlochtiefsten – bezeichnet.

Verengte Risswurzel

Darunter wird jener Bereich an der Wirkungsgrenze der Injektionsausbreitung (siehe Constrained Boundaries) verstanden, in dem die hydraulisch aufgezwängte Kluft in einer flachen Keilform ausläuft.

Verformungsmodul

Siehe Steifigkeit.

Viskosimeter

Ein Viskosimeter ist ein physikalisches Messgerät zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Flüssigkeiten. Üblicherweise werden dabei Rotationsviskosimeter, die im Regelfall geschwindigkeitsgesteuert – seltener schubspannungsgesteuert – sind, eingesetzt. Für die Messung der Viskosität wird üblicherweise ein Zylinder in einem Becher mit der Flüssigkeit rotiert (Searle-System) und die Probe dadurch definierten Scherbedingungen im Ringspalt ausgesetzt. Das benötigte Drehmoment wird bei unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten (Scherraten) aufgezeichnet und in eine Schubspannung umgerechnet, wodurch sich die Fließkurve der untersuchten Flüssigkeit ergibt. Wichtig dabei ist, dass die Messung nur mit genormten Messzylindern durchgeführt wird (siehe Abbildung 4).

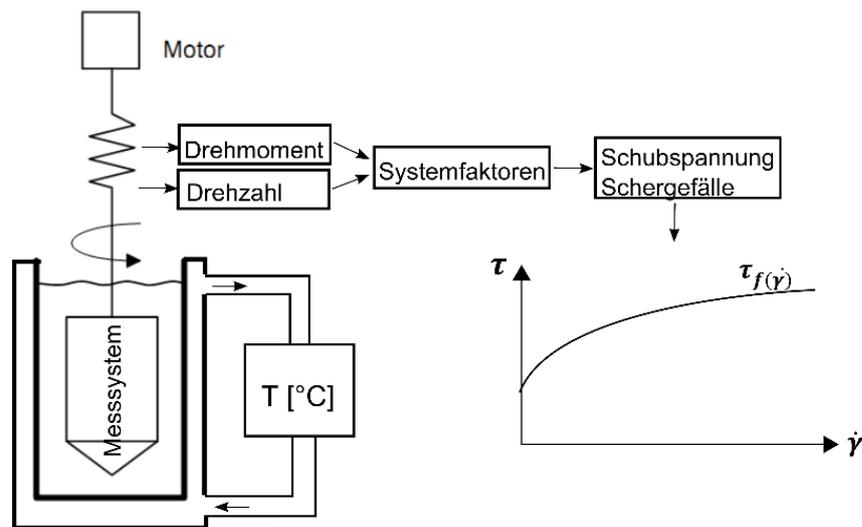


Abbildung 4. Schemaskizze zu Viskosimeterversuch (Kainrath, 2012)

W/B-Wert

Der W/B-Wert beschreibt das Massenverhältnis von Wasser zu Bindemittel einer Mischung.

Wirksamer Injektionsdruck

Der wirksame Injektionsdruck ist der im Hohlraum (z.B.: Kluft) durchschnittlich wirksamer Druck in der Suspension. Der wirksame Injektionsdruck kann in guter Annäherung über die Druckabfallkurve (siehe Ruhedruck) abgeschätzt werden. Für die Ermittlung des wirksamen Differenzdruckes der Injektion muss der örtlich vorherrschende Kluft- oder Porenwasserdruck berücksichtigt werden.

W/Z-Wert

Der W/Z-Wert beschreibt das Massenverhältnis von Wasser zu Zement einer Mischung.

Zementinjektionen

In diesem Werk wird der Begriff Zementinjektion als Synonym für alle Arten von Bindemittelinjektion verwendet.

4. ERFORDERLICHE INFORMATIONEN ZUR AUSFÜHRUNG DER ARBEITEN

Das folgende Flussdiagramm beschreibt die Prozesse der Planung und Ausführung einer Injektionsmaßnahme. Die dort getroffene Phaseneinteilung entspricht dabei den in Österreich üblichen (auch verwaltungsrechtlichen) Abläufen. Je nach Umfang und Auswirkungen der Injektionsarbeiten kann es für die behördliche Einreichung des Projektes erforderlich sein, unter anderem die Eingriffe und deren möglichen Auswirkungen in den Grundwasser- bzw. Bergwasserkörper bezüglich der Umweltverträglichkeit darzustellen. Mit Anforderungen (AF) sind unter anderem die räumlichen Gegebenheiten (z.B.: Reichweite des Injektionsgutes, Hebungen bestehender Bauwerke), die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die Beschränkung der Auswirkungen auf die Umwelt oder die Dauerhaftigkeit des Injektionsgutes gemeint. Für die einzelnen Akteure sind die Verantwortlichkeiten und Aufgaben vorab zu definieren und ggf. im Laufe des Projektes anzupassen. Injektionsexperten sind auch in der Sphäre des Bauherrn bzw. Auftragsgebers unbedingt erforderlich.

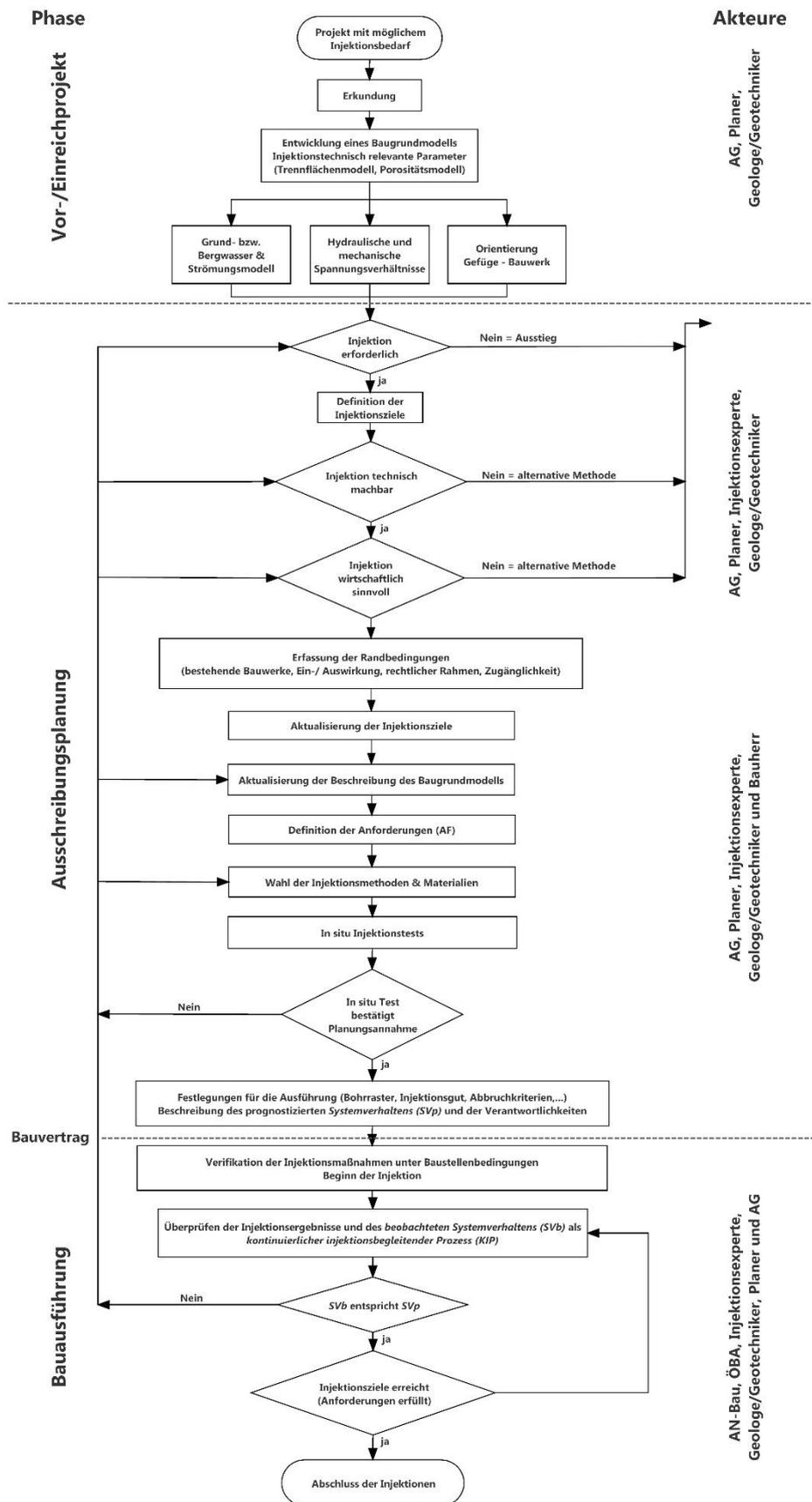


Abbildung 5. Flussdiagramm Ablauf einer Injektionsmaßnahme

5. GEOTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die in der EN 12715 im Kapitel 5 angeführten Angaben zu geotechnischen Untersuchungen sind zu erweitern und als geologisch-geotechnische Erkundungen zu verstehen. Diese erweiterte Untersuchung erfordert eine eingehende, injektionsspezifische Baugrunderkundung sowohl in situ als auch in Laborversuchen. In den Erkundungsberichten sind ingenieurgeologische Baugrundbeschreibungen, geotechnische Versuche und Interpretationen klar und verständlich in Wort, Bild und mittels Versuchsprotokollen darzustellen. Die Interpretationen dienen dazu, die ermittelten Kennwerte (in situ und Labor) mit der geologischen Genese unter Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse in Einklang zu bringen. Der in Kapitel 4 dargestellte Projektablauf in Kontext mit den im gegenständlichen Kapitel dargelegten Erkundungsmethoden, ermöglicht die frühzeitige Fokussierung auf injektionstechnische Erfordernisse.

5.1. Allgemeines

5.1.1. Anforderungen an Baugrunduntersuchungen und Erkundungsziele

Bezüglich der Anforderungen an Baugrunduntersuchungen wird auf ÖNORM B 1997-2, ÖN EN ISO 14688 – Teile 1 und 2, EN ISO 14689 Teile 1 und 2, ON B 4400-1 und 2 sowie weiterführende nationale und internationale Normen und Richtlinien verwiesen. Erkundungsmethoden, welche sich speziell zur Planung und Umsetzung von Injektionsmaßnahmen als zielführend erweisen, werden in diesem Werk (siehe auch Tabelle 2 und Tabelle 3) beschrieben.

Im Zuge der Planung von Injektionsmaßnahmen werden Aussagen über den zu injizierenden Untergrund (Locker- oder Festgestein) benötigt. Dabei stehen hinsichtlich Injektionstechnik hydraulische Parameter sowie Aussagen zu den Hohlräumen und deren Konnektivität im Gebirge im Vordergrund.

Umfang und Art der geologisch-geotechnischen Erkundungsarbeiten sind abhängig von der Projektphase, der Bauwerksart sowie der in Frage kommenden Baumethoden. Je nach Bauwerksart und Bauwerksteil werden unterschiedliche Anforderungen an die Injektionsarbeiten gestellt. Um die Injektionsziele und deren Erreichung planen zu können, spielt das abgeleitete Baugrundmodell eine wesentliche Rolle. Daher sind zur Klärung des generellen Injektionserfordernisses und des Injektionskonzeptes bereits in einer frühen Projektphase injektionsrelevante Erkenntnisse zur Baugrundsituation erforderlich (siehe Abbildung 5).

5.1.2. Umfang der Baugrunduntersuchungen

Die Erkundungen (Umfang und Methode) sowie insbesondere die räumliche Auslegung müssen sich an den regionalen und lokalen geologisch-tektonischen Rahmenbedingungen orientieren. Es ist erforderlich, die strukturgeologischen Verhältnisse (Lagerungsdichten, Trennflächeninventar etc.) in die Planung der Erkundung einzubeziehen, um injektionstechnisch maßgebliche Zonen im Untergrund lokalisieren und charakterisieren zu können. Ein schrittweises Vorgehen, beginnend mit einfachen und günstigen Erhebungs- und Erkundungsmethoden, wird empfohlen. Eine ingenieurgeologische Baugrundkartierung und die Ableitung eines ersten Untergrundmodells im geeigneten Maßstab sind an den Beginn der Planung zu stellen.

Weiter ist es zweckmäßig, die regionalen geologischen Verhältnisse unter anderem anhand folgender Quellen im Zuge der Vorstudie abzuklären:

- verfügbare geologische Karten, Profile, Berichte,
- bestehende Untergrunderkundungen in der Umgebung,
- geologisch-geotechnisch relevante Informationen aus Baugrunderkundungen und Dokumentationen zu benachbarten oder vergleichbaren Bauvorhaben.

5.1.3. Erkundungsmethoden

Erkundungsmethoden sind grundsätzlich auf die Beschreibung und Beurteilung der Untergrundverhältnisse in Bezug auf die Injektionsziele und dem daraus folgenden Injektionsbedarf hin auszurichten.

Das bedeutet, dass für die Beurteilung des Baugrundes nicht nur die üblichen, genormten Erkundungsverfahren zum Einsatz kommen sollten, sondern bevorzugt auch solche, die über die geohydraulischen Verhältnisse Aufschluss geben und zum Nachweis der Injektionswirkungen verwendet werden können (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3).

Tabelle 2. Empfehlungen für Erkundungsparameter (adaptiert nach Stadler, unveröffentlicht)

Geotechnische Untersuchungen für Injektionsmaßnahmen									
Lockergestein					Fels				
	absolut erforderlich	erforderlich	empfohlen	hilfreich		absolut erforderlich	erforderlich	empfohlen	hilfreich
Scherfestigkeit				X	Einaxiale Druckfestigkeit			X	
Verformbarkeit				X	Verformungsmodul		X		
Korngrößenverteilung	X				Trennflächenbeschaffenheit	X			
Sättigung				X	Öffnungsparameter	X			
Lagerungsdichte			X		Profil Transmissivität	X			
Schichtung/Lagerung	X				Anisotropie Transmissivität			X	
Filtrationseigenschaften			X		Mineralog. Zusammensetzung				X
Durchlässigkeit k_f , hor/vert.	X				(Lithologische) Schichtung	X			
Grundwasserströmung			X		Porosität		X		
in situ Spannungszustand				X	DRI Index				X
Porenanteil		X			RQD Index				X
					Verwitterungsgrad				X

Bei den geologisch-geotechnischen Erkundungsmethoden unterscheidet man prinzipiell zwischen Feldmethoden und Labormethoden.

Feldmethoden werden an **natürlichen Aufschlüssen** und **künstlichen Aufschlüssen** angewandt. Vorhandene natürliche Aufschlüsse stellen eine wichtige Basis jeder geologisch-geotechnischen Baugrunderkundung dar. Darüber hinaus fließen Ergebnisse aus der Luftbildinterpretation sowie geomorphologischer Aufnahmen in die Kartierung ein. Bei der Probenahme für Laborversuche wird auf entsprechende normative Festlegungen verwiesen.

Künstliche Aufschlüsse werden durch direkte Verfahren wie z.B.: Bohrungen und Schürfe geschaffen und dienen unter anderem der Gewinnung von Probenmaterial und der Durchführung von in situ Tests.

Indirekte Verfahren betreffen vor allem geophysikalische Methoden wie Seismik, Geoelektrik etc.

Labormethoden werden zur Abklärung von Fragen aus den Bereichen Hydrochemie, Chemie, Mineralogie, Fels- und Bodenmechanik sowie Fels- und Bodenhydraulik verwendet.

In Tabelle 3 sind Erkundungsmethoden und die Parameter, welche mit den Methoden erkundet werden können, dargestellt.

Tabelle 3. Feld- und Laborversuche zur Erfassung injektionspezifischer Parameter

Feldversuche					
Locker/Festgestein	Methode	Parameter	Verfahren	Anmerkung, Anwendungsgrenzen	
L/F	geologische Kartierung/ Trennflächenaufnahme	Lithologie, Trennflächen und ihre Eigenschaften, geologische Grenzen etc.	Geländebegehungen unterstützt durch Luftbild-/Satellitenauswertungen, digitale Hilfsmittel (Stereo Photogrammetry, LIDAR, etc.)	Wichtig dabei, die Lage im Raum zu erfassen und anschaulich zu kommunizieren	
L/F	Geoelektrische Widerstandsmessung	Schichtgrenzen		Schneedecke, Grundwasserströmung Beeinflussung durch Wassergehalt	
L/F	Refraktionsseismik	Schichtgrenzen Hang- Grundwasserspiegel		kostengünstig; nicht für komplexe Geologie, Erkundungstiefe beschränkt	
L/F	Reflexionsseismik	Schichtgrenzen		Aufwändig, kostenintensiv, oberflächennaher Bereich wird schlecht erfasst	
L/F	Hybride Seismik	Schichtgrenzen		Vorteile von Refraktions- und Reflexionsseismik werden vereint	
L/F	Schürfe und Schächte	Schichtgrenzen, Orientierung Grund/Kluftwasser Probengewinnung in situ Versuche		begrenzte Tiefe	
F	Erkundungsstollen	Gebirgsparameter insitu Versuche Probengewinnung		aufwändig, kostenintensiv	
L/F	Bohrung	Geologie/Schichtgrenzen	Kernaufnahme Kamerabefahrung, OBI/ABI	saubere Bohrlochwandung	
L		Geohydraulische Eigenschaften	Absenk/Auffüllversuche im Bohrloch		
L/F			Wasserabpressversuche	Karst, zu hohe Durchlässigkeit	
F			Wasserstand, Ganglinie		
F		Fließrichtung und Geschwindigkeit			
L/F		Geomechanische Eigenschaften	Bohrlochaufweitungsversuche		kurzfristig standfeste Bohrlochwandung
L			Standard Penetration Tests		
L/F			Bohrenergie		
L			Bohrkern	Bodenmechanische Untersuchungen Felsmechanische Untersuchungen	in Abhängigkeit der Probenqualität
L/F		Sondierungen	Schichtgrenze	Rammsondierung, CPT, Tastbohrungen, Bohrenergie	
L			Lagerungsdichte	Rammsondierung, CPT, Bohrenergie	

Laborversuche			
	Relevanz	Parameter	Verfahren
Lockergestein	●	Kornverteilung	Siebanalysen
	○	Korndichte	Pyknometer
	○	Kornform	Augenscheinbefund / Mikroskop
	●	Lagerungsdichte	
	●	Lockerste/Dichteste Lagerung	Rütteltischmethode, Proctor
	○	Wassergehalt	Ofentrocknung, Luftpyknometer etc.
	○	Reibungswinkel, Kohäsion	Scherversuche, Triaxialversuche
	○	Verformbarkeit	Kompressionsversuche, Triaxialversuche
	●	Durchlässigkeit	Versuche mit konstantem/veränderlichem hydraulischen Gefälle
	●	Porenanteil	
	○	Mineralogie	Dünnschliff, XRPD, Tonmineralanalyse
	○	Glühverlust	Bestimmung organischer Bestandteile
Festgestein	○	Abrasivität	LCPC-Versuch, Abrasimeterversuch, Los Angeles Versuch
	○	Dichte	
	●	Porosität	Pyknometer
	○	(Druck-)Festigkeit	einaxialer Druckversuch, Triaxialversuch
	●	Verformbarkeit	einaxialer Druckversuch, Triaxialversuch, Quellversuche
	○	Scherfestigkeit	Scherversuch, Triaxialversuch
	●*/○	Zugfestigkeit	Spaltzugversuch
	○	Gesteinsdurchlässigkeit	Durchlässigkeitsversuch mit fallender Druckhöhe
○	Mineralogie	Dünnschliff, XRPD, Tonmineralanalyse	
○	Abrasivität	Cherchar, NTNU	

- Eigenschaft von signifikanter Bedeutung * bei geschichteten/geschieferten/laminierten Gesteinen
- Eigenschaft von untergeordneter Bedeutung

5.1.4. Anforderungen an Erkundungsberichte

Der Erkundungsbericht hat eine ausreichende Grundlage für die Planung der Injektionsmaßnahmen zu liefern. Dazu sind Baugrundbeschreibungen mit vornehmlich geohydraulischen Klassifikationen sowie die Aufzählung der angewandten Methoden und Verfahren nötig.

Die Ergebnisse sind zu interpretieren und zusammenfassend in dem Baugrundmodell darzustellen. Im Weiteren sind ingenieurgeologische Schnitte, welche die Kommunikation des Baugrundmodells erleichtern, anzufertigen. Die detaillierten Einzelergebnisse sollten in den Anhängen enthalten sein. Ermittelte Werte aus Gelände, in situ Versuchen und Labor (die Datengrundlagen) sind von den abgeleiteten Interpretationen klar zu trennen.

Der Schwerpunkt muss dabei auf die Verständlichkeit der Aussagen gelegt werden, um im interdisziplinären Projektteam das Baugrundmodell optimal kommunizieren zu können. Zur Veranschaulichung von Injektionsverhalten sollen auf jeden Fall Systembilder zur prognostizierten Ausbreitung des Injektionsgutes gemäß Kapitel 5.3 enthalten sein.

Der Erkundungsbericht (im Sinne eines Geotechnical Baseline Report) bildet auch die Referenz, um etwaige, später festgestellte Abweichungen vom beschriebenen Baugrundmodell beurteilen zu können.

5.2. Geohydraulische Grundlagen

Weil im Zuge geotechnischer Injektionen Wasser-Bindemittelgemische mit flüssiger bis pastöser Konsistenz in den Baugrund unter Druck eingebracht werden, muss die Darstellung der geohydraulischen Verhältnisse einen wesentlichen Teil bei der Erstellung des Untergrundmodelles einnehmen. Dazu wird im Zuge dieses Kommentars auf ausgewählte Themen verwiesen. Die Grundlagen sind in der entsprechenden Fachliteratur dargelegt.

Die wesentlichen geohydraulischen Parameter und deren Zusammenhänge werden im ISRM Report on Grouting (1996) zusammengefasst:

Tabelle 4. Verhältnisse zwischen geohydraulischen Kennwerten (ISRM, 1996)

Kennwert	Abkürzung	T	K	k	Einheit
Transmissivität (Transmissivity)	T	τ	$K \cdot d$	$k \cdot \frac{d \cdot \gamma}{\eta}$	[m ² /s]
Leitfähigkeit (Conductivity)	K	$\frac{T}{d}$	K	$k \cdot \frac{\gamma}{\eta}$	[m/s]
Durchlässigkeit (Permeability)	k	$\frac{T \cdot \eta}{\gamma \cdot d}$	$K \cdot \frac{\eta}{\gamma}$	k	[m ²]

η : dynamische Viskosität [mPA·s]

d : Mächtigkeit des Aquifers [m]

γ : Wichte des Fluides [kN/m³]

Zum grundlegenden Verständnis der hydraulischen Vorgänge im Untergrund ist es erforderlich, die Unterschiede in der Rheologie von Flüssigkeiten (z.B.: Wasser und Zementsuspension) zu berücksichtigen. Insbesondere ist der Unterschied nach Bingham'scher und Newton'scher Definition zu beachten.

Wasser (Medium für Wasserdruckversuche, Lugeontest) wird entsprechend seiner belastungsunabhängigen Viskosität und seines proportionalen Zusammenhangs von Schubspannung und Schergeschwindigkeit (also ohne Fließgrenze - *yield*) den **Newtonschen Flüssigkeiten** zugerechnet.

Binghamsche Flüssigkeiten (zutreffend für die meisten partikulären Injektionsmischungen und Suspensionen) unterscheiden sich von Newtonschen dadurch, dass sie eine innere Kohäsion (Fließgrenze τ_0 , *yield-stress*) besitzen, die überwunden werden muss, um Fließen einzuleiten. Die Schubspannung steigt bei Binghamschen Fluiden nach dem Überwinden (oder oberhalb) der Fließgrenze τ_0 in der Regel proportional zur Schergeschwindigkeit an (siehe Abbildung 6).

Von dieser Linearität abweichende Flüssigkeiten zeigen **strukturviskoses** Verhalten. **Rheopexe** Fluide (etwa Bentonit-Silikat-Gele, feststoffreiche Zementsuspensionen) werden mit zunehmender Rührdauer und Geschwindigkeit **dünnflüssiger** (scherverdünnend), andere wiederum zeigen dilatantes Verhalten, sie **dicken ein** (scherverdickend). Beide Vorgänge sind in unterschiedlichem Ausmaße – mit der Rückkehr in den Ruhezustand – reversibel.

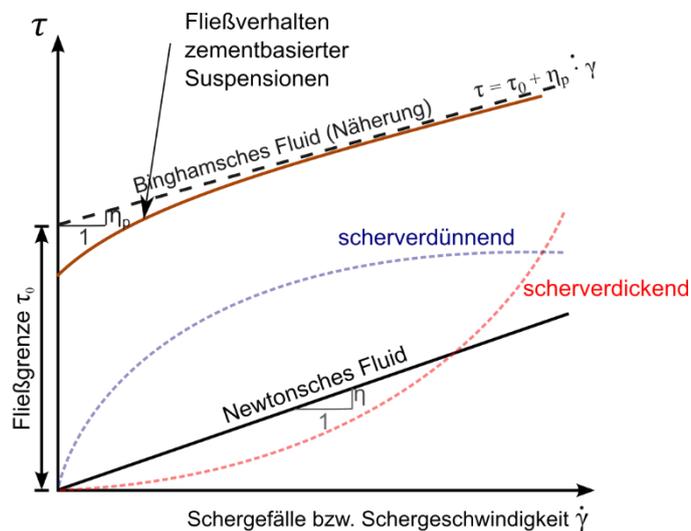


Abbildung 6. Fließverhalten verschiedener Flüssigkeiten (Kainrath, 2014)

Thixotropie

Unter diesem Begriff versteht man das veränderliche Verhalten eines Fluids, welches sich bei mechanischer Einwirkung (Bewegung) verflüssigt und im Ruhezustand eine Viskositäts- bzw. Fließgrenzenerhöhung erfährt. Dieser Prozess ist reversibel und wiederholbar. Abbildung 7 zeigt diesen Einfluss der Thixotropie anhand einer typischen Fließkurve. Thixotropie tritt im Hinblick auf Injektionen vor allem bei einer erhöhten Beimischung von Tonen (insbes. Bentonit) oder anderen Zusatzstoffen auf. Sie spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn Unterbrechungen des Injektionsvorganges auftreten, oder wenn etwa die Suspension im Marsh-Trichter – vor dem Messen der Auslaufzeit – zu lange gehalten wird.

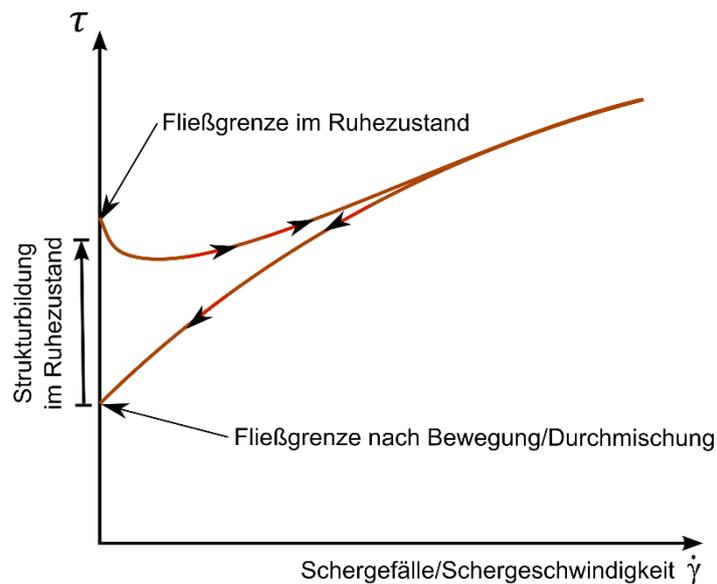


Abbildung 7. Fließkurve thixotroper Flüssigkeiten (unveröffentlicht Stadler, 2016)

5.2.1. Geohydraulik im Lockergestein

Die hydraulische Charakteristik in Lockergesteinen wird vom Gefüge (Kornform, Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte) der Lockergesteine bestimmt. Zur Beschreibung der Strömung von Wasser im Bodenkörper wird in der Regel das Gesetz von Darcy angewandt. Dieses definiert die Filtergeschwindigkeit (v_f) als Quotient aus dem Durchfluss (Q) und der Querschnittsfläche (A). Nach Darcy ist die Filtergeschwindigkeit (v_f) direkt proportional zum hydraulischen Gradienten (I). Der Gradient (I) resultiert aus der Wasserspiegelhöhendifferenz (Δh) bezogen auf die durchströmte Länge L . k_f ist der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens. Die Abbildung 8 stellt diese Zusammenhänge symbolisch dar.

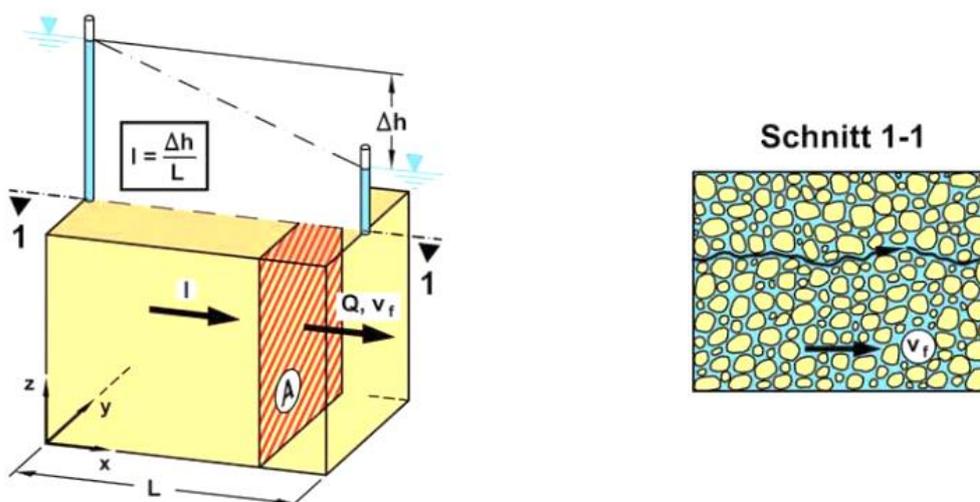


Abbildung 8. Abstraktion des bodenhydraulischen Modells (Sommer, 2012)

$$v_f = \frac{Q}{A} = k_f \cdot I \quad (3)$$

5.2.2. Geohydraulik im Festgestein

Die hydraulische Charakteristik von Festgestein im Sinne eines vorwiegenden Kluftwasserleiters wird von der Geometrie und Beschaffenheit der Trennflächenzwischenräume und deren hydraulischen Verbindungen (Konnektivität) bestimmt. Für Störungszonen, die Lockergesteinscharakter haben, wird auf das Kapitel 5.2.1 verwiesen. Es ist anzumerken, dass poröse Festgesteine als Mischung aus Kluftwasserleiter und Porenwasserleiter anzusehen und zu charakterisieren sind.

5.2.2.1. Trennflächen im Festgestein

Trennflächen sind Diskontinuitäten, die den Gesteinsverband durchtrennen und durch Parameter wie Öffnungsweiten, Oberflächenbeschaffenheit (u.a. Rauigkeit), Füllungen, Durchtrennungsgrad und Trennflächendichte beschrieben werden. Je nach Entstehung werden verschiedene Trennflächenarten unterschieden. Der Orientierung der Trennflächen zum Bauwerk kommt eine besondere Bedeutung zu (Abbildung 9).

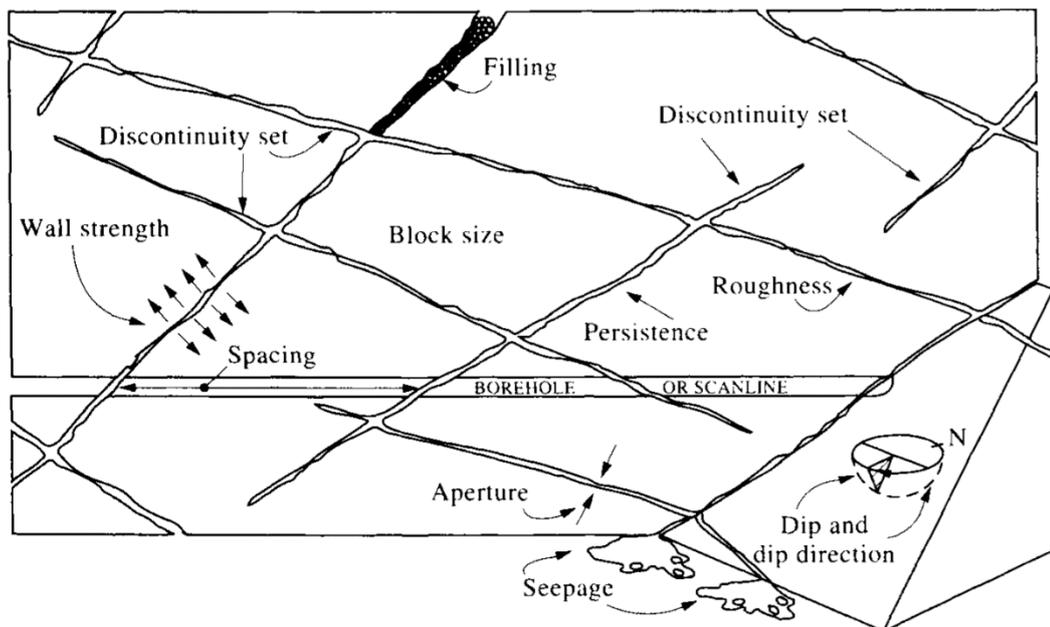


Abbildung 9. Trennflächensystem mit Trennflächenabstand, Öffnungsweite, Oberflächenbeschaffenheit und dessen Verschnitt mit einem Bohrloch (Hudson, 1989)

5.2.2.2. Trennflächenhydraulik

Die Strömung in einem als homogen angenommenen Festgesteinskörpermodell, kann nach Darcy mit der Filtergeschwindigkeit (v_f) beschrieben werden. Diese resultiert aus dem Quotient des Durchflusses (Q) und der durchströmten Gesamtquerschnittsfläche (A) (beinhaltend die „undurchlässige“ Matrix und die Klufthohlräume). Die Durchströmung erfolgt nach diesem Modellansatz ausschließlich in den Trennflächenzwischenräumen. Der Durchlässigkeitsfaktor für eine einzelne Kluft lässt sich folgendermaßen beschreiben:

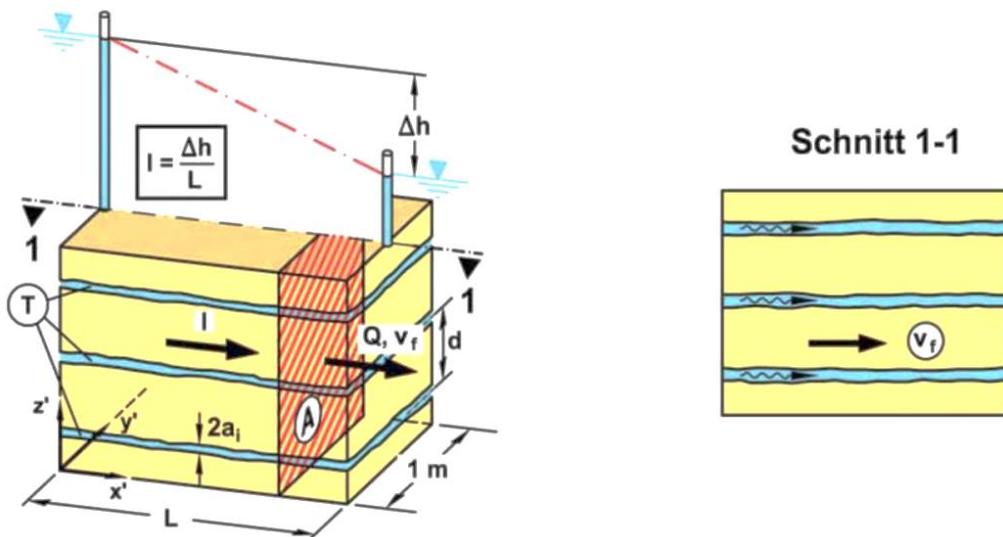


Abbildung 10. Abstraktion des hydraulischen Modells im Festgestein (Sommer, 2012)

$$v_f = \frac{Q}{A} = \frac{g(a_i)^2}{12\nu} \cdot \frac{2a_i}{d} \cdot l = k_t \cdot \frac{2a_i}{d} \cdot l = k_T \cdot l \quad (4)$$

g:	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
ν:	kinematische Viskosität	[m ² /s]
2a _i :	Öffnungsweite der Kluft	[m]
L:	durchströmte Länge	[m]
Q:	Fließrate	[m ³ /s]
k _t :	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
d:	mittlerer Kluftabstand	[m]

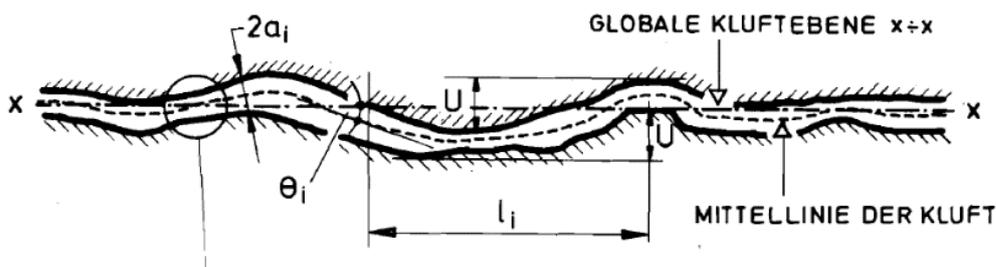


Abbildung 11. Veranschaulichung einer allgemeinen Trennfläche (Louis, 1967)

Vereinfacht kann auf diese Weise unter Summierung aller in der durchströmten Richtung bzw. normal auf die betrachtete Querschnittsfläche liegenden Trennflächen die Wassermenge ermittelt werden. Für die Abschätzung der Gebirgswasserführung im Festgestein ist in der Regel das Cubic Law anzuwenden, wonach zum einen die Transmissivität proportional zur dritten Potenz der hydraulisch wirksamen Kluftöffnungsweite und der Durchfluss direkt proportional zum Druckgradienten ist. Einschränkungen aus Turbulenzen sind zu beachten.

Die injektionstechnische Bedeutung der anisotropen Bedingungen im Festgestein ist besonders relevant, weil sie die Wasserwegigkeit (Konnektivität) maßgeblich bestimmen.

Die tatsächliche Durchlässigkeit (Transmissivität siehe Tabelle 4) von Festgestein wird in der Regel mit in situ Wasserabpressversuchen nach der Methode von Lugeon bestimmt. Der Lugeonwert stellt die Wasseraufnahme in Liter pro Minute je Meter beaufschlagter Bohrlochlänge bei einem Einpressdruck von 10 bar dar. In der Praxis werden häufig unterschiedliche Bohrlochlängen getestet, geringere Drücke verwendet und unterschiedliche Installationsszenarien (Einfachpacker am Bohrlochende, Doppelpacker in der offenen Bohrlochstrecke) getestet. Der Lugeonwert wird nach diesen Wasserdruckversuchen auf 10 bar unter Zugrundelegung der letzten Druckstufe linear extrapoliert.

Da Wasserdruckversuche selten linear verlaufen, ist es erforderlich das ermittelte Diagramm (Fluss/Druck-Verlauf) hinsichtlich geohydraulischer Veränderungen während der Versuchsdurchführung zu analysieren und entsprechend zu interpretieren.

Injektionstechnisch maßgebliche Phänomene sind unter anderem:

- Auswaschung
- Verklausung
- Turbulenz
- Elastische Kluftaufweitung
- Hydrojacking & Hydrofracking

Die Extrapolation niedriger Versuchsdrücke auf den Referenzdruck von 10 bar ist insbesondere bei nicht linearen Versuchsverläufen kritisch zu beurteilen. Der Lugeonwert erhält allerdings erst dann injektionstechnische Relevanz, wenn es gelingt, eine plausible Kluftweitenverteilung abzuleiten. Die unterschiedliche Rheologie von Wasser und Suspensionen ist bei der Verwendung von Ergebnissen aus Lugeontests zu beachten. Obwohl es meist nicht eindeutig gelingt die Kluftweitenverteilung daraus zu ermitteln, kann man den Lugeonwert als geeigneten Indikator für die Transmissivität vor und nach der Injektion verwenden.

5.3. Geomechanische Grundlagen

Im Zuge der Projektierung ist das Systemverhalten zwischen Untergrund, dem zu errichtenden Bauwerk und der Injektionsmaßnahme zu beschreiben. Dabei kommt der Möglichkeit, durch die Injektions- bzw. Baumaßnahmen die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes zu verändern, eine maßgebliche technische wie auch wirtschaftliche Bedeutung zu.

Zur Abschätzung und Bestimmung des Systemverhaltens sind jedenfalls nachfolgende Punkten zu berücksichtigen:

- Kenntnis der geomechanischen Eigenschaften des Untergrundes (z.B.: Bodenparameter, Gesteinsparameter, Gebirgsparameter, Poren- bzw. Trennflächenwassersituation)
- Kenntnis der Einwirkungen durch die Baumaßnahme (Belastungssituation) und deren Auswirkung auf das geomechanische Verhalten des Untergrundes (elastisch, plastisch und zeitlich veränderlich)
- Einfluss der Injektionen auf den Untergrund (z.B.: Veränderung von Kohäsion, Deformationsverhalten und Durchlässigkeit)

Die dazu verwendeten geomechanischen Grundlagen orientieren sich an der Zielsetzung der Injektion und der Beschaffenheit des Untergrundes. Im Kontext mit Untertagearbeiten sind in der

Praxis die im Rahmen der Gebirgsartenbeschreibung (GA) gemäß der ÖGG-Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb zu erhebenden Parameter ausreichend.

Skizzen, wie nachfolgend gezeigt, erleichtern das Verständnis der möglichen Injektionsgutausbreitung im Baugrund. Derartige Skizzen müssen Teil des umfassenden Erkundungsberichtes sein.

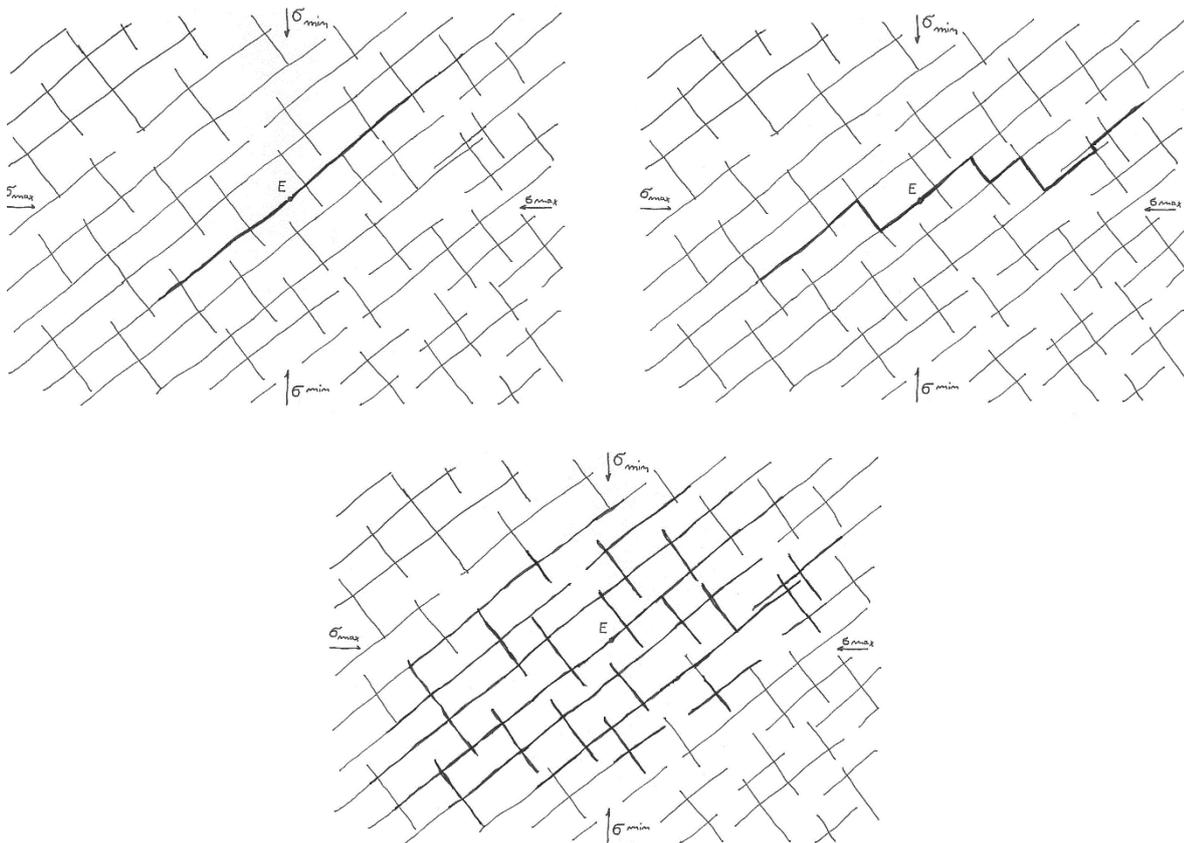


Abbildung 12. Unterschiedliche Ausbreitung des Injektionsgutes um die Einpresstelle (E) abhängig von der Ausbildung und Beschaffenheit der Trennflächen sowie dem vorherrschenden Spannungszustand im Gebirge (Ewert, 1985)

5.4. Ableitung injektionsspezifischer Parameter aus Erkundungsdaten

5.4.1. Informationen aus dem Bohrvorgang

Im Zuge von Erkundungsbohrungen können während des Bohrvorganges zusätzliche Informationen gewonnen werden, die für das Verständnis des Baugrundmodells zusätzliche Daten liefern. Die Aufzeichnung von Bohrparametern wie spezifische Energie, Drehmoment, Anpressdruck, Drehzahl, welche für das Lösen des Gesteins im Zuge des Bohrvorganges aufgewendet werden, sowie die Auswertung von Bohrprotokollen (Spülverluste, Beobachtungen des Bohrmeisters etc.) müssen als wichtige Information zur Beurteilung der physikalischen Baugrundeigenschaften herangezogen werden. Ein Energieprofil entlang der Bohrung kann bei der Zuordnung u.a.

etwa der Kornverteilung, Lagerungsdichte, Durchtrennungsgrad, Störzonen oder Hohlräume besonders nützlich sein, und verdichtet bzw. ergänzt dadurch den Informationsgehalt der übrigen geotechnischen Erkundungen in Korrelation mit den geologischen Profilen.

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{AR} \quad (5)$$

e:	Spezifische Bohrenergie	[kJ/m ³]
F:	Anpressdruck (Vorschubkraft)	[kN]
A:	Querschnittsfläche Bohrloch	[m ²]
N:	Bohrdrehzahl	[U/s]
T:	Drehmoment	[kNm]
R:	Bohrfortschritt	[m/s]

5.4.2. Hydraulische und mechanische Parameter

Folgende injektionstechnisch relevante Informationen können aus Bohrungen gewonnen werden:

- Öffnungsweite der Trennflächen
- Beschaffenheit der Trennflächen (Form, Rauigkeit, Füllung und Durchtrennungsgrad)
- Anzahl der Trennflächen je Laufmeter Bohrung (Trennflächendichte), klassifiziert nach hydraulischer Relevanz
- Lage der Trennflächen im Raum

Diese Daten sind in Relation zur Position des Bauwerks und in ihrer Orientierung zum Bauwerk darzustellen.

Es ist zu beachten, dass die Erkundung der hydraulischen Parameter immer nur Hinweise auf Poren- bzw. Kluftengstellen geben, denn nur diese bestimmen im Wesentlichen das Ergebnis hydraulischer in situ Versuche (Wasserabpress- und Absenkversuche).

Die geometrische Öffnungsweite der Trennflächen hingegen ist im Verschnitt mit dem Bohrloch von der maßgeblichen hydraulischen Engstelle unterschiedlich und bestimmt Filtrationsphänomene und Eindringverluste.

Unter dem wirksamen Injektionsdruck treten darüber hinaus in der Regel elastische und plastische Kluftaufweitungen (Hydrojacking) im Fels und Claquagen im Lockerboden auf, welche das Eindringen und Ausbreiten des Injektionsgutes fördern. In diesem Zusammenhang kann es zu maßgeblichen Abweichungen und Verbrauch von Injektionsgut über die abgeschätzten Mengen hinauskommen.

5.5. Injektionsversuche vor Ort und im Laboratorium

Bauvorbereitende Injektionsversuche haben Erkundungscharakter, können das Ausführungsrisiko stark reduzieren und sind daher zu empfehlen.

6. BAUSTOFFE UND BAUPRODUKTE

6.1. Allgemeines

Für geotechnische Injektionen stehen eine Vielzahl an unterschiedlichen Baustoffen und Bauprodukten zur Auswahl, deren Eigenschaften über die Zusammensetzung der Mischung definiert werden. Die Auswahl des Injektionsgutes steht somit immer im Zusammenhang mit dem Injektionsziel, den Injektionsrahmenbedingungen (Boden/Felseigenschaften, Hydrogeologische Verhältnisse...) und den speziellen Anforderungen an das Injektionsgut durch das Injektionsziel. Die Auswahl und Anpassung des Injektionsgutes ist als iterativer Prozess zu sehen, bei dem anhand von Erfahrungswerten, Prüfungen, Suspensionsprüfungen und den Ergebnissen der Ausführung eine für die Anwendung geeignete bzw. optimale Mischung ermittelt wird.

6.2. Baustoffe für das Injektionsgut

6.2.1. Hydraulische Bindemittel und Zemente

Zu den hydraulischen Bindemitteln gehören alle Zemente und ähnliche Produkte, die in wässriger Suspension zur Herstellung von Injektionsgut verwendet werden können. Dabei kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen den folgenden Arten von Injektionsgut:

6.2.1.1. Normzemente gem. EN 197-1

Normzemente werden anhand Ihrer Inhaltsstoffe gem. EN 197-1 folgendermaßen unterteilt:

Tabelle 5. Einteilung anhand der Druckfestigkeit (Zementfestigkeitsklassen: EN 197-1)

Festigkeits- klasse	Druckfestigkeit			
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit	
	2 Tage	7 Tage	28 Tage	
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-		
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-		
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-		

N: normal

R: frühhochfest (rapid)

Tabelle 6. Einteilung Normzemente anhand der Zusammensetzung

CEM I –	Portlandzement
CEM II –	Portlandkompositzement
CEM III –	Hochofenzement
CEM IV –	Puzzolanzement
CEM V –	Kompositzement

Es ist zu beachten, dass die in der EN 197-1 angegebenen physikalischen Kennwerte nur für niedrige Wasserbindemittelwerte (ca. 0,5 W/B) gelten. Bei den in der Injektionstechnik üblichen Wasserbindemittelwerten $W/B > 0,8$ verändern sich die Eigenschaften signifikant.

Der Zementtyp CEM I enthält als Hauptbestandteil reinen Portlandzementklinker, während die Zementarten CEM II bis CEM V andere Stoffe neben dem Portlandzementklinker beinhalten. Für Injektionen kommen hauptsächlich Zemente des Typs CEM I bis III zur Anwendung, wobei sich die Suspensionsstabilität mit zunehmendem Portlandklinkeranteil und steigender Festigkeitsklasse (höhere Mahlfeinheit/Blainewert) verbessert.

6.2.1.2. Mischbinder (herstellerspezifische Injektionsmischungen)

Mischbinder sind herstellereigenspezifische Injektionsmischungen, die neben Normzementen werkseitig noch Zusatzstoffe (Füller) beigemischt haben. Mischbinder sind in der Regel kostengünstiger als Normzemente. Die physikalischen und rheologischen Eigenschaften von Suspensionen mit Mischbindern hängen stark von der Zusammensetzung des Mischbinders ab und sind anhand von Eignungsprüfungen nachzuweisen.

6.2.1.3. Feinstbindemittel

Unter Feinstbindemittel versteht man feinkörnige hydraulische Bindemittel mit einem Größtkorn bei 95% Siebdurchgang von $d_{95} \leq 20 \mu\text{m}$. Hinweise zur Anwendung und zur Prüfung sind dem „Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemittel in Lockergestein“ (Schulze, 1993) zu entnehmen.

6.2.2. Wasser

Als Anmachwasser sollte nach Möglichkeit immer Trinkwasser verwendet werden. Auf der Baustelle aus natürlichen Vorkommen entnommenes Wasser sollte (besonders auf Chloride, Sulfate und organische Stoffe) untersucht werden, bevor seiner Verwendung zugestimmt werden kann. Bei Verdacht auf schädigende Inhaltsstoffe oder der Verwendung von Oberflächenwasser, Grundwasser und Restwässern muss die Eignung geprüft werden. Festlegungen zur Prüfung und Beurteilung von Wasser für die Betonherstellung sind in der ÖNORM EN 1008 enthalten.

6.2.3. Zusatzstoffe

Unter Zusatzstoffen sind Stoffe zu verstehen, die mit dem Ziel die Eigenschaften der Suspension projektspezifisch anzupassen, beigemischt werden. Zusatzstoffe können inert sein (Füller) oder auch puzzolanische Eigenschaften aufweisen d.h. zur Festigkeit des Injektionsgutes beitragen. Üblicherweise werden Zusatzstoffe zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften oder zur Erhöhung des Feststoffgehaltes von Suspensionen beigemischt. Die Menge an Zusatzstoffen ist

im Allgemeinen so groß, dass sie in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen sind. Ein höherer Feststoffgehalt und damit einhergehend eine höhere Dichte der Suspension erhöht die Dauerhaftigkeit und verringert die Durchlässigkeit, was speziell bei hydraulischen Langzeitbarrieren von Relevanz ist. Die optimale projektspezifische Dosierung ist anhand von Eignungsprüfungen zu ermitteln.

Siehe EN 12715, 6.2.6.1:

Karbonatische oder Füller auf Siliziumdioxid (Quarz)-Basis, pulverisierte Flugasche (pfa), Puzzolane und Flugasche von thermischen Kraftwerken oder andere inerte oder reaktive Bestandteile im Injektionsgut dürfen unter der Voraussetzung eingesetzt werden, dass sie miteinander chemisch verträglich sind und sowohl beim als auch langfristig alle Umweltauforderungen erfüllen.

Siehe EN 12715, 6.2.3.1:

Sand und Füller werden in zementhaltigem Injektionsgut oder in Tonsuspensionen im Allgemeinen als Füllstoffe oder zur Veränderung der Konsistenz des Injektionsgutes, seiner Beständigkeit gegen Auswaschen oder seiner mechanischen Festigkeit und Verformbarkeit verwendet.

Anwendungsgebiete von Füllstoffen in Injektionsmischungen sind die Verfüllung von großen Hohlräumen bzw. bei Verdichtungsinjektionen. Die zugesetzten Stoffe dürfen keine schädlichen Bestandteile enthalten und die Granulometrie der im Injektionsgut verwendeten Sande und Füller muss bekannt sein.

6.2.4. Tone

Zur Verbesserung der Stabilität von Zementsuspensionen werden häufig aufgemahlene quellfähige Tone (Bentonite) beigemischt. Diese vermindern die Sedimentation unter Schwerkraft und reduzieren die Filtratwasserabgabe unter Druck. In Abhängigkeit der Qualität der verwendeten Bentonite müssen diese ev. vorgequollen werden um die volle Wirkung zu entfalten. Das Vorquellen hat in zementfreiem Wasser zu erfolgen, weil die Quellfähigkeit von Natrium-Bentonit durch Kalzium-Ionen im Anmachwasser gestört wird. „*Mineralogie, Korngrößenverteilung, Wassergehalt und Atterberg-Grenzen des Tones sollten bekannt sein*“ (EN 12715, 6.2.2.).

6.2.5. Zusatzmittel und Zusätze

Zusatzmittel werden der Suspension im Mischvorgang zugegeben, um die physikalischen Eigenschaften entsprechend den Projekterfordernissen zu optimieren. Zusatzmittel können in flüssiger, als auch in Pulverform der Suspension mit bis zu 5 Massenprozent (siehe EN 934) der Zementmasse beigemischt werden. Zusatzmittel müssen nicht in der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden. Zusatzmittel verändern, unter anderem, folgende Eigenschaften:

- Konsistenz (Fließgrenze, Viskosität, Thixotropie)
- Verarbeitbarkeit (Beibehaltung der Eigenschaften über die Verarbeitungszeit)
- Erstarrungsbeginn (verzögernde oder beschleunigende Wirkung)
- Porengehalt
- Festigkeit

Bei der Verwendung von Zusatzmitteln ist zu beachten, dass die Verbesserung einer Eigenschaft (z.B.: Fließfähigkeit) sich auf andere Eigenschaften (z.B.: Druckfestigkeit, Luftporenbildung) auswirken kann. Die Eignung der Zusatzmittel und deren Dosierung sind immer durch Eignungsprüfungen nachzuweisen. Die für die Injektionstechnik relevanten Zusatzmittel können in folgende Arten eingeteilt werden:

- **Verflüssiger** verringern den Wasseranspruch und verbessern die Fließfähigkeit durch Verringerung der Fließgrenze und Viskosität.
- **Stabilisatoren** vermindern das Wasserabsetzmaß, verbessern die Verarbeitbarkeit und verhindern die Entmischung im Kontakt mit Berg-/Grundwasser
- **Erstarrungsbeschleuniger** verkürzen die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn. Zur Anwendung kommen Erstarrungsbeschleuniger vor allem dann, wenn eine zu weitläufige Ausbreitung des Injektionsgutes im Untergrund verhindert werden soll (z.B.: Berg- und Grundwasserströmung; abbindungsverzögernden Faktoren wie z.B.: hoher Sulfatgehalt; niedrige Temperatur) oder frühzeitige Festigkeiten gefordert sind.
- **Verzögerer** verzögern den Zeitpunkt bis zum Erstarrungsbeginn der Suspension.

6.3. Suspensionen als Injektionsmischung

In Tabelle 7 sind die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung von Suspensionen angeführt:

Tabelle 7. Parameter zur Charakterisierung von Suspensionen

Parameter zur Charakterisierung von Suspensionen	
Fließverhalten/Rheologie	-Fließgrenze
	-Viskosität
	-Thixotropie
Dichte	-Suspensionsdichte
Stabilität	-Filtratwasserabgabe unter Druck
	-Sedimentationsstabilität
	-Stabilität gegenüber Auwaschen
	-Verdünnung
Festigkeit/Festigkeitsentwicklung	-Erstarrungsbeginn
	-Frühfestigkeit
	-Endfestigkeit
Beständigkeit	-Stabilität gegenüber chemischen Angriffen
	-Erosionsstabilität
	-Dauerhaftigkeit

6.4. Probenahme und Prüfung

Es wird zwischen Eignungsprüfung und Kontrollprüfung unterschieden. Die Eignungsprüfung dient dabei zur Optimierung der Suspensionseigenschaften für das Erreichen des Injektionsziels, wogegen die Kontrollprüfung zur Qualitätssicherung auf der Baustelle dient. Der Prüfumfang der Eignungsprüfung ist vom Planer unter Einbeziehung der Fachexperten projektspezifisch so festzulegen, dass anhand der Eignungsprüfung alle benötigten rheologischen und physikalischen

Kennwerte inklusive deren erwartbaren Bandbreiten ermittelt werden. Der Umfang der Kontrollprüfungen, der ebenfalls vom Planer festzulegen ist, beschränkt sich auf die Kontrolle der festgelegten Kennwerte. In Tabelle 7 sind dazu die wichtigsten Kennwerte für Kontroll- und Eignungsprüfungen zusammengestellt.

6.4.1. Suspensionsprüfung im Labor

Im Labor sind die Kennwerte des Injektionsgutes bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C zu prüfen. Die Einhaltung konstanter Versuchsrandbedingungen (Mischreihenfolge, Temperatur, Zeit, Geschwindigkeiten/Energieeintrag und Mischdauer) ist zu beachten und die Vorgänge inklusive Abweichungen sind zu dokumentieren. Die Mischungskomponenten sind auf 0,1 g genau abzuwiegen und in entsprechender Reihenfolge zu mischen. Für das Anmischen der Suspension ist ein hochturbulenter Mischer zu verwenden. Die Temperatur und der Chemismus des Anmachwassers sollten vergleichbar mit dem auf der Baustelle verwendeten Wasser sein. Sind keine Daten vorhanden, so wird eine Temperatur des Anmachwassers von 12 °C empfohlen. Wenn Einflüsse durch den Chemismus des Zugabewassers auf der Baustelle nicht ausgeschlossen werden können, sind die Versuche mit dem Wasser von der Baustelle durchzuführen.

„Falls die Bedingungen auf der Baustelle wesentlich von den Laborbedingungen abweichen (u.a. Temperatur, Chemismus des Grund- und Bergwassers), sollten die Versuche unter Baustellenbedingungen wiederholt werden. Die Temperaturentwicklung während der Versuche muss gemessen und dokumentiert werden“ (EN 12715, 6.4.4).

6.4.2. Kontrollprüfung auf der Baustelle

„Von den Bestandteilen einer Injektionsmischung sowie von der Mischung selbst müssen regelmäßig Proben entnommen werden, um die Übereinstimmung mit den geplanten Anforderungen nachzuweisen“ (EN 12715, 6.4.1).

Die Probennahme der angemischten Injektionssuspension sollte aus dem Vorratsbehälter (oder – nach Überwinden evtl. größerer Leitungslängen – am Bohrlochmund) und nicht aus dem Mischbehälter erfolgen. Der Entnahmezeitpunkt und Ort, Mischungsalter und Zusammensetzung sind zu notieren. Die rheologischen Prüfungen müssen unmittelbar nach der Entnahme durchgeführt werden. Für die Entnahme von Rückstellproben zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit wird die Verwendung von zylindrischen Probeformen oder Rohren mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser größer als 2:1 empfohlen. Eine Lagerung ähnlich den in situ Bedingungen des injizierten Untergrunds (Temperatur, Feuchtigkeit und Wasserchemismus) ist anzustreben bzw. die Werte auf in situ Werte in Bezug zu bringen. Auf jeden Fall sind die Lagerungsbedingungen zu dokumentieren. Die Probekörper sollten bis zur Prüfung mindestens im Wasserbad bei Raumtemperatur gelagert werden, Abweichungen davon sind anzugeben. Erschütterungen durch Transporte sind vor allem in den ersten Tagen zu vermeiden. Vor der Prüfung sind die Proben auf eine Höhe von $H:D = 2:1$ im Rohr zu schneiden.

6.4.3. Prüfverfahren

6.4.3.1. Herstellerangaben und Prüfungen für Produktdatenblätter

„Es sind genormte Versuchsverfahren (Prüfgeräte, Randbedingungen, Analysen) anzuwenden, um einen Vergleich der Kennwerte von Produkten unterschiedlicher Hersteller zu ermöglichen“ (EN 12715, 6.4.2).

Herstellerangaben von produktspezifischen Datenblättern für Injektionsgut sollten sich bei Suspensionen auf Basis hydraulischer Bindemittel auf einen W/B – Wert von 1,0 beziehen.

Dabei sind neben der Angabe der Zementart, der vollständigen Granulometrie, der Korndichte und der Zusatzstoffe (technische Spezifikationen/Eigenschaften) mindestens folgende Kennwerte anzugeben:

- an der **reinen Suspension**: Dichte, Wasserabsetzmaß, Marshzeit
- an der **stabilisierten Suspension** (Wasserabsetzmaß < 5%): Anteil der Beimischung und Produktname des stabilisierenden Zusatzstoffes, Dichte, Wasserabsetzmaß, Filtratwasserabgabe, Fließgrenze, Viskosität bzw. Viskositätskurve, Marshzeit, Erstarrungsbeginn, einaxiale Druckfestigkeit der reinen Suspension nach 28 Tagen am Zylinder

In Tabelle 8 sind Erfahrungswerte für Portlandzement-Suspensionen angeführt:

Tabelle 8. Erfahrungswerte für Portlandzementsuspensionen

	Messverfahren	Einheit	von	bis	Anmerkungen
Filtratwasserabgabe	API-Filterpresse	[ml]	40	150	DIN 4126; nach 7,5 Minuten
Marsh-Trichter Zeit	Marshtrichter	[s]	31	40	DIN 4126; bei 1000ml
Absetzmaß	1000ml Standglas	[%]	1	5	DIN 4126; nach 2h
Erstarrungsbeginn*		[min]	80	240	

* Werte variieren in Abhängigkeit von der Messmethode

6.4.3.2. Prüfverfahren und deren Anwendung

In Tabelle 9 sind die wichtigsten Kennwerte und mögliche Prüfverfahren zur Eignungs- und Kontrollprüfung für Suspensionen angeführt. Die Art und Anzahl der Prüfungen ist dabei projektspezifisch festzulegen. Die Eignungsprüfung im Labor dient dabei zur Anpassung und Optimierung der Suspension an die Injektionsaufgabe, während die Kontrollprüfung auf der Baustelle zur Überprüfung der gewählten Mischung(en) und zur Qualitätssicherung dient. Der Prüfumfang im Zuge der Kontrollprüfung ist daher wesentlich geringer anzusetzen und beschränkt sich auf einfache Prüfverfahren.

Tabelle 9. Prüfverfahren zur Eignungs- und Kontrollprüfung für Suspensionen

Parameter		Empfohlene Messverfahren	Eignungsprüfung	Kontrollprüfung
Zusammensetzung	Dichte	Messzylinder, Spülungswaage	ja	ja
Stabilität	Absetzmaß	Messzylinder d = 6 cm, V = 1000 ml Absetzmaß = $\Delta h/h$	ja (2/4/6h)	ja (2h)
		Filtratwasserabgabe	Filterpresse ¹²	ja
Rheologische Kennwerte	Fließgrenze	Viskosimeter mit Messflügel ¹⁰ oder Bestimmung aus der Fließkurve nach Bingham [EN 12715: Bild B1, S.2]	ja	nein ¹
		Kugelharte ²	ja ²	ja
		Fließkurve ³ [EN 12715: Bild B1, S.2]	ja	nein ¹
	Viskosität	Marshtrichter ⁴ 1000ml, d _{Ausfluss} = 4,75 mm	ja ⁵	ja ⁵
Erstarrungsbeginn ¹³		Viskosimeter mit Messflügel ¹¹	ja ^{8, 9}	nein
Festigkeitsentwicklung	Frühfestigkeit	einaxiale Druckfestigkeit ⁶	ja ^{7, 8}	nein
	Endfestigkeit (28d)	einaxiale Druckfestigkeit ^{6, 7}	ja	ja

¹ außer bei Erfordernis um Abweichungen von der Originalmischung bzw. Änderungen in den Zusatzstoffen feststellen zu können.

² nur für Vergleichs- und Kontrollmessungen; starke Versuchsstreuung und hohe Ungenauigkeit insbesondere bei der Verwendung von Zusatzstoffen. Für die Kontrollprüfung unter Baustellenbedingungen haben sich auch Adhäsions-Tests (z.B.: Wägung von benetztem Schleifpapier Körnung 100) als zweckmäßig und aussagekräftig herausgestellt. Für Versuchsreihen im Zuge der Eignungsprüfung und zur Bestimmung der tatsächlichen Fließgrenze sollten andere Verfahren (Messflügel, Bestimmung anhand der Fließkurve) angewendet werden.

³ Viskositätsprüfung im Rotationsviskosimeter unter Verwendung von coaxialen Zylindermesssystemen. Die Verwendung von Relativmesssystemen ist nicht zu empfehlen.

⁴ zur groben Abschätzung der Viskosität und zur Kontrolle

⁵ nur für Relativmessungen und zur Vergleichsmessung bei der Kontrollprüfung

⁶ Prüfung nach Merkblatt „Qualitätssicherung für Bodenvermörtelung“ bzw. ÖNORM B 4415 an Zylindern (H/D = 2:1) der erhärteten Injektionsmischung (Absetzmaß in den Probeformen/Rohren berücksichtigen, Einfüllhöhe > Probenhöhe), Lagerung der Proben bis zur Prüfung im Wasserbad, Schneiden und abgleichen der Probenenden, Prüfung weggesteuert, Vorschub 1% der Anfangshöhe, bei $\epsilon < 4\%$ -> 0,2% der Anfangshöhe; Abweichungen von den Prüfvorgaben sind gesondert anzuführen.

⁷ an im Wasserbad gelagerten Rückstellproben

⁸ bei Projekterfordernis

⁹ bei Verwendung von Mischungen oder Zusatzstoffen die den Hydratationsverlauf überdurchschnittlich stark beeinflussen können

¹⁰ Der Maximalwert der Schubspannung wird als Fließgrenze herangezogen. Vgl. Kainrath (2014)

¹¹ Intermittierende Versuchsdurchführung. Messung der Schubspannungszunahme über die Zeit. Der Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns wird bei einer Scherfestigkeit von $\tau = 100$ Pa angenommen. Vgl. Kainrath (2014)

¹² nach DIN 4127, Filtrationsüberdruck von $(7 \pm 0,35)$ bar, gemessen wird das Volumen des Filtratwassers nach 7,5 Minuten Filtrationszeit

¹³ zur Berücksichtigung von insitu Bedingungen kann ein Filmerstarrungstest unter Berücksichtigung der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und des Berg-/Grundwassers (Chemismus) erfolgen.

7. HINWEISE ZU ENTWURF UND BEMESSUNG

7.1. Vorbemerkungen

Der Entwurf wie auch die Bemessung von Injektionsarbeiten stellt eine multidisziplinäre, ingenieurmäßige Herausforderung dar, die nur mit einschlägiger Erfahrung auf allen Seiten bewältigbar ist. Injektionsarbeiten erfordern in der Umsetzung ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit. Diesen Umstand gilt es bei Entwurf und Bemessung im Planungsstadium zu berücksichtigen. Die dafür erforderliche Flexibilität muss vertraglich geregelt werden, damit sie in der Ausführung angewendet werden kann. In der Praxis haben sich folgende Methoden bewährt:

- Die Injektionsarbeiten anhand einfacher Modelle zu planen.
- Die Eingangsparameter sind im Modell veränderlich zu halten, um auch auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren zu können.
- Im Zuge von Risikoanalysen den Rahmen möglicher Szenarien zu identifizieren und bereits im Vorfeld diesen Rahmen mittels geeigneter Maßnahmen hinsichtlich Entwurf, Bemessung und Ausschreibung abzudecken.

7.2. Grundlagen und Ziele der Planung

7.2.1. Grundlagen der Planung

Die wesentlichen Grundlagen der Planung von Injektionsarbeiten sind dadurch bestimmt, **welche Ziele** unter **welchen Rahmenbedingungen** mit den Injektionen erreicht werden sollen.

Dabei geht es im Wesentlichen darum, in welchem Ausmaß im unmittelbaren Interaktionsbereich zwischen Bauwerk und Untergrund die Untergrundeigenschaften verändert werden sollen und wie weit diese durch Injektionsmaßnahmen überhaupt veränderbar sind. Die Ziele bestehen aus einer für das Projekt vorteilhaften Veränderung der Eigenschaften des Untergrundes. Dies gilt im Hinblick auf die hydrogeologischen Eigenschaften, die geomechanischen Eigenschaften oder auch auf die Kompensation bzw. Verminderung von Setzungen. Bei den Zielen kann es von Belang sein, ob die Maßnahmen auf eine temporäre oder dauernde Wirkung abzielen.

Die **Rahmenbedingungen**, auf die Entwurf und Planung abzustimmen sind, ergeben sich in erster Linie aus den Eigenschaften des Untergrundes (Geologie, Hydrogeologie), aus den Einschränkungen im Umfeld (zulässige Setzungen, zulässige Bergwasserzutritte, Umwelt) und aus den Bedingungen im Bauumfeld (Platzverhältnisse, Injektionswiderlager).

Unter präventiven Injektionsmaßnahmen werden vorbeugende Injektionsmaßnahmen verstanden, die vor der Ausführung der eigentlichen Baumaßnahme geplant und umgesetzt werden. Dies kann zum Beispiel im Tunnelbau bedeuten, dass der Baugrund vorseitend systematisch von Obertag oder aber auch von Untertag aus injiziert wird, bevor der Vortrieb erfolgt. Im Rahmen einer solchen Planung sind in der Regel auch Injektionsversuche angebracht. Durch präventive Injektionsmaßnahmen soll das Ausführungsrisiko vermindert werden.

Unter Interventionsmaßnahmen werden Injektionsmaßnahmen verstanden, welche im Rahmen von Risikoszenarien mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit vorab geplant sein können,

welche jedoch sporadisch im Anlassfall als Zusatz- und Sondermaßnahmen zum Einsatz kommen. In solchen Fällen kann die Planung im Allgemeinen nicht im gleichen Maße wie bei präventiven Maßnahmen von weitgehend erkundeten Randbedingungen ausgehen und sind auch vorgängige Injektionsversuche in der Regel nicht möglich.

Zur Bestimmung der Reichweite sind als wesentliche Grundlagen die im Kapitel 5 beschriebenen Geohydraulischen Grundlagen zusammen mit den rheologischen Eigenschaften des Injektionsgutes, den Injektionsparametern und den Injektions- und Interventionsregeln, im Kontext mit dem Bohrschema (Raster bzw. Reihengeometrie, Tiefe, Neigung, Stellung der Bohrungen zueinander) maßgeblich.

Checkliste Grundlagen (vollständige Checkliste im Anhang A.3.2):

- Injektionsziele:
 - Abdichtung/Reduktion von Wasserzutritten
 - Veränderung der geomechanischen Eigenschaften
 - Setzungskompensation
 - Erosionsstabilität
- Injizierbarkeit des Untergrundes
- Suspension und Technologie (siehe Kapitel 6.2 und 7.3)
- Geologie/Geotechnik (siehe Kapitel 5 und 7.3.2)
- Hydrogeologie (siehe Kapitel 5.2)
- Bescheidaufgaben für Injektionen und Umwelt
- Randbedingungen des Bauverfahrens
- Randbedingungen der Baustelle

7.2.2. Ziele der Planung

Die Ziele der Planung von Injektionsmaßnahmen orientieren sich in erster Linie an den jeweiligen Planungsphasen (siehe Abbildung 5).

Im Zuge des **Vorprojektes** (Machbarkeit inkl. Trassenwahl) geht es in der Regel darum, ob, in welcher Form und in welchem Ausmaß Injektionsmaßnahmen Teil der Baumaßnahmen sind. In der Folge gehen Kosten- und Bauzeitabschätzungen zusammen mit einer Risikobetrachtung in die Projektentscheidung ein. Dazu muss ein grobes, machbares Injektionskonzept auf Basis des Baugrundmodells erarbeitet werden, welches belastbare Aussagen zu obigen Fragestellungen zulässt.

Für die **Einreichplanung** (UVP-Planung, Genehmigungsverfahren) sollen alle im Rahmen der Injektionsmaßnahmen angewendeten Methoden und Mittel sowie die zu erwartenden Auswirkungen anhand des zu diesem Zeitpunkt bestehenden Erkenntnisstandes beschrieben werden. Die Injektionsziele sind in dieser Phase jedenfalls aber in der Ausschreibungsplanung festzulegen.

Die exemplarische Planung wird durch eine Risikoanalyse zur Identifikation und Bearbeitung möglicher Szenarien ergänzt.

Im Zuge der Ausschreibungs- bzw. Angebotsplanung sind die geplanten Injektionsmaßnahmen in einer Ausführlichkeit zu beschreiben, welche zunächst eine Planung und Kalkulation durch den

anbietenden und in der Folge eine bauliche Umsetzung durch den beauftragten Unternehmer mit entsprechender Überwachung und Abrechnung ermöglichen. Daher sind in dieser Phase das beabsichtigte Injektionskonzept (Injektionsmittel, Injektionsraster, Bohrverfahren und Bohrlochtiefen, Bohrdurchmesser, Injektionsdurchgänge/Phase, Injektionsversuche, Abbruchkriterien, Überprüfung Injektionserfolg etc.), das Gerätekonzept, Randbedingungen der Baustelle und Bauablauf einschließlich Mengenermittlung bzw. Ermittlung der Vordersätze (einschließlich Abrechnungskonzept) exemplarisch für den wahrscheinlichsten Fall zu planen und auszuweisen. Um eine spätere Anpassung an die tatsächlichen Verhältnisse oder Vorschläge des Auftragnehmers zu ermöglichen, sollte die Ausschreibungsplanung im Sinne einer Rahmenplanung erstellt werden. Ebenfalls sollte der iterative und interaktive Charakter von Injektionsmaßnahmen Berücksichtigung in der Ausschreibung finden.

Für die **Ausführungsplanung bzw. Bauausführung** ist es Ziel der Planung, sowohl konzeptionelle Planung als auch Überwachung an die Umstände vor Ort anzupassen.

Bei präventiven Injektionsmaßnahmen kommt meist noch die Planung und Begleitung von Injektionsversuchen dazu, um die geplanten Maßnahmen zu verifizieren und erforderlichenfalls zu optimieren.

Die Interventionsmaßnahmen sind an die Randbedingungen der Baustelle anzupassen und auch im Hinblick auf neue Erkenntnisse vor Ort entsprechend zu adaptieren.

7.2.3. Kriterien zur Injizierbarkeit im Lockergestein

Zur Abschätzung der Injizierbarkeit im Lockergestein haben sich die folgenden 3 Kriterien als brauchbar erwiesen:

7.2.3.1. Analyse der Siebkurven

Die Grenzen der Injizierbarkeit für verschiedene Injektionsmischungen und Korngrößenverteilungen werden traditionell anhand der Siebkurve des Lockergesteins diskutiert. Dabei ergeben sich die in Abbildung 13 dargestellten Anwendungsbereiche. Die Sieblinien des Baugrundes sollten in den straffierten Bereichen, der Abbildung 13, zu liegen kommen. Unberücksichtigt bleiben bei dieser Einteilung jedoch die Genese, die Kornform, die Lagerungsdichte und die spezifische Form der Kornverteilungslinie.

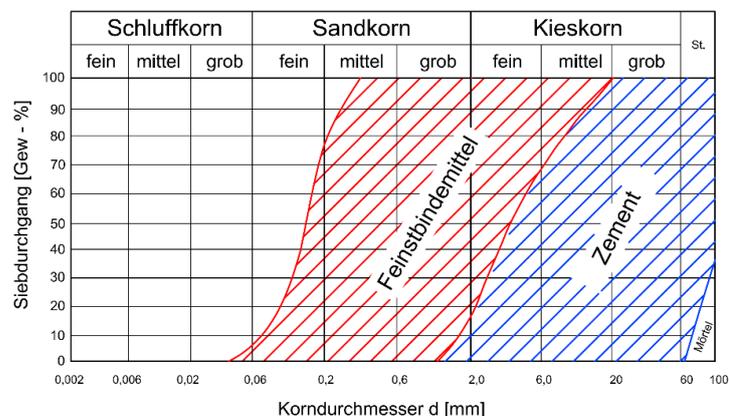


Abbildung 13. Anwendungsbereiche der Injektionsmittel/-güter in Abhängigkeit der Sieblinien des Baugrundes (unveröffentlicht Leitner, 2016)

7.2.3.2. N-Kriterium

Für die Anwendung des N-Kriteriums werden die charakteristischen Korngrößen des Bodens mit denen der Suspension in Beziehung gesetzt. Der N-Wert beschreibt das Verhältnis D_{15} Boden zu d_{85} Suspension und stellt ein Filterkriterium dar, welches zu empirischen Grenzen der Eindringfähigkeit von Suspensionen in Lockergestein geführt hat.

- N: D_{15}/d_{85}
- D_{15} : Korngröße des Bodens bei 15% Siebdurchgang
- d_{85} : Partikelgröße der Suspension bei 85% Siebdurchgang

Die von den unterschiedlichen Autoren angegebenen Bandbreiten zur Abschätzung der Injizierbarkeit über das N-Kriterium liefern nur eine grobe Abschätzung und liegen i.d.R. auf der konservativen Seite. Insbesondere ist beim N-Kriterium zu beachten, dass nur eine einzelne Größe (D_{15}) der Kornverteilungslinie als Beurteilungskriterium herangezogen wird, was speziell bei weit- und intermittierend gestuften Kornverteilungen nur eine eingeschränkte Betrachtung zulässt.

Dennoch kann in der Regel bei folgenden N-Werten von einer Injizierbarkeit des Bodens ausgegangen werden:

Tabelle 10. Richtwerte für die Injizierbarkeit verschiedener Autoren

Autor	Injizierbarkeit		
	Gegeben	Unsicher	Nicht gegeben
Kutzner (1991)	$N > 40$	-	-
Mitchell (1970)	$N > 24$	$24 < N < 11$	$N < 11$
Sherard & Dunningan (1984)	$N > 24$	$24 < N < 9$	$N < 9$
Kravetz (1958)	$N > 20$	$20 < N < 5$	$N < 5$

Für Normzemente können folgende typische Werte für d_{85} angenommen werden:

Tabelle 11. Partikelgröße verschiedener Zemente bei 85% Siebdurchgang

CEM I 32,5	$d_{85} \sim 0,043 \text{ mm}$
CEM I 42,5	$d_{85} \sim 0,025 \text{ mm}$
CEM I 52,5	$d_{85} \sim 0,020 \text{ mm}$
Feinstbindemittel	$d_{85} < 0,016 \text{ mm}$ bis 0,006 mm erhältlich

Für eine genauere Abschätzung der Injizierbarkeit sind höherwertigere Verfahren wie z.B. die Porenengstellenverteilung heranzuziehen.

7.2.3.3. Porenengstellenverteilung

Die Beurteilung der Injizierbarkeit über die Porenengstellenverteilung wurde von (Schulze, 1993) erstmals formuliert und von (Schuler und Brauns, 2000) weiterentwickelt. Anhand eines Porenraummodells kann auf die effektiven Porenöffnungsweiten des Bodens rückgeschlossen werden, was als Grundlage zur Beurteilung der Injizierbarkeit herangezogen wird. Die Modellvorstellung

berücksichtigt im Gegensatz zum N-Kriterium die gesamte Kornverteilung und die Lagerungsdichte des anstehenden Bodens, was eine genauere und realitätsnahe Abschätzung der Injizierbarkeit ermöglicht.

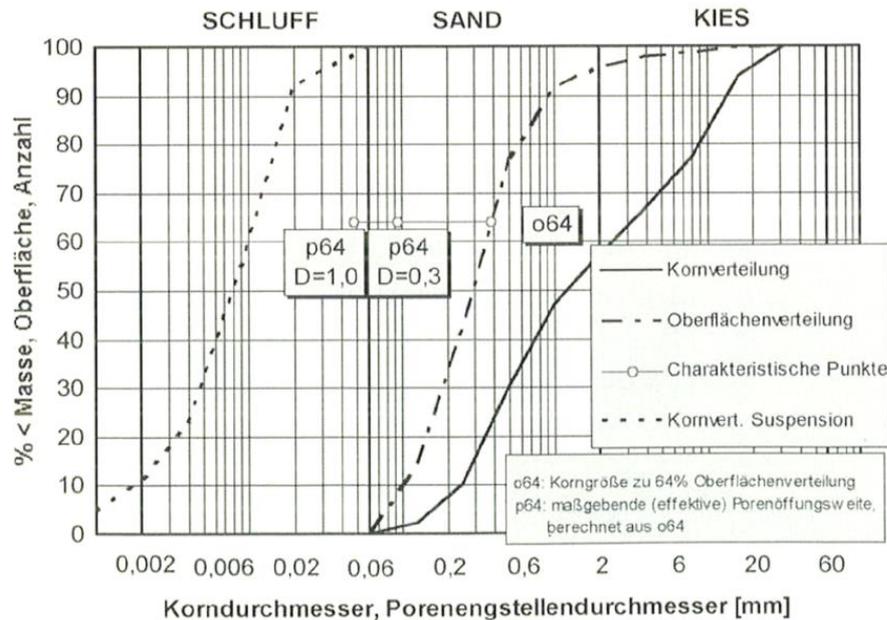


Abbildung 14. Porenengstellenverteilung aus (Schuler und Brauns, 2000)

7.2.4. Kriterien für die Injizierbarkeit von Festgestein

Anhand der Abbildung 15 können die hydraulischen Kluftweiten abgeschätzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die hydraulischen nicht den geometrischen – etwa im Rahmen der geologischen Erkundung ermittelten – Kluftweiten entsprechen. Die Abschätzung der Kluftweiten auf Grundlage von hydraulischen in situ Versuchen wird im Festgestein ebenfalls in der Absicht vorgenommen, nach etablierten Filterregeln das Größtkorn geeigneter Injektionsstoffe abzuleiten. Bei der Bestimmung der Kluftweiten ist die Verformung dieser unter dem wirksamen Injektionsdruck zu beachten.

In das Diagramm (Abbildung 15) steigt man über die Abszisse des linken Quadranten mit der Eingabe des Lugeon Wertes ein. Nachdem man vertikal nach oben mit einer der beiden Referenzgeraden verschneidet (isotrop, anisotrop), geht man von dort horizontal in den rechten Quadranten und verschneidet dort mit der gewählten Anzahl Klüfte pro m und rau oder glatt. Unter diesem Schnittpunkt ist dann auf der Abszisse die entsprechende hydraulische Kluftweite angegeben.

Die dahinterliegende Berechnung nach dem – um Rauigkeitsfaktoren erweiterten – Cubic Law geht von dem idealisierten Fall planparalleler Kluftflächen aus. Die Ergebnisse können daher auch nur als Anhaltswerte zur Größenordnung von (hydraulischen) Kluftweiten gesehen werden.

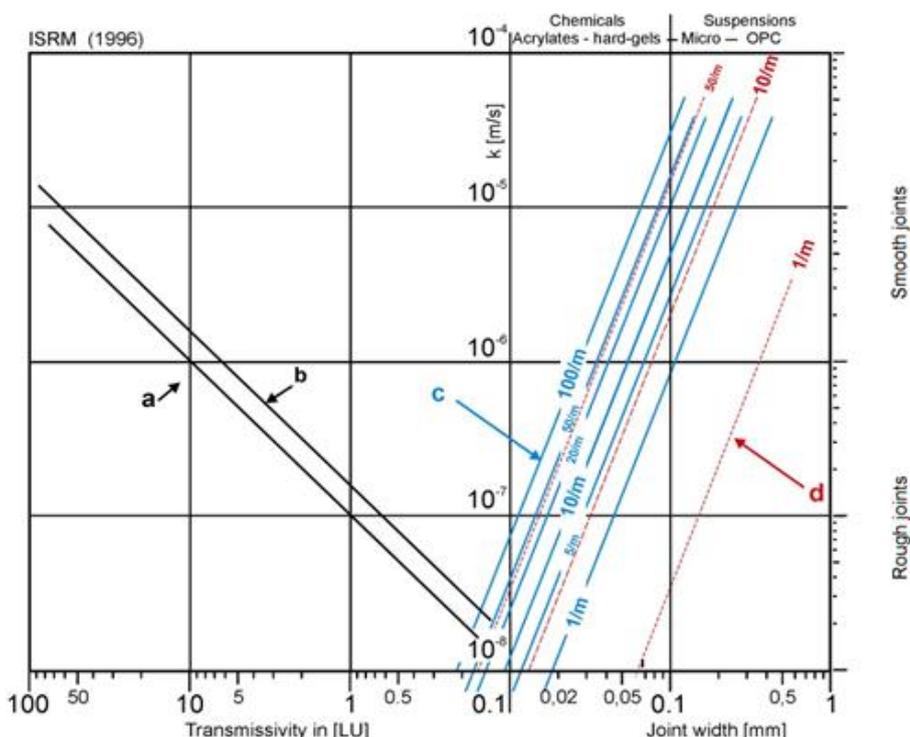


Abbildung 15. Transmissivität, Leitfähigkeit und hydraulischer Kluftweite (ISRM, 1996)

- (a): isotrope Bedingungen
- (b): anisotrope Bedingungen
- (c): glatte Trennflächen
- (d): raue Trennfläche

Injektionsziel und -methode sind auch in Abhängigkeit von den angetroffenen Durchlässigkeiten zu definieren. Diese sind mitbestimmend dafür, welche Ziele technisch erreichbar sind (siehe Tabelle 12). Bei geringen Ausgangswerten (z.B.: $k_f = 1E-08$ m/s) kann in manchen Gesteinen die Injektion die Durchlässigkeit erhöhen. Der Grund dafür sind neue Fließwege, die durch injektionsbedingte Verformungen geschaffen werden.

Tabelle 12. Erfahrungswerte für Ziel-Durchlässigkeiten in Fels (unveröffentlicht Stadler, 2016)

Ausgangswert	Inkompetentes Gestein	Kompetentes Gestein
k_f [m/s]	k_f [m/s] erreichbar	k_f [m/s] erreichbar
1E-04	8E-09	5E-09
1E-05	5E-08	1E-08
1E-06	1E-07	6E-08
1E-07	3E-07	1E-07
1E-08	5E-07	3E-08

7.3. Injektionsprinzipien und -verfahren

7.3.1. Injektionsverfahren

In der Tabelle 13 werden die Zusammenhänge zwischen geotechnischen Parametern und möglichen Injektionsverfahren dargestellt.

Für Injektionen in Lockergestein sind die Fraktionen in der Siebkurve und die Ausgangsdurchlässigkeit für die Wahl der Injektionsmittel (von chem. Produkten wie etwa Acrylaten bis zum Mörtel) und die Art der Injektionsmethode (Lanzen, Manschettenrohre etc.) maßgebend. Der Übergang von wirksamer Porenpenetration zu Claquagen (vergleiche auch Hydrojacking) – und damit einer Bodenverdichtung durch Verdrängung (insbesondere im Feinkornbereich) – ist meist fließend. Die Abbruchkriterien sind in Kapitel 7.3.3 beschrieben.

Auch beim Injizieren in Fels ist die Ausgangstransmissivität (mit Lugeontests ermittelt) für die Wahl der Methoden wesentlich. Dort ist allerdings zusätzlich zwischen einer Vielzahl von Klüften mit diffuser Wasserwegigkeit und wenigen, diskreten Großklüften gleicher Wasseraufnahme unter Druck zu unterscheiden. Auch die Standfestigkeit des Untergrundes und des Bohrloches spielen eine Rolle. Entweder kann bis zur Plantiefe gebohrt werden, oder es muss abschnittsweise gebohrt, injiziert und wieder aufgebohrt werden. Oder es gelingt, spezielle Injektionsrohre (etwa MPSP „multiple packer sleeve pipes“) einzubauen, über die ein passgenaues Injizieren möglich wird. Hinsichtlich der Abbruchkriterien bedient man sich verschiedenartiger Druck- und Mengenbegrenzungen (siehe Kapitel 7.3.4).

7.3.1.1. Lockergestein

Die Injektionsbohrungen werden – unter Suspensionsstützung oder verrohrt – üblicherweise mit Durchmesser 76 mm bis 140 mm gebohrt. Der Bohrlochabstand ist projektspezifisch unter der Berücksichtigung der Bohrtiefe, der Bohrgenauigkeit und des Eindringverhaltens (Reichweite) der Suspensionen festzulegen. Die Genauigkeit der Ansatzpunkte kann unter 10 cm angesetzt werden. Der Ringraum zwischen Bohrlochwandung und Manschettenrohr muss zur Vermeidung von Umläufigkeiten entlang des Bohrloches mit einer Suspension geringer Festigkeitsentwicklung (Mantelmischung) – vollständig vom Bohrlochtiefsten beginnend – verfüllt werden. Durch nachfolgendes Aufsprengen der Mantelmischung im Bereich um die einzelnen Manschetten ist ein gezieltes Injizieren von einzelnen Abschnitten bzw. Horizonten möglich. Mit Doppelpackern kann jede Manschette einzeln angesteuert werden. Die eingesetzten Stahl- oder Kunststoffmanschettenrohre weisen üblicherweise einen Durchmesser zwischen 3/4“ bis 2“ auf. Die Regelabstände der einzelnen Manschetten sind unverschieblich und betragen zwischen 33 cm und 100 cm. Für Sonderanwendungen können auch Injektionslanzen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den unten beschriebenen Festgesteinsinjektionen kann man durch Manschetten in mehreren Phasen injizieren. Die Bohrlochabstände liegen üblicherweise zwischen 1 m und 3 m und werden in Abhängigkeit des k_f -Wertes und der Ergebnisse aus den Injektionsversuchen festgelegt.

Tabelle 13. Übersicht über Verfahren und Methoden angepasst und adaptiert aus: Grundbautaschenbuch 6. Auflage

Art des Untergrundes	Lockergestein				
	gemischtkörnig/kohäsionslos		feinkörnig/bindig		
Verfahrensprinzip	Poren-Penetration		Verdrängung/Verformung		
Funktionsdauer	temporär				
	permanent		permanent		
verwendete Mittel	Suspensionen				
	Chemische und Feinstbindemittel			Pasten	
	Kunststoffe				
Verarbeitungsparameter	Mengen-/ Druckbegrenzung	Injektion bis Aus-/Übertritt, mengenbegrenzt	Energie- und Verformungskriterien		
Bauverfahren	MR-Verfahren	Lanzeninj.	SEMA-Verf.	Compaction	Frac-Grouting
Ziel der Behandlung (Abdichtung und/oder Verfestigung)	max. Verfüllung Porenraum	Teilverfüllung Porenraum Verkitung		Konsolidierung, Vermittlung von Kohäsion und Aktivierung der inneren Reibung, Bauwerksanhebung	

Art des Untergrundes	Festgestein			
	standfest	gebräch	brüchig/tekt. zerkleinert	
Verfahrensprinzip	Hohlrauminjektion (verkarstet bis klüftig)		Verformung/Poren; Penetration	
Funktionsdauer	gelegentlich temporär			
	permanent			
verwendete Mittel	Suspensionen			
	Feinstbindemittel und chem. Injektionsmittel (z.B.: Harze, Acrylatgele, Kunststoffe)			
	split-spacing/ von innen nach außen/ von außen nach innen			
Verarbeitungsparameter	Druckbegrenzung/ Energiekriterien		Energie- und Sättigungskriterien	
	upstage	downstage	MPSP	MR-Verfahren
Ziel der Behandlung (Abdichtung und/oder Verfestigung)	max. Verfüllung Porenraum		Konsolidierung, Abdichtung	

Begriffserklärungen:	
temporär	< 2 Jahre Funktionsdauer; die Funktionsdauer wird für mehrheitliche - nicht ausschließliche - Verwendung der Bauverfahren zitiert.
Energiekriterium	Begrenzung der zugeführten Injektionsgutmenge durch Festlegung eines max. Produktes aus wirksamen Druck und verpreßter Menge (siehe EN 12715, [3] Beschreibung der Grouting Intensity Number "GIN")
MR-Verfahren	Manschettrohrverfahren
Lanzeninjektion	Injektionswege im Boden werden mittels gerammter oder eingeborhter Lanzen geschaffen; Injektionsöffnungen verteilt über den Behandlungsbereich. Lanzeninjektion kann auch durch seitliche Öffnungen im Bereich der Lanzenspitze erfolgen, oder durch die untere Rohroffnung unter gleichzeitigem Rückzug der Lanze.
SEMA-Verfahren	Injektion durch das Bohrwerkzeug im Zuge der Herstellung der Bohrung.
Compaction	Einpressen von Pasten und Mörtel über Rohre von 3" bis 6" Durchmesser; die Mischung tritt über das offene Rohrende aus und penetriert nur wenig in die Poren des Bodens.
Frac-Grouting	Aufbrechinjektion unter Überwindung von Kohäsion, evtl. Zugfestigkeit (im Fels) und Auflast im Boden an der Injektionsstelle.
tekt. zerkleinert	zu kleinen Klutkörpern zerschert, körnig bis bindig, gelegentlich vergleichbar mit "mylonitisiert".
split-spacing	Bohrlochteilung (Abstände zwischen den Bohrpunkten) der nachfolgenden Behandlungsphase auf halbe Abstände der vorangegangenen.
von innen nach außen	bedeutet, dass in Bohrlochgruppen (Stollen, Dammaufstandsflächen, etc.) die Zentrumsbohrungen zuerst, die Randbohrungen zuletzt injiziert werden.
von außen nach innen	bedeutet die umgekehrte Behandlungsabfolge zu oben (auf das unbeabsichtigte Einschließen von Grund-/Bergwasser ist zu achten).
upstage	ist der gängige Ausdruck für das - durch Packer abschnittsweise - getrennte Injizieren eines unverrohrten, auf Plantiefe hergestellten Bohrloches.
downstage	beschreibt das Aufeinanderfolgen der Arbeitsschritte: Bohren, Packer setzen, injizieren, erhärten, aufbohren, tiefer bohren, Packer setzen
MPSP	ist die in der Literatur übliche Bezeichnung für die Sonderkonstruktion eines Manschettrohres mit Sackpackern; multiple-packer-sleeve-pipe
Sättigung	Grad der erreichten Hohlraumfüllung; feststellbar, u.a. über das Beobachten instationärer Druckentwicklung nach Pumpenstopp (siehe EN 12715/[3], Beschreibung der Transient Pressure Analysis "TPA")

7.3.1.2. Festgestein

Die Injektionsbohrungen werden meist unverrohrt im Hammerbohrverfahren oder als Kernbohrung mit Durchmessern ca. 46 mm bis HQ 96 mm bzw. PQ 122 mm (bei Doppelkernrohr: 101 mm, 114 mm, 131 mm) abgeteuft. Nicht standfeste Bohrabschnitte werden Top Down durch Zementieren und Wiederaufbohren stabilisiert. Im Gegensatz zur Lockergesteinsinjektion kommen in der Regel Einfachpacker zum Einsatz. Die übliche Injektionsrichtung ist, soweit es die Bohrlochstabilität zulässt, vom Bohrlochtiefsten aufsteigend zum Bohrlochmund.

Die sich deutlich vom Lockergestein unterscheidende Hydraulik in Festgesteinen und den damit verbunden Fließwegen der Suspension hat Auswirkungen auf die Injektionsreihenfolge. Bei der Planung ist zu bedenken, dass sich die Ausbreitung der Suspension meist auf diskrete Klüfte beschränkt, welche oft eine große Ausdehnung (mehr als 5 m) haben. Auf Grund von Umläufigkeiten, verzögertem Abbinden, Überlappen der Injektionsreichweiten, Übertritte in benachbarte Bohrungen etc. ist das Bohren und Injizieren ein alternierender Vorgang, dem andauernde Planungsaufmerksamkeit gewidmet werden muss. Üblicherweise verringern sich sukzessive die Bohrlochabstände (split spacing) bei Festgesteinsinjektionen (siehe Tabelle 14). Dabei wird zwischen primären, sekundären und manchmal auch tertiären und quartären Bohr- und Injektionsdurchgängen unterschieden.

Tabelle 14. Richtwerte für Bohrlochabstände (unveröffentlicht Stadler, 2016)

Felsinjektionen

Bohrlochabstand [a], Bohrlochlänge [L], Reichweite = a/2 [R]

Anwendungsbeispiel: Schirm- bzw. Kontaktinjektion, Ziel: $K_f > 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

- Ausgangs-Transmissivität		100 Lug	30 Lug	1 Lug
- bzw. Ausgangswert K_f	10^{-4} m/s	10^{-5} m/s	10^{-6} m/s	10^{-7} m/s
- Primär	20,0 m	18,0 m	15,0 m	12,0 m
- Sekundär	10,0 m	9,0 m	7,5 m	6,0 m
- Tertiär	5,0 m	4,5 m	3,8 m	3,0 m
- Quartär	2,5 m	2,25 m	1,9 m	1,5 m

- Sedimentgesteine: Erhöhung von [a]
- Karst: möglicherweise Reduktion von [a] (ungeachtet von Ausgangs- K_f)
- Kristalline Gesteine: [a] wie angegeben
- Kontaktinjektion: [a]/[L] variiert zwischen 0,8 und 1,5

7.3.2. Aufnahme von Injektionsgut und Reichweite

Die Aufnahmefähigkeit des Untergrundes für Injektionsgut ist abhängig von (a) der Öffnungsweite der Trennflächen und Porenräume und (b) deren Verbindung (Konnektivität).

Die Reichweite und der Durchdringungsgrad des Untergrundes ist abhängig von (a) der Lage des Hohlraumes zur Bohrung (Passe), (b) der Rheologie des Injektionsgutes (c) dem Injektionsdruck (d) der Injektionsgeschwindigkeit und (e) der Injektionsdauer.

Aus theoretischen Überlegungen von Lombardi (Lombardi & Deere, 1993) wurden folgende Zusammenhänge abgeleitet:

$$R_{max} = \frac{p_{max} \cdot t}{\tau_0} \quad (6)$$

$$V_{max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p_{max}^2 \cdot t^3}{\tau_0^2} \quad (7)$$

$$F_{max} = \frac{\pi \cdot p_{max}^3 \cdot t^2}{3 \cdot \tau_0^2} \quad (8)$$

- τ_0 : Fließgrenze
- p_{max} : maximaler Druck an der Eintrittsstelle in den Hohlraum
- t : offenen Kluftweite
- R_{max} : Reichweite in einer Idealen ebenen und horizontalen geöffneten Kluft
- V_{max} : maximales Injektionsvolumen in einer Idealen ebenen und horizontalen geöffneten Kluft
- F_{max} : normal auf die Trennfläche wirkende Hebekraft

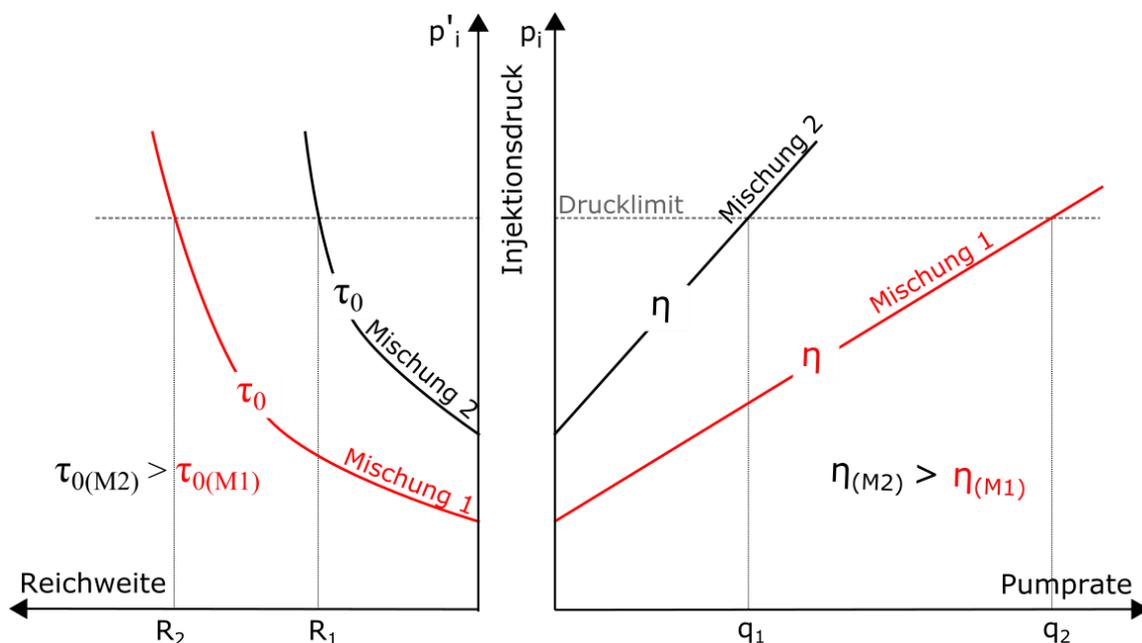


Abbildung 16. Schematische Darstellung der interaktiven Zusammenhänge zwischen Injektionsdruck, Fließgrenze, Reichweite und Rate (Stadler, 2016)

In dem beispielhaften Diagramm (Abbildung 16) wird der Zusammenhang zwischen Reichweite (R) (Stagnations- bzw. Injektionsradius) und der Mischung und deren Fließgrenze (τ_0) bzw. zwischen Viskosität (η) und Pumprate (q) für zwei unterschiedliche Mischungen skizziert. Die

darin dargestellten Abhängigkeiten machen die Rolle des Injektionsdrucks (p_i) besonders deutlich. Zum Beispiel bedeutet ein höherer Injektionsdruck eine größere Reichweite; eine geringe Fließgrenze bei gleichem Injektionsdruck eine größere Reichweite.

Ein sechster Parameter überlagert sich diesen Beziehungen noch in Form einer druckabhängigen Klufteaufweitung. Der gewählte Injektionsdruck steuert danach für eine gewählte Mischung nicht nur Reichweite und erforderliche Pumpzeit, sondern auch das Injektionsvolumen.

Für die Injektionsplanung müssen daher zu diesen wesentlichen Punkten entweder Messergebnisse aus der Erkundung vorliegen, oder eben möglichst treffliche Annahmen zu folgenden Punkten getätigt werden:

- Anzahl, Orientierung und Gängigkeit von Klüften
- Hydraulische und physische Öffnungsweite (Verteilung) derselben
- Verformbarkeit des Felsverbands unter Injektionsdruck

7.3.3. Abbruchkriterien Lockergestein

Zur Festlegung der Injektionsmengen und Abbruchkriterien haben sich im Lockergestein folgende vier Kriterien bewährt. Diese üblichen Kriterien stellen den Mindestumfang einer Planung dar und müssen projektspezifisch festgelegt werden. Sinnvollerweise sind die Kriterien in einem Flusdiagramm darzustellen.

1. Die Injektion wird nach Erreichen der festgelegten Mengen beendet. Die notwendige Menge errechnet sich aus der effektiv erreichbaren Porosität (17% bis 25%) zuzüglich eines Faktors für Verluste. Daraus ergibt sich ein Designwert von 23% bis 30% des Volumens des theoretischen Injektionskörpers. Die Injektionsmenge muss je Passe unter Berücksichtigung der Inhomogenität des Untergrundes festgelegt werden.
2. Die Injektion wird nach Erreichen des maximal festgelegten Injektionsdrucks am Bohrlochmund beendet. Dieser Druck wird meist mit 80% des Aufbrechdruckes definiert, welcher durch Frac-Tests in situ ermittelt werden kann. In der Regel bewegen sich dann diese Drücke bei Injektionsraten von 5 bis 15 l/min um 6 bis 20 bar.
3. Der Abbruch erfolgt beim Auftreten von substantiellen Hebungen. Die Hebungen können mit Oberflächenpunkten und/oder mit Tiefenpegeln gemessen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Referenzpunkte sicher in einem unbeeinflussten Bereich sind und die Messfrequenz ausreicht um rasch genug reagieren zu können. Beginnende Verformungen des Untergrundes zeigen die erreichte Sättigung bzw. das Überschreiten des verformungsfreien Druckes an. Auf bestehende Gebäude ist besonders zu achten.
4. Im Fall von Austritten an freien Oberflächen bzw. Kanälen, Keller etc. ist die Injektion sofort und ohne weiteres abubrechen.

Seltener werden duale Kriterien (z.B.: GIN) formuliert, in denen, wie bei der Felsinjektion üblich, die wirksame Energie begrenzt wird (siehe 7.3.4.4).

7.3.4. Abbruchkriterien Festgestein

7.3.4.1. Apparent Lugeon-Methode

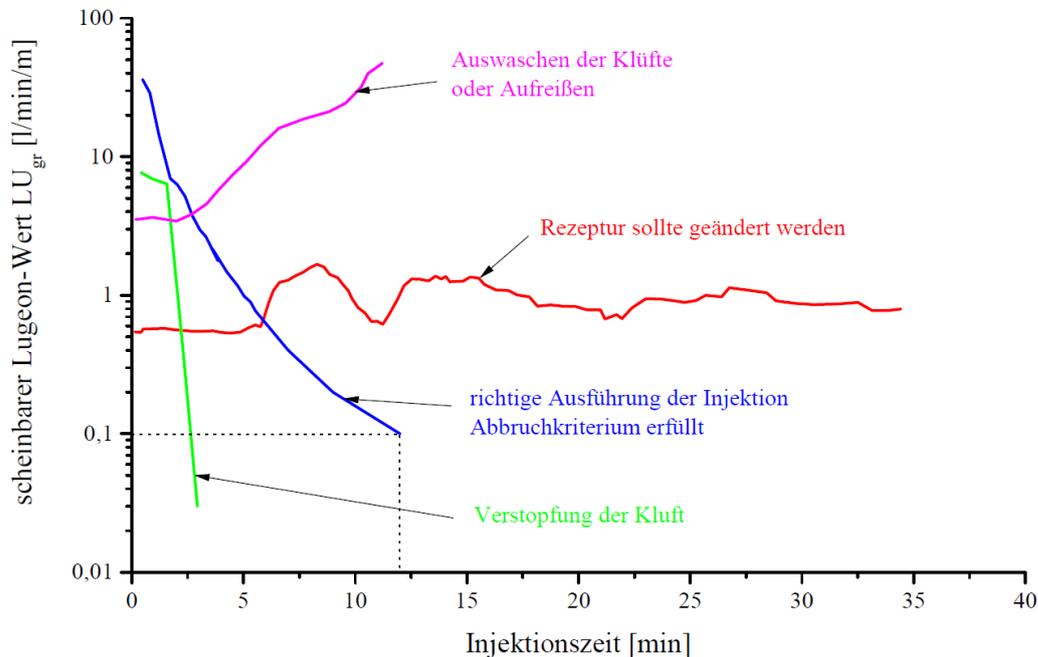


Abbildung 17. Mögliche Verläufe des scheinbaren Lugeon-Werts (Gabriel, 2016)

In den USA werden Felsinjektionen nach der Amenableity Theory (Theorie über die Zugänglichkeit der Klüfte) unter Betrachtung des scheinbaren Lugeon-Werts („apparent-Lugeon-Value“) gesteuert. Rate, Druck und Viskosität werden dabei auf den Lugeon-Wert $[l/min/m \text{ Bohrloch}]$ mit Wasser und einen Versuchsdruck von 10 bar bezogen. Die Injektion wird als eine Art kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen, in dem die Newtonsche Flüssigkeit (Wasser) durch eine Bingham'sche Flüssigkeit (Suspension) ersetzt wird. Aus der Durchflussrate, dem Injektionspumpendruck und der Viskosität der Suspension wird während der Injektion auf einen scheinbaren Lugeon-Wert zurückgerechnet. Dieser Wert wird in Verhältnis zum ursprünglichen Lugeon-Wert aus den Wasserabpressversuchen gestellt. Aus diesem Verhältnis wird die Eignung der Suspension für das Trennflächensystem bewertet, die Rezeptur wird während der Injektion infolge nach und nach optimiert. Die Suspension wird im Allgemeinen so gewählt, dass 75% der Klüfte mit der Suspension zugänglich (amenable) sind. Die Injektion wird abgebrochen, sobald der scheinbare Lugeon-Wert einen gewissen Zielwert erreicht hat. Nachteilig zeigt sich bei dieser Methode, dass statt der dynamischen Viskosität in $[mPa \cdot s]$, das Verhältnis der Marsh-Zeiten verwendet wird, was nur zu einem Bruchteil (in etwa $1/50$ -el) des wahren Verhältnisses darstellt. Dies ist bei der Interpretation des Zielwertes jedenfalls zu berücksichtigen. Außerdem werden bei dieser Methode die Effekte von Kluftaufweitungen nicht berücksichtigt. Zusätzlich reflektiert die gewonnene Information nur die Verhältnisse der ersten dm Reichweite (also begrenzt auf die Durchlässigkeit im Nahebereich) um das Bohrloch.

$$LU_{app} = LU_{gr} = \frac{q(l/min)}{1(l/min)} \times \frac{1(m)}{L_{Abschnitt}(m)} \times \frac{10(bar)}{P_{eff}(bar)} \times \frac{V_{Marsh}(sec)}{28(sec)} \quad (9)$$

LU_{app} :	scheinbarer Lugeon Wert	
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)

7.3.4.2. q/p - Methode

Die 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 (schwarz strichlierte Linie in der Graphik). Eine Verhältniszahl (Rate /Injektionsdruck) von 3 bis 5 ist für den Beginn der Behandlung einer durchlässigen/aufnahmefähigen Passe typisch, ein Wert kleiner als 0,2 dagegen zeigt das Erreichen einer – relativ auf die Viskosität und Fließgrenze der Mischung bezogenen – Sättigung des von einer Passe beaufschlagten Baugrundes beim jeweiligen Injektionsdruck an.

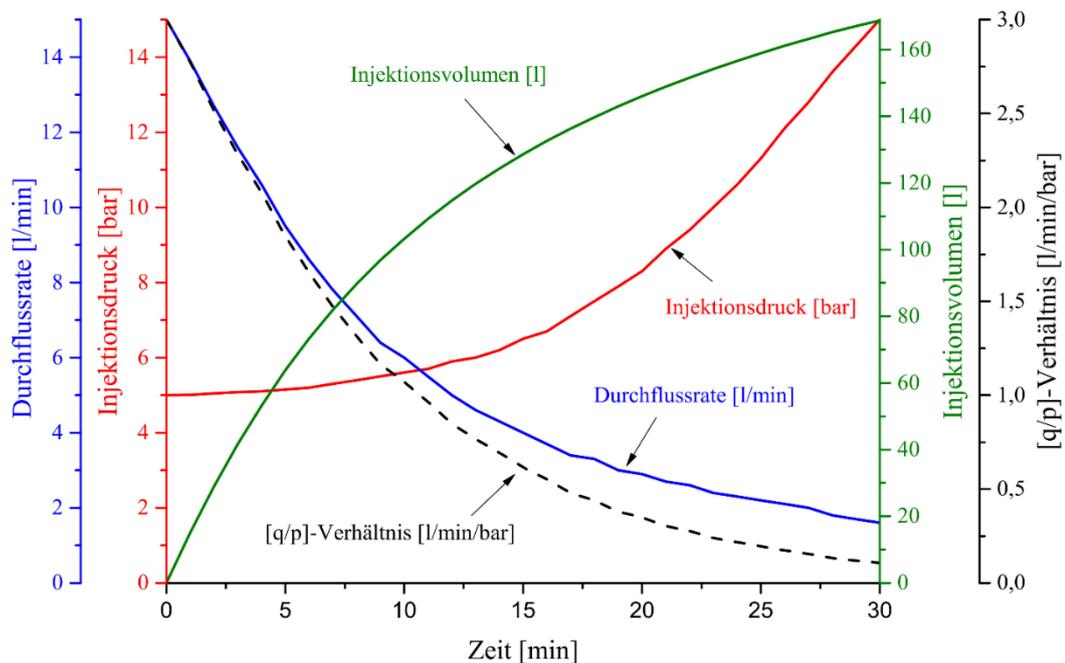


Abbildung 18. Verlauf des q/p -Verhältnisses (Gabriel, 2016; nach Stadler unveröffentlichte Mitteilung und Kutzner, 1991)

7.3.4.3. Real Time Grouting Control (RTGC)

In Schweden hat sich die von Stille (Stille, 2015) entwickelte Methode durchgesetzt, über eine aus dem Ergebnis von Wasserabpressversuchen angestellte Analyse der Kluftweitenverteilung die theoretische Reichweite der Injektion für die größte und die kleinste Kluft zu berechnen. 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 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 hat. 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).

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.: den in Schweden üblichen 50 bar) unberücksichtigt bleiben. Diese Vorgangsweise eignet sich besonders für homogenes kompetentes Festgestein (Skandinavien), zeigt jedoch bei Inhomogenitäten und Anisotropien Schwächen.

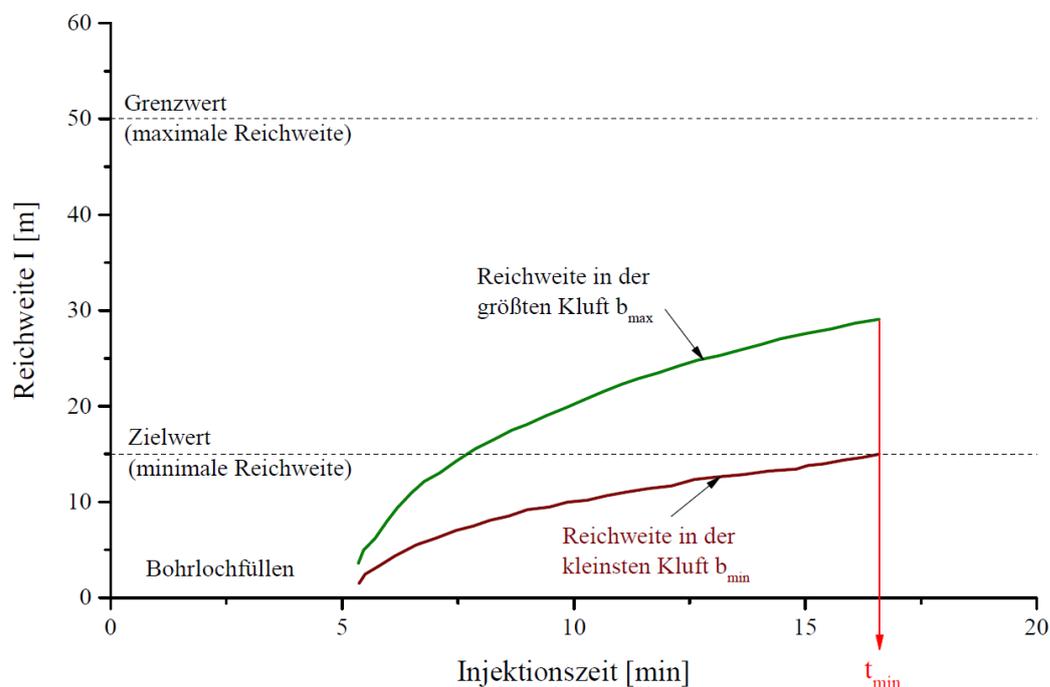


Abbildung 19. Beispiel einer Aufzeichnung für Real Time Grouting Control (RTGC) (Gabriel 2016; nach Stille et al. 2015)

7.3.4.4. Grouting Intensity Number (GIN)

Das Konzept der Begrenzung der Injektions-Energie/Laufmeter Bohrung ist auf Lombardi (Lombardi et al., 1993) zurückzuführen (Grouting Intensity Number - GIN). Ermittelt wird diese „Injektionsintensität“ 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]. GIN-Werte zwischen 500 (für inkompetentes Gebirge) und 2.500 (für kompetentes Gebirge) werden als empfohlen publiziert. 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? Warum wird mit dem Pumpendruck und nicht dem in der Kluft tatsächlich wirksamen Druck multipliziert? Da der wirksame Injektionsdruck die Druckverhältnisse in den Klüften dargestellt, sollte der wirksame Injektionsdruck (zur Darstellung der tatsächlichen eingebrachten Energie) als Eingangsparameter für die Berechnung des GIN-Wertes verwendet werden.

Da das GIN-Kriterium die Energie, welche auf das Gebirge aufgebracht wird, begrenzt, müssen entsprechende Mengen die für das drucklose Vorverfüllen notwendig sind aus dem Gin-Kriterium ausgeklammert werden.

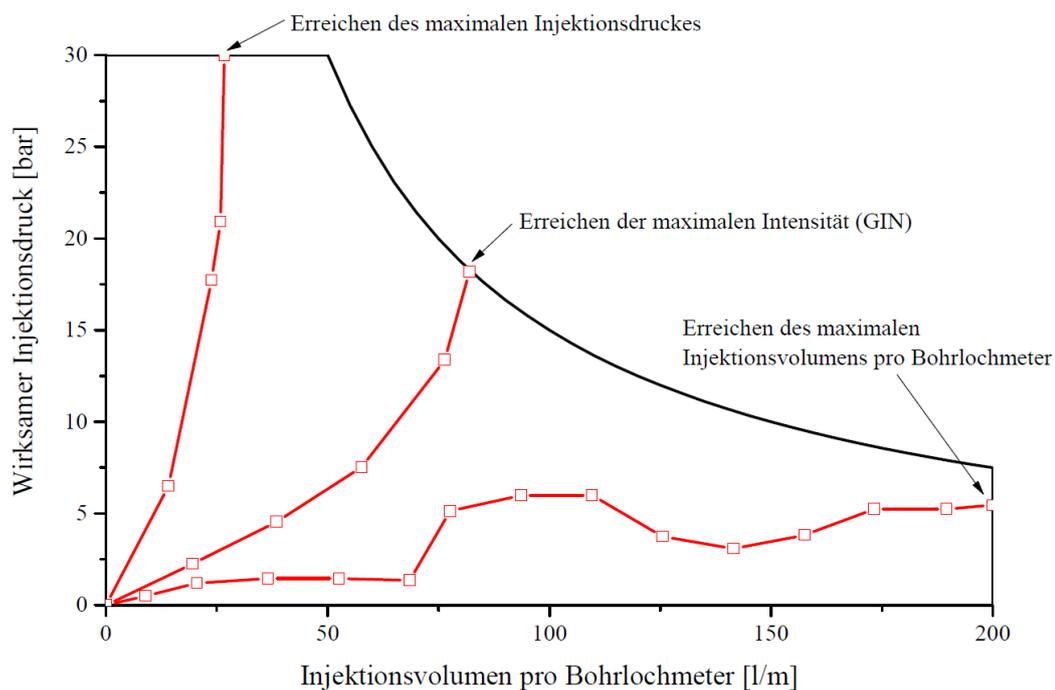


Abbildung 20. Beispiel einer Injektion nach der GIN-Methode (Gabriel, 2016)

7.3.4.5. Aperture Controlled Grouting (ACG)

Diese von Carter (Carter et al., 2014) empfohlene Kontrollmethode des Injektionsvorganges, die seit 40 Jahren eingesetzt wird, beginnt mit einer Kluftanalyse – ähnlich dem Vorgehen bei der RTGC-Methode – und mit Lugeontests. Über den Vergleich der Kluftstrukturen mit den Ergebnissen der Lugeontests wird eine Bandbreite von empfohlenen Suspensionen ermittelt. Abhängig von den Lugeon-Werten in den jeweiligen Passen wird eine Suspensionsmischung ausgewählt, mit der ein Ziel-q/p-Wert erreicht werden kann (siehe Abbildung 21). Bei der Injektion werden laufend Menge und Druck über die Zeit beobachtet, um das Verhältnis Rate zu Injektionspumpendruck interpretieren zu können. 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 (siehe Abbildung 22).

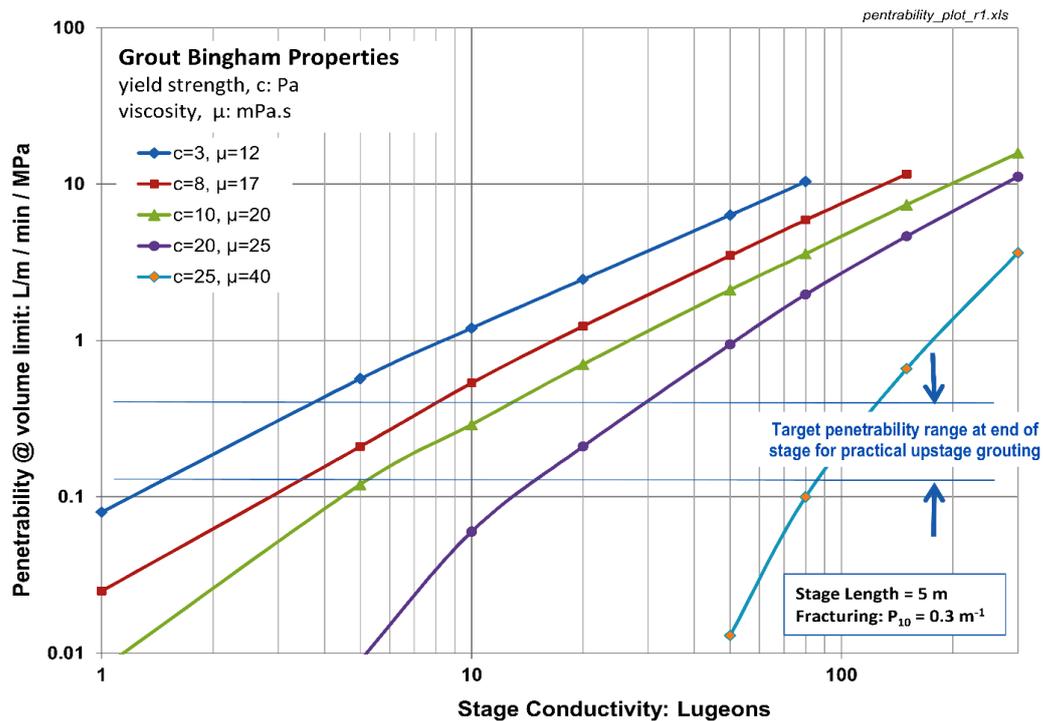


Abbildung 21. Zuordnung von Suspensionsmischungen zu Durchlässigkeiten in den Passen (Carter et al., 2014)

In Summe stellt diese Methode ein Hybrid aus einigen der unter 7.3.4 Abbruchkriterien und Methoden. Daher erntet diese Methode auch nur wenig Kritik aus der Fachwelt – vorausgesetzt die fachliche Betreuung der Baustelle entspricht dem komplexen Anspruch der Methode.

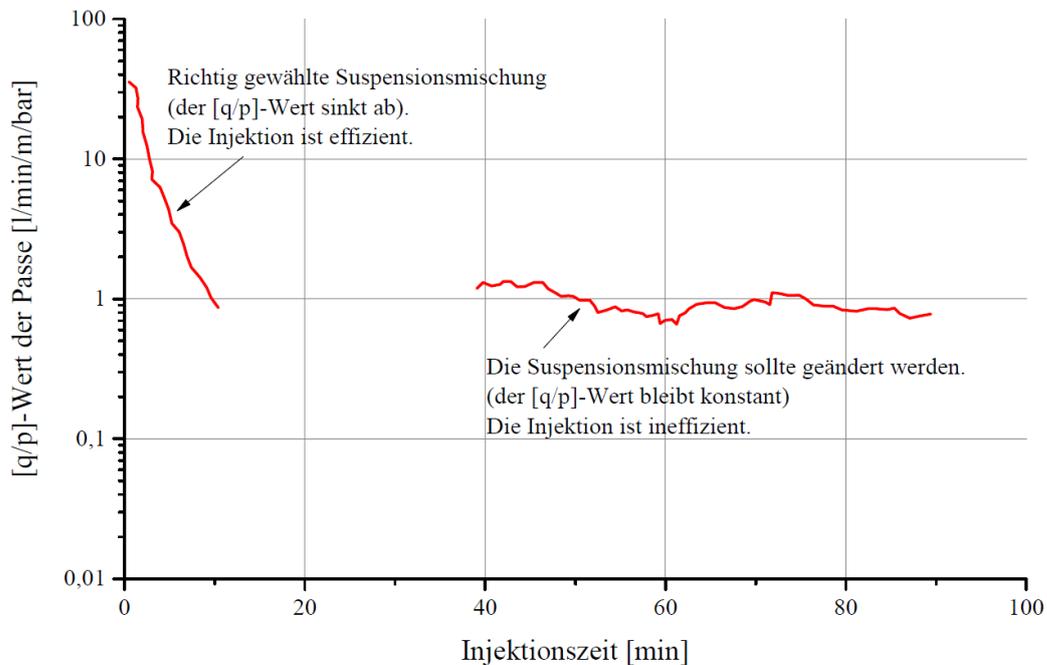


Abbildung 22. q/p-Wert aufgetragen gegen die Injektionszeit (Gabriel, 2016; nach Carter et al., 2014)

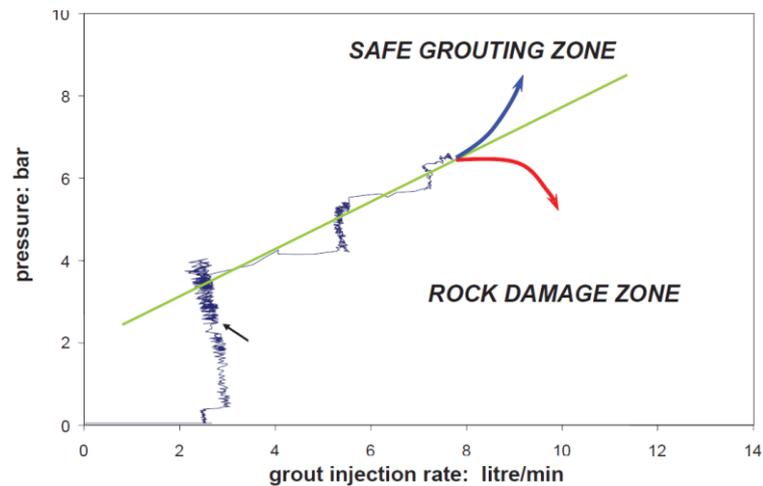


Abbildung 23. Darstellung einer Injektion. Die grüne Linie stellt die Grenze zwischen Schädigung des Gebirges und sicherem Injizieren dar. (Bonin et al., 2012)

7.3.4.6. Transient Pressure Analysis (TPA)

Nicht nur der in situ wirksame Druck lässt sich aus Druckabfallkurven nach einem Pumpenstopp (Shut-in) der Pässe abschätzen. Vielmehr gibt die Form dieser Kurven (und deren relative Änderung bei mehrmaliger Wiederholung siehe Abbildung 24) auch Aufschluss über die erreichte Sättigung und – bei Verwendung gleicher Shut-in-Zeiten (etwa 20s) – samt der relativen Entwicklung der Drücke zur Zeit $[t+t_{20} s]$ selbst in linearen Diagrammen einen guten Hinweis auf ein evtl. Abfließen von Injektionsgut, auf Verklausen oder Verjüngung der Querschnitte, auf Sättigung, auf Auswaschung und Erosion oder auf Fracks. Auch können quantitative Hinweise auf die relative Durchlässigkeit in einer doppellogarithmischen Darstellung 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 (Stadler, 1992; Pollard 2009, wie auch EN 12715).

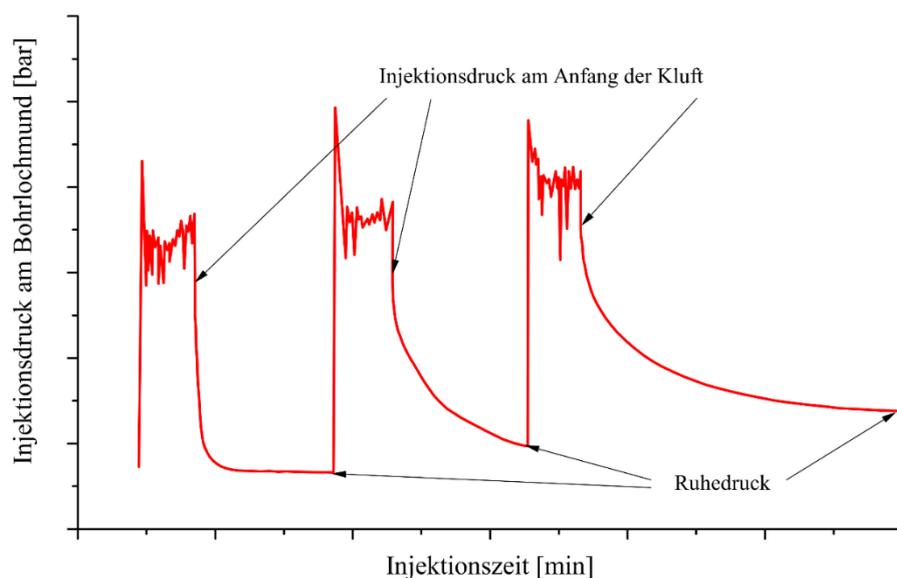


Abbildung 24. Schematische Darstellung vom Injektionspumpendruck und Druckabfallkurven (Gabriel, 2016; nach Stadler, 1992)

Die Feldtauglichkeit der Methode wurde unter anderem bei den Projekten Kölnbrein Sperre, AT und Dounreay, UK bewiesen. Die Ableitung absoluter Werte für die Durchlässigkeit, Kluftaufweitung, oder der Entfernung eines festgestellten Phänomens vom Bohrloch ist wegen der Bingham'schen Rheologie des Injektionsgutes nicht möglich. Jedoch können für die Injektionsmaßnahme ausreichend genaue Aussagen getroffen werden.

7.3.4.7. Pressure Sensitive Grouting (PSG)

Für eine Weiterentwicklung von TPA wurde in Versuchen nachgewiesen, dass der Gradient einer Druckabfallkurve nach einem Pumpenstopp und der Ruhedruck am Ende einer Druckabfallkurve Auskunft über die Druckverhältnisse in den angesprochenen Hohlräumen und damit über deren Sättigung geben. In der Abbildung 25 links sieht man den Druckverlauf am Bohrlochmund mit 4 Druckabfällen. Von Druckabfall zu Druckabfall sinkt der Gradient ($m_1 < m_4$). Im rechten Diagramm ist der bei einem Versuch gemessene Druck in der Kluft dargestellt. Der Druckgradient in der Kluft verflacht sich zunehmend und zeigt damit ebenfalls die steigende Sättigung der Kluft (M 1 = Bohrlochmund, M 8 = Ende der Kluft) vom 1. Druckabfall (DA 1) bis zum 4. Druckabfall (DA 4).

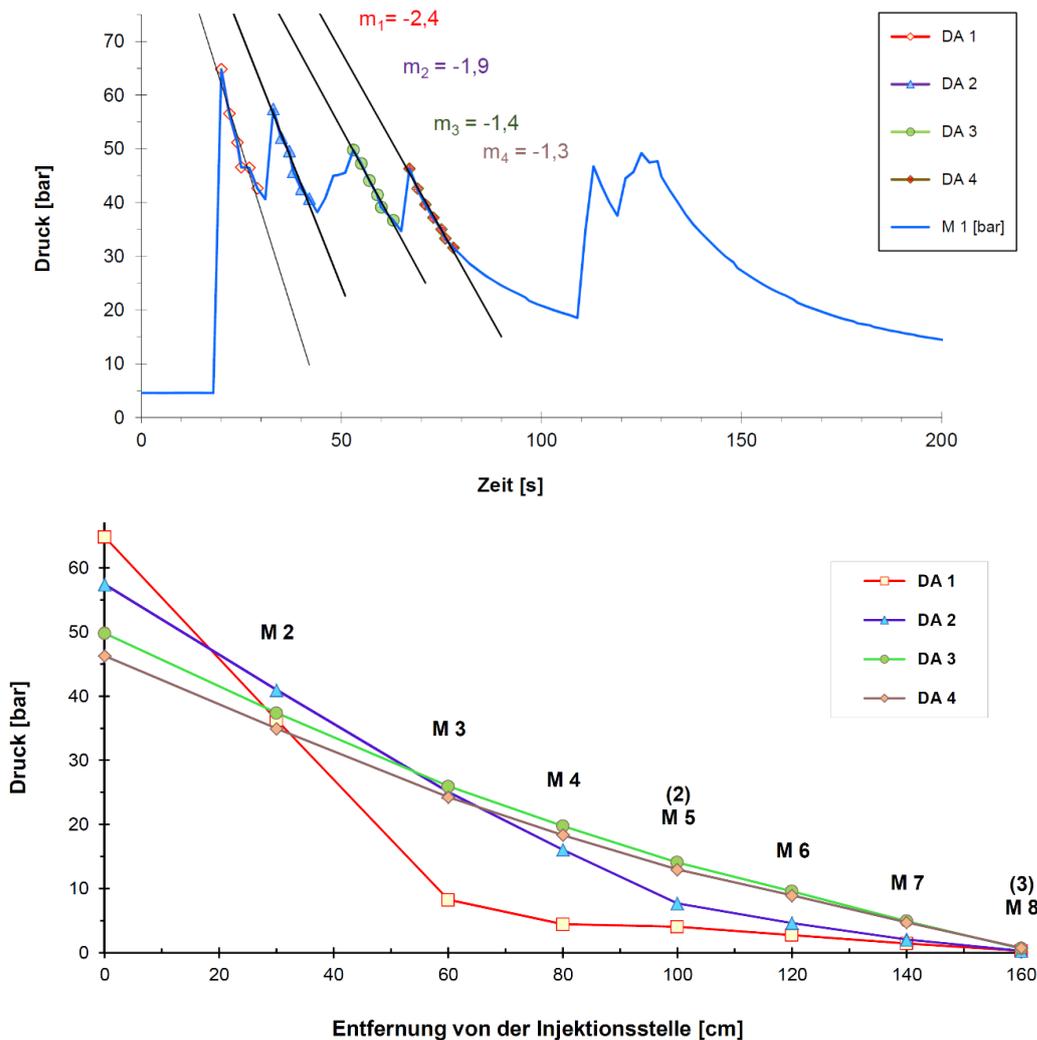


Abbildung 25. Druckabfälle und die dazugehörige Druckverteilung in der Kluft (Reichl, 2000)

Dabei ist es grundsätzlich erforderlich, dass im Zuge des Auslösens des Druckabfalls die Energiezufuhr durch die Injektionspumpe unterbunden wird. Die Änderung des Gradienten (c in Abbildung 26) und des Ruhedruckes (k in Abbildung 26) – von Druckabfall zu Druckabfall – geben nicht nur Auskunft über die fortschreitende Verfüllung der angesprochenen Hohlräume, sondern zeigen auch eine mögliche Überlastung (Aufweiten oder gar Fracken) des Gebirges an. Große Hohlräume können mit dieser Methode ebenfalls detektiert und effizient – z.B.: durch eine Erhöhung der Injektionsrate – behandelt werden. PSG eignet sich somit sehr gut dazu, jede Passe individuell mit der notwendigen Suspensionsmenge und der geeigneten Rate zur effektiven und dennoch schadlosen Füllung der Hohlräume, und dem Erzielen der geplanten Reichweite, zu beaufschlagen. Alle 4 erwähnten Parameter: Druckabfallgradient, Ruhedruck (nach definierter Zeit, etwa 20 s), die Änderung des Druckabfallgradienten von Druckabfall zu Druckabfall und die Änderung des Ruhedruckes von Druckabfall zu Druckabfall (siehe Abbildung 26), machen es mittels Fuzzylogik-Modellierung möglich, der Injektion einen vorgeplanten Ablauf zu verleihen.

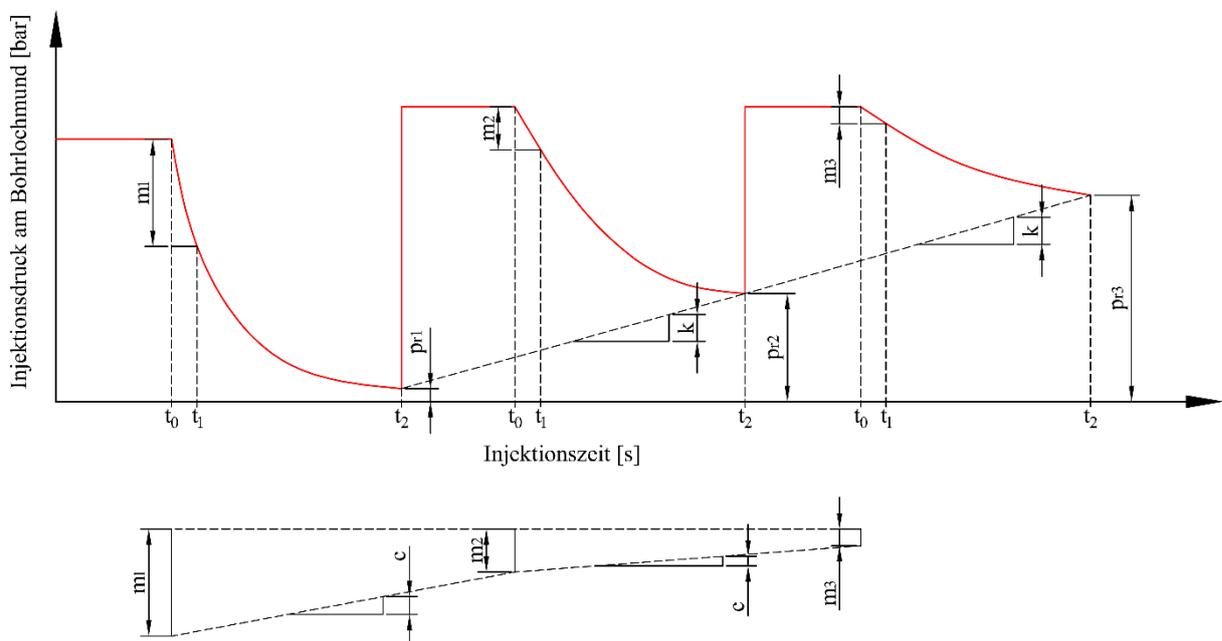


Abbildung 26. Parameter zur Steuerung der Injektion mit der PSG-Methode (Gabriel, 2016; nach Reichl, 2000)

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

7.3.4.8. Kombinatorik der Systeme und Methoden

Die in 7.3.4.1 bis 7.3.4.7 beschriebenen Methoden der Parameterauswertung beziehen sich auf gleichartige Datensätze (Menge, Rate, Druck, Ruhedruck etc.), welche mittlerweile in Form von online-Aufzeichnungen auf der Baustelle vorliegen (müssen), und sich damit für all diese unterschiedlichen Auswertungen verwenden lassen.

Eine kombinierte Anwendung dieser Kriterien (RTGC, app. Lug., q/p, GIN, ACG, TPA&PSG) gibt mehrfache Redundanz und Sicherheit in der Interpretation zur erreichten Sättigung, einen raschen und somit wirtschaftlichen Weg zur gewünschten Sättigung, zur Verhinderung schädlicher Aufweitungen (Jacking) bzw. Auswaschungen, zum Abfluss in Open Boundaries, oder dem Erreichen (reduzierter) Ziel-Transmissivität etc., und ist daher besonders zu empfehlen.

7.3.5. Überwachungs- und Kontrollkriterien

In der Planung muss festgelegt werden, dass in der Umsetzung (Injektionsversuch und eigentliche Injektion) die Injektionsdaten (Erkenntnisse aus dem Abbohren, Lugeontest in den Injektionsbohrlöchern, Druck, Menge, Rate, Druckabfall, reale Suspensionseigenschaften etc.) auf Basis des Wissens der Erkundung von einem Injektionsexperten laufend interpretiert wird und die Injektionsparameter (Druck, Rate, Menge je Passe, Eigenschaften der Suspension und damit die Abbruchkriterien) entsprechend angepasst werden. Diese Funktion ist mit dem Geotechniker vor Ort bei NÖT Vortrieben zu vergleichen (siehe ÖGG RIL 2008 bzw. ÖNORM B2203-1:2001).

7.4. Injektionsgut

siehe Kapitel 6 Baustoffe und Bauprodukte

7.5. Einbringen des Injektionsgutes

In der EN 12715 Kap. 7.5.4.1 wird von einem Injektionsdruck, einem Betriebsdruck und einem wirksamen Druck gesprochen. Da die drei Drücke sehr unterschiedlich sein können und auch der tatsächlich wirksame Druck im Verhältnis zu dem Druck am Bohrlochmund von Passe zu Passe sich stark ändern kann, ist eine Differenzierung und entsprechende Benennung in der Planung und Ausführung notwendig. Somit ist zwischen dem Druck direkt an der Injektionspumpe, dem Druck am Bohrlochmund und dem, in den Hohlräumen, tatsächlich wirksamen Druck zu unterscheiden. Die ersten zwei Drücke kann man auf einfachem Weg über Manometer an der jeweiligen Stelle messen. Der tatsächlich wirksame Druck kann der Größenordnung nach über einen Druckabfall (siehe TPA Kapitel 7.3.4.6) ermitteln werden. Dazu wird ein Manometer zwischen dem Druckventil der Injektionspumpe (oder einem Schieber als Absperrorgan) und dem Hohlraum situiert und die Pumpe abgestellt bzw. der Schieber gleichzeitig geschlossen. Die Energiezufuhr durch die Injektionspumpe wird damit unterbrochen und der in dem Hohlraum wirkende Druck ist nach kurzer Zeit (ca. 20 s bis max. 5 min) am Manometer messbar. Fünf Minuten oder länger sind nur im Zuge von Injektionsversuchen sinnvoll. Bei Zementsuspensionen ist zu beachten, dass Druckabfälle mit einer Dauer von mehr als 5 min zu Sedimentation bzw. Verklausungen führen können. Im Zuge der Injektionen vor Ort kann man diese Zeitdauer auf wenige Sekunden reduzieren.

Der tatsächlich „wirksame Druck“ wird von der Rheologie des Injektionsgutes, durch Größe und Form der Eintrittsöffnung (Geometrie des Verschnittes von Bohrloch und Trennfläche), sowie durch Größe und Form der erreichten angesprochenen Hohlräume mitbestimmt.

Die Bohrlöcher (ad 7.5.2.7 EN 12715) sollten auf Bohrabweichungen kontrolliert werden und die Injektionsparameter (Druck, Menge und Rate) müssen auf die tatsächliche Lage der Passen abgestellt werden.

8. AUSFÜHRUNG

8.1. Bohrungen

Mit den in der EN 12715: Ausgabe 2001 angeführten Bohrverfahren werden sehr unterschiedliche Richtungsgenauigkeiten erzielt. Besondere Bedeutung gewinnt dieser Umstand bei Bohrtiefen über 30 m, sowie bei der Ausführung von horizontalen Bohrfächern – etwa für Kompensationsinjektionen. Im Allgemeinen wirken sich vertikale Bohrrichtung, große Gestängedurchmesser, geringer Anpressdruck sowie optimale Abstimmung des Bohrstrangs und dessen Durchmessers günstig auf die erzielbare Genauigkeit aus.

Bohrrichtungen parallel zur Haupttrichtung der Trennflächen bzw. zur Schichtung des Bodens erschließen die zu injizierenden und zu verfüllenden Hohlräume nur unbefriedigend und sind daher zu vermeiden.

Die Durchmesser für Manschettenrohrbohrungen liegen häufig zwischen 100 mm und 150 mm. Im standfesten Fels sollten Bohrungen generell mit kleineren Durchmesser (36 mm bis 76 mm) ausgeführt werden. Dies wirkt sich u.a. vorteilhaft auf den Verbrauch von Injektionsgut aus, weil im Fels das Bohrlochvolumen das zu injizierende Hohlraumvolumen meist um ein Vielfaches übersteigt. Außerdem resultiert daraus eine günstigere Durchströmung des Bohrlochquerschnittes, welche der Sedimentation im Bohrloch entgegenwirkt, und vorzeitiges Aushärten in „Toträumen“ verhindert.

Wasser als Bohrspülung wirkt sich – weil dadurch die Klüfte/Hohlräume geöffnet und gereinigt werden – im Allgemeinen günstig auf Gängigkeit der Injektionswege aus. Druckluft birgt die Gefahr des Verstopfens (Verklausens) von offenen Strukturen.

8.2. Aufbereitung des Injektionsgutes

Das Aufbereiten von Suspensionen mit Wasser/Feststoff Verhältnissen deutlich größer als 0,4 ist mit handelsüblichen Misch- und Pumpenanlagen möglich. Wichtig ist dabei das wirksame Aufschließen der festen Bestandteile im Anmachwasser durch ausreichenden Eintrag von Scherkräften in die Flüssigkeit. Mit diskontinuierlicher automatischer Einwaage der Bestandteile einer Mischung lassen sich im Allgemeinen die besten Genauigkeiten beim Dosiervorgang erzielen (< 3%).

Geeignete Mischanlagen sollten innerhalb von 3 Minuten (reine Mischzeit mindestens 60 s) die einzelne Charge an Zementsuspension herstellen können, damit eine unerwünschte Alterung und Erwärmung der Suspension vermieden wird. Der erforderliche Energieeintrag zur Aufbereitung einer Injektionssuspension auf Zementbasis kann mit 550 kJ/m^3 als Mittelwert angegeben werden.

Fein- und Feinstbindemittel bedürfen einer gesonderten Betrachtung.

8.3. Pumpen

Das Prinzip von nur einer Austrittsöffnung (Passe) pro Pumpe sollte bei qualitätsvollen Injektionen beibehalten werden.

Druck- und pumpratengesteuerte Pumpen für Raten zwischen 3 und 15 l/min und Injektionsdrücken zwischen 5 und 35 bar sind für Standardanwendungen üblich. Drücke für das Aufsprengen von Mantelmischungen sowie für die Injektion von feinen Rissen können bis zu 100 bar erforderlich machen.

Die Messung der Drücke (auch des TPA-Druckverlaufs nach Shut in) am Injektionsweg werden durch digitale Datenerfassung ermöglicht, deren Genauigkeit unter 5% der Messwerte im Regelbereich der Anlage sein muss. Die Aufzeichnung der Parameter muss unabhängig vom Betrieb der Pumpen kontinuierlich über die Zeit erfolgen können. Die Ausgabe muss sowohl in Papierform als auch digital (z.B.: CSV-Datei) möglich sein.

8.4. Anmerkungen zu dem Ablauf von Injektionen

Bei der Planung der Abläufe von Injektionsarbeiten ist auf eine Reihe von Wechselwirkungen und Beziehungen zu achten. Es ist nicht möglich, alle Kombinationen von Eventualitäten bereits in der Planung zu berücksichtigen. Daher ist die Verantwortung für die jeweilige Konkretisierung vor Ort und während der Ausführung von besonderer Wichtigkeit. Einige Festlegungen dazu helfen allerdings, bereits im Vorfeld für die Reaktion auf ein beobachtetes Phänomen gerüstet zu sein und sind demzufolge in der Planung zu berücksichtigen:

- Bohrungen abzuteufen, gleichzeitig zu laufenden Injektionen in unmittelbarer Nähe kann ungewollte Verbindungen mit Auswaschungen von Injektionsgut durch Spülflüssigkeit der Bohrung verursachen.
- Wenn nicht in einer Gruppe von Bohrungen von innen nach außen injiziert oder eine Injektionsfront vorangetrieben werden kann, können Grund-Wassertaschen eingeschlossen werden und den Injektionserfolg gefährden.
- Das Auswaschen von Verwitterungsmaterial aus Klüften ist je nach Tongehalt von unterschiedlichem Erfolg begleitet. Die dafür notwendigen Geschwindigkeiten der turbulenten Strömung werden auch mit Einsatz von Druckluft selten erreicht.
- Bei Felsinjektionen ist die unvorhersehbare Kluftweitenverteilung oft Anlass dazu, eine Phase der Homogenisierung des Untergrundes der endgültigen Behandlung voranzustellen.
- Auf tektonische Störungen oder Ähnliches ist in der Planung der Reihenfolge von Injektionsschritten besonders einzugehen. Je nach Zerlegung des darin eingeschlossenen Materials (vom (teil-)verfestigten Störungsgestein bis zu kohäsionslosem Lockermaterial) wird zwischen Penetration oder Verdichtung/Konsolidierung durch Verdrängungsinjektion zu wählen sein.
- Injektionssuspensionen tendieren dazu, bei in situ Temperaturen und in der Ausbildung von dünnen Strömungsfäden und -filme (geringer Hydratationswärme-Entwicklung) nur langsam abzubinden (manchmal > 24 Stunden, siehe Filmerstarrungszeit). Entsprechende in situ Kontrollen sind vorzusehen.
- Das interaktive Anpassen aller Ausführungsdetails in der Ausführung (selbst bei Vorliegen einer detaillierten Ausführungsplanung) wird daher immer erforderlich sein.
- Die Kompetenzen für die interaktiven Anpassungen sind klar festzulegen (EN 12715 schreibt dazu die Einbindung des Planers ausdrücklich vor).

Zur mengenmäßigen Planung von Felsinjektionen haben sich zudem die in Tabelle 15 dargestellten Ermittlungen als hilfreich erwiesen.

Ausgehend von Annahmen

- zur Anzahl hydraulisch wirksamer Klüfte
- zum Abfließen von Injektionsgut in Nachbarbereiche und
- zum mengenmäßigen Effekt der Kluftaufweitung beim Injizieren

werden dafür typische Transmissivitäten zu den Gesamtinjektionsmengen errechnet.

Diese werden auf die – typischerweise aufeinanderfolgenden – Injektionsphasen (primär, sekundär etc.) nach steigender Sättigung und abnehmender Aufnahmekapazität aufgeteilt, und gleichzeitig mit immer feinerem Injektionsgut belegt.

In Kombination mit der Anwendung der üblichen Abbruchkriterien (siehe Kapitel 7.3.3 und 7.3.4) erhält man einen ersten Überblick über die erforderlichen Arten und Mengen an Injektionsgut und kann die dafür erforderlichen Bauzeiten ermitteln.

Tabelle 15. Abschätzung des Injektionsaufwandes für Felsinjektionen

[1]	Ausgangs-Transmissivität						>100 Lug	50	30	15	<5 Lug	Reichweite [m]	Verluste in angrenzende Bereiche	zusätzlicher Verbrauch als Folge von "Aufwäng- bzw. Aufkelleffekt"	Anzahl Klüfte/m³			
[2]	Anfangsmischung W/C 1,5:1 Portland-Normalzement; Anfangsdruck p _i [bar] bei Pumprate von 5 l/min:						0-3	4-8	9-15	16-21	22-30	3,00	20%	2,0	a	b	c	
[3]	Kluftweite [µm]						300	250	180	120	60							
[4]	angenommene Kluftporosität vor Injektion						0,27%	0,23%	0,16%	0,11%	0,05%				4	3	2	
[5]	daraus abgeleitetes tatsächliches Injektionsvolumen						0,58%	0,48%	0,35%	0,23%	0,12%							
[6]	Theor. Injektionsvolumen je m in [l]						183	153	110	73	37							
[7]	Ziel-Transmissivität: < 1,0 Lug	Abbruchkriterien und/oder Änderung von Mischung und Druck																
[8]	pi max <80% "Aufwäng- bzw. Aufkelleffekt"	RTGC	applug	TPA	GIN	q	Σeff Vol	371	309	223	149	74	% von Zeile [6]	Verluste in angrenzende Bereiche				
[9]	anteiliges Injektionsvolumen in lit in Primärbohrung	$t_0=6 \cdot \Delta p \cdot \mu_g / (t_0 \cdot \eta)$; $b_0=t/t_0$; $D_0=I/l_{max}$ Zieldurchlässigkeit (Lug) in Bezug auf Viskosität der Mischung und Druck  C=PP20*TPA*vol.in; Sekundärbohrung=80%eFP; Tertiärbohrung=75%eFS; Quartärbohrung =66%eFT entweder < 3,0 lit/min oder bei Erreichen der Volums-Grenze:														Portland-Normalzement		
[10]	anteiliges Injektionsvolumen in lit in Sekundärbohrung							92	76	55	37	18	50%	25%				Feinbindemittel
[11]	anteiliges Injektionsvolumen in lit in Tertiärbohrung							67	56	40	27	13	55%	33%				Feinstbindemittel
[12]	anteiliges Injektionsvolumen in lit in Quartärbohrung							66	55	40	27	13	66%	50%				Chemisches Injektionsmittel

9. BAUÜBERWACHUNG, PRÜFUNGEN UND KONTROLLEN

9.1. Überwachung und Kontrolle

Art, Umfang und Genauigkeit der Überwachungsanforderungen sind grundsätzlich bereits in der Planungsphase und in den Ausschreibungsunterlagen festzulegen und hängen maßgeblich von der Zielsetzung der Injektionsmaßnahme und dem Injektionsverfahren selbst ab.

Hierfür muss ein fachkundiger Berater beginnend von der Planungsphase, über Ausschreibungserstellung bis hin zur Abwicklung vor Ort die gesamte Injektionsmaßnahme begleiten.

Hinsichtlich der Kompetenzen der einzelnen Projektbeteiligten in dem jeweiligen Projekt wird auf die Koordinationspflicht des Bauherrn verwiesen. Durch geeignete Instrumente, wie z.B.: Flussdiagramme, sind die Kompetenzen, Informations- und Dokumentenläufe sowie Entscheidungshierarchien zu regeln.

Die Bauüberwachung vor Ort – unabhängig davon, ob diese vom Auftraggeber (AG) oder Auftragnehmer (AN) durchgeführt wird und unabhängig davon, welches Vertragsmodell den Injektionsmaßnahmen zu Grunde liegt – findet ein entsprechend dem Injektionsziel und –verfahren gestaltetes Ausführungsprojekt vor. Der Bauüberwachung obliegt die Kontrolle der Umsetzung der im Ausführungsprojekt festgelegten Vorgaben.

Die Kontrollen auf der Baustelle setzen sich im Wesentlichen zusammen aus:

- Übereinstimmung der eingesetzten Materialien mit den laut Planung vorgesehenen Materialien
- Kontrolle der eingesetzten Gerätschaften und Messinstrumente z.B.: durch Überprüfen der Eichungszertifikate der Manometer und der Durchflussmengenähler
- Kontrolle der eingesetzten Suspension und deren Eigenschaften z.B.: Viskosität, Dichte, Fließgrenze, Kippzeit
- Kontrolle der Bohrgeometrie
- Überwachung der festgelegten Injektionsparameter und Abbruchkriterien wie z.B.: Druck und Menge
- Überprüfen der Zuverlässigkeit der elektronischen Datenregistrierung (Vergleich zwischen handschriftlichen Aufzeichnungen vor Ort mit den Injektionsprotokollen)
- Allgemeine Beobachtungen z.B.: Verformungen der Oberfläche, Austritte, Umweltauswirkungen
- Einhaltung der behördlichen Auflagen
- Arbeitszeiten und Mannschaftsstärken

Werden vor Ort im Zuge der Ausführung abweichende Randbedingungen gegenüber den Planungs- und Ausschreibungsgrundlagen festgestellt, sind Anpassungen / Änderungen der festgelegten Vorgehensweise vorzunehmen.

Bei Abweichungen sind auf jeden Fall der Planer und der Experte zu konsultieren und vom AG die erforderlichen Entscheidungen zu treffen.

Der Informationsfluss und die Verantwortlichkeiten zwischen dem AG und dem AN sowie den Hierarchieebenen müssen eindeutig z.B.: in Form von Arbeitsanweisungen geregelt sein.

Die Bauüberwachung überprüft die korrekte Umsetzung der Arbeitsanweisungen.

Alle relevanten Bohr- und Injektionsparameter sind elektronisch zu erfassen und bearbeitbar abzuspeichern. Die Bauüberwachung überprüft die Auswertung und Darstellung der aufgezeichneten Parameter. Injektionsprotokolle sind von der Bauüberwachung auf deren Übereinstimmung mit den planlich festgelegten bzw. den im Zuge der Ausführung angepassten Injektionsparametern zu prüfen. Es wird geprüft, ob beispielsweise die Abbruchkriterien eingehalten worden sind.

Weiter muss anhand von handschriftlichen Notizen vor Ort (z.B.: Notieren von Druck, Menge, Durchflussmenge zum Zeitpunkt) die Zuverlässigkeit der Datenregistrierung kontrolliert werden.

Der Nachweis des Injektionserfolges, der in der Planung und in weiterer Folge im Bauvertrag überprüfbar definieren ist, wird von der Bauüberwachung verifiziert.

Der Nachweis des Injektionserfolges kann in der Regel nur indirekt geführt werden. Hierfür eignen sich beispielsweise Wasserabpressversuche, Ramm- bzw. Drucksondierungen, Kernbohrungen, Bohrlochaufweitungsversuche, die Auswertung der eingepressten Injektionsmengen und des Erreichungsgrades der Abbruchkriterien. In der Regel ist die Gewinnung von prüfbaren Injektionskörperproben (Kernbohrungen) aus dem Untergrund nicht möglich. Die Bestimmung des Zementgehaltes an Proben des injizierten Baugrundes erlaubt Rückschlüsse auf bodenmechanische sowie bodenphysikalische Kennwerte. Bei Abdichtmaßnahmen erlauben großräumige Beobachtungen des Berg- bzw. Grundwasserspiegels eine Beurteilung der Gesamtwirkung.

Daher ist bei der Festlegung der Nachweismethode des Injektionserfolges auf die technische Umsetzbarkeit und auf die Aussagekraft der vorgeschlagenen Methode zu achten.

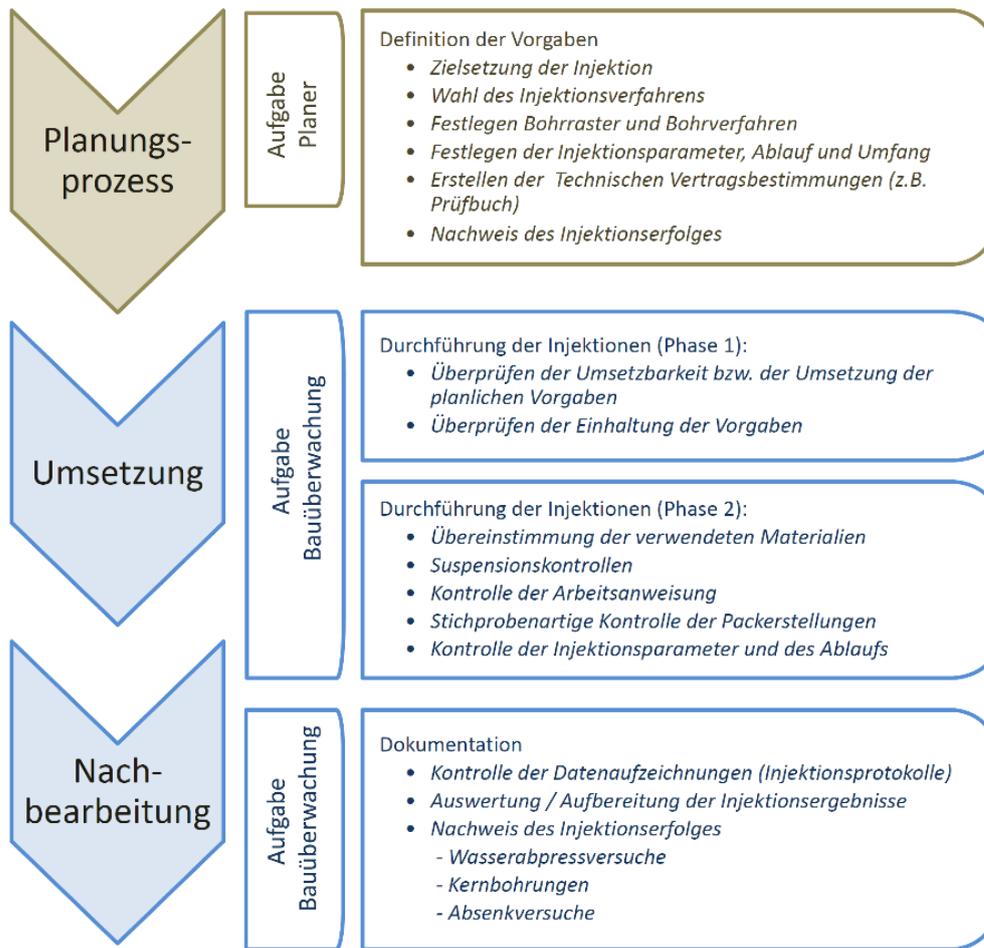


Abbildung 27. Schematische Darstellung der Aufgaben der Bauüberwachung

10. AUFZEICHNUNGEN

Die Verfahrensanweisung für die Umsetzung der Injektionsversuche und –arbeiten muss, über die in der EN 12715 (2001) enthalten Punkte hinausgehend, für plausible Fälle Vorgangsweisen enthalten. Für alle Beteiligten muss klar erkennbar sein, was eine Abweichung vom SOLL-Verhalten darstellt und wie darauf zu reagieren ist. Die Verfahrensanweisung muss für die einzelnen Hierarchieebenen (Projektleiter bis Pumpenfahrer) entsprechend differenziert und verständlich ausgestaltet werden. Die Verfahrensanweisungen sollten auch in einem Flussdiagramm dargestellt werden. Dabei sind auch die Kommunikationswege und Kompetenzen (die fachliche Kompetenz und die Entscheidungskompetenz sollte jeweils in einer Person vereinigt sein) zu berücksichtigen.

Die eingetretenen Ereignisse und Aufzeichnungen sind von Fachkundigen (je einer auf AG und einer auf AN Seite) zu sichten und zu interpretieren. Auf Basis der Interpretation ist die Verfahrensanweisung zu bestätigen oder ggf. anzupassen. In der Anfangsphase und Versuchsphase muss diese Sichtung und Interpretation zu mindestens täglich erfolgen. Der Planer und der Geotechniker/Geologe sind dabei miteinzubeziehen.

Die Injektionsparameter müssen digital aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungen müssen unabhängig vom Betrieb der Injektionspumpen stattfinden. Zumindest müssen folgende Injektionsparameter aufgezeichnet werden:

- Pumpe (Nummer)
- Art der Suspension
- Bohrloch (Name)
- Passe
- Druck (Betriebsdruck besser Druck am Bohrlochmund)
- Rate [l/min] und
- Injektionsmenge [l]

Diese müssen mit einem Zeitstempel [Datum; Stunde:Minute: Sekunde] versehen in einem weiterbearbeitbaren Dateiformat (z.B.: CSV) täglich dem AG übergeben werden. Diese Aufzeichnungen sind für eine Beurteilung des Injektionserfolges unerlässlich.

Bei Austritt von Berg- bzw. Grundwasser aus den Injektionslöchern ist die Menge [l/s bzw. min], der Druck, die Temperatur und ggf. pH-Wert und die Leitfähigkeit zu messen und entsprechend zu dokumentieren.

Die Daten, vor allem der Injektionsdruck (Injektionsdruck am Bohrlochmund besser Ruhedruck), die Injektionsmengen und der Abbruchgrund (z.B.: Austritt, Erreichungsgrad des verwendeten Abbruchkriteriums), sind auf jeden Fall laufend auch in einer übersichtlichen gut interpretierbaren Form (ggf. räumlich) und maßstäblich in Bezug die Lage des künftigen Bauwerks darzustellen.

11. BESONDERE ANFORDERUNGEN

Keine Ergänzungen

12. VERGÜTUNGSMODELLE

Weil die leistungs- und kostenrelevanten Zusammenhänge, wie Anzahl, Gleichzeitigkeit und Auslastung der Injektionspumpen, Wichte der Suspension, Pumprate und Abbruchkriterien in der Planung, Leistungsbeschreibung und Leistungsverzeichnis, nicht ausreichend eindeutig, vollständig und neutral beschrieben werden können, ist für Injektionsarbeiten eine auf Ungewissheit ausgelegte Form der Vergütung zu wählen. Eine Pauschalierung der Leistung stellt folgerichtig die ausgesprochene Ausnahme und eine Risikozuordnung zu dem Auftragnehmer dar.

Grundsätzlich sehen Regelwerke für die Vergabe von Bauleistungen in Abhängigkeit von Art, Güte, Umfänge und Umstände der Leistungserbringung dazu folgende Zusammenhänge für die Wahl der Vergütung vor:

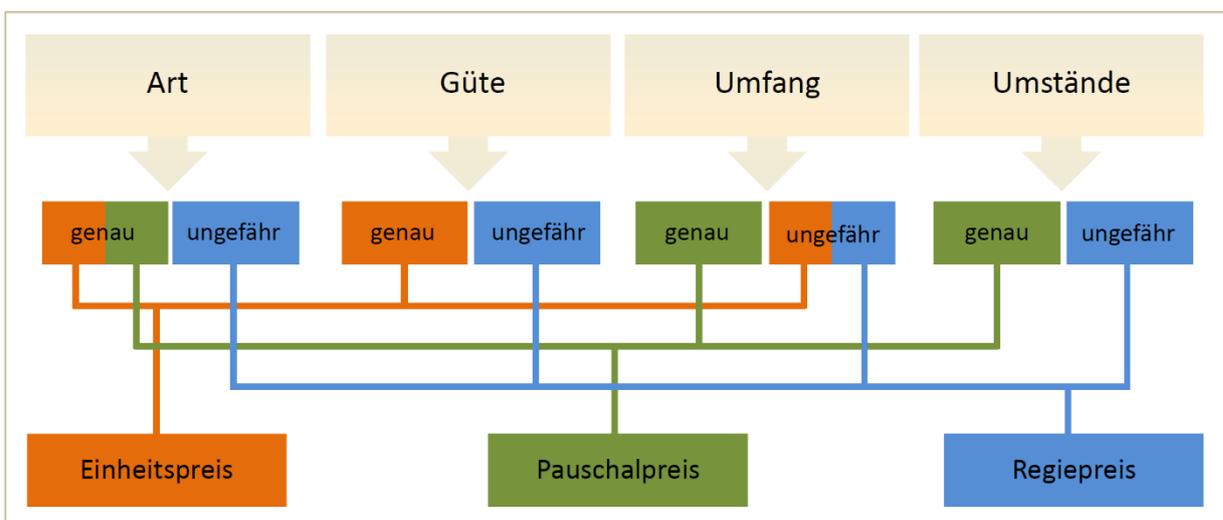


Abbildung 28. Wahl der Vertragsart je nach Wissensstand (Ganster, 2001)

Für die Vertragsgestaltung von Injektionen wird dabei klar, dass auf jeden Fall auch **zeitgebundene LV-Positionen explizit ausgewiesen** werden müssen. Dies deswegen, weil zu Art, Güte, Umfang und Umstände der Leistungserbringung im Regelfall keine genauen Angaben gemacht werden können und darüber hinaus der Bauherr auch im Zuge der Bauabwicklung steuernd Einfluss nimmt.

Je nach (zunehmender) Tiefe und Detailliertheit der Erkundungsmaßnahmen bzw. je nach (zunehmender) Intensität der Einflussnahme auf die Ausführung, bieten sich nämlich zwischen der funktionalen Pauschalierung (Pauschalpreis) und der Übernahme aller Kosten (Regiepreis) zusätzlich eines Unternehmenszuschlags eine Reihe von Vergütungsmodellen an, die teilweise auch in den Regelwerken dargestellt sind.

Tabelle 16. Vertragsart versus Erkundungsstand (Stadler, Semprich, 2009)

Grad der Einflußnahme →

	pauschaliert		DIN 18301 und DIN 18309		"STILFOS"	Selbständige Regie	SKEV	Quelle/ Bezeichnung
funktional	m ³ Boden lfm Tunnel	lfm Bohrg. m ³ Boden Versuch	lfm. Bohrg. Pumpen- Stunde Prüfungen Stoffe	BGK lfm. Bohrg. Pumpen-Std. Stoffe Versuch	BGK Ger. Miete/Mo. Personal/Std Leistung je VE Stoffe Energie, etc.	BGK Ger. Miete/Mo. Personal/Std Betriebsstunde Stoffe Energie, etc.	Erstattung der nachweislichen Selbstkosten zuzüglich GZ	Vergütungs- elemente

← **Grad der Erkundung**

Je mehr der Bauherr auf Konstruktion und Ausführung Einfluss nimmt und umso geringer die Erkundungstiefe ist, umso mehr steigt die Ungewissheit der Ermittlung der für die Leistungserstellung relevanten Kosten.

Die Vergütungsmöglichkeiten reichen somit von der problematischen funktionalen Ausschreibung oder Pauschalierung, über die Einheitspreis-Definitionen der DIN 18301 und ehem. ON 2270 bis zu dem zeit- und leistungsorientierten Modell StilfOs, bzw. der klassischen Regie oder gar dem Direct Cost Reimbursement Contract (Kostenerstattungsvertrag).

Ein standardisierendes Leistungsverzeichnis wird etwa in Ground Improvement III (Kirsch & Bell, 2011) empfohlen, welches als Mischform (Regie, Einheitspreis und Pauschale) gute Anhaltspunkte zu einer nützlichen Struktur und Detailliertheit von zu wählenden Positionen bietet (siehe Anhang A.3.1).

13. ANHANG

ANHANG A.2 (INFORMATIV) MESSUNG VON INJEKTIONSPARAMETERN

Anhang A.2.1: GIN Kriterium

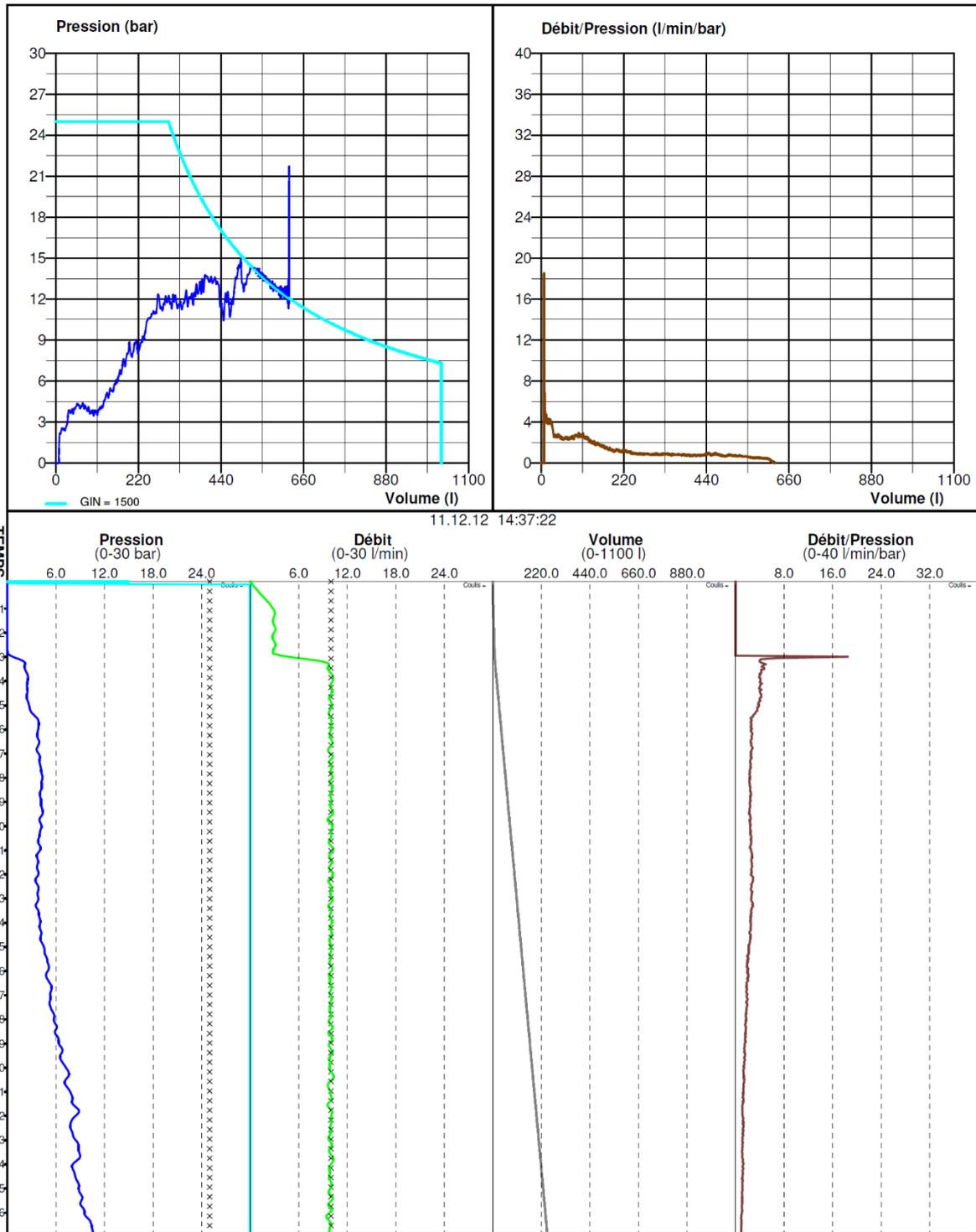
Anhang A.2.2: Druck/Menge Kriterium

ANHANG A.3 (INFORMATIV) VORSCHLAG LEISTUNGSVERZEICHNIS FÜR INJEKTIONSARBEITEN

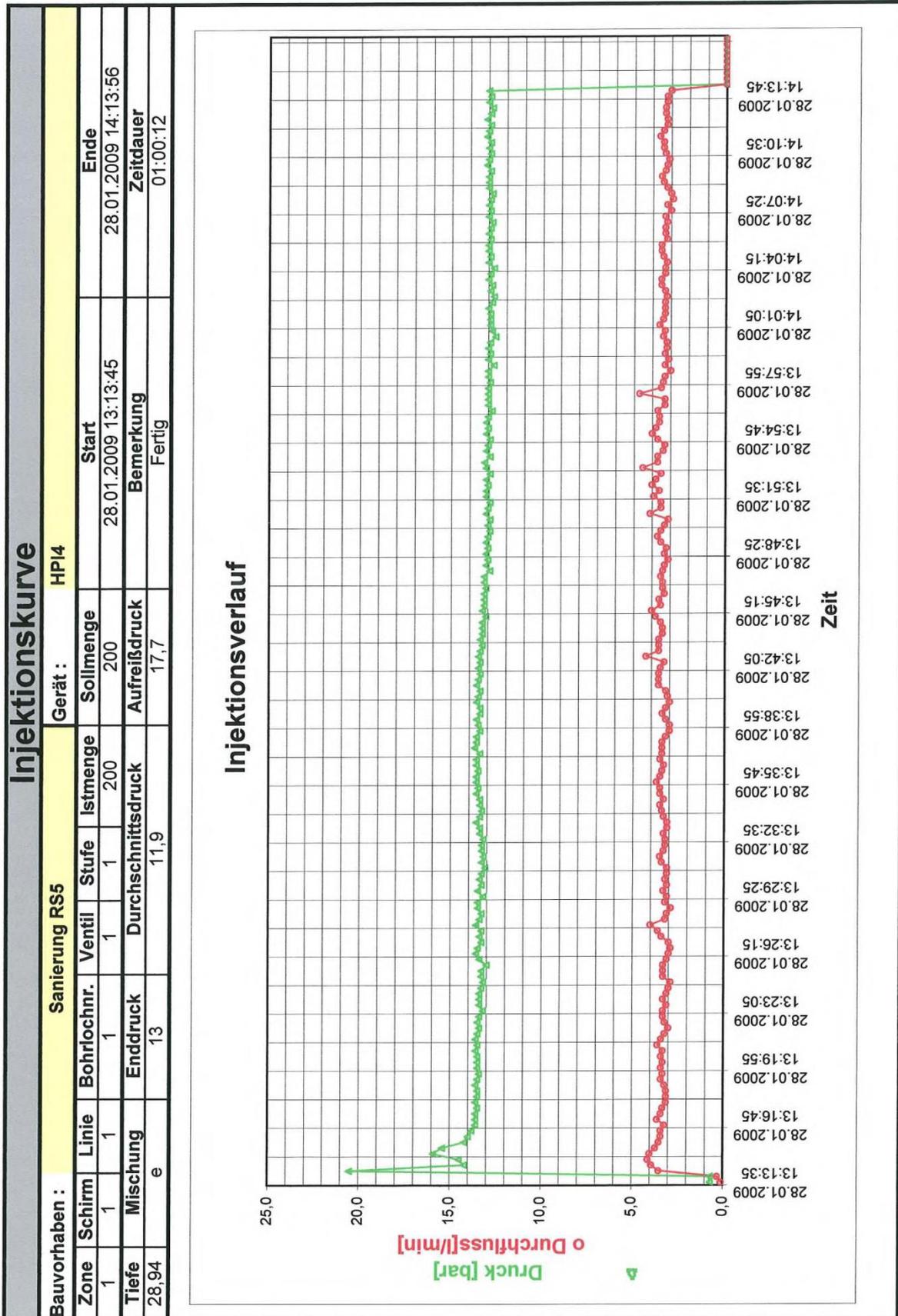
Anhang A.3.1: Vorschlag Leistungsverzeichnis für Injektionsarbeiten

Anhang A.3.2: Checkliste für Planung von Injektionsarbeiten

ANHANG A.2.1: GIN KRITERIUM NACH LOMBARDI



ANHANG A.2.2: DRUCK/MENGEN KRITERIUM



ANHANG A.3.1: VORSCHLAG LEISTUNGSVERZEICHNIS FÜR INJEKTIONSARBEITEN

Positionsnr.	Obergruppe	Hauptgruppe	Untergruppe	Einheit	Menge	Preis	Einheitspreis
1.01	Transport, Einrichtung, Abtransport	Generelle Einrichtung	Büros, Lagerräume, Aufenthaltsräume, Unterkünfte, Maschinen/Werkstatt, Fahrzeuge, etc.	Pauschale			
1.02		Bohr- & Injektionsanlagen	Dosierungs-/Mischanlage	Pauschale			
1.03			Bohrgerät (Typ)	Pauschale			
1.04			Injektionspumpen (einzeln, oder in Container)	Pauschale			
1.05			getrennte Mess- und/oder Prüfeinheit	Pauschale			
1.06		Zusatzequipment	Typ entweder wie oben angeführt oder weitere, gesondert spezifizierte	Pauschale			
1.091	Umstellen Bohranlagen & andere Einrichtung gem. Pos 1.02 bis 1.06	innerhalb des Projektgebiets	je Position 1.02-1.06	Pauschale			
1.092		zwischen Projektgebieten	je Position 1.02-1.06	Pauschale			
2.01	Miete Anlagen und Geräte	Generelle Einrichtung		Kalenderwoche			
2.02		Bohr- und Injektionsanlagen, Versuchs- & Messgeräte	je Position (wie oben)	Kalenderwoche			
3.0	Stilliegezeit/Ausfälle (wie spezifiziert)	Personal (Kategorie)	vor Ort	Arbeitsstunden			
4.00	Einrichten Bohranlage über Bohrloch						
4.01		Umbau/Versatz > 2,5 m		Stk			
4.02		ohne Umbau/Versatz		Stk			
5.00	Bohren für Kerngewinn oder Injektion, in allen Bodenarten, alle Richtungen und Neigungen, Bohr-Ansatzpunkt <2.0m über Arbeitsfläche						
5.01		Kernbohrung, Durchmesser 75-115 mm					
5.011			0-15 m	m			
5.012			15-30 m	m			
5.013			30-60 m	m			
5.014			Zuschlag für Verrohrung	m			
5.02		Rotations-Schlagbohrung 56 bis 76 mm					
5.021			0-6 m	m			
5.022			6-12 m	m			
5.023			12-20 m	m			
5.03		Überlagerungsbohrung 115 bis 133 mm (in Lockerboden)					
5.031			0-15 m	m			
5.032			15-30 m	m			
6.01	Lieferung und Einbau sowie Ummantelung der Manschettenrohre (tubes a manchettes)	Rohre aus Normalstahl, 2" Durchmesser, Passenabstand 66 cm, inkl. Stoffe		m			
6.02	ditto in HDPE			m			
6.03	Beistellen, Warten, Setzen und Entfernen (Rauben)	Packer: alle Durchmesser, alle Tiefenstufen					
6.031		Einzelpacker		Stk			
6.032		Doppelpacker		Stk			
6.033		MPSP-mit aufblasbarem Packer		Stk			
6.034		Zirkulationspacker inkl. Rücklauf		Stk			
6.035		Aufblasbare Doppelpacker für Manschettenrohre		Stk			
7.0	Betreiben Injektionspumpe, inkl. Wiegung, Dosierung, Lagerung und Zuleitung von Injektionsmischungen aller Art, Betreiben Injektionspumpe unter Druck, elektronische Datenerfassung	Dokumentation von Druck, (Injektions)rate und -menge gem. Erfordernis nach EN 12715					
7.01		Arbeitsstunden einer einzelnen (ersten) Pumpe		H			
7.02		Arbeitsstunden einer zweiten Pumpe im gleichen Projektgebiet, gleichzeitig mit Betrieb der ersten Pumpe		H			
7.03		Arbeitsstunden einer dritten Pumpe im gleichen Projektgebiet, gleichzeitig mit Betrieb der ersten und zweiten Pumpe		H			
8.0	Material für Injektionsmischung						
8.01		Portlandzement (Blaine > 3.900 cm ³ /g)		to			
8.02		Ultrafeinzement (D ₈₀ < 12µm)		to			
8.03		Natrium-Bentonit		to			
8.04		Kalzium-Bentonit		to			
8.05		Natriumsilikat (flüssig, 38° Bé)		kg			
8.06		PU (1-Komponente)		kg			
8.07		PU (2-Komponenten)		kg			
8.09		Acrylat (gem. Vorschlag Bieter)		kg			
9.0	Bohrlochtests	Wasserabpressversuch in Fels (Lugeon), Durchlässigkeitsversuch in Lockermaterial (Lefranc), inkl. aller Pumpen, Rohrleitungen, Packer und Datenerfassung bzw. -dokumentation, alle Tiefenstufen		Stk			
Gesamt, netto				Währung			

ANHANG A.3.2: CHECKLISTE PLANUNG

In der Checkliste sind jene Punkte aufgezählt, die auf jeden Fall in der Planung abgebildet werden müssen.

Für die Injektionsplanung müssen zu wesentlichen Punkten entweder quantifizierbare Erkundungsergebnisse vorliegen, oder zumindest nachvollziehbare Aussagen dazu getätigt werden.

Der Nachweis des Injektionserfolges kann in der Regel nur indirekt geführt werden. Hierfür eignen sich beispielsweise Wasserabpressversuche, Ramm- bzw. Drucksondierungen, Bohrlochaufweitungsversuche (z.B.: Dilatometer), die Auswertung der eingepressten Injektionsmengen und des Erreichungsgrades der Abbruchkriterien. Vielfach ist die Gewinnung von prüfbaren Injektionskörperproben aus dem Untergrund nicht möglich.

Daher ist bei der Festlegung der Nachweismethode des Injektionserfolges auf die technische Umsetzbarkeit und auf die Aussagekraft der vorgeschlagenen Methode zu achten.

Checkliste Planung:

- Festlegung der Injektionsziele:
 - temporär oder permanent
 - Abdichtung/Reduktion Wasserzutritte
 - Veränderung der geomechanischen Eigenschaften
 - Setzungskompensation
- Prüfung des Injektionsergebnisses (Nachweis des Injektionserfolges):
 - Methoden und Verfahren
- Topografie:
 - Tiefenlage des zu injizierenden Bereiches
 - Primärspannungsverhältnisse
- Geologie/Geotechnik (siehe auch Kapitel 5.1, 5.3 und 5.4):
 - Gebirgsartenbeschreibung gemäß ÖGG RIL für geotechnische Planung von Untertagebauten oder Gleichwertiges
 - Verformbarkeit des Untergrundes, Kluftverhalten unter Druck
 - Systemskizzen zur prognostizierten Ausbreitung des Injektionsgutes gemäß 5.3
- Hydrogeologie (siehe auch Kapitel 5.2):
 - Modell für die Wasser- bzw. Suspensionswegigkeit im Fels (Festgestein); Anzahl, Orientierung und Verbindung von Trennflächenzwischenräumen (Klüfte); Angaben zur hydraulischen und geometrischen Öffnungsweite (Verteilung); Verformbarkeit des Felsverbands unter Injektionsdruck
 - Modell für ein Durchlässigkeitsprofil in Lockermaterial
 - Wasserandrang
 - Berg- bzw. Grundwasserdrücke
 - Durchlässigkeit, Transmissivität, bedingt Lugeon
 - Fließgeschwindigkeit des Berg- bzw. Grundwassers während der Injektion
 - Wasserchemie
 - Umwelteinflüsse

- Injizierbarkeit bzw. Penetrierbarkeit des Untergrundes (u.a. Newtonsche versus Bingham'sche Flüssigkeiten)
- Bohrbarkeit des Baugrundes:
 - Mögliche Bohrsysteme und -geschwindigkeiten
 - Parametererfassung während der Bohrung
 - Bohrlochstabilität
- Injektionsparameter:
 - Injektionsbetriebsdruck, wirksamen Injektionsdruck
 - Injektionsrate (Bandbreite), Maximale Menge je Passe
 - Abbruchkriterien, Haltedauer in Abhängigkeit des Packers
 - Injektionsgut (z.B.: Bindemittel, Kunststoffe, Schäume)
 - Vorgabe der rheologischen Suspensionsmischungen
 - Bohrschema, Injektionsablauf
- Randbedingungen:
 - Bescheidaufgaben für Injektionen und Umwelt: zulässige Mittel, zulässige Auswirkungen (temporär oder permanent)
 - Bauverfahren: ober oder unter Tag, während welcher Bauphase z.B.: Vortrieb
 - Infrastruktur, Platzverhältnisse, Entsorgung, Temperatur

14. LITERATURHINWEISE

- Bérigny, C.: Mémoire sur un Procédé d'Injection propre à prévenir ou arrêter les Filtration sous les Foundations des Ou-vrages Hydrauliques, Paris, 1832.
- Bonin, G.R.; Rombough, V.T.; Carter, T.G.; Jefferies, M.G.: Towards Better Injection Control and Verification of Rock Grouting. Proceedings 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, New Orleans, 2012.
- Bremen, R.: Injektionen als Bauhilfsmaßnahme. Fachtagung für Untertagbau - Swiss Tunnel Congress, Luzern, 2008.
- Cambefort, H.: Bodeninjektionstechnik. Bauverlag, 1969.
- Carter, T.G., Rombough, V., Jefferies, M., Dershowitz, W.: Aperture Controlled Grouting – Benefits of the Discrete Fracture Network Approach, DFNE 2014 – 136, 2014.
- Carter, T.G., Dershowitz, W., Shuttle, D.A. and Jefferies, M.J.: Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock, 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, 2012.
- Deere, D.U., Lombardi, G.: Grout Slurries thick or thin? - Issues in Dam Grouting. in Proceedings of the ASCE Convention, Denver, 1985.
- Kutzner, C.: Injektionen im Baugrund, Spektrum Akademischer Verlag, 1991.
- Ewert, F-K.: Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites, 1985.
- Ganster, M.: Vertrags- und Vergütungsmodelle für unvollkommen beschriebene Leistungen. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2001.
- Gabriel, P.: Abbruchkriterien bei Felsinjektionen - Eine vergleichende Analyse. Diplomarbeit, Technische Universität Wien - Institut für Geotechnik, 2016.
- Hudson, J.A.: Rock Mechanics Principles in engineering Practice. CIRIA/Butterworths, London, 1989.
- ISRM - Commission on Rock Grouting: Report on Grouting, 1996.
- Kainrath, A., Krenn, H., Adam, D.: Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand. Symposium Baugrundverbesserung, Wien, 2012.
- Kainrath, A., Adam, D., Krenn, H.: Verfahren zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften zementbasierter Injektionssuspensionen. Proceedings of XV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Wien, 2014.
- Kirsch K., Bell A., Ground Improvement, 3rd Edition, CRC Press (Taylor & Francis), 2013.
- Kohl, T.: Modellsimulation gekoppelter Vorgänge bei Wärmeentzug aus heißem Gebirge. Dissertation ETH Zürich, 1992.
- Kravetz, G.A.: Cement and clay grouting of foundations: the use of clay in pressure grouting. Proceedings ASCE - Soil mechanics and foundation division, 84, SM1, 1958.
- Kutzner, C.: Injektionen im Baugrund, Spektrum Akademischer Verlag, 1991.

Lombardi, G., Deere, D.: Grouting design and control using the GIN principle. International Water Power & Dam Construction, 1993.

Louis, C.: Strömungsvorgänge in kluftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. Veröffentlichungen des Institutes für Boden- und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 30, 1967.

Mitchell, J.K.: Stabilization of Soils for Foundations of Structures, 1970.

Pollard, R., Jones, W., Whitfield, J.: The use of transient pressure analysis at the Dounreay Shaft Isolation Project. Geomechanics and Tunneling, Vol. 2, Issue 5, 2009.

Prinz, H., Strauss, R.: Ingenieurgeologie. Springer Spektrum, 2011.

Reichl, I.: Fuzzy Logic Steuerung von Injektionen auf der Basis von Modellversuchen. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, 2000.

Sherard, J.L., Dunningan, L.P.: Basic properties of sand and gravel filters. Journal of Geotechnical Engineering 110, No. 6, 1984.

Schuler, U., Brauns, J.: Die effektive Porenöffnung körniger Erdstoffe - ein Kriterium für die Injizierbarkeit von Suspensionen. Geotechnik 23, No.4, 2000.

Schulze, B.: Neuere Untersuchungen über die Injizierbarkeit von Feinstbindemittel-Suspensionen. International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, 1993.

Schulze, B.: Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein, Bautechnik 79, Heft 8 2002: 499-598.

Sommer, R.: Standsicherheit von Felsböschungen beim Lastfall schnelle Absenkung, 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau, Stuttgart, 2012.

Stadler, G.: Transient pressure analysis of RODUR epoxy grouting in concrete and rock at Kölnbrein dam, Austria. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1992.

Stadler, G., Semprich, S.: Grundbautaschenbuch, ed. Weinheim: Ernst & Sohn, Wiley, Vol. 2, 7. Auflage, 2009.

Stadler, G., Krenn, H.: Permeation Grouting, Ground Improvement, Third Edition, CRC Press, 2013.

Stadler, G., Reichl, I., Carter, T.: A how to guide to a successful grouting process! Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 2015.

Stadler [unveröffentlichte Mitteilung] 1991 (Abbildung 18)

Stille, H.: Rock Grouting - Theories and Applications. 2015.

Witherspoon, P.A., Wanf, J.S.Y., Iway, K., Gale, J.E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resource Res. 16, 1980.

Zettler, A.: A Hybrid Grouting Control Algorithm Based On Fuzzy Logic Tuned By A Neural Network. Dissertation, Technische Universität Wien - Institut für Geologie, 1998.

15. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1.	Bestimmung der Fließgrenze anhand verschiedener Verfahren (unveröffentlicht Kainrath, 2016)	7
Tabelle 2.	Empfehlungen für Erkundungsparameter (adaptiert nach Stadler, unveröffentlicht)	17
Tabelle 3.	Feld- und Laborversuche zur Erfassung injektionsspezifischer Parameter.....	19
Tabelle 4.	Verhältnisse zwischen geohydraulischen Kennwerten (ISRM, 1996)	20
Tabelle 5.	Einteilung anhand der Druckfestigkeit (Zementfestigkeitsklassen: EN 197-1)	28
Tabelle 6.	Einteilung Normzemente anhand der Zusammensetzung	29
Tabelle 7.	Parameter zur Charakterisierung von Suspensionen	31
Tabelle 8.	Erfahrungswerte für Portlandzementsuspensionen	33
Tabelle 9.	Prüfverfahren zur Eignungs- und Kontrollprüfung für Suspensionen.....	34
Tabelle 10.	Richtwerte für die Injizierbarkeit verschiedener Autoren	38
Tabelle 11.	Partikelgröße verschiedener Zemente bei 85% Siebdurchgang	38
Tabelle 12.	Erfahrungswerte für Ziel-Durchlässigkeiten in Fels (unveröffentlicht Stadler, 2016)	40
Tabelle 13.	Übersicht über Verfahren und Methoden angepasst und adaptiert aus: Grundbau- taschenbuch 6. Auflage	42
Tabelle 14.	Richtwerte für Bohrlochabstände (unveröffentlicht Stadler, 2016)	43
Tabelle 15.	Abschätzung des Injektionsaufwandes für Felsinjektionen	57
Tabelle 16.	Vertragsart versus Erkundungsstand (Stadler, Semprich, 2009)	64

16. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1. Injektionsarbeiten zu Pionierzeiten: Aufschlussarbeiten KW Kaprun, Bohrgerät CRAELIUS CX 42, INSOND (1950).....	1
Abbildung 2. Schematische Darstellung der hydraulischen und der geometrischen Kluftweite (Kohl, 1992)	7
Abbildung 3. Schema einer Druckabfallkurve (Reichl, 2000)	11
Abbildung 4. Schemaskizze zu Viskosimeterversuch (Kainrath, 2012)	13
Abbildung 5. Flussdiagramm Ablauf einer Injektionsmaßnahme	15
Abbildung 6. Fließverhalten verschiedener Flüssigkeiten (Kainrath, 2014)	21
Abbildung 7. Fließkurve thixotroper Flüssigkeiten (unveröffentlicht Stadler, 2016)	22
Abbildung 8. Abstraktion des bodenhydraulischen Modells (Sommer, 2012)	22
Abbildung 9. Trennflächensystem mit Trennflächenabstand, Öffnungsweite, Oberflächenbeschaffenheit und dessen Verschnitt mit einem Bohrloch (Hudson, 1989).....	23
Abbildung 10. Abstraktion des hydraulischen Modells im Festgestein (Sommer, 2012)	24
Abbildung 11. Veranschaulichung einer allgemeinen Trennfläche (Louis, 1967).....	24
Abbildung 12. Unterschiedliche Ausbreitung des Injektionsgutes um die Einpressstelle (E) abhängig von der Ausbildung und Beschaffenheit der Trennflächen sowie dem vorherrschenden Spannungszustand im Gebirge (Ewert, 1985)	26
Abbildung 13. Anwendungsbereiche der Injektionsmittel /-güter in Abhängigkeit der Sieblinien des Baugrundes (unveröffentlicht Leitner, 2016).....	37
Abbildung 14. Porenengstellenverteilung aus (Schuler und Brauns, 2000)	39
Abbildung 15. Transmissivität, Leitfähigkeit und hydraulischer Kluftweite (ISRM, 1996)	40
Abbildung 16. Schematische Darstellung der interaktiven Zusammenhänge zwischen Injektionsdruck, Fließgrenze, Reichweite und Rate (Stadler, 2016).....	44
Abbildung 17. Mögliche Verläufe des scheinbaren Lugeon-Werts (Gabriel, 2016)	46
Abbildung 18. Verlauf des q/p-Verhältnisses (Gabriel, 2016; nach Stadler unveröffentlichte Mitteilung und Kutzner, 1991).....	47
Abbildung 19. Beispiel einer Aufzeichnung für Real Time Grouting Control (RTGC) (Gabriel 2016; nach Stille et al. 2015)	48
Abbildung 20. Beispiel einer Injektion nach der GIN-Methode (Gabriel, 2016)	49
Abbildung 21. Zuordnung von Suspensionsmischungen zu Durchlässigkeiten in den Passen (Carter et al., 2014)	50
Abbildung 22. q/p-Wert aufgetragen gegen die Injektionszeit (Gabriel, 2016; nach Carter et al., 2014)	50
Abbildung 23. Darstellung einer Injektion. Die grüne Linie stellt die Grenze zwischen Schädigung des Gebirges und sicherem Injizieren dar. (Bonin et al., 2012)	51
Abbildung 24. Schematische Darstellung vom Injektionspumpendruck und Druckabfallkurven (Gabriel, 2016; nach Stadler, 1992)	51
Abbildung 25. Druckabfälle und die dazugehörige Druckverteilung in der Kluft (Reichl, 2000) .	52

Abbildung 26. Parameter zur Steuerung der Injektion mit der PSG-Methode (Gabriel, 2016; nach Reichl, 2000)53

Abbildung 27. Schematische Darstellung der Aufgaben der Bauüberwachung60

Abbildung 28. Wahl der Vertragsart je nach Wissensstand (Ganster, 2001).....63

17. FORMELVERZEICHNIS

(1) Cubic law	6
(2) Transmissivität	6
(3) Spezifische Bohrenergie.....	22
(4) Gesetz von Darcy	24
(5) Gesetz von Darcy	27
(6) Reichweite in einer idealen ebenen und horizontal geöffneten Trennfläche.....	44
(7) Maximales Injektionsvolumen in einer idealen ebenen und horizontal geöffneten Trennfläche.....	44
(8) Normal auf die Trennfläche wirkende Hebekraft.....	44
(9) Scheinbarer Lugeon Wert	47

AUSTRIAN
SOCIETY FOR
GEOMECHANICS

ÖSTERREICHISCHE
GESELLSCHAFT FÜR
GEOMECHANIK

Innsbrucker Bundesstraße 67
5020 Salzburg, Austria

Tel.: +43 662 875519
Fax: +43 662 886748
H.: www.OEGG.at
E.: Salzburg@OEGG.at