



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Abbruchkriterien bei Felsinjektionen

Eine vergleichende Analyse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

und

Proj.Ass. Dipl.-Ing. **Adrian Kainrath**

E220

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Patrick Gabriel, BSc

1025773

Hellwagstraße 4-8/2/66, 1200 Wien
Ahornweg 4, 4171 St. Peter am Wimberg

Wien, am 12.09.2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Patrick Gabriel', written over a horizontal line.

(Patrick Gabriel)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Geotechnik – Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik – an der Technischen Universität Wien. Mein Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Geotechnik umzusetzen. Mein Dank gilt insbesondere Proj.Ass. Dipl.-Ing. Adrian Kainrath für seine ausgezeichnete Betreuung während all meiner wissenschaftlichen Arbeiten an der Technischen Universität Wien.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Firma Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H. – insbesondere bei Herrn Ing. Kurt Kogler und Herrn Dipl.-Ing. Johann Hechenbichler – bedanken, die mir zum einen während des Studiums ein Nebeneinkommen auf technisch herausfordernden interessanten Baustellen ermöglichten und zum anderen mir eine zusätzliche fachspezifische Ausbildung in der Injektionstechnologie ermöglichten. Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang auch dem Technischen Büro der Zentralen Technik Wien.

Ein spezieller Dank gebührt meinem Vater Reinhold und meiner Mutter Alexandra, die mir – auch bei drei gleichzeitig in Ausbildung befindlichen Kindern – ein Studium an der Technischen Universität Wien ermöglichten. Für die angenehme Studienzeit möchte ich mich schließlich bei all meinen Freunden und Kollegen bedanken und zu guter Letzt bei meiner Freundin Julia, die mir während des Studiums und während des Schreibens der Abschlussarbeit immer beistand.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden weltweit übliche Abbruchkriterien bei Felsinjektionen vergleichend analysiert. Unter Felsinjektionen versteht man das Einpressen eines Injektionsmittels in Felsklüfte. Abbruchkriterien sind dabei Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit das Injektionsziel als erreicht gilt und die Injektion beendet werden kann. Während der Injektion stehen für die Beurteilung lediglich der Injektionsdruck am Bohrlochmund und die Durchflussrate an der Injektionspumpe zur Verfügung. Auf Grundlage dieser gemessenen Parameter müssen die Abbruchkriterien erstellt werden. In der Praxis haben sich dazu bis heute verschiedene Methoden wie die Amenability Theory, die GIN-Methode, die ACG-Methode, die TPA-Methode, die PSG-Methode oder die RTGC-Methode etabliert. Die unterschiedlichen Methoden werden in dieser Arbeit hinsichtlich der zugrunde liegenden Theorie und der praktischen Anwendung analysiert und deren Voraussetzungen, Eingangsdaten, Abbruchkriterien sowie Vor- und Nachteile beschrieben. Es wird aufgezeigt, dass es mit den Ansätzen in den unterschiedlichen Methoden tatsächlich möglich ist, alleine durch Betrachtung des Injektionsdrucks und der Durchflussrate Aussagen über die Zustände im Kluftsystem zu treffen. In weiterer Folge werden die unterschiedlichen Methoden miteinander verglichen und auf Basis der Analyse beurteilt.

Abstract

This thesis analyses common stop criteria in rock grouting. Grouting of rock is the process of injecting grout into jointed rock mass. Stop criteria are terms that need to be fulfilled in order to reach the aim of the grouting and to have the grouting measures completed. During grouting only the pressure at the top of the borehole and the flow rate at the injection pump can be used to evaluate the process. The stop criteria must be set up based on these two parameters. Until now different methods like the amenability theory, the GIN-method, the ACG-method, the TPA-method, the PSG-method or the RTGC-method have been developed. In this thesis the methods are analysed regarding the theory behind the method, its practical application, technical requirements, input data as well as the criteria for the stop itself. Different approaches in various common methods allow one to issue statements on the quality of the grouted fractures only by watching the pressure and the flow rate. Furthermore this thesis compares and assesses the common methods based on their advantages and disadvantages.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zu Felsinjektionen	3
2.1 Überblick	3
2.2 Komponenten einer Felsinjektion	4
2.3 Begriffsbestimmungen	5
2.4 Rheologische Eigenschaften (zementbasierter) Suspensionen	7
2.5 Ausbreitung von Suspension in Klüften	8
2.6 Wasserabpressversuche (WAPs)	10
2.7 Klassische Abbruchkriterien	21
3 Amenability Theory (Apparent-Lugeon-Methode)	25
3.1 Beschreibung	25
3.2 Praktische Anwendung der Methode	27
3.3 Vor- und Nachteile	30
3.4 Zusammenfassung	33
4 Grouting Intensity Number (GIN-Methode)	35
4.1 Beschreibung	35
4.2 Praktische Anwendung der Methode	40
4.3 Vor- und Nachteile	45
4.4 Zusammenfassung	47
5 Aperture Controlled Grouting (ACG-Methode)	49
5.1 Beschreibung	50
5.2 Praktische Anwendung der Methode	55
5.3 Vor- und Nachteile	58
5.4 Zusammenfassung	60
6 Transient Pressure Analysis (TPA-Methode)	61
6.1 Beschreibung	61
6.2 Praktische Anwendung der Methode	74
6.3 Vor- und Nachteile	78
6.4 Zusammenfassung	80

7	Pressure Sensitive Grouting (PSG-Methode)	81
7.1	Beschreibung	82
7.2	Praktische Anwendung der Methode	93
7.3	Vor- und Nachteile	98
7.4	Zusammenfassung	100
8	Real Time Grouting Control (RTGC-Methode)	103
8.1	Beschreibung	104
8.2	Praktische Anwendung der Methode	114
8.3	Vor- und Nachteile	121
8.4	Zusammenfassung	124
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
9.1	Zusammenfassung	125
9.2	Vergleich der unterschiedlichen Methoden	127
9.3	Ausblick	132
10	Exkurs: Abbruchkriterien im Lockergestein	135
10.1	Kugelförmige Ausbreitung	135
10.2	Zylindrische Ausbreitung	136
10.3	Abbruchkriterien	137
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	142
	Literaturverzeichnis	143

Einleitung

Aufgrund der fortschreitenden Urbanisierung und der damit einhergehenden Verringerung der Verfügbarkeit von freien Bauplätzen müssen Bauwerke oftmals auf oder in dafür nicht geeigneten Untergründen gebaut werden. Der Untergrund ist nur in den seltensten Fällen homogen und zeichnet sich vorwiegend durch Diskontinuitäten aus. Beim Lockergestein definieren sich diese Diskontinuitäten durch Poren, beim Festgestein durch Klüfte. Viele dieser Klüfte können bei der Herstellung und Betrieb eines Bauwerks – zum Beispiel beim Bau eines Tunnels oder Betrieb einer Talsperre – erhebliche Probleme verursachen, da sie für gewöhnlich wasserführend sind. Zur Abdichtung dieser Klüfte werden Felsinjektionen ausgeführt. Zum Beispiel kann durch eine Herstellung eines Dichtschirms bei Talsperren oder durch eine Vortriebssicherung beim Tunnelbau die Durchlässigkeit des Gebirges auf ein verträgliches Maß reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit behandelt Abbruchkriterien bei Felsinjektionen. Anders als der Begriff suggeriert, behandelt die Thematik der Abbruchkriterien nicht ein unvermitteltes, frühzeitiges Beenden von Felsinjektionen. Vielmehr sind darunter Antworten auf die folgenden Fragen zu verstehen:

Wann ist ein Injektionsziel erreicht?

Welche **Kriterien** bzw. Bedingungen müssen erfüllt sein, damit eine Felsinjektion beendet bzw. **abgebrochen** werden kann?

Gerade im Hinblick auf vertragliche Angelegenheiten oder die Wirtschaftlichkeit einer Injektion ist es wichtig, in erster Linie ein Injektionsziel zu definieren und dieses bei der Injektion zu erreichen. In der Vergangenheit wurde die Überprüfung des Injektionserfolgs in der Regel mit Wasserabpressversuchen durchgeführt. Mit der Entwicklung der digitalen Injektionsaufzeichnung wurde in den letzten Jahren zunehmend die Echtzeitaufzeichnung, wie die Protokollierung des Injektionsdrucks und der Durchflussrate, verwendet, um den Injektionserfolg dadurch nachzuweisen.

Das gewünschte Injektionsziel wie eine Reichweite der Suspension in der Kluft oder der Abdichtungserfolg kann während des Injektionsvorgangs nicht direkt gemessen werden. Das Problem dabei ist, dass die Trennflächegeometrien nicht genau bekannt sind und auch das Kluftsystem während der Injektion nicht beobachtet werden kann, um einen Füllungsgrad zu bestimmen. Zusätzlich können über den tatsächlich wirkenden Injektionsdruck in den Klüften nur vage Vermutungen angestellt werden. Für Injektionsaufzeichnungen stehen lediglich das Manometer am Bohrlochmund und der Durchflussmesser an der Injektionspumpe zur Verfügung. Von diesen Messwerten alleine müssen also alle Aussagen über die Reichweite der Injektion, den Abdichtungserfolg oder den Füllungsgrad der Klüfte abgeleitet werden.

Während der Injektion gibt Fels kein *natürliches* Abbruchkriterium vor. Der Injektionsdruck und die Durchflussrate könnten theoretisch bis zum Versagen des Felses laufend erhöht werden – vorausgesetzt die Injektionspumpe hat die notwendige Kapazität. Jedoch ist das alleinige Ziel einer Injektionsmaßnahme das Abdichten bzw. das Füllen der Klüfte. Schädliche Aufweitungen bestehender Klüfte oder gar ein Aufreißen der Klüfte sollen auf jeden Fall verhindert werden. Dies führt zu einem Widerspruch: Einerseits sollte der Injektionsdruck hoch genug sein, um eine möglichst effektive Injektion durchzuführen, andererseits aber eben nicht zu groß sein, um die Klüfte aufzuweiten oder aufzureißen. Für eine Berücksichtigung dieser Randbedingungen und der Definition eines Injektionsziels haben sich in der Praxis weltweit verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Abbruchkriterien entwickelt. In diesen Methoden werden alleine die Daten aus den Echtzeit-Injektionsaufzeichnungen verwendet, um den Injektionserfolg bzw. die vorgegebenen Kriterien nachzuweisen. Somit müssen zur Verifizierung des Injektionsziels nicht unbedingt Wasserabpressversuche durchgeführt werden.

Vielen Ausführenden, Planern und Experten dürften die Bezeichnungen der verschiedenen Abbruchkriterien zwar geläufig, die Details oder die genaue Anwendung dieser Methoden jedoch nicht bekannt sein. Bis dato gibt es kein gesammeltes Werk, das die Verwendung der verschiedenen Abbruchkriterien beschreibt und analysiert. Diese Arbeit soll eine Übersicht der Abbruchkriterien für die praktische Anwendung bieten und Hinweise auf Vor-, Nachteile und Eigenheiten der Kriterien geben. Das Ziel ist ganz klar, die Disziplin der Abbruchkriterien bei Felsinjektionen für Ausführende, Planer und Experten leichter verständlich zu machen. Neben der zugrunde liegenden Theorie wird vor allem die praktische Anwendung jeder Methode aufgezeigt.

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Zu Beginn werden alle notwendigen Grundlagen zu Felsinjektionen erläutert, um die gängigen Abbruchkriterien hinreichend genau beschreiben und analysieren zu können. Danach wird jeder Methode ein eigenes Kapitel gewidmet, in dem die Abbruchkriterien beschrieben und die praktische Anwendung dargestellt wird. In der Zusammenfassung werden diese Methoden hinsichtlich deren Voraussetzungen, Eingangsdaten, Abbruchkriterien sowie Vor- und Nachteile verglichen. Nach dieser Zusammenfassung werden im Ausblick Empfehlungen für die praktische Anwendung sowie Anregungen für weitere wissenschaftliche Arbeiten gegeben. Der Vollständigkeit wegen befindet sich am Ende ein Exkurs zu Abbruchkriterien im Lockergestein.

Grundlagen zu Felsinjektionen

2.1 Überblick

Unter *Injektionen* versteht man das Einpressen eines Injektionsmittels in Hohlräume, Klüfte oder Poren des Untergrunds. Sie können dabei zur Abdichtung, Verfestigung oder zur Verdichtung dienen. Dabei gibt es mehrere Arten von Injektionen: [25, 2]

- Eine **Auffüllinjektion** (verdrängungsfreie Injektion) dient der Abdichtung oder Verfestigung vorhandener Hohlräume, Klüfte oder Poren ohne wesentliche Strukturänderung des Kluft- und Porensystems. Dafür muss der Druck niedrig genug sein, um eine nennenswerte Verformung des Baugrunds ausschließen zu können. Diese Art der Injektion wird zum Beispiel dafür verwendet, um ein Bauwerk abzudichten. [25, 2]
- Eine **Aufbrechinjektion** (oder Hebungsinjektion) dient der Auffüllung von Hohlräumen, Klüften oder Poren, die durch den hydraulischen Druck des Injektionsmittels – zusätzlich zu den bereits vorhandenen – neu geschaffen werden. Als Folge dieser Aufbrechwirkung kommt es zu Hebungen des Untergrunds. Eine Aufbrechinjektion wird zum Beispiel verwendet, um Bauwerkssetzungen rückgängig zu machen. [25, 2]
- Eine **Verdichtungsinjektion** (oder Verdrängungsinjektion) dient der Tragfähigkeitserhöhung. In unmittelbarer Nähe der Injektionsbohrung wird der Untergrund vom Injektionsmittel verdrängt und verdichtet. Diese Art der Injektion wird auch als *Compaction Grouting* bezeichnet und wird zum Beispiel zur Gründungssicherung verwendet. [25, 2]
- Eine **Düsenstrahlinjektion** (DSV) bzw. Hochdruckbodenvermörtelung (HDBV) ist keine Injektion im klassischen Sinne. Unter hohem Druck wird der Untergrund gelockert und teilweise erodiert. Der entstandene Hohlraum wird mit dem Injektionsmittel wieder gefüllt. [25, 2]

Alle diese verschiedenen Arten von Injektionen können grundsätzlich im Lockergestein und Festgestein eingesetzt werden, wobei sich nicht alle für jede Art der geologischen Formation gleichermaßen eignen. Der Gegenstand dieser Arbeit sind **Felsinjektionen**. Als Fels wird ein Gestein bezeichnet, welches von Trennflächen durchzogen ist und dem

Festgestein zugeordnet wird. Felsinjektionen werden zum Beispiel zur Herstellung eines Dichtschirms (bei Talsperren) oder zur Vortriebssicherung im Tunnelbau verwendet. Dabei dienen sie der Verbesserung der Felseigenschaften und der Verringerung der Durchlässigkeit (bzw. der Abdichtung des Bauwerks). Eine klassische Felsinjektion kann zum Überbegriff der Auffüllinjektion (oder verdrängungsfreie Injektion) gezählt werden. Ein Aufbrechen soll auf jeden Fall verhindert werden, um keine neuen möglichen Wegigkeiten zu schaffen. Das Ziel von Felsinjektionen ist das ausschließliche Abdichten der Klüfte durch eine Auffüllinjektion. [11, 1]

2.2 Komponenten einer Felsinjektion

In Abbildung 2.1 sind ein Kluftsystem und dazu schematisch die notwendigen Komponenten für eine Felsinjektion dargestellt. Zuerst wird in einer Mischanlage die Suspension angemischt. Mit einer oder mehreren Injektionspumpen wird danach die Suspension von einem Vorratsbehälter über einen Injektionsschlauch in die Injektionsbohrung gepumpt. Im Bohrloch wird die Suspension unter Wirkung des Injektionsdrucks entweder mithilfe von Einfach- oder Doppelpackern in die offenen Klüfte injiziert. [25]

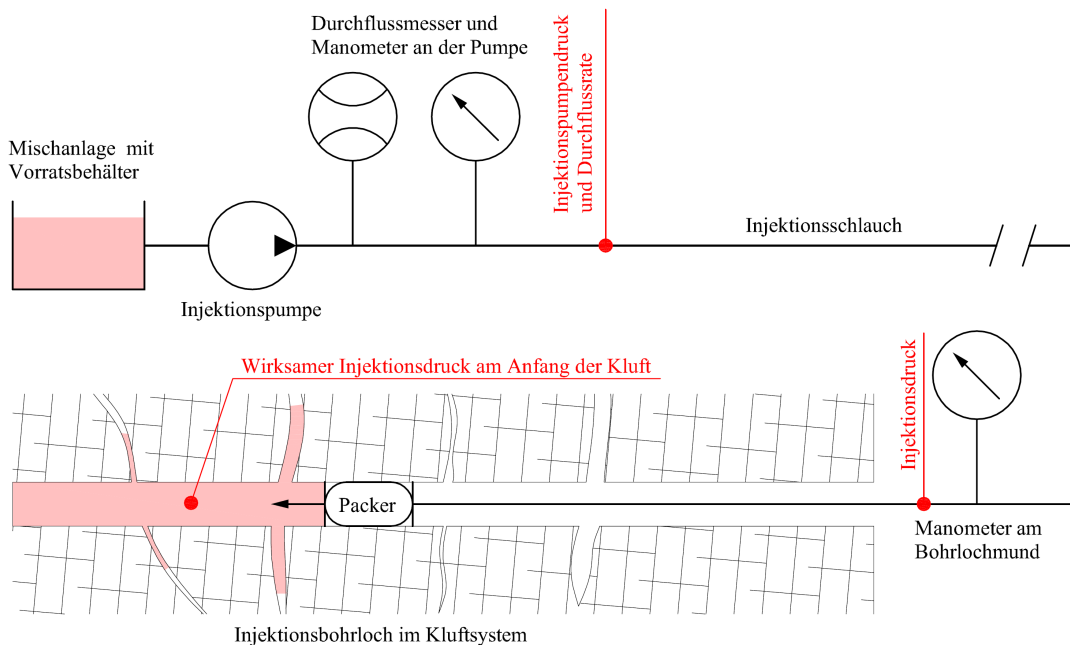


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Komponenten einer Felsinjektion mit Einfachpacker

Die Injektionspumpe übt einen Injektionsdruck aus, welcher sich durch hydraulische Verluste sehr stark bis zum Anfang der zu injizierenden Kluft reduzieren kann. Bei der Verwendung des Begriffs *Injektionsdruck* ist es wichtig, diesen entlang des gesamten Förderwegs zu differenzieren. Dabei wird unterschieden zwischen Injektionsdruck an der Pumpe (Injektionspumpendruck), Injektionsdruck und wirksamem Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Abbildung 2.1). In den Abbruchkriterien selbst ist es unabdingbar, anzugeben, welcher Injektionsdruck genau verwendet wird. Bei Beschreibungen von Abbruchkriterien in der Literatur wird der verwendete Injektionsdruck nur selten exakt differenziert.

2.3 Begriffsbestimmungen

Injektionsdruck

In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff *Injektionsdruck* der *Injektionsdruck am Bohrlochmund* verstanden, da es in der Praxis üblich ist, den Druck für die Injektionsaufzeichnungen am Bohrlochmund zu messen. Werden in der Arbeit andere Definitionen des Injektionsdrucks verwendet, so werden dafür folgende Begriffe benützt:

Unter *Injektionspumpendruck* versteht man den Injektionsdruck, gemessen unmittelbar nach der Pumpe.

Unter *effektivem Injektionsdruck* versteht man die Differenz aus *Injektionsdruck* und *hydrostatischem Druck*.

Unter *wirksamem Injektionsdruck am Anfang der Kluft* versteht man den Injektionsdruck am Klufteingang. Er entspricht dem aus der Erdölkunde stammenden Begriff *Shut-In-Pressure*.

Unter *Ruhedruck* versteht man den Druck, der sich nach dem Abstellen der Pumpe nach Verstreichen einer definierten Zeit im Kluftsystem einstellt.

Injektionsvolumen

Unter *Injektionsvolumen* versteht man das Volumen an Suspension, das in eine Passe injiziert wird und an der Pumpe aufgezeichnet wird. Es wird in Liter angegeben.

Injektionszeit

Unter *Injektionszeit* versteht man die Zeit vom Start der Injektion an einer Passe (Einschalten der Pumpe) bis zum Ende der Passe (Ausschalten der Pumpe). Sie wird entweder in Sekunden oder Minuten angegeben.

Durchflussrate

Unter *Durchflussrate* versteht man das an der Pumpe aufgezeichnete Injektionsvolumen pro Zeiteinheit, das in die Passe injiziert wird. Sie wird in Liter pro Minute angegeben.

Druckfiltration (Pressure Filtration)

Die Druckfiltration tritt auf, wenn Wasser aus der Suspension bei Beaufschlagung mit Druck ausgepresst wird. Die Filtrationseigenschaften der Suspension werden mit der Filterpresse bestimmt. Die Bestimmung der Filtrationsrate ist in den USA und in Europa unterschiedlich. In den USA ist die Filtrationsrate der Flüssigkeitsverlust nach 30 Minuten unter einem Druck von 100 psi (6,9 bar). In Europa wird der Flüssigkeitsverlust nach 7,5 min unter einem Druck von $7 \pm 0,35$ bar bestimmt. Der Druckfiltrationskoeffizient K_{pf} ist dabei definiert als das Volumen des ausgepressten Wassers dividiert durch das Probenvolumen und die Quadratwurzel aus der Filtrationszeit in Minuten. [32, 51]

$$K_{pf} = \frac{V_{\text{Filtrat}}}{V_{\text{Probe}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_{\text{Filtrat}}}} \quad (2.1)$$

K_{pf}	Druckfiltrationskoeffizient [$min^{-1/2}$]
$V_{Filtrat}$	Volumen des ausgepressten Wassers (Filtrationsrate) [ml]
V_{Probe}	Probenvolumen [ml]
$t_{Filtrat}$	Filtrationszeit [min]

Der Druckfiltrationskoeffizient K_{pf} gibt Auskunft über den Widerstand einer Suspension gegen die Druckfiltration und wird in der Amenity Theory in Kapitel 3 und in der ACG-Methode in Kapitel 5 dieser Arbeit verwendet. [33]

Permeabilität

Die Permeabilität K wird zur Beschreibung der Durchlässigkeit von Böden und Fels benutzt. Sie ist aus dem Darcy'schen Gesetz abgeleitet und definiert als:

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (2.2)$$

K	Permeabilität [m^2]
Q	Durchflussrate [m^3/s]
η	Dynamische Viskosität [Ns/m^2]
l	Durchströmte Länge des porösen Körpers [m]
A	Durchströmte Querschnittsfläche des porösen Körpers [m^2]
Δp	Druckdifferenz [Pa]

Durchlässigkeitsbeiwert

Beim Durchlässigkeitsbeiwert k_f gehen zusätzlich die Dichte und die Erdbeschleunigung ein. Er ist unabhängig von der Viskosität der Flüssigkeit und wird definiert als:

$$k_f = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\eta} = \frac{Q \cdot l \cdot \rho \cdot g}{A \cdot \Delta p} = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h} \quad (2.3)$$

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (2.4)$$

k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
ρ	Dichte des Fluids [kg/m^3]
g	Erdbeschleunigung (9,81) [m/s^2]
Δh	Hydraulische Druckdifferenz [m]

Transmissivität und Transmissibilität

Für die Beschreibung von Durchlässigkeiten in Fels werden hauptsächlich die Transmissivität und die Transmissibilität verwendet. Die **Transmissibilität** T_K ist definiert als Produkt als Permeabilität K und der Mächtigkeit h der wasserführenden Schicht. Für die Mächtigkeit h kann für Klüfte die Öffnungsweite eingesetzt werden.

$$T_K = K \cdot h \quad (2.5)$$

Im Gegensatz zur Transmissibilität T_K ist die **Transmissivität** T_k als Produkt aus Durchlässigkeitsbeiwert k_f und Mächtigkeit h definiert:¹

$$T_k = k_f \cdot h \quad (2.6)$$

T_K	Transmissibilität [m^3]
T_k	Transmissivität [m^2/s]
h	Mächtigkeit der wasserführenden Schicht (Kluft) [m]

2.4 Rheologische Eigenschaften (zementbasierter) Suspensionen

Für die Abschätzung der Reichweite von Felsinjektionen ist das Verständnis der Eigenschaften und des Verhaltens der Suspensionen unentbehrlich. Eine zementbasierte Suspension zeigt ein pseudoplastisches Verhalten. In Abbildung 2.2 ist das Fließverhalten (zementbasierter) Suspensionen dargestellt. Ist die Viskosität² η einer Flüssigkeit unabhängig von der mechanischen Belastung auf das Fluid (aufgetragen als Schergefälle $\dot{\gamma}$), so spricht man von einem *Newton'schen Fluid*. Ein typischer Vertreter einer solchen Flüssigkeit ist Wasser. Bei (zementbasierten) Suspensionen jedoch verändert sich die Viskosität in Abhängigkeit der mechanischen Belastung. Mit zunehmender Beanspruchung sinkt oder steigt die Viskosität an. Suspensionen haben zudem im Gegensatz zu *Newton'schen Flüssigkeiten* eine Fließgrenze. Erst durch Überschreiten einer Schubspannung τ_0 wird ein Fließen eingeleitet. Unter dieser Fließgrenze verhält sich die Flüssigkeit wie ein Feststoff. [20]

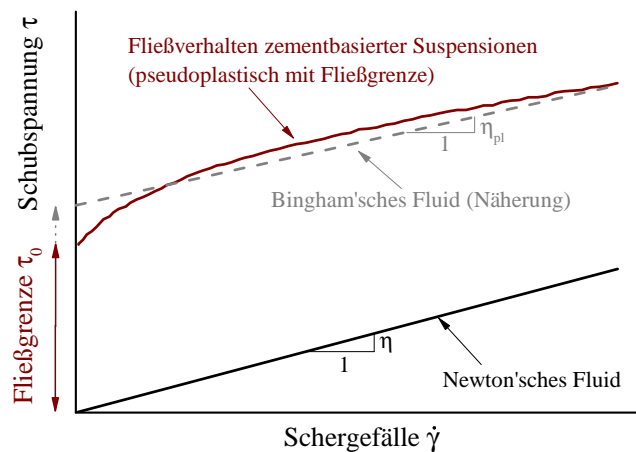


Abbildung 2.2: Fließverhalten von Suspensionen, adaptiert aus [20]

Mit dem theoretischen Ansatz einer *Bingham'schen Flüssigkeit* kann dieses pseudoplastische Verhalten durch eine Gerade angenähert werden. Dabei entspricht der Nulldurchgang der Gerade in etwa der Fließgrenze τ_0 . Die Steigung der Gerade wird als plastische

¹In der Literatur unterscheidet sich die Schreibweise der Transmissivität und Transmissibilität nur durch ein kleines k oder großes K im Index.

²Teilweise wird in der Literatur die Viskosität mit dem griechischen Buchstaben μ notiert.

Viskosität η_{pl} bezeichnet. Die Schubspannung³ τ verhält sich zum Schergefälle $\dot{\gamma}$ linear. In Formel 2.7 ist die Geradengleichung für eine *Bingham'sche Flüssigkeit* dargestellt. [25]

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \tag{2.7}$$

τ	Schubspannung [Pa]
τ_0	Fließgrenze [Pa]
η_{pl}	Plastische Viskosität [Pa · s]
$\dot{\gamma}$	Schergefälle [s^{-1}]

In Zusammenhang mit den Abbruchkriterien und der Reichweite der Injektion üben beide Parameter (plastische Viskosität η_{pl} und Fließgrenze τ_0) sozusagen einen Widerstand gegen das Fließen aus. Die Viskosität dominiert die Durchflussrate, während die Fließgrenze die maximale Reichweite der Injektion bestimmt. Mit zunehmendem Injektionsdruck steigt die maximale Reichweite, mit zunehmender Fließgrenze sinkt sie. [31]

2.5 Ausbreitung von Suspension in Klüften

In den Abbildungen 2.3, 2.4 und 2.5 ist der Einfluss der Fließgrenze auf die Reichweite der Injektion dargestellt. Mit zunehmendem Abstand der Injektionsbohrung sinkt der Druck bis zur Injektionsfront ab. Ist die Schubspannung τ größer als die Fließgrenze τ_0 , so verhält sich die Suspension wie ein Fluid. Ist die Schubspannung τ kleiner als die Fließgrenze τ_0 , verhält sich die Suspension wie ein Festkörper. Sobald im gesamten Querschnitt an der Injektionsfront die Schubspannung τ unterhalb der Fließgrenze τ_0 liegt, kommt die Suspension zum Stillstand – die maximale Reichweite der Injektion ist erreicht. In den Abbildungen 2.3, 2.4 und 2.5 ist jeweils die Lage der Suspension in der Kluft, der zugehörige Druck und das Geschwindigkeitsprofil der Suspension sowie der Verlauf der Schubspannung in der Kluft dargestellt.

In Abbildung 2.3 ist die Ausbreitung der Suspension in der Nähe der Bohrung dargestellt. Die Schubspannung τ ist in den Randbereichen noch deutlich größer als die Fließgrenze τ_0 . In den Bereichen, in denen die Schubspannung τ kleiner als die Fließgrenze τ_0 ist (in der Mitte der Kluft), verhält sich die Suspension bereits wie ein Festkörper.

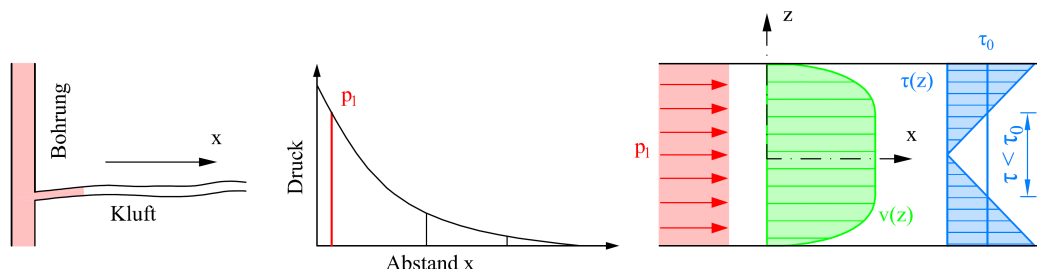


Abbildung 2.3: Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – in der Nähe der Bohrung, adaptiert aus [18]

³Teilweise wird in der Literatur die Schubspannung mit dem Buchstaben *c* notiert.

In Abbildung 2.4 ist die Ausbreitung der Suspension in größerem Abstand zur Injektionsbohrung dargestellt. Die Schubspannung τ ist in den Randbereichen zwar noch größer als die Fließgrenze τ_0 , jedoch wird dieser Bereich schon kleiner. Der Bereich, in dem sich die Suspension wie ein Festkörper verhält, ist dagegen größer.

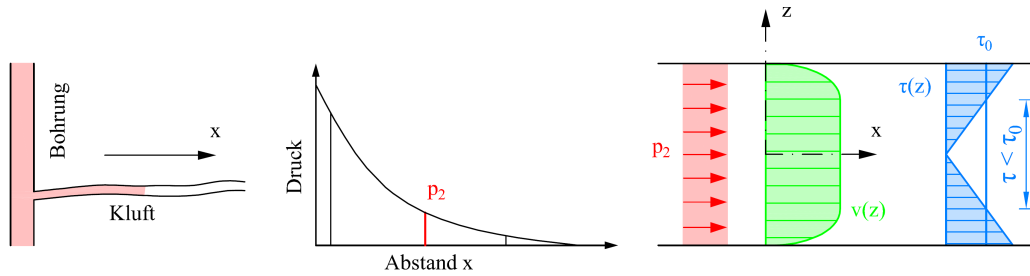


Abbildung 2.4: Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – in größerem Abstand zur Injektionsbohrung, adaptiert aus [18]

In Abbildung 2.5 ist die Ausbreitung der Suspension im Grenzzustand an der Injektionsfront dargestellt. Die Schubspannung τ ist im gesamten Querschnitt der Kluft größer als die Fließgrenze τ_0 . Die Suspension verhält sich folglich wie ein Festkörper und es kommt zum Stillstand – die maximale Reichweite der Injektion ist erreicht.

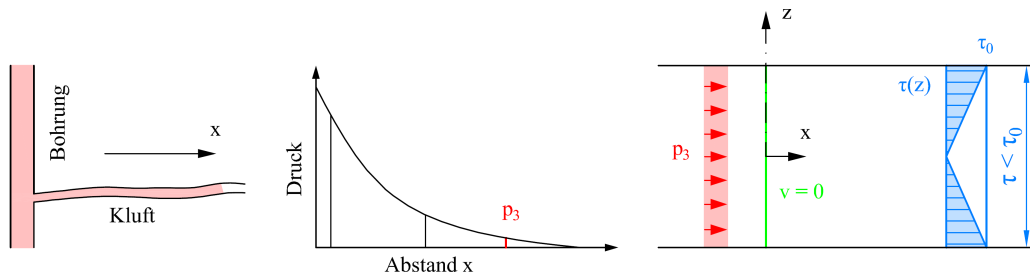


Abbildung 2.5: Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – an der Injektionsfront, adaptiert aus [18]

Betrachtet man die Ausbreitung der Suspension in Abhängigkeit der Dimensionalität, gibt es drei Haupttypen von Ausbreitungsformen: [37]

Lineare, eindimensionale Ausbreitung in Fließkanälen

Eine lineare, eindimensionale Ausbreitung in Fließkanälen tritt auf, wenn alle Geschwindigkeitsvektoren parallel sind und die Flüssigkeit sich ausschließlich in einer Richtung bewegt. In einem idealen linearen, eindimensionalen Fließkanal ist der Querschnitt entlang der Ausbreitungsrichtung konstant.

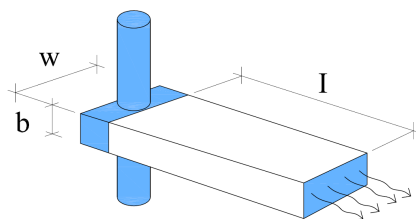


Abbildung 2.6: Lineare, eindimensionale Ausbreitung in einem Fließkanal, adaptiert aus [40]

Die Reichweite der Injektion I ist in dieser Art der Ausbreitung von den geometrischen Parametern Kluftweite w und Kluftöffnungsweite b abhängig.

Ebene, zweidimensionale, radiale Ausbreitung in Klüften

Eine ebene, zweidimensionale radiale Ausbreitung in einer Kluft tritt auf, wenn sich alle Geschwindigkeitsvektoren radial vom Bohrloch wegbewegen. Im Modell einer idealen, ebenen Kluft ist die Öffnungsweite konstant.

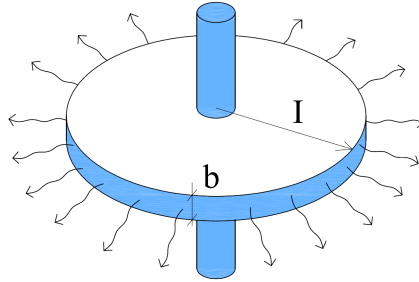


Abbildung 2.7: Ebene, zweidimensionale, radiale Ausbreitung in einer Kluft, adaptiert aus [40]

Die Reichweite der Injektion I ist in dieser Art der Ausbreitung von der Kluftöffnungsweite b abhängig.

Dreidimensionales, sphärisches Fließen in einem System von sich kreuzenden Kluftflächen

Jede Art der Ausbreitung, die nicht unter eine lineare oder ebene Ausbreitung fällt, wird als dreidimensionales, sphärisches Fließen bezeichnet. Um eine Ausbreitung in einem System von sich kreuzenden Kluftflächen zu bestimmen, sind sehr genaue geologische Untersuchungen notwendig. Zusätzlich kann diese Ausbreitung nicht mehr analytisch gelöst werden und es bedarf einer numerischen Simulation.

2.6 Wasserabpressversuche (WAPs)

An erster Stelle vor jeder Injektion stehen geologische/geotechnische Untersuchungen. Hydrogeologische Erkundungen sind dabei ein wesentlicher Bestandteil jeder Untergrunduntersuchung. Das Ziel dabei ist, die hydrogeologischen Gegebenheiten zu untersuchen. Dabei spielt insbesondere die hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges eine Rolle. Der Wasserabpressversuch (WAP) nach Lugeon ist dabei ein in der Praxis bedeutender Versuch, der sich bewährt hat. In erster Linie werden die Ergebnisse benützt, um zu bewerten, ob im Gebirge eine Injektion notwendig ist und ob eine Injektion überhaupt unter normalen Umständen durchgeführt werden kann. [13] [40]

Ziel von Wasserabpressversuchen (WAPs) ist, folgende Eigenschaften eines Gebirges festzustellen: [50]

- hydraulische Eigenschaften des Gebirges, insbesondere das Verhalten bei Beaufschlagung von Klüften mit Wasserdruck
- Absorptionsvermögen des Gebirges

- Durchlässigkeit des Gebirges
- geomechanisches Verhalten, z.B. hydraulisches Aufspalten, hydraulisches Aufweiten

Nach einer ausgeführten Injektion wird zusätzlich der Erfolg der Injektionsmaßnahmen in der Praxis häufig mit Wasserabpressversuchen überprüft. Dabei werden die Ergebnisse nach der Injektion mit den Ergebnissen vor der Injektion verglichen.

Der Lugeon-Test wird durch die Messung des Wasserabflusses bei einem Bohrlochabschnitt unter vorgegebenem Druck unter stationären Bedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden als Liter pro Minute pro Meter Bohrlochlänge bei einem effektiven Druck von 10 bar angegeben. Diese Einheit wird Lugeon genannt. Um ein Gefühl für diese Einheit zu bekommen, sind nachfolgend einige Werte aus der Praxis aufgelistet: [40]

- **1 Lugeon:** kaum durchlässiges Gebirge; in den meisten Fällen ist keine Injektion notwendig
- **10 Lugeon:** durchlässiges Gebirge; um die Durchlässigkeit zu verringern, wird eine Injektion benötigt
- **100 Lugeon:** stark klüftiges Gebirge mit sehr großen Klüften; eine Injektion ist in der Regel schwer durchzuführen, da das Injektionsmittel während der Injektion ausgewaschen werden kann

Der Wasserabpressversuch kann in Bohrlochern jeder Ausrichtung und jedes Durchmessers durchgeführt werden. Der Prüfabschnitt kann sich sowohl oberhalb als auch unterhalb des Grundwasserspiegels befinden. Je nach Art des Versuchs werden Einfach- oder Doppelpacker verwendet. In Abbildung 2.8 ist ein Doppelpacker und ein dreidimensionales Klufsystem schematisch dargestellt. Der Abstand zwischen beiden Packern wird Prüfabschnitt genannt. [50]

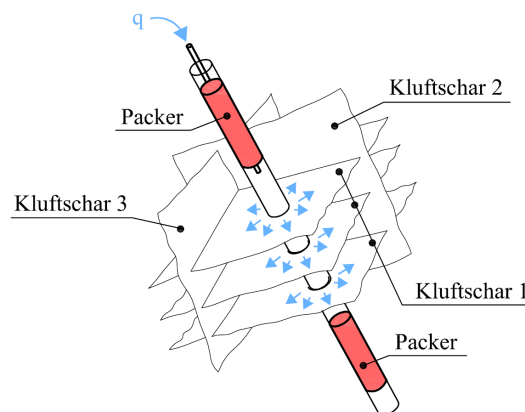


Abbildung 2.8: Doppelpacker in dreidimensionalem Klufsystem, adaptiert aus [40]

In Abbildung 2.9 sind die Komponenten eines Lugeon-Tests dargestellt. Links befindet sich ein Einfachpacker, rechts ein Doppelpacker. Mit einer Pumpe wird das Klufsystem unter einem konstanten Druck [bar] beaufschlagt und die Durchflussrate [l/min] aufgezeichnet. Sobald die Durchflussrate konstant bleibt, wird das Klufsystem mit einer

neuen Druckstufe beaufschlagt und die Reaktion des Systems erneut gemessen. Der mehrstufige Wasserabpressversuch wird in fünf Schritten durchgeführt:

- Step 1: Druckstufe p_1 (niedriger Druck) bis zu einer konstanten Durchflussrate
- Step 2: Druckstufe p_2 (mäßiger Druck) bis zu einer konstanten Durchflussrate
- Step 3: Druckstufe p_3 (hoher Druck) bis zu einer konstanten Durchflussrate
- Step 4: Druckstufe p_2 (mäßiger Druck) bis zu einer konstanten Durchflussrate
- Step 5: Druckstufe p_1 (niedriger Druck) bis zu einer konstanten Durchflussrate

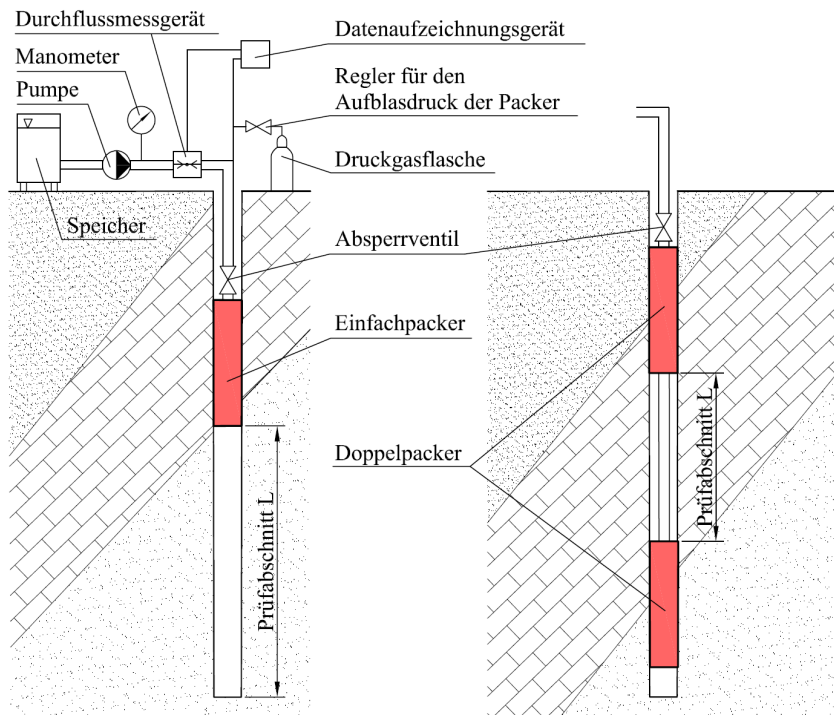


Abbildung 2.9: Durchführung eines Wasserabpressversuchs, adaptiert aus [50]

Diese fünf Stufen werden unmittelbar hintereinander durchgeführt. Der Lugeon-Wert wird für jede einzelne Druckstufe berechnet. Bei den Ergebnissen handelt es sich somit um einen aufgezeichneten Druck p [bar] (der für jede Druckstufe konstant ist) und die Durchflussrate q [l/min]. In Abbildung 2.10 ist die Datenaufzeichnung eines Wasserabpressversuchs schematisch dargestellt.

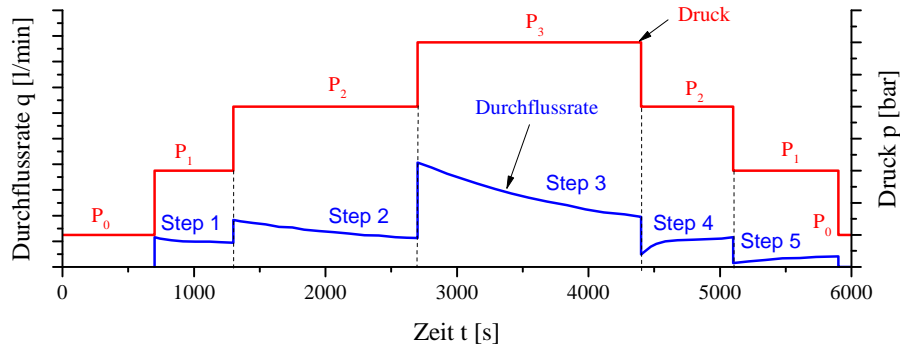


Abbildung 2.10: Datenaufzeichnung eines Lugeon-Tests, adaptiert aus [50]

Der Lugeon-Wert kann für jede Druckstufe mit Formel 2.8 berechnet werden. [40]

$$Lu = \frac{q}{L} \cdot \frac{10 \text{ bar}}{\Delta p} \quad (2.8)$$

- Lu Lugeon-Wert [$l/min/m$ bei 10 bar]
- q Durchflussrate [l/min]
- L Prüfabschnitt [m]
- Δp Effektiver Druck (Pumpendruck p abzüglich hydrostatischen Druck p_o) [bar]

Die ausgewerteten Lugeon-Werte werden dann miteinander verglichen, um das jeweilige Durchfluss-Regime zu bestimmen. Außerdem ist die Darstellung von Durchfluss q [l/min] und aufgezeichnetem Druck p [bar] in einem Diagramm sinnvoll. Eine Betrachtung der Druck-Durchfluss-Diagramme und der Lugeon-Werte erlaubt einerseits eine genaue Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung, andererseits kann auch eine elastische Dehnung der Klüfte (Aufweiten), ein Auswaschen der Klüfte oder ein Füllen der Klüfte festgestellt werden. In den nächsten Punkten sind diese möglichen typischen Durchfluss-Regime dargestellt.

2.6.1 Laminare Strömung

Eine laminare Strömung in den Klüften zeichnet sich durch das Merkmal ab, dass alle Lugeon-Werte – unabhängig von der jeweiligen Druckstufe – ähnlich sind (Abbildung 2.11). Dies tritt im Normalfall bei sehr ruhiger, langsamer Strömung in sehr engen Klüften auf. Üblicherweise deutet eine laminare Strömung auf sehr ebene, feine Klüfte hin. In Abbildung 2.12 ist schematisch die Datenaufzeichnung eines Versuchs unter laminarer Strömung dargestellt. [25]

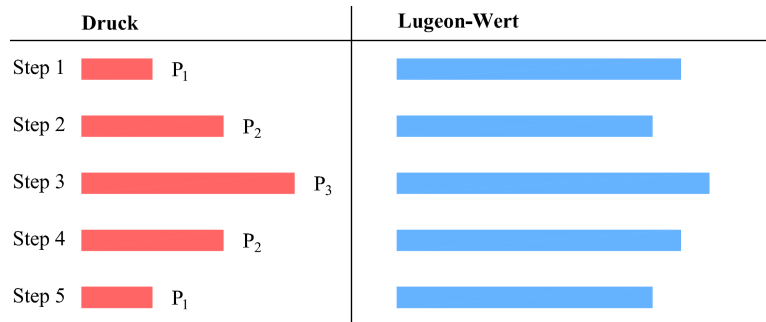


Abbildung 2.11: Ergebnis eines Lugeon-Tests bei laminarer Strömung

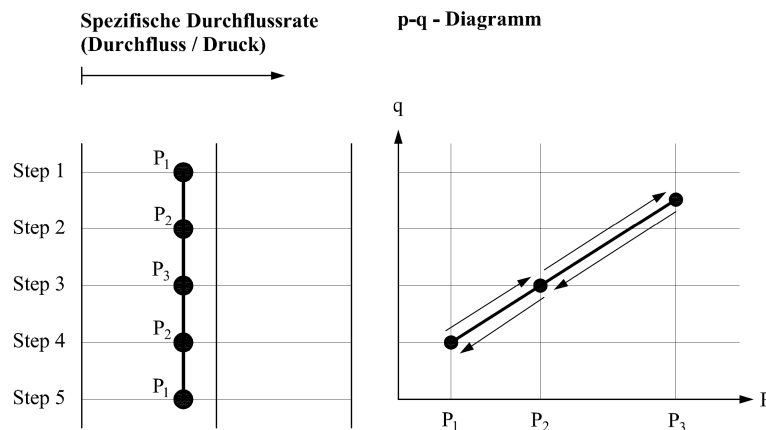


Abbildung 2.12: Links: spezifische Durchflussrate bei laminarer Strömung; rechts: p-q-Diagramm bei laminarer Strömung, adaptiert aus [50]

2.6.2 Turbulente Strömung

Eine turbulente Strömung in den Klüften zeichnet sich durch ein Abnehmen der Lugeon-Werte bei höheren Druckstufen und ein Ansteigen der Lugeon-Werte bei niedrigen Druckstufen ab. Sind die Lugeon-Werte symmetrisch über die Druckstufen verteilt (der niedrigste Lugeon-Wert an der höchsten Druckstufe und der höchste Lugeon-Wert an der niedrigsten Druckstufe), so deutet dies auf eine turbulente Strömung hin (Abbildung 2.13). Die Reibung und die Rauigkeit der Klüfte führen zu Verwirbelungen. Diese Turbulenzen greifen ab einem bestimmten Druck auf die gesamte Strömung über. Im Normalfall tritt dies bei schneller Strömung in weiten Klüften auf. In Abbildung 2.14 ist schematisch die Datenaufzeichnung eines Versuchs unter turbulenter Strömung dargestellt. [25]

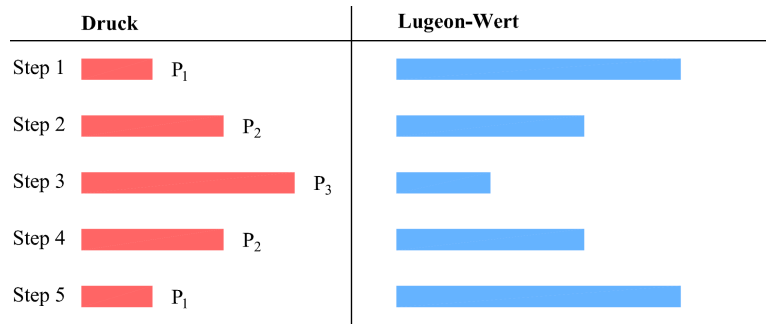


Abbildung 2.13: Ergebnis eines Lugeon-Tests bei turbulenter Strömung

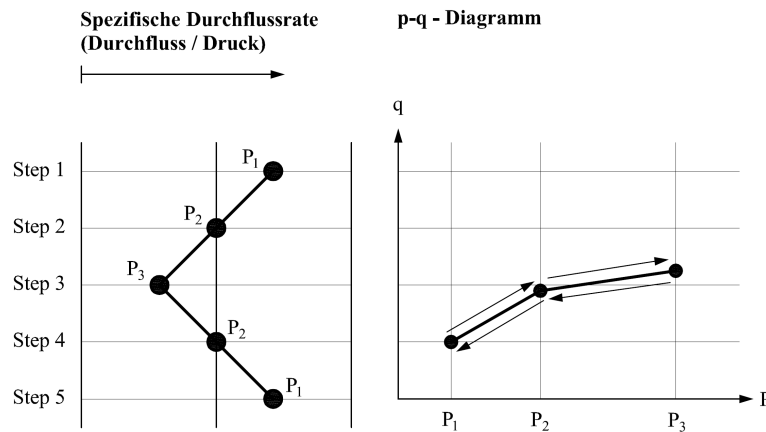


Abbildung 2.14: Links: spezifische Durchflussrate bei turbulenter Strömung; rechts: p-q-Diagramm bei turbulenter Strömung, adaptiert aus [50]

2.6.3 Elastische Dehnung

Ein elastisches Dehnen oder Aufweiten der Klüfte tritt ein, wenn die Drücke einen für jedes Kluftsystem unterschiedlichen kritischen Grenzdruck überschreiten. Dieser Grenzdruck ist insbesondere abhängig vom Gebirge und dessen Eigenschaften. In der Regel soll ein Aufweiten der Klüfte bei Felsinjektionen verhindert werden, da sich das Ziel lediglich auf ein Füllen der Klüfte beschränkt. Bei Wasserabpressversuchen zeichnet sich eine elastische Dehnung der Klüfte mit einem entgegengesetzten Verhalten gegenüber einer turbulenten Strömung ab. Zeigt eine höhere Druckstufe einen auffällig höheren Lugeon-Wert als alle anderen, so deutet dies auf eine Dehnung der Klüfte hin (Abbildung 2.15). Der Druck in der höheren Druckstufe war somit hoch genug, um lokale Klüfte – aufgrund weicheren Materials oder durch die Schließung parallel führender Klüfte – auszudehnen. Sinkt der Lugeon-Wert bei den niedrigeren Druckstufen wieder auf das ursprüngliche Maß, so kann davon ausgegangen werden, dass die Ausdehnung elastisch erfolgte. Dieser kritische Druck, ab dem ein Aufweiten eintritt, ist für Injektionen sehr wichtig, da dieser den maximalen Injektionsdruck vorgibt. In Abbildung 2.16 ist schematisch die Datenaufzeichnung eines Versuchs unter elastischer Dehnung dargestellt. [25]

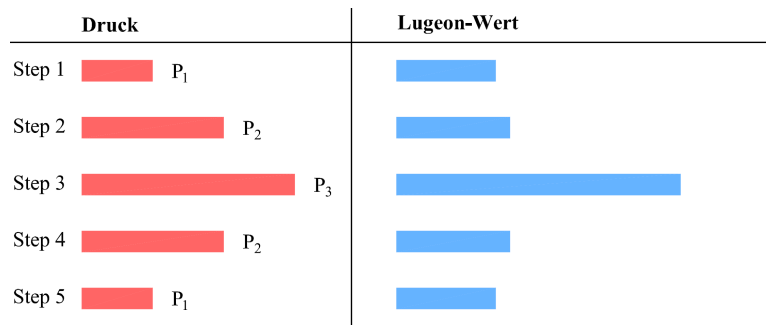


Abbildung 2.15: Ergebnis eines Lugeon-Tests bei elastischer Dehnung

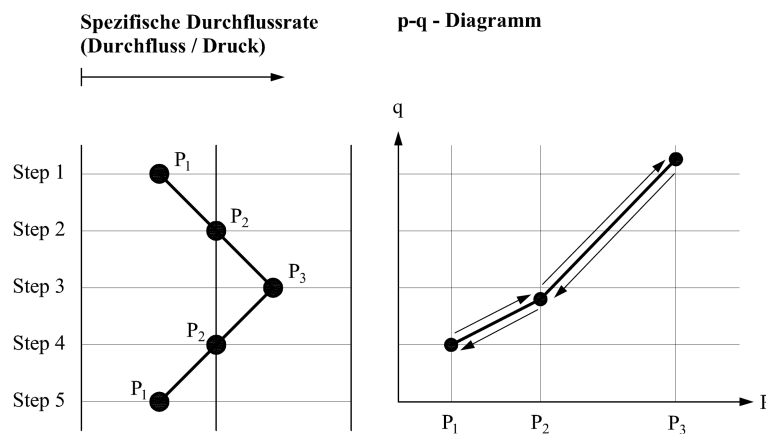


Abbildung 2.16: Links: spezifische Durchflussrate bei elastischer Dehnung; rechts: p-q-Diagramm bei elastischer Dehnung, adaptiert aus [50]

2.6.4 Auswaschen

Ein Auswaschen der Klüfte zeichnet sich durch steigende Durchlässigkeiten mit zunehmenden Druckstufen ab. Sinkt die Durchlässigkeit dabei nicht wieder auf den ursprünglichen Wert ab, so deutet dies auf ein permanentes Auswaschen von Füllmaterial in den Klüften hin (Abbildung 2.17). Ein solches Verhalten zeigt vorwiegend, dass die Klüfte mit erodierbarem Material gefüllt sind. Mit zunehmendem Druck wird dieses feine Material ausgewaschen, wodurch die Klüfte freigelegt werden und mehr Wasser durch die Kluft gelangen kann, obwohl der Druck weniger wird. Auf jeden Fall kann daraus geschlossen werden, dass die Drücke für diesen Versuch zu hoch waren. Auch die Injektion sollte mit niedrigeren Drücken durchgeführt werden, damit ein Auswaschen verhindert wird. Eine schematische Datenaufzeichnung von Versuchen bei einem Auswaschen der Klüfte unter laminarer Strömung ist in Abbildung 2.18, bei einem Auswaschen unter turbulenter Strömung in Abbildung 2.19 und bei einem Auswaschen bei gleichzeitiger elastischer Dehnung in Abbildung 2.20 dargestellt. [25]

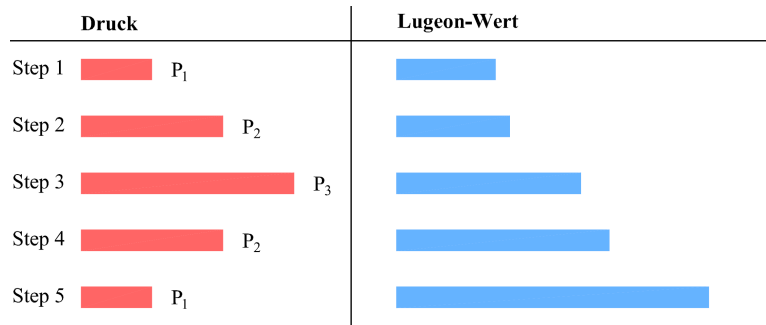


Abbildung 2.17: Ergebnis eines Lugeon-Tests bei Auswaschen der Klüfte

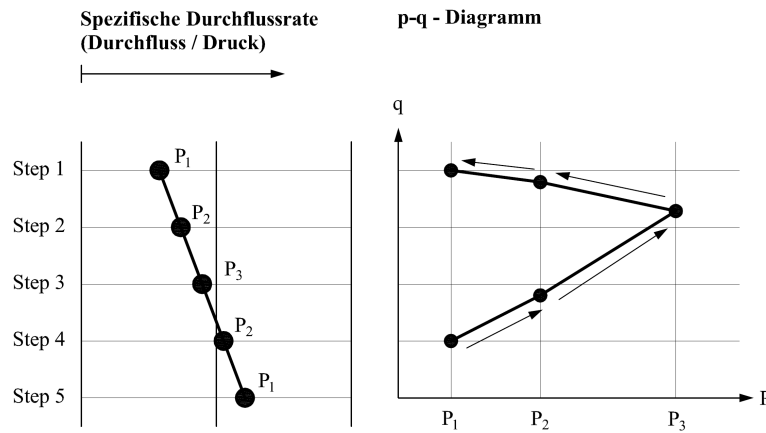


Abbildung 2.18: Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (unter laminarer Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (unter laminarer Strömung), adaptiert aus [50]

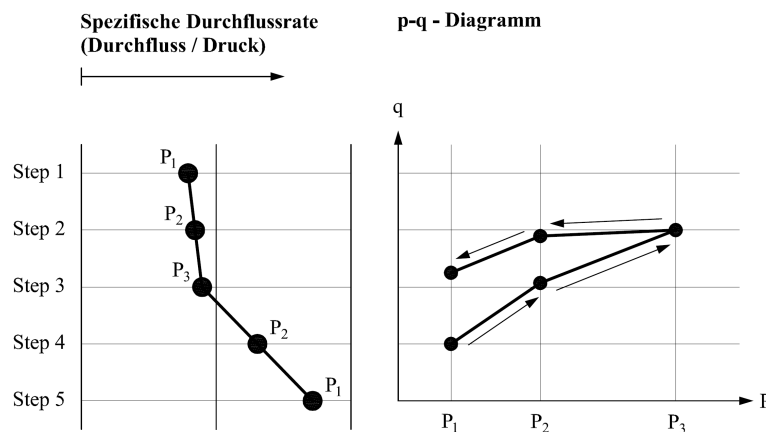


Abbildung 2.19: Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (unter turbulenter Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (unter turbulenter Strömung), adaptiert aus [50]

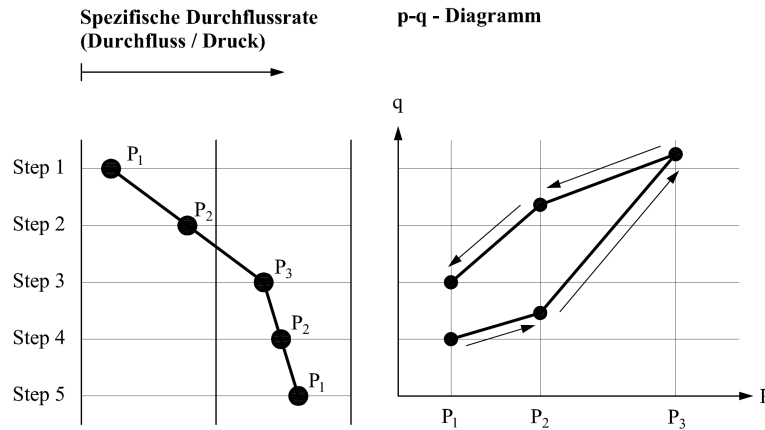


Abbildung 2.20: Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung), adaptiert aus [50]

2.6.5 Füllen

Das umgekehrte Durchfluss-Regime des Auswaschens ist das Füllen. Wenn die Lugeon-Werte mit zunehmenden Druckstufen progressiv absinken, so deutet das auf ein Füllen der Klüfte hin (Abbildung 2.21). Durch das Füllen mit Material sinkt die Durchlässigkeit in der Kluft. Sollte dieses Ergebnis auftreten, ist es ratsam, den Test mit niedrigeren Drücken weiter auszuführen, bis der Trend der Abnahme der Durchlässigkeit nachlässt. Empfohlen ist auch eine Wassersättigung der Klüfte vor Testbeginn. Eine schematische Datenaufzeichnung von Versuchen bei einem Füllen der Klüfte unter laminarer Strömung ist in Abbildung 2.22, bei einem Füllen unter turbulenter Strömung in Abbildung 2.23 und bei einem Füllen bei gleichzeitiger elastischer Dehnung in Abbildung 2.24 dargestellt. [25]

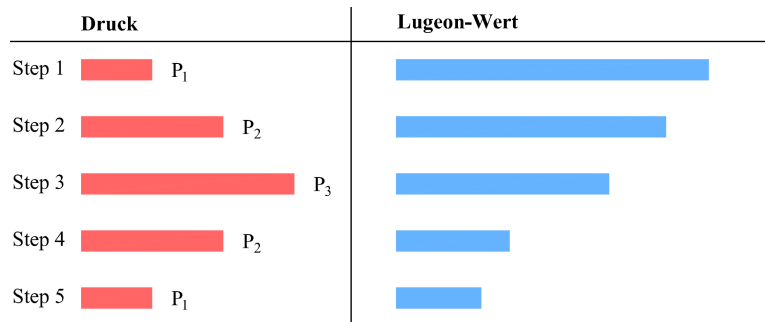


Abbildung 2.21: Ergebnis eines Lugeon-Tests bei Füllen der Klüfte

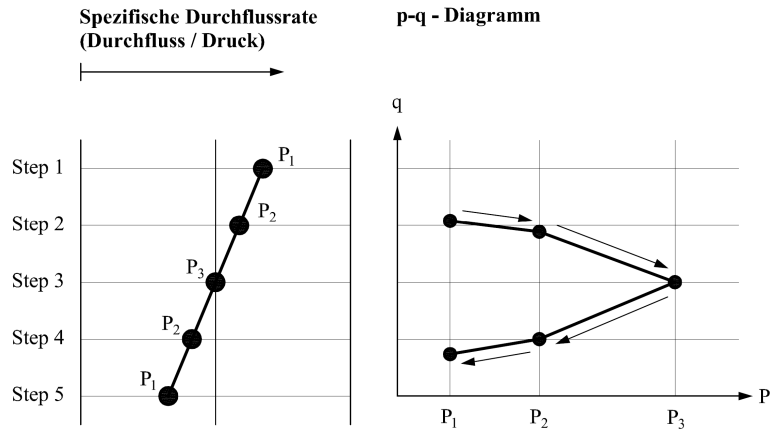


Abbildung 2.22: Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (unter laminarer Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (unter laminarer Strömung), adaptiert aus [50]

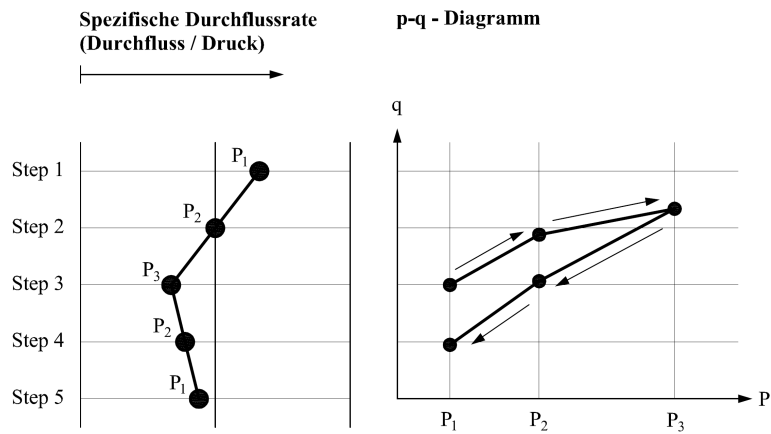


Abbildung 2.23: Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (unter turbulenter Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (unter turbulenter Strömung), adaptiert aus [50]

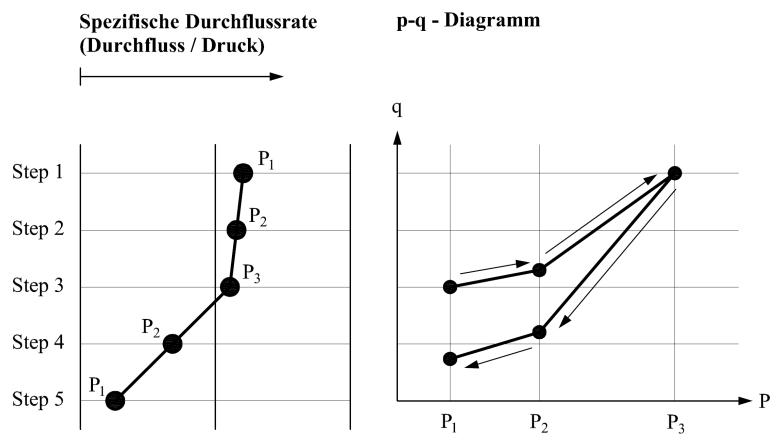


Abbildung 2.24: Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung), adaptiert aus [50]

2.6.6 Bestimmung der Transmissivität und Kluftöffnungsweite

Carter [7] gibt Abschätzungen für die Bestimmung der Transmissivität aus den Lugeon-Werten an. Für laminare Strömung, in der der Durchfluss durch eine einzige Kluft dominiert wird⁴, kann die Transmissivität mit Formel 2.9 bestimmt werden.

$$T \approx 10^{-7} \cdot L \cdot Lu \quad (2.9)$$

T	Transmissivität [m^2/s]
L	Prüfabschnitt [m]
Lu	Lugeon-Wert [$l/min/m$ bei 10 bar]

Die hydraulische Öffnungsweite der dominanten Kluft im Abschnitt kann nach *Carter* [7] mit Formel 2.10 bestimmt werden.

$$e_h = a \cdot T^b \quad (2.10)$$

e_h Hydraulische Kluftöffnungsweite der dominanten Kluft [m]

Die Koeffizienten a und b müssen in Abhängigkeit der geologischen Formationen ausgewählt werden. Eine erste Abschätzung kann mit den Koeffizienten $a = 4,50$ und $b = 0,49$ durchgeführt werden. [4, 7]

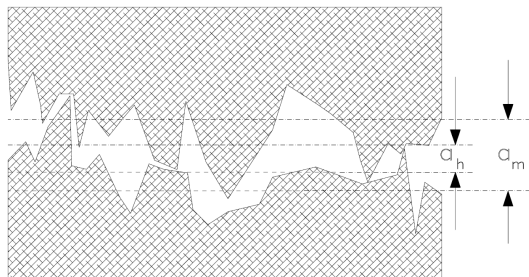


Abbildung 2.25: Hydraulische Kluftöffnungsweite und geometrische Kluftöffnungsweite, aus [24]

In Abbildung 2.25 ist der Unterschied zwischen geometrischer Kluftöffnungsweite a_m und hydraulischer Kluftöffnungsweite a_h dargestellt. Die hydraulische Kluftöffnungsweite a_h wird durch die kleinste Kluftöffnungsweite und durch elektrostatisch gebundene Haftwasserfilme an den Kluftwänden bestimmt und ist kleiner als die geometrische Öffnungsweite der Kluft, die den tatsächlich vorhandenen (mittleren) Abstand der Kluftwandungen angibt.

2.6.7 Injizierbarkeit und Wasserabpressversuche

Neben den Abschätzungen von *Carter* [7] sind in den einzelnen Abbruchkriterien ebenfalls Annäherungen, wie man durch die Ergebnisse aus den Lugeon-Tests auf die

⁴Bei mehreren Klüften oder einer nicht bekannten Kluftverteilung gibt *Dershowitz* [8] gute Annäherungen für die Transmissivität und die hydraulische Kluftöffnungsweite.

Transmissivität oder sogar auf eine mögliche Kluftverteilung schließen kann, enthalten. Hauptsächlich aber werden Wasserabpressversuche durchgeführt, um festzustellen, ab welchen maximalen Injektionsdrücken ein Aufweiten oder Aufreißen verursacht wird. Einerseits sollte ein Aufweiten verhindert werden, andererseits sollte der Injektionsdruck so hoch wie möglich sein. Der optimale Injektionsdruck liegt zwischen 75 und 90 % des kritischen Aufweitungsdrucks. Der kritische Druck ist abhängig von der Tiefe und der geologischen Formation. [4]

Obwohl Wasserabpressversuche grundsätzlich eine hohe Aussagekraft haben, ist es dennoch schwierig, einen tatsächlichen Zusammenhang zwischen Injizierbarkeit (Injektionsmenge, die vom Fels aufgenommen werden kann) und den Ergebnissen des Lugeon-Tests (der sich auf eine Durchflussmenge bezieht) herzustellen. Dies hat unter anderem folgende Gründe: [27]

- Wasser ist eine *Newton'sche Flüssigkeit*, Suspensionen sind im Gegensatz dazu *Bingham'sche Flüssigkeiten*
- Wasser ist molekular, Suspensionen bestehen aus Wasser und Feststoff
- Wasser dringt in feinste Klüfte ein, die Penetrierbarkeit von Suspensionen ist durch das Größtkorn begrenzt
- Wasserabpressversuche haben als Ergebnis eine Durchflussmenge, die Injektion verlangt jedoch eine Injektionsaufnahme in Form eines Volumens oder einer Reichweite
- Wasserabpressversuche dauern nur kurz, Injektionen werden in der Regel über eine längere Zeitdauer durchgeführt
- Bei Injektionen werden andere Drücke als für Wasserabpressversuche verwendet

Aus dem Grund, dass ein Zusammenhang zwischen Injizierbarkeit und Wasserabpressversuchen gewisse Probleme mit sich bringt, verzichten manche Abbruchkriterien gänzlich auf die Verwendung von Lugeon-Tests. Die tatsächliche Injizierbarkeit kann nur durch Testinjektionen herausgefunden werden. Jedoch haben sich in gewisser Hinsicht Wasserabpressversuche auch bewährt, da sie eine hohe Aussagekraft über das hydrogeologische Gebirgsverhalten haben. Sie liefern einen wichtigen Anhaltspunkt für die Planung einer Injektion. Auf Lugeon-Tests sollte nicht verzichtet werden, jedoch sind die Ergebnisse immer mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten.

2.7 Klassische Abbruchkriterien

2.7.1 Druck- und Volumenbegrenzung

In der Vergangenheit wurde bei Felsinjektionen häufig ein Drucklimit gesetzt. Die Injektion wurde abgebrochen, sobald dieses Limit erreicht wurde. Teilweise wurde zusätzlich ein maximales Volumen pro Bohrlochmeter angegeben. Nach dem Erreichen von diesem Volumen wurde die Injektion ebenfalls abgebrochen. Die Abbildung 2.26 zeigt ein Beispiel dieser klassischen Abbruchkriterien. Dabei sind zwei Injektionspfade dargestellt. Am ersten Pfad wird die Injektion bei Erreichen des maximalen Injektionsdrucks abgebrochen, beim zweiten bei Erreichen des maximalen Injektionsvolumens. [27]

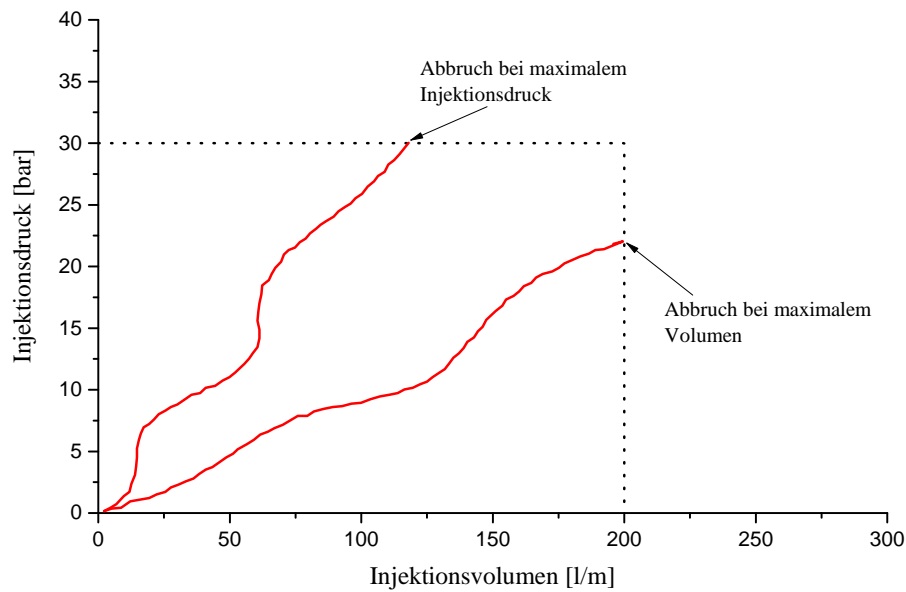


Abbildung 2.26: Druck- und Volumenbegrenzung, adaptiert aus [27]

Dabei ist kein Punkt außerhalb des Rechtecks für den Injektionspfad möglich. Gleichzeitig darf aber auch keiner innerhalb enden. Diese klassische Methode führte später zur GIN-Methode, die in Kapitel 4 ausführlich beschrieben wird.

2.7.2 [q/p]-Methode

Bei der klassischen [q/p]-Methode wird die Durchflussrate q [l/min] durch den Injektionsdruck p [bar] dividiert. Dieses Verhältnis wird ebenso wie das gesamte Injektionsvolumen V über die Zeit aufgetragen. Aus diesen beiden Kurven lässt sich auf eine relative Sättigung der Klüfte schließen. Mit zunehmendem Füllungsgrad der Klüfte sinkt entweder die Durchflussrate bei konstantem Injektionsdruck ab oder es steigt der Injektionsdruck bei konstanter Durchflussrate. Diese beiden Gegebenheiten sind in diesem [q/p]-Verhältnis verpackt. In der Literatur wird dieses Verhältnis häufig als *penetrability* beschrieben. Das [q/p]-Verhältnis gegen die Zeit aufgetragen zeigt die fortschreitende Verfüllung der Klüfte und das Aufbauen eines Drucks. Ein Aufweiten oder Aufreißen kann in diesem Diagramm als eine scharfe Spitze abgelesen werden. Üblich für eine Felsinjektion ist ein [q/p]-Verhältnis von 3 bis 5 l/min/bar zu Beginn der Injektion. Am Ende der Injektion zeigt ein Wert von $< 0,2$ l/min/bar an, dass gewissermaßen für die aktuelle Phase eine Sättigung erreicht wurde. In Abbildung 2.27 ist der Durchfluss q , der Injektionsdruck p , das [q/p]-Verhältnis und das gesamte Injektionsvolumen über die Injektionszeit t aufgetragen. [39, 31]

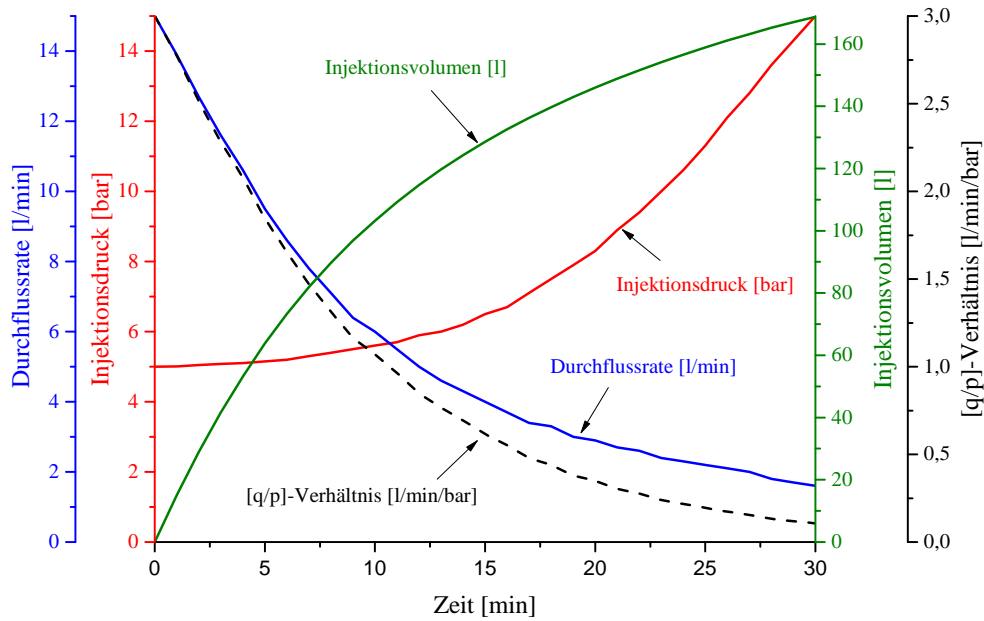


Abbildung 2.27: Verlauf des $[q/p]$ -Verhältnisses, adaptiert aus [25, 37]

Nachdem eine Injektion entweder auf Basis eines vorgegebenen Injektionsdrucks mit variablem Durchfluss oder auf Basis eines vorgegebenen Durchflusses mit variablem Injektionsdruck durchgeführt werden kann, ist der Quotient von Durchflussrate und Injektionsdruck ein guter Indikator für die Zustände in der Kluft. Ein abnehmendes Verhältnis deutet in beiden Fällen auf einen Stillstand der Suspension hin. Aus diesem Grund ist der $[q/p]$ -Wert in einigen nachfolgenden Abbruchkriterien enthalten (z.B. in der GIN-Methode in Kapitel 4, in der Amenability Theory in Kapitel 3 und in der ACG-Methode in Kapitel 5). In der Praxis ist es mittlerweile üblich, während der Injektion – neben den Injektionsdruck-Injektionszeit-, Durchfluss-Injektionszeit- und Injektionsvolumen-Injektionszeit-Diagrammen – zusätzlich das $[q/p]$ -Verhältnis in einem Diagramm darzustellen.

Amenability Theory (Apparent-Lugeon-Methode)

In den USA werden Felsinjektionen nach der Theorie der *Zugänglichkeit* (im Originalkontext *Amenability Theory*) durchgeführt. Dabei werden vor der Injektionsmaßnahme Wasserabpressversuche ausgeführt und aus den Testergebnissen eine mögliche Suspensionsmischung erstellt. Die Injektion wird als eine Art kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen, in dem die *Newton'sche Flüssigkeit* (Wasser) durch eine *Bingham'sche Flüssigkeit* (Suspension) ersetzt wird. Sobald die ausgewählte Start-Suspensionsmischung bei der Injektion in ein Kluftsystem eindringt, wird beurteilt, wie *zugänglich* die Klüfte für die ausgewählte Suspensionsmischung sind. Dafür wird während der Injektion aus der Durchflussrate, dem Injektionsdruck und der Viskosität der Suspension auf einen scheinbaren Lugeon-Wert (im Originalkontext *apparent-Lugeon-Value*) zurückgerechnet und mit dem ursprünglichen Lugeon-Wert aus den Wasserabpressversuchen verglichen. Der Zugänglichkeitskoeffizient (im Originalkontext *Amenability Coefficient*) sagt dabei aus, wie viele der angetroffenen Klüfte von der Suspension im Verhältnis zu Wasser *zugänglich* sind. Die Suspensionsmischung wird während der Injektion so lange optimiert, bis in der Regel mindestens 75% der Klüfte für die Suspension zugänglich sind. Die Injektion wird abgebrochen, sobald der scheinbare Lugeon-Wert einen Zielwert erreicht.

3.1 Beschreibung

3.1.1 Scheinbarer Lugeon-Wert (Apparent-Lugeon-Value)

Wie bereits in der Einleitung kurz beschrieben, wird bei dieser Methode die Injektion als eine Art kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen. Die rheologischen Eigenschaften der Suspension (*Bingham'sches Fluid*) werden mit einem Korrekturfaktor auf die Eigenschaften des Wassers (*Newton'sche Flüssigkeit*) relativiert. Aus der Durchflussrate, dem Injektionsdruck und der Viskosität (ausgedrückt durch die Marsh-Zeit) wird auf einen scheinbaren Lugeon-Wert Lu_{app} zurückgerechnet. In der Literatur wird der scheinbare Lugeon-Wert oftmals auch als *Grouting Lugeon Value* Lu_{gr} bezeichnet. Die Berechnung des scheinbaren Lugeon-Werts Lu_{app} oder Lu_{gr} wird mit Formel 3.1 durchgeführt. [33, 6]

$$Lu_{app} = Lu_{gr} = \frac{q(l/min)}{1(l/min)} \cdot \frac{1(m)}{L_{Abschnitt}(m)} \cdot \frac{10(bar)}{p(bar)} \cdot \frac{t_{M.Suspension}(s)}{t_{M.Wasser}(s)} \quad (3.1)$$

Lu_{app}, Lu_{gr}	Scheinbarer Lugeon-Wert [$l/min/m$ bei 10 bar]
$t_{M.Suspension}$	Marsh-Zeit der Suspension [s]
$t_{M.Wasser}$	Marsh-Zeit des Wassers [s]
$L_{Abschnitt}$	Länge des Prüfabschnitts [m]
p	Injektionsdruck [bar]
q	Durchflussrate [l/min]

Für die Ermittlung der Marsh-Zeit wird in den USA der Marsh-Trichter aus der ASTM D6910 [52] verwendet. Dieser Trichter ist so dimensioniert, dass eine Viertelgallone (946 ml) Wasser bei einer Öffnung von 3/16" (4,76 mm) in 26 Sekunden ausfließt. Der in Europa übliche Marsh-Trichter aus der DIN V 4126-100 [51] ist so dimensioniert, dass 1000 ml Wasser bei einer Öffnung von 4,76 mm in 28 Sekunden ausfließen. Für die Bestimmung des scheinbaren Lugeon-Werts ist es gleichgültig, welcher Marsh-Trichter für die Ermittlung der Marsh-Zeit verwendet wird – es muss nur der gleiche Marsh-Trichter für das Wasser und die Suspension verwendet werden. Bei der Angabe von Werten für verschiedene Marsh-Zeiten von Suspensionen ist es wichtig, den zugehörigen Marsh-Trichter-Typ mitanzugeben.

Bei Betrachtung der Gleichung 3.1 ist ersichtlich, dass aus den Echtzeitdaten aus der Injektion (Injektionsdruck und Durchflussrate) über das Verhältnis der Marsh-Zeiten auf einen äquivalenten (scheinbaren) Lugeon-Wert von Wasser zurückgerechnet wird. Reduziert man die Gleichung um den *Lugeon-Term* (Formel 3.2), ist diese Relativierung ersichtlich. [33, 6]

$$Lu_{app} = Lu_{gr} = Lu \cdot \frac{t_{M.Suspension} (s)}{t_{M.Wasser} (s)} \quad (3.2)$$

Lu Lugeon-Term [$l/min/m$ bei 10 bar]

Dieser scheinbare Lugeon-Wert dient in der Apparent-Lugeon-Methode als Abbruchkriterium. Nach Erreichen eines vordefinierten Ziel-Lugeon-Werts wird die Injektion abgebrochen. Die Ziel-Lugeon-Werte sind dabei in einer Größenordnung von 0,1 bis 1 $l/min/m$ bei 10 bar. Ob eine Suspensionsmischung für ein Kluftsystem geeignet ist, wird über den Zugänglichkeitskoeffizienten ermittelt.

3.1.2 Zugänglichkeitskoeffizient (Amenability Coefficient)

Die Zugänglichkeit wird definiert als die Fähigkeit einer bestimmten Suspensionsmischung, in das vorhandene Kluftsystem einzudringen. Wasser ist im Gegensatz zu Suspensionen im Stande, auch in feinste Klüfte einer bestimmten Felsformation einzudringen. Die Penetrierbarkeit von Suspensionen ist dagegen deutlich schlechter. Nur alle Klüfte, die groß genug für die ausgewählte Suspension sind, können injiziert werden. Die Zugänglichkeit wird ausgedrückt durch den Zugänglichkeitskoeffizienten A_c . Dieser ist der Quotient aus dem scheinbaren Lugeon-Wert Lu_{gr} , der von der verwendeten Suspensionsmischung abhängig ist und dem Lugeon-Wert aus Wasserabpressversuchen Lu_{wa} , der direkt von den Öffnungsweiten der Klüfte abhängig ist. Der Zugänglichkeitskoeffizient A_c gibt somit den Prozentsatz von offenen Klüften an, die von einem

Bohrloch geschnitten werden und mit der ausgewählten Suspension zu erreichen sind. Die Berechnung erfolgt mit Formel 3.3. [33, 6]

$$A_c = \frac{Lu_{gr}}{Lu_{wa}} \quad (3.3)$$

A_c	Zugänglichkeitskoeffizient (Amenability Coefficient) [–]
Lu_{gr}	Scheinbarer Lugeon-Wert [<i>l/min/m bei 10 bar</i>]
Lu_{wa}	Lugeon-Wert aus Wasserabpressversuchen [<i>l/min/m bei 10 bar</i>]

Nachdem Wasser auch in Klüfte eindringt, die nicht für Suspensionen zugänglich sind, kann erwartet werden, dass die anfängliche Injektionsaufnahme (ausgedrückt mit Lu_{gr}) kleiner ist als die Aufnahme aus den Wasserabpressversuchen Lu_{app} . Der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} bezieht sich in diesem Verhältnis immer auf die ersten Minuten der Pässe. Wenn der Zugänglichkeitsfaktor etwa 75% ist, kann zumindest eine Restdurchlässigkeit nach der Injektion von 25% der ursprünglichen Durchlässigkeit – gemessen am Bohrloch – erwartet werden. Mit zunehmendem Abstand zum Bohrloch kann die Restdurchlässigkeit größer sein. Der Zugänglichkeitskoeffizient signalisiert am Anfang der Injektion sofort die Eignung einer Suspensionsmischung für das angetroffene Kluftsystem. Wenn der Zugänglichkeitskoeffizient zu gering ist, muss die Suspension angepasst werden. Die Eigenschaften werden so lange verändert, bis der Zugänglichkeitskoeffizient in der Regel größer als 75% ist. [42, 6]

3.1.3 Abbruchkriterien

Die beiden beschriebenen Parameter (der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} und der Zugänglichkeitskoeffizient A_c) dienen bei der Injektion als Entscheidungsgrundlage. Der Zugänglichkeitskoeffizient wird benützt, um die Eignung der Suspensionsmischung für das vorhandene Kluftsystem zu bewerten, während der scheinbare Lugeon-Wert schließlich für das Abbruchkriterium benützt wird. Die Injektion wird nach Erreichen eines vordefinierten Ziel-Lugeon-Werts (in der Regel bei etwa 0,1 bis 1 *l/min/m bei 10 bar*) abgebrochen.

3.2 Praktische Anwendung der Methode

Am Anfang der Injektion wird der gewünschte Zugänglichkeitskoeffizient A_c definiert. Durch Testinjektionen wird die benötigte Suspensionsmischung festgestellt, um die gewünschte Zugänglichkeit zu erreichen. In den ersten Minuten der Injektion wird dann mit dem Zugänglichkeitskoeffizienten überprüft, ob die Suspensionsmischung passend oder nicht passend ist. Bei der Amenability Theory bzw. generell auf dem amerikanischen Kontinent ist es durchaus üblich, sich eine Palette an möglichen Suspensionsmischungen vorzuhalten und je nach Kluftsystem zu benützen. [33]

Der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} wird nach Formel 3.1 während der Injektion berechnet. Dieser kombiniert die Durchflussrate mit dem Injektionsdruck. In einer richtig ausgeführten Injektion sinkt der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} zunehmend mit der Injektionszeit. In Abbildung 3.1 sind die unterschiedlichen charakteristischen Verläufe einer Injektion nach der Apparent-Lugeon-Methode dargestellt.

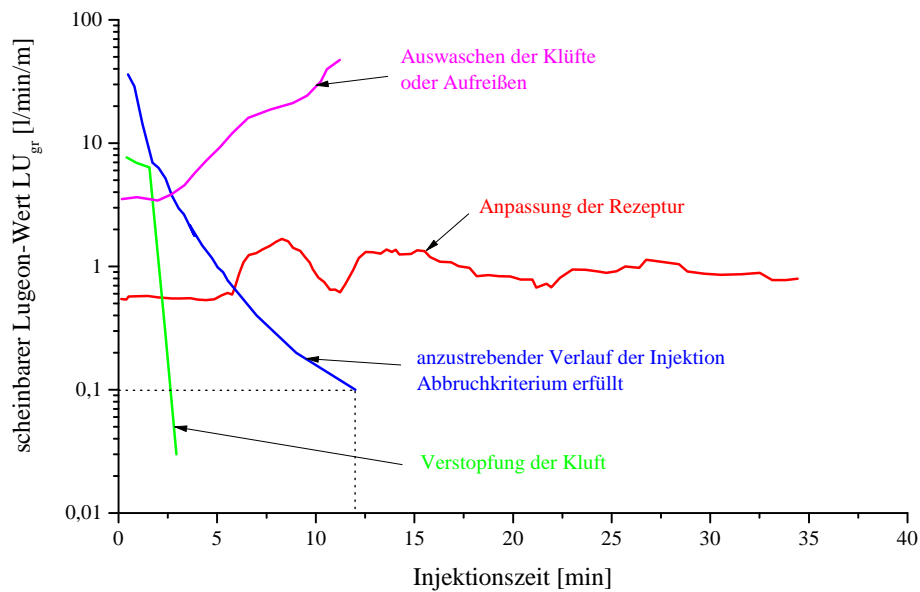


Abbildung 3.1: Mögliche Verläufe des scheinbaren Lugeon-Werts

- Steigt der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} während der Injektion an, bedeutet das, dass entweder ein Auswaschen in den Klüften stattfindet, Bohrklein verlagert wird oder ein Aufreißen stattfindet.
- Bleibt der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} gleich, ist die Suspensionsmischung nicht passend und sollte geändert werden.
- Sinkt der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} überdurchschnittlich schnell ab, kann das auf eine mögliche Druckfiltration hinweisen. Das Wasser wird aus der Suspension ausgepresst und die Kluft wird nahe dem Bohrloch verstopft. Eine Suspension mit einem niedrigeren Druckfiltrationskoeffizienten¹ sollte verwendet werden.
- Sinkt der scheinbare Lugeon-Wert Lu_{gr} stetig, so deutet dies auf eine richtige Ausführung der Injektion hin. Sobald der scheinbare Lugeon-Wert einen vordefinierten Zielwert erreicht hat, wird die Injektion abgebrochen.

3.2.1 Richtlinien für die Auswahl der Suspensionsmischung

Anhand von mehreren Injektionsprojekten und Erfahrungen von Ausführenden wurden für die Anwendung der Apparent-Lugeon-Methode Richtlinien erstellt, die in *Brown* [6] veröffentlicht wurden. Das Befolgen der in den Richtlinien erläuterten Injektionsphilosophie hat sich in der Praxis bewährt. Anhaltspunkte für Entscheidungen wie eine Veränderung des W/Z-Werts, die Verwendung von Fein- oder Feinstbindemittel oder eine Verwendung von Zusatzmittel sind in den Richtlinien verankert. Dabei greifen sie auf die bereits beschriebenen Parameter wie den Zugänglichkeitskoeffizienten und den scheinbaren Lugeon-Wert zurück, die während der Injektion kontinuierlich beobachtet werden. In den nachfolgenden Punkten sind diese Anhaltspunkte für die Auswahl der Suspensionsmischung kurz dargestellt. [6]

¹Der notwendige Druckfiltrationskoeffizient wird im Allgemeinen in der Ausschreibung vorgegeben. Ein typischer Wert liegt etwa bei $0,04 \text{ min}^{-1/2}$.

Lugeon-Werte über 150 Lu

Bei Lugeon-Werten über 150 Lu sollte die Injektion mit einer stabilen zementbasierten Suspension mit einer niedrigen Viskosität und durchschnittlichem W/Z-Wert gestartet werden.² [6]

- Bleibt der scheinbare Lugeon-Wert annähernd konstant, während die Injektionsvolumen eher willkürlich sind (auch bis zum 1- oder 2-fachen theoretischen Volumen), sollte der W/Z-Wert der Suspension schrittweise verringert werden.³ Dabei sollte die Fließgrenze so wenig wie möglich erhöht werden, aber gleichzeitig der Widerstand gegen Druckfiltration gegeben sein. [6]
- Bleibt der scheinbare Lugeon-Wert auch nach der Verringerung des W/Z-Werts konstant, sollten durch Zugabe von Additiven die Fließgrenze und die Viskosität schrittweise erhöht werden. Die Reibungsverluste der Suspension in den Klüften sollten schließlich ein Beenden der Passe ermöglichen. [6]
- Sinkt der scheinbare Lugeon-Wert an einem Punkt der Injektion ab, sollte zunächst das verpresste Injektionsvolumen bewertet werden: [6]
 - Ist noch nicht genug Volumen injiziert worden, um die gewünschte Ziel-Reichweite zu erzielen, so kann entweder die Viskosität verringert werden oder Fein- bzw. Feinstbindemittel verwendet werden. [6]
 - Ist genug Volumen injiziert worden, so kann die Passe beendet werden, ohne die Suspension weiter zu verändern. [6]

Kommt es bei der Injektion zu Austritten, müssen Kompromisse gemacht werden, um die Ausbreitung der Suspension einzudämmen. Typischerweise wird der Durchfluss in der Zone reduziert und die Öffnung des Austritts verschlossen. Eine weitere Annäherung ist die Erhöhung der Zähigkeit der Suspension. Sollte dies nicht machbar oder nicht praktikabel sein, kann unter Verwendung der gleichen Suspension ein Beschleuniger verwendet werden. Gibt man dieser injizierten Passe eine Pause von ein paar Minuten, kann die Injektion fortgesetzt werden. [6]

Lugeon-Werte zwischen 30 und 150 Lu

Bei Lugeon-Werten zwischen 30 und 150 Lu sollte die Injektion mit einer stabilen zementbasierten Suspension mit einer niedrigen Viskosität und hohem W/Z-Wert gestartet werden.⁴ Sollte der Zugänglichkeitskoeffizient nicht angemessen sein, kann die Injektion auch mit Fein- oder Feinstbindemittel gestartet werden. Der W/Z-Wert sollte schrittweise verringert werden, wenn es die Umstände zulassen. Die Chargen sollten generell klein gehalten werden, um bei der Anpassung der Suspensionsmischung flexibel zu bleiben. Dabei können die gleichen Schritte wie für Lugeon-Werte über 150 Lu verwendet werden. [6]

²In den USA ist es üblich, den Feststoffgehalt zu Wasser anzugeben, was genau das umgekehrte Verhältnis zu dem in Europa üblichen W/Z-Wert darstellt. In Ausschreibungen nach der Amenability Theory ist für die Klassifizierung von Suspensionen im Allgemeinen nur die notwendige Marsh-Zeit angegeben. Eine Marsh-Zeit bei durchschnittlichem W/Z-Wert wäre demnach etwa 45 bis 70 Sekunden beim Marsh-Trichter aus der ASTM D6910 [52].

³In den USA ist es durchaus üblich, den W/Z-Wert so weit zu verringern, bis eine zugehörige Marsh-Zeit von etwa 150 bis 200 Sekunden beim Marsh-Trichter aus der ASTM D6910 [52] erreicht ist.

⁴Ein hoher W/Z-Wert entspricht dabei etwa einer zugehörigen Marsh-Zeit von 30 bis 40 Sekunden beim Marsh-Trichter aus der ASTM D6910 [52].

Lugeon-Werte unter 30 Lu

Bei Lugeon-Werten unter 30 Lu sollte die Injektion mit einer stabilen Suspension auf Basis von Fein- oder Feinstbindemitteln ausgeführt werden. Abhängig von den scheinbaren Lugeon-Werten und den Zugänglichkeitskoeffizienten kann der W/Z-Wert variiert werden. [6]

- Ist der Zugänglichkeitskoeffizient zu gering, sollte der W/Z-Wert so gut wie möglich angehoben werden. In diesem Fall wird die Durchflussrate sehr klein sein und das Abbruchkriterium schnell erreicht werden. [6]
- Wenn der Zugänglichkeitskoeffizient hoch ist, sollte die Injektion mit der gleichen Suspensionsmischung durchgeführt werden. Wenn sich während der Injektion der scheinbare Lugeon-Wert nicht verändert, sollte der W/Z-Wert von Feinzement schrittweise verringert werden. Dabei soll auf eine niedrige Viskosität geachtet werden, da es in diesem Fall möglich ist, dass kleine Klüfte zu größeren Klüften führen. [6]

Führt bei einer generellen geringen Zugänglichkeit auch eine Erhöhung des W/Z-Werts zu keiner Verbesserung, können Suspensionen auf Basis von Kunstharzen und Polyurethanen verwendet werden. [6]

Anzeichen von Auswaschen

Zeigt sich ein Auswaschen von sandig, schluffig oder tonig gefüllten Klüften durch zu hohe Drücke (beschrieben unter Kapitel 2.6), werden die Injektionsvolumen allmählich steigen. An diesem Punkt ist der Zugänglichkeitskoeffizient theoretisch größer als 100% und der scheinbare Lugeon-Wert höher als die anfängliche Durchlässigkeit. Die Suspensionsmischung sollte so schnell wie möglich verändert werden und die Injektionsdrücke so schnell wie möglich verringert werden. [6]

Anzeichen von Füllen

Zeigt sich ein Füllen mit sandigem, schluffigem oder tonigem Material in den Klüften (beschrieben unter Kapitel 2.6), so sollte ebenfalls die Suspension angepasst werden. Dabei sollten Suspensionen mit hohem W/Z-Wert und niedrigem Druckfiltrationskoeffizienten oder alternativ stabile Suspensionsmischungen auf Basis von Fein- oder Feinstbindemitteln verwendet werden. Unter keinen Umständen darf die Injektion unterbrochen werden, da Feststoffteilchen sich setzen und den Weg der Suspension verstopfen könnten. [6]

3.3 Vor- und Nachteile

Für die Anwendung der Amenability Theory gibt es klar definierte Richtlinien. Alle Entscheidungen für die Auswahl der Suspensionsmischung oder dem Abbruch der Passe basieren auf einfach berechenbaren Parametern aus den Echtzeit-Injektionsdaten. Dadurch kann eine Injektion nach der Apparent-Lugeon-Methode von weniger gut ausgebildetem Personal ebenso gut ausgeführt werden wie von gut ausgebildetem Personal.

Für das Treffen von Entscheidungen wird bei dieser Methode im Allgemeinen nicht unbedingt das Fachwissen von Experten benötigt, sondern die Entscheidungen können von den Ausführenden anhand der definierten Richtlinien direkt vor Ort und Stelle getroffen werden.

Bei der Methode wird die Injektion als kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen. Die Lugeon-Werte aus der Injektion werden mithilfe der Marsh-Zeit auf vergleichbare Lugeon-Werte aus Wasserabpressversuchen relativiert. Grundsätzlich ist dieser Ansatz kein schlechter, denn die scheinbaren Lugeon-Werte aus der Injektion könnten somit direkt mit den Ergebnissen aus Wasserabpressversuchen zu Beginn der Injektionsmaßnahme verglichen werden. Während der Injektion wäre somit ständig ein Erfolg oder Misserfolg zu sehen. Dieser scheinbare Lugeon-Wert gäbe sozusagen Auskunft über die Rest-Durchlässigkeit des Systems. Jedoch ist diese Vorgehensweise fragwürdig, zumal die Marsh-Zeit keine wirkliche Aussage über die Viskosität liefert. Die Fließgrenze und die Dichte der Suspension, die Seitenreibung im Marsh-Trichter sowie die Messungenauigkeit haben einen größeren Einfluss auf die Marsh-Zeit als die Viskosität selbst. In Abbildung 3.2 wird die Marsh-Zeit ausgewählter Suspensionen mit der tatsächlichen Viskosität verglichen. Würde die Marsh-Zeit eine gute Aussage über die Viskosität liefern, so würde dieser Zusammenhang im Diagramm sichtbar sein.

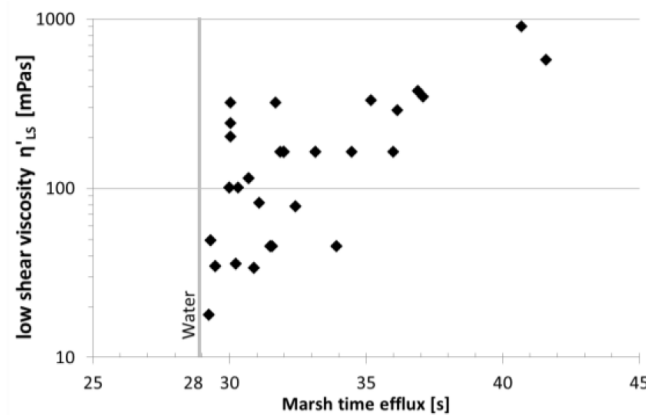


Abbildung 3.2: Vergleich zwischen Marsh-Zeit und Viskosität, aus [19]

Für das Abbruchkriterium, in dem der scheinbare Lugeon-Wert einen vorgegebenen Zielwert erreichen muss, ist diese Vorgehensweise eher unproblematisch, da der scheinbare Lugeon-Wert nichts anderes ist als das relativierte $[q/p]$ -Verhältnis. Bei Verwendung einer einzigen Suspensionsmischung kann der scheinbare Lugeon-Wert somit einen guten Hinweis auf die Kluffüllung liefern. Die eigentliche Problematik liegt aber bei der Verwendung verschiedener Suspensionsmischungen. Da die Marsh-Zeit keine wirkliche Aussage über die Viskosität liefert, werden die scheinbaren Lugeon-Werte mithilfe der Marsh-Zeit unter Umständen falsch relativiert. Tatsächlich würde bei einigen Suspensionen die Injektion früher abgebrochen, bei einigen später abgebrochen werden, während die Aussage zur Rest-Durchlässigkeit in den Klüften über den scheinbaren Lugeon-Wert nicht richtig wäre. An denkbar wäre in dieser Hinsicht eine Verwendung der echten Viskosität zur Relativierung. Mit Rotationsviskosimetern könnte auf der Baustelle direkt die Viskosität festgestellt werden.

Bei der Methode wird anhand des Zugänglichkeitsfaktors, der abhängig vom scheinbaren Lugeon-Wert ist, bestimmt, ob eine Suspension passend oder nicht passend ist. Die Richtlinien sehen in der Regel eine immer dickflüssiger werdende Suspension mit niedrigem W/Z-Wert vor, sofern der scheinbare Lugeon-Wert konstant bleibt. Bei dicker werdenden Suspensionsmischungen verändert sich auch die Viskosität. Diese hat entscheidenden Einfluss auf die Pumpbarkeit und folglich auf die Durchflussrate. Suspensionen mit einem niedrigen W/Z-Wert sind schwieriger pumpbar. Bei niedriger Durchflussrate aufgrund der Viskosität kann ein niedriger scheinbarer Lugeon-Wert vorgetäuscht werden, der zum Abbruch führt. Die Klüfte müssen dabei noch gar nicht gefüllt sein – das Injektionsziel noch nicht erreicht sein.

In der Praxis werden einer Mischanlage oft mehrere Injektionspumpen zugeordnet. Die Pumpen beaufschlagen dabei verschiedene Passen in verschiedenen Injektionsbohrungen. In der Regel sind nicht alle Klüfte, die durch die einzelnen Passen beaufschlagt werden, gleich. Große Klüfte benötigen im Allgemeinen eine Suspensionsmischung mit niedrigem W/Z-Wert, kleine Klüfte eine mit hohem W/Z-Wert. Bei gleichzeitiger Injektion von verschiedenartigen Klüften mit nur einer Mischanlage muss sich auf eine adäquate Suspensionsmischung geeinigt werden. Laut Grundlagen und Richtlinien dieser Methode wäre die Effizienz der Injektionsmaßnahme damit verloren.

3.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- Durchführung von Wasserabpressversuchen

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Durchflussrate [l/min]
- Injektionsdruck [bar]
- Marsh-Zeit der Suspension [s]

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher [$-$]
- Maximaler Injektionsdruck erreicht [bar]
- Scheinbarer Ziel-Lugeon-Wert erreicht [$l/min/m$ bei $10 bar$]

Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe

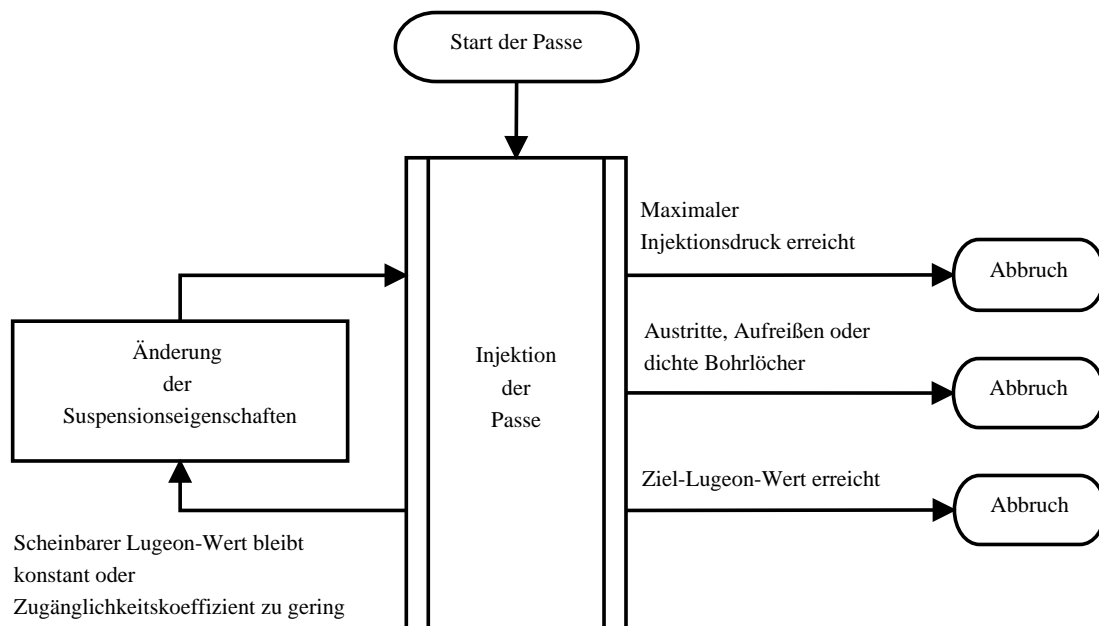


Abbildung 3.3: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der Apparent-Lugeon-Methode

Grouting Intensity Number (GIN-Methode)

Eine der Basis-Ideen der GIN-Methode ist die Vernachlässigung der Wasserabpressversuche zu Beginn der Injektionsmaßnahme. Der Injektionsprozess wird direkt gesteuert durch Erkenntnisse aus den bereits injizierten Pässen (jede Pässe dient als Testinjektion). Dabei werden primäre Injektionsbohrungen in weitem Raster hergestellt und sekundäre Injektionsbohrungen zwischen diesen platziert. Anhand der Datenauswertungen aus den durchgeführten Injektionen wird entschieden, ob zusätzlich tertiäre oder quartäre Bohrungen (zwischen den primären und sekundären) hergestellt werden. Eine weitere Basis-Idee ist die Verwendung einer einzigen Suspensionsmischung, um die Abläufe zu vereinfachen. Die Injektion wird entweder nach Erreichen eines maximalen Injektionsvolumens pro Bohrlochmeter, eines maximalen Injektionsdrucks oder einer definierten Injektionsintensität (*Grouting Intensity*) abgebrochen. Die Intensität – in der Theorie nichts anderes als die Energie, die in den Fels eingebracht wird – wird als GIN-Wert (*Grouting Intensity Number (GIN)*) ausgedrückt. Das Ziel dabei ist, ein gleichzeitiges Auftreten von hohen Injektionsdrücken und großen Injektionsvolumen zu verhindern, die kombiniert mit großer Wahrscheinlichkeit ein Aufreißen hervorrufen.

4.1 Beschreibung

4.1.1 Begrenzung der Injektionsintensität

In erster Linie sollten die Injektionsdrücke so hoch wie möglich sein, um eine möglichst große Reichweite der Injektion zu erzielen. In anderer Hinsicht dürfen die Drücke aber nicht eine Größe erreichen, ab der ein Aufweiten oder Aufreißen eintritt. Bei einer Injektion unter ausschließlicher Kluftfüllen (kein Kluftaufweiten) steigt der Injektionsdruck mit zunehmendem Injektionsvolumen stetig an. Kommt es während der Injektion zu einem Aufreißen, lässt sich dies im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm ablesen. Mit zunehmendem Injektionsvolumen nimmt dabei der Injektionsdruck stetig ab. In Abbildung 4.1 ist ein Auszug aus Injektionsversuchen dargestellt, in denen bewusst ein Aufreißen hervorgerufen wurde. *Lombardi* [27] und *Ewert* [12] zeigten, dass das Aufreißen im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm als eine Hyperbel sichtbar ist. Mit zunehmendem Injektionsvolumen sinkt dabei der Injektionsdruck. [27, 28]

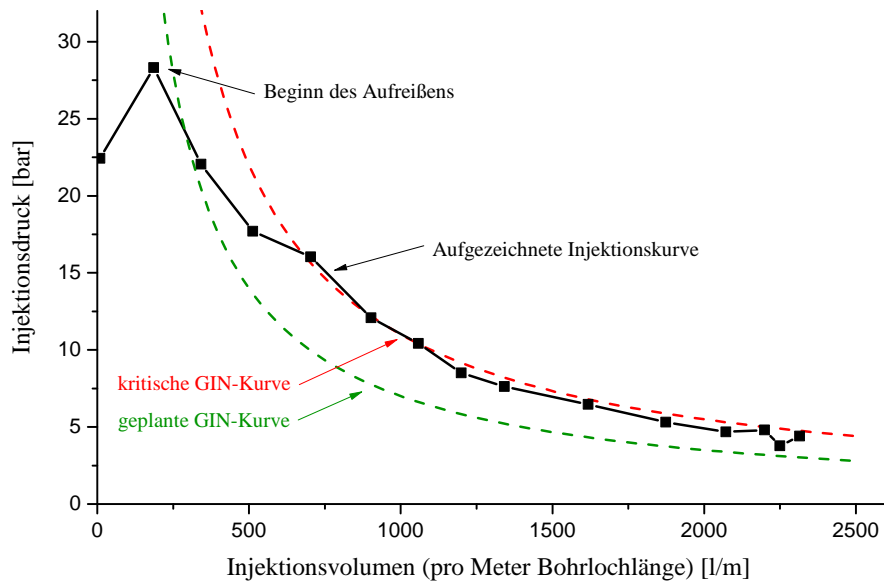


Abbildung 4.1: Injektionsversuch, in dem ein Aufreißen hervorgerufen wurde, adaptiert aus [27]

Die Injektionsversuche haben gezeigt, dass das Risiko von Aufreißen am größten ist, wenn die Intensität hoch ist – das heißt durch eine Begrenzung der Intensität kann dieses Risiko kontrolliert werden. Diese in Abbildung 4.1 gezeigte Hyperbel kann mathematisch mit der sogenannten GIN-Kurve und dem GIN-Wert beschrieben werden. [27]

$$GIN = p \cdot V \approx \text{Injektionsintensität} \tag{4.1}$$

GIN = GIN-Wert (Grouting Intensity Number) [bar · l/m]
 p = Injektionsdruck [bar]
 V = Injektionsvolumen (pro Meter Bohrlochlänge) [l/m]

Die Injektionsintensität (*Grouting Intensity*) ist in der Theorie die Energie, die in den Fels eingebracht wird. Durch die Einführung der sogenannten *Grouting Intensity Number (GIN)* wird diese Injektionsenergie nach oben begrenzt. Das Ziel dabei ist, ein gleichzeitiges Auftreten von hohen Injektionsdrücken und hohen Injektionsvolumen zu verhindern, die kombiniert mit großer Wahrscheinlichkeit ein Aufreißen hervorrufen. [28]

Für eine Ausführung einer Injektion mit reinem Kluffüllen muss folglich der geplante GIN-Wert deutlich kleiner als der kritische GIN-Wert sein, ab dem ein Aufreißen eintritt.

$$GIN_{des} \leq GIN_{krit} \tag{4.2}$$

GIN_{des} Geplanter GIN-Wert [$bar \cdot l/m$]
 GIN_{krit} Kritischer GIN-Wert, ab dem ein Aufreißen eintritt [$bar \cdot l/m$]

$$GIN_{des} \leq p_{max} \cdot V_{max} \quad (4.3)$$

Die Einführung des GIN-Limits bedeutet, dass das Limit für den Injektionsdruck nicht konstant ist, sondern im Verhältnis zur aufgenommenen Injektionsmenge hyperbolisch abnimmt. Eine GIN-Injektion ist abhängig von Injektionsdruck, Injektionsvolumen und optimiertem GIN-Wert. Die klassischen Abbruchkriterien in Form einer Druck- und Volumenbegrenzung kommen bei dieser Theorie ebenfalls zur Anwendung. Sie sind sichtbar als Begrenzung der Hyperbel durch einen maximalen Injektionsdruck p_{max} [bar] und ein maximales Injektionsvolumen V_{max} [l/m]. In Abbildung 4.2 sind die drei Abbruchkriterien im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm dargestellt. [31]

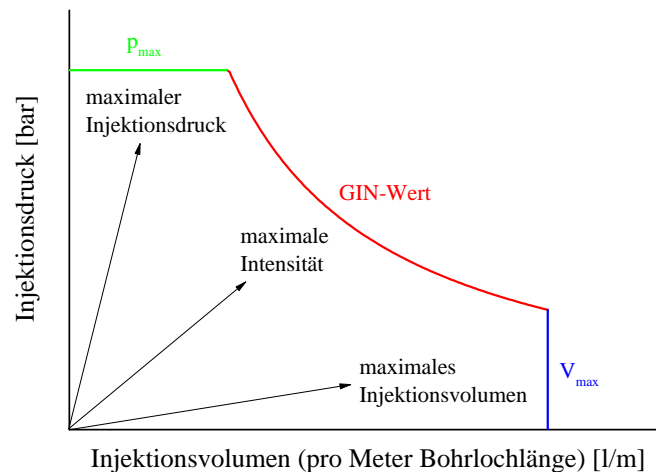


Abbildung 4.2: Abbruchkriterien nach der GIN-Methode

4.1.2 Injektionsdruck

Das Konzept der GIN-Methode basiert auf der Verwendung des Injektionsdrucks beim Pumpenstopp, wenn die Durchflussrate null ist.¹ Sobald die Injektion gestoppt wird, sinkt die Durchflussrate auf null. Dieser Stopp verursacht einen Druckabfall, der in den ersten Zehntelsekunden stattfindet. Dieser aufgezeichnete Druck beim Pumpenstopp ist der tatsächliche Injektionsdruck am Anfang des Kluftsystems, ohne Druckverluste des Fördersystems.² In Abbildung 4.3 ist eine typische Druckentwicklung dargestellt. Die roten Punkte markieren den Injektionsdruck bei einer Durchflussrate von null, der für die Berechnung des GIN-Werts verwendet wird. [28, 29]

¹In den Veröffentlichungen von Lombardi [29] wird dieser Druck als *(final) pressure at rest* bezeichnet.

²In der TPA-Methode in Kapitel 6 findet sich eine genaue Analyse von Druckabfällen. Der verwendete Injektionsdruck für die Bestimmung des GIN-Werts ist äquivalent zum Injektionsdruck am Anfang der Kluft oder dem *Shut-In-Pressure*.

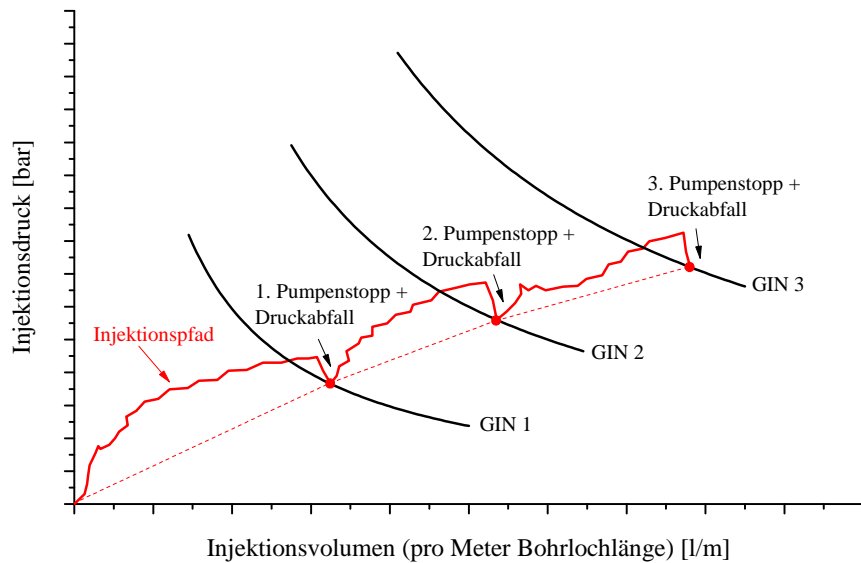


Abbildung 4.3: Bestimmung des Injektionsdrucks für den GIN-Wert, adaptiert aus [29]

Der aufgezeichnete Injektionsdruck am Manometer am Bohrlochmund beinhaltet während der Injektion die Druckverluste des Fördersystems. Dieser Druck ist in der Regel um 10 bis 20% höher als der Injektionsdruck bei einer Durchflussrate von null, der für das GIN-Kriterium benötigt wird. [28]

4.1.3 Auswahl des GIN-Werts

Die Auswahl des optimalen GIN-Werts liegt beim ausführenden Planer. Dieser muss für jeden Abschnitt unterschiedlicher geologischer Verhältnisse die GIN-Werte festlegen, um die definierten Injektionsziele zu erreichen. In der Theorie gibt es dafür drei unterschiedliche Methoden, die gegebenenfalls auch miteinander kombiniert werden können: [29]

- Mathematische Methode
- Experimentelle Methode
- Beobachtungsmethode

Mathematische Methode

Diese Methode beruht auf einem einfachen Modell des Kluftsystems. Sie eignet sich nur für sehr simple theoretische Kluftsysteme, deren Ergebnisse ausschließlich als erste Abschätzung für die weitere Planung verwendet werden sollten. Das exakte Kluftsystem kann nie präzise vorhergesagt werden, somit kann diese Abschätzung nur für einzelne Klüfte durchgeführt werden. [28, 29]

Die erzielte Reichweite kann in Abhängigkeit vom Injektionsdruck³, der theoretischen Kluftöffnungsweite und der Fließgrenze wie folgt berechnet werden: [28]

$$R = \frac{p \cdot e}{2 \cdot \tau_0} \quad (4.4)$$

- R Erzielte Reichweite [m]
- p Injektionsdruck [bar]
- τ_0 Fließgrenze der Suspension [Pa]
- e Theoretische Öffnungsweite der Kluft [m]

Unter der Annahme einer ebenen, radialen Ausbreitung in Klüften kann das Injektionsvolumen für eine einzelne Kluft wie folgt berechnet werden: [28]

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot e \quad (4.5)$$

- V Injektionsvolumen einer Kluft [l]

Durch Einsetzen beider Gleichungen in die Grundgleichung der Hyperbel (4.1) kann der GIN-Wert unabhängig von der Öffnungsweite der Kluft abgeschätzt werden: [28]

$$GIN = p \cdot V = 2\pi \cdot n \cdot k_p \cdot k_v \cdot \tau_0 \cdot R^3 \quad (4.6)$$

- n Anzahl der Hauptklüfte (pro Meter Bohrlochlänge) [–]
- k_p Koeffizient zur Berücksichtigung von Druckverlusten aufgrund der Klufrauigkeit und der Schwankung der Kluftöffnungsweite [–]
- k_v Koeffizient zur Berücksichtigung von Volumenzunahmen aufgrund von Unebenheiten und der Schwankung der Kluftweite [–]

Experimentelle Methode

Diese Methode setzt einen Feldversuch mit Testinjektionen voraus. Mit Kontrollbohrungen in verschiedenen Abständen zur Injektionsbohrung werden bei einer Verwendung unterschiedlicher GIN-Werte die jeweiligen Reichweiten gemessen. Dabei können verschiedenfarbige Suspensionen benützt werden, um die jeweiligen Ausgangspassen feststellen zu können. Ein solcher Feldversuch wird in der GIN-Methode empfohlen, jedoch ist die Ausführung sehr aufwändig. Für aussagekräftige Testinjektionen ist eine große Anzahl an Messungen in verschiedenen Tiefen notwendig. Die gemessenen Reichweiten unter den verwendeten GIN-Werten können anschließend mit Formel 4.7 auf einen GIN-Wert für eine erforderliche Reichweite bei der Injektion skaliert werden. [29]

$$GIN = \frac{\tau_0 \cdot R^3}{\tau_{0t} \cdot R_t^3} \cdot GIN_t \quad (4.7)$$

³Sollte in der Formation ein hydrostatischer Druck anstehen, muss für eine korrekte Abschätzung der Reichweite selbstverständlich der effektive Injektionsdruck verwendet werden.

- τ_0 Fließgrenze der Suspension bei der Injektion [Pa]
- τ_{0t} Fließgrenze der Suspension bei der Testinjektion [Pa]
- R Erforderliche Reichweite bei der Injektion [m]
- R_t Erzielte Reichweite bei der Testinjektion [m]
- GIN_t GIN-Wert bei der Testinjektion [$bar \cdot l/m$]

Beobachtungsmethode

Bei dieser Methode wird die Injektion mit einem vorläufigen GIN-Wert aus Erfahrungswerten⁴ oder empfohlenen GIN-Werten aus Abbildung 4.4 gestartet. In dieser Grafik sind von *Lombardi* [28] empfohlene GIN-Kurven dargestellt. Die oberste Kurve stellt eine sehr hohe Intensität mit einem GIN-Wert von 2500 $bar \cdot l/m$ dar. Die unterste Kurve stellt eine sehr niedrige Intensität mit einem GIN-Wert von 500 $bar \cdot l/m$ dar. Während der Injektion kann dieser Wert anhand der Auswertung bereits injizierter Passen nach und nach korrigiert werden. [31, 29]

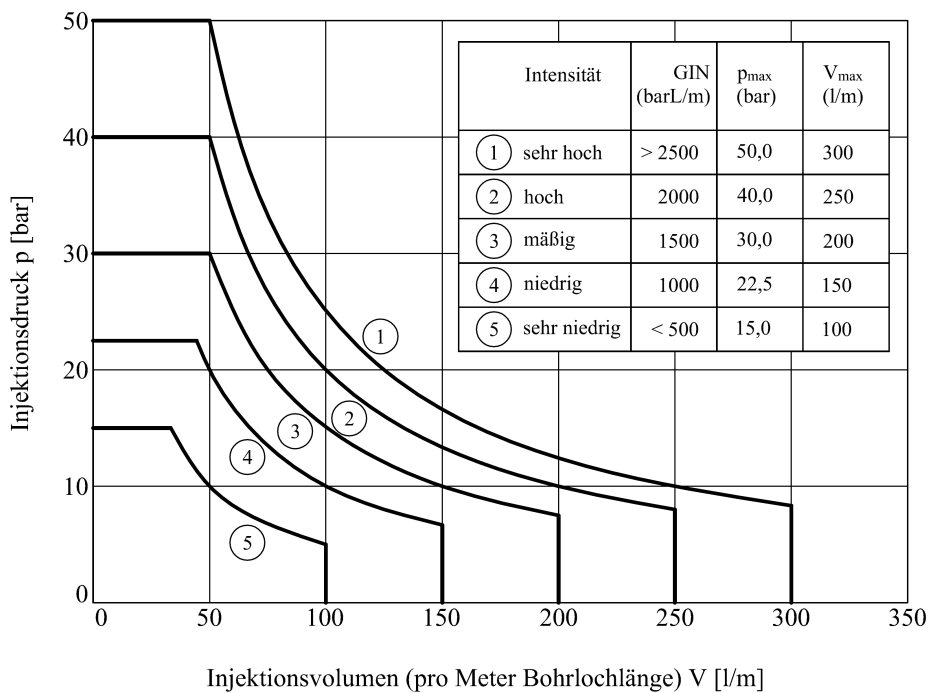


Abbildung 4.4: Empfohlene GIN-Werte, adaptiert aus [28]

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit und der angestrebten Reduktion aufwändiger Testinjektionen wird in der Praxis hauptsächlich die Beobachtungsmethode angewandt, die dabei unter dem Namen *Split-Spacing-Methode* bekannt ist und sich mittlerweile bewährt hat. Diese Split-Spacing-Methode wird in der praktischen Anwendung unter Kapitel 4.2 genauer beschrieben.

4.2 Praktische Anwendung der Methode

4.2.1 Richtlinien der GIN-Methode

Aus der Erfahrung ausgeführter Injektionsprojekte wurden ebenso für die GIN-Methode Richtlinien für die Anwendung aufgestellt.

⁴*Lombardi* [31] empfiehlt für einen Injektionsschirm einen Start-GIN-Wert von 1500 $bar \cdot l/m$.

Unter den folgenden Punkten sind diese kurz zusammengefasst: [28, 31, 29]

- Für alle Abschnitte der Injektion soll nur eine einzige (bestmögliche) stabile Suspensionsmischung verwendet werden. Damit soll die Qualität sichergestellt und der Ablauf vereinfacht werden. Zudem wird der Schwund klein gehalten. Gegebenenfalls können Zusatzmittel für die Suspension verwendet werden. Vor der Injektion ist die optimale Suspension anhand von Eignungsprüfungen festzulegen. Während der Injektion ist die Qualität der Suspension zu überprüfen.
- Die GIN-Kurve im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm soll für die Darstellung des Injektionsdrucks benützt werden. Dabei sollen die GIN-Parameter unter Berücksichtigung aller geologischen Randbedingungen sorgfältig ausgewählt werden. Während der Injektion sollen alle definierten Parameter (Maximaler Injektionspumpendruck, maximales Injektionsvolumen und maximale Intensität) anhand der Aufzeichnungen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.
- Die Injektion soll nach der Split-Spacing-Methode durchgeführt werden. Sie soll in eine Primärphase, Sekundärphase und gegebenenfalls auch eine tertiäre und quartäre Phase unterteilt werden. Dabei beginnt die Injektion bei primären Injektionsbohrungen mit großem Rasterabstand. Durch Betrachtung der Injektionspfade in den GIN-Kurven (im Speziellen das Injektionsvolumen) wird entschieden, ob zusätzliche Bohrungen im engen Raster durchgeführt werden. Somit ergibt sich ein optimaler Rasterabstand abhängig von den geologischen Verhältnissen.
- Die Passenlängen sollen mit zunehmender Tiefe größer werden, um die Injektionsmaßnahme zu beschleunigen.
- Zusätzlich zur GIN-Kurve sollen während der Ausführung die Echtzeitdaten wie das Druck-Zeit-, das Durchfluss-Zeit- und das $[q/p]$ -Volumen-Diagramm zur Kontrolle verwendet werden.

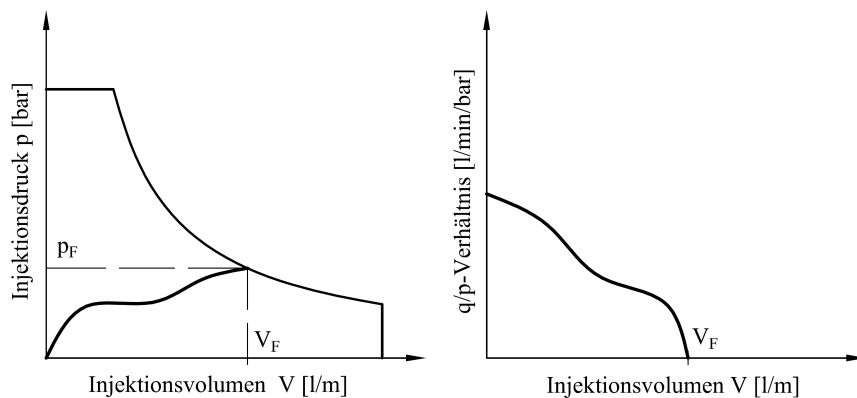


Abbildung 4.5: $[q/p]$ -Volumen-Diagramm und GIN-Kurve, adaptiert aus [28]

V_F Injektionsvolumen bei Abbruch der Injektion [l]

p_F Injektionspumpendruck bei Abbruch der Injektion [bar]

- Klüfte in trockenen Felsformationen oberhalb des Grundwasserspiegels sollen kurz vor der Injektion mit Wasser gefüllt werden, um plötzliche Blockaden durch Wasserverlust der Suspension zu verhindern.

- Während der Injektion dürfen keine Wasserabpressversuche durchgeführt werden. Sie dürfen nur zu Beginn der Injektion und nach Abschluss der Injektion zum Überprüfen der anfänglichen und der endgültigen Durchlässigkeiten durchgeführt werden.

4.2.2 Ablauf nach der Split-Spacing-Methode

Bei der Split-Spacing-Methode werden primäre Injektionsbohrungen in einem vorgegebenen weiten Raster unter Verwendung eines vorläufigen GIN-Werts injiziert.⁵ Enden die primären Injektionen im Bereich des maximalen Volumens, so sind sekundäre Injektionsbohrungen notwendig. Diese werden zwischen den primären Injektionsbohrungen hergestellt und injiziert. Anhand der Injektionsaufzeichnungen aus den bereits ausgeführten Passen der primären und sekundären Injektionsbohrungen wird wiederum entschieden, ob weitere Bohrungen notwendig sind. Tertiäre und quartäre Injektionsbohrungen werden dann in äquivalenter Weise zwischen den vorherigen Bohrungen hergestellt. In den Abbildungen 4.6 und 4.7 ist diese Vorgangsweise für eine flächige Injektion schematisch dargestellt. [29]

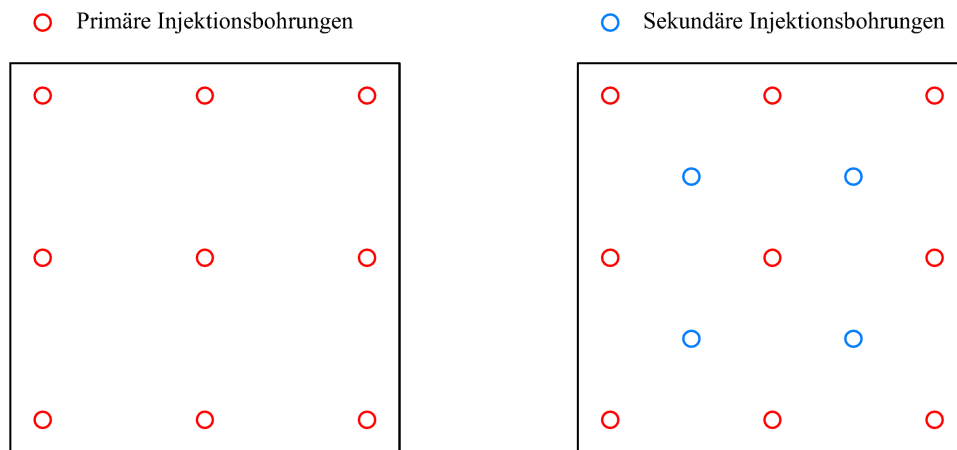


Abbildung 4.6: Primäre und sekundäre Injektionsbohrungen im Bohrlochmuster

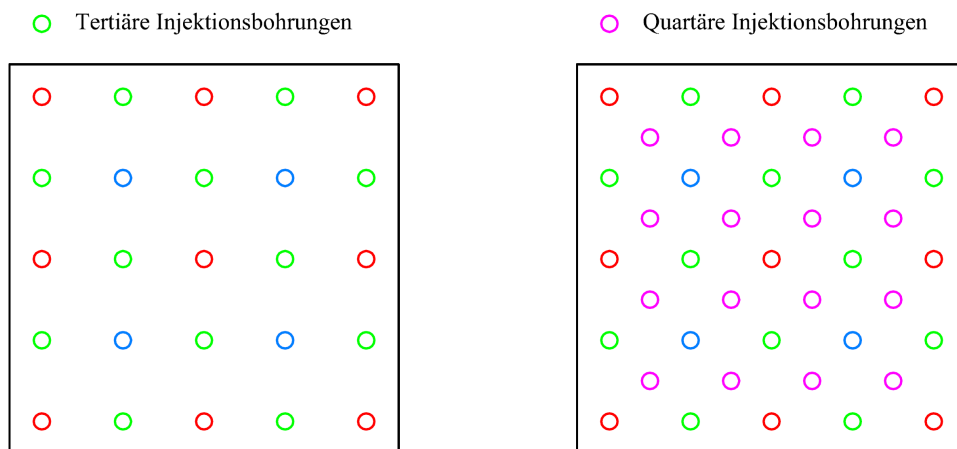


Abbildung 4.7: Tertiäre und quartäre Injektionsbohrungen im Bohrlochmuster

⁵Lombardi [31] empfiehlt für einen Injektionsschirm einen Start-GIN-Wert von $1500 \text{ bar} \cdot l/m$.

Von einer Bohrlochserie zur nächsten sollten sich die Injektionsvolumen verringern, während die Injektionsdrücke stetig bis zum maximalen Injektionsdruck ansteigen sollten (Abbildung 4.8). Ein ansteigender Injektionsdruck von einer Serie zur nächsten zeigt, dass die vorherigen Serien jeweils die größeren Klüfte abgedichtet haben und die nächsten Serien die kleineren Klüfte. Üblicherweise enden die primären Injektionsbohrungen im Bereich des maximalen Injektionsvolumens. Bei den zusätzlichen (sekundären, tertiären, quartären) Injektionsbohrungen wandern die Injektionspfade in der Regel immer weiter Richtung maximalem Injektionsdruck. Diese Abnahme der Injektionsvolumen (von primären zu sekundären, von sekundären zu tertiären, usw.) wird als Kriterium für die Steuerung der Injektion benutzt. Ein sehr gutes Ergebnis wäre eine Halbierung der Injektionsvolumen in jeder Serie, wobei in der Praxis diese Abnahme zwischen 25 und 75% streut und ebenfalls akzeptiert werden sollte. [29, 31]

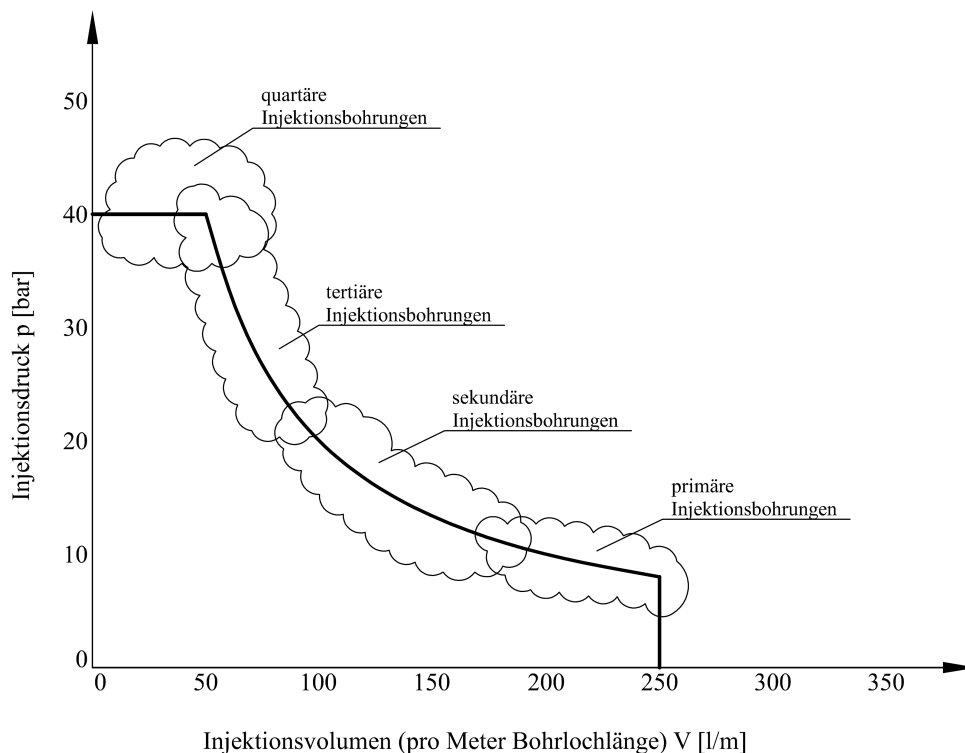


Abbildung 4.8: Primäre, sekundäre, tertiäre und quartäre Injektionsbohrungen im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm, aus [28]

Sollte die Abnahme der Injektionsvolumen zu gering sein, bedeutet das, dass der verwendete GIN-Wert für den verwendeten Bohrlochraster zu gering ist. In diesem Fall sollten der GIN-Wert erhöht oder die Abstände im Bohrlochraster verringert werden. Ist im Gegenteil die Abnahme zu hoch, sollten der GIN-Wert verringert werden oder die Abstände im Bohrlochraster vergrößert werden. [29]

4.2.3 Abbruchkriterien

In Abbildung 4.9 sind abschließend die drei möglichen Abbruchkriterien anhand von Beispielen aus der Praxis dargestellt.

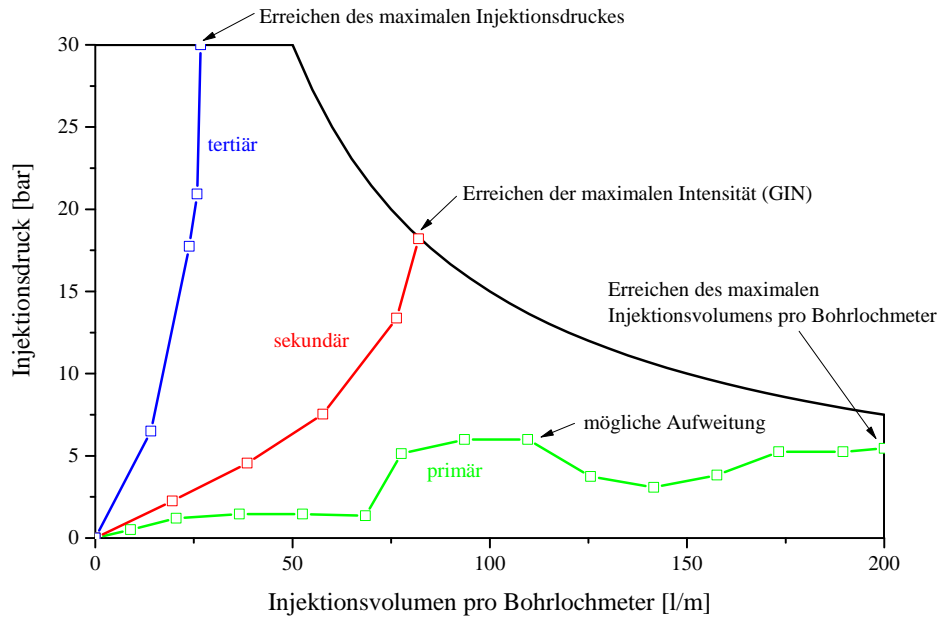


Abbildung 4.9: Mögliche Injektionspfade nach der GIN-Methode, adaptiert aus Datenaufzeichnungen einer Injektionsbaustelle

Maximales Injektionsvolumen

Der erste Injektionspfad (grün) in Abbildung 4.9 zeigt einen Druck-Volumen-Verlauf einer Passe einer primären Injektionsbohrung. Das Injektionsvolumen nimmt stetig zu, während der Injektionsdruck nur leicht ansteigt. Die Injektion wurde schließlich beim Erreichen des maximalen Injektionsvolumens beendet. Aus dem Pfad der Injektion dieser Passe kann gedeutet werden, dass es sich vermutlich um eine große Kluft handelt, die etwa bei einem Injektionsvolumen von 110 Litern aufgeweitet oder leicht aufgerissen wurde.

Sollte bei der Ausführung der Injektion die obere Druckbegrenzung (entweder durch die GIN-Konstante oder den maximalen Injektionsdruck) nicht erreicht werden, ist das ein Hinweis, dass weitere Maßnahmen notwendig sind. Dies können insbesondere sein: [28]

- Neue Bohrlöcher (sekundäre, tertiäre, quartäre) bzw. Änderung des Bohrlochcharakters
- Änderung der Suspensionsmischung
- Fortsetzen der Injektion bis zu einem höheren maximalen Injektionsvolumen
- Definitiver Abbruch der Injektion (da die Maßnahme zu keinem Ergebnis führt)
- Aussetzen der Injektion und spätere Wiederaufnahme

Das maximale Injektionsvolumen sollte, wie bereits in der Split-Spacing-Methode beschrieben, nicht als fixe obere Größe betrachtet werden, sondern als Indikator, dass Ansätze in der Planung nicht richtig sind und korrigiert werden sollten.

Maximale Intensität

Der zweite Injektionspfad (rot) in Abbildung 4.9 zeigt einen Druck-Volumen-Verlauf einer Passe einer sekundären Injektionsbohrung. Der Injektionsdruck und das Injektionsvolumen steigen verhältnismäßig an. Fällt bei einem Pumpenstopp der Druck nur langsam ab und bildet sich ein Ruhedruck aus, kann aus einem derartigen Verlauf gedeutet werden, dass der GIN-Wert richtig ausgewählt wurde.

Maximaler Injektionsdruck

Der dritte Injektionspfad (blau) in Abbildung 4.9 zeigt einen Druck-Volumen-Verlauf einer Passe einer tertiären Injektionsbohrung. Der Injektionsdruck steigt sehr schnell an, während nur geringe Injektionsaufnahmen sind. Aus dem Pfad der Injektion dieser Passe kann gedeutet werden, dass es sich um eine enge Kluft handelte, die in der tertiären Phase gefüllt wurde, während alle größeren Klüfte bereits in der primären und sekundären Phase gefüllt wurden.

4.3 Vor- und Nachteile

Die GIN-Methode sieht bei der praktischen Anwendung nur eine einzige bestmögliche Suspensionsmischung vor. Grundsätzlich vereinfacht dies die Abläufe auf der Baustelle, da mehrere Injektionspumpen von einer einzigen Mischanlage beaufschlagt werden können. In theoretischer Hinsicht ist jedoch eine einzige Suspensionsmischung nicht für alle Kluftöffnungsweiten gleich gut geeignet. Bei mehrmaligem Erreichen des maximalen Injektionsvolumens wird man sich vermutlich für eine Suspensionsmischung mit niedrigerem W/Z-Wert entscheiden. Führt man mit dieser Suspension die sekundären und tertiären Injektionen aus, so werden womöglich kleinere Klüfte mit dieser nicht mehr erreicht und es würde verfrüht zum Abbruch kommen.

Unabhängig von der Auswahl der Suspensionsmischung herrschen die notwendigen Injektionsdrücke genau an den Stellen, an denen sie benötigt werden. Große Klüfte verlangen ein großes Injektionsvolumen und haben einen niedrigen Ansprechdruck, kleine Klüfte verlangen ein kleines Injektionsvolumen, haben jedoch einen hohen Ansprechdruck. Bei engen Klüften (im speziellen in der sekundären, tertiären oder quartären Phase) sind unter dem GIN-Kriterium sehr hohe Drücke möglich. Bei großen Klüften (im speziellen in der primären Phase) sind nur niedrige Drücke möglich. Dadurch wird einerseits in großen Klüften die Reichweite begrenzt und in kleinen Klüften die Reichweite so gut wie möglich ausgeschöpft. Somit wird man in jeder Passe eine annähernd gleiche Reichweite erzielen, unabhängig von der Kluftöffnungsweite. Geologische Unregelmäßigkeiten werden mit der Split-Spacing-Methode automatisch ausgeglichen. In Bereichen mit höheren Injektionsvolumen werden sekundäre, tertiäre oder quartäre Bohrungen erstellt. In Bereichen, in denen nur kleine Injektionsvolumen aufgenommen wurden, werden keine unnötigen zusätzlichen Injektionsbohrungen hergestellt.

Die Anwendung der GIN-Methode ist für weniger gut ausgebildetes Personal ebenso möglich wie für ausgebildetes Personal. Der GIN-Wert ist einfach berechenbar, ebenso ist die Darstellung des Injektionspfads im Druck-Volumen-Diagramm anschaulich. Jedoch sind bei dieser Methode bereits mehr Entscheidungen zu treffen als in der Amenability Theory. Zuerst muss der optimale GIN-Wert für die geologischen Bedingungen richtig ausgewählt werden. Danach muss jeweils entschieden werden, ob und wo weitere

Injektionsbohrungen angeordnet werden. Für diese Entscheidungen, die in der Regel nach der Injektion eines Bereichs getroffen werden, ist ausgebildetes Personal erforderlich.

Bei einer Injektion nach der GIN-Methode wird ein gleichzeitiges Auftreten von großen Injektionsvolumen und hohen Injektionsdrücken verhindert. Das Risiko von Aufweiten oder Aufreißen wird somit auf ein verträgliches Maß reduziert. Dabei sei angemerkt, dass keine analytische Theorie hinter dieser Methode steckt, sondern lediglich in Injektionsversuchen bewusst ein Aufreißen hervorgerufen und daraus die GIN-Kurve abgeleitet wurde. Nicht alle Injektionspfade im Druck-Volumen-Diagramm zeigten dabei eindeutig eine Hyperbel. Ob diese charakteristische Kurve für alle Kluftsysteme und alle Gebirgsverhältnisse gilt, wurde nicht eindeutig geklärt.

Für die Bestimmung des GIN-Werts wird der Injektionsdruck beim Pumpenstopp, wenn die Durchflussrate null ist, verwendet. Folglich kann dieser Wert nur bestimmt werden, wenn der Injektionsvorgang unterbrochen ist. Die Schwierigkeit dabei ist, die Injektion zur richtigen Zeit zu stoppen, ohne dass der GIN-Wert dabei überschritten wird, denn der richtige Wert ist während des Betriebs der Pumpe nicht bekannt. Ein Kompromiss wäre, den GIN-Wert mit dem Injektionsdruck am Manometer am Bohrlochmund während der Injektion zu berechnen und bei Überschreiten der GIN-Kurve die Pumpe zu stoppen. Somit wäre der GIN-Wert auf jeden Fall mit etwa 10 bis 20% auf der sicheren Seite. Danach könnte in kleinen Intervallen bis zum Erreichen der GIN-Kurve weiterinjiziert werden. Ein Abbruch der Injektion beim Erreichen der maximalen Intensität wäre allerdings in jedem Fall ein Herantasten an die GIN-Kurve, was nur sehr schwierig durchgeführt werden kann. Die Injektion kann niemals beim korrekten GIN-Wert beendet werden, sondern entweder darunter oder darüber.

Die genaue Bestimmung des GIN-Werts wurde bereits ausführlich diskutiert. In dieser liegt die größte Schwierigkeit der Methode. Es ist praktisch unmöglich, den optimalen GIN-Wert in der Planung bereits richtig abzuschätzen. Auch mit Testinjektionen kann der GIN-Wert nur vage auf größeren Maßstab projiziert werden. In die Formel für die Skalierung gehen die Reichweiten zur dritten Potenz ein. Geringe Messabweichungen führen demnach bereits zu einem sehr großen Fehler im GIN-Wert. Die einzige Möglichkeit, den GIN-Wert exakt zu bestimmen, ist die Beobachtungsmethode bzw. Split-Spacing-Methode. Ebendiese hat sich in der Praxis auch bewährt. Der Vorteil darin liegt zusätzlich, dass das Kluftsystem und die geologischen Eigenschaften nicht genau bekannt sein müssen. Mit einem vorläufigen GIN-Wert aus Erfahrungen wird die Injektion begonnen und durch Beobachten der Reaktion des Systems wird der Wert laufend korrigiert. Mit dieser Vorgehensweise konnten in der Vergangenheit gute Ergebnisse erzielt werden.

4.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- (Testinjektionen)

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Durchflussrate [l/min]
- Injektionsdruck [bar]

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher $[-]$
- Maximaler Injektionsdruck erreicht [bar]
- Maximales Injektionsvolumen pro Bohrlochmeter erreicht [l/m]
- GIN-Wert erreicht [$bar \cdot l/m$]

4.4.1 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe

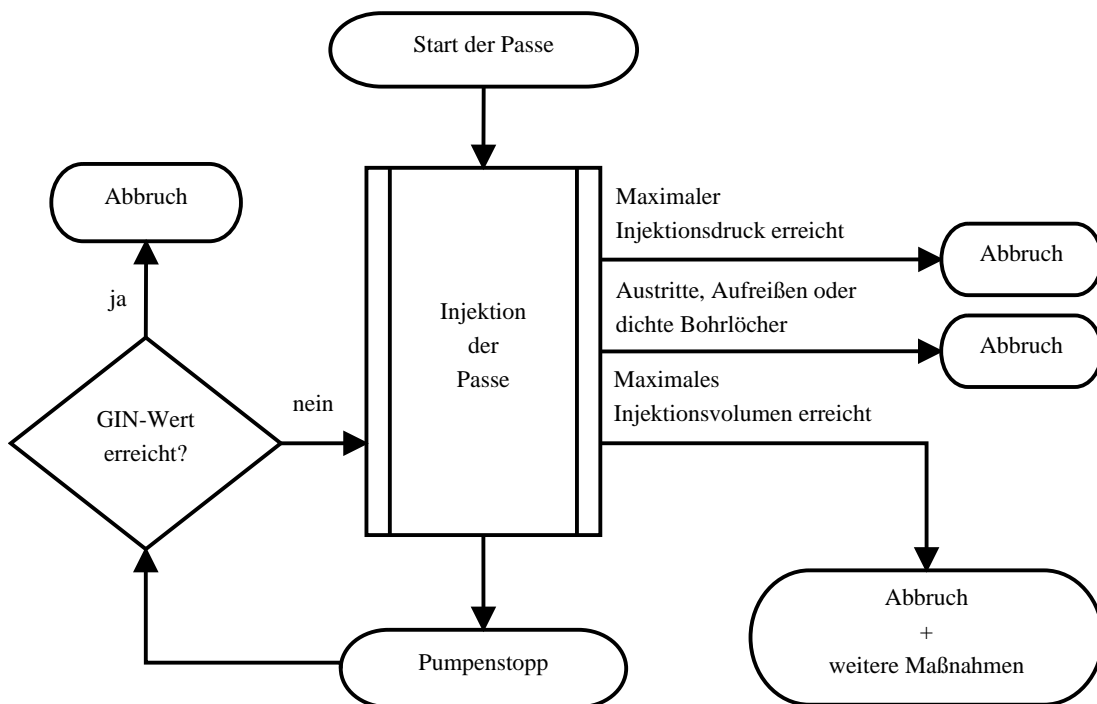


Abbildung 4.10: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der GIN-Methode

Aperture Controlled Grouting (ACG-Methode)

Aperture Controlled Grouting (ACG-Methode) ist eine Erweiterung einerseits der GIN-Methode (Kapitel 4) und andererseits der Amenability Theory (Kapitel 3). Die Voraussetzung dieser Methode ist die ausführliche Planung der Injektionsmaßnahme anhand genauer geologischer Erkundungen. Zu Beginn werden durch Kernaufnahmen und Bohrlochaufnahmen die Verteilung der Kluftscharen und die Öffnungsweiten der Klüfte aufgenommen. Ebenso werden für eine spätere Zuordnung von notwendigen Injektionsvolumen zu vorliegenden Durchlässigkeiten Wasserabpressversuche durchgeführt. Anhand von numerischen Modellen des Untergrunds wird die Injektion im Detail geplant – die Grundlage dafür ist die Theorie der *Bingham'schen Flüssigkeit* (definiert durch die Fließgrenze und die plastische Viskosität). Durch Simulationen werden am Computer der optimale Bohrlochraster und das notwendige Volumen zum Erreichen einer vorgegebenen Reichweite (mindestens der halbe Bohrlochabstand) festgelegt. Diese simulierten Injektionsvolumen werden dann mit den Ergebnissen aus Wasserabpressversuchen (Lugeon-Werte) verglichen. Einem vorhandenen Lugeon-Wert einer Passe kann damit ein notwendiges Injektionsvolumen, das aus dem Modell abgelesen wird, zugeordnet werden. Gleichzeitig werden im Modell die Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität der Suspension variiert, um für jede Kluftöffnungsweite eine optimale Suspensionsmischung zu finden. Für einen vorhandenen Lugeon-Wert wird also zusätzlich eine optimale Suspensionsmischung ausgewählt, mit der ein Ziel-[q/p]-Wert erreicht werden kann. Vor der Injektion werden entweder bei allen Passen Wasserabpressversuche durchgeführt oder die anfänglichen Echtzeit-Injektionsdaten auf scheinbare Lugeon-Werte zurückgerechnet. Anhand der Ergebnisse (oder der scheinbaren Lugeon-Werte) werden die notwendige Suspensionsmischung und das notwendige Injektionsvolumen für die Passe ausgewählt. Bei der Ausführung wird für die Steuerung der Injektion der [q/p]-Wert (oder der scheinbare Lugeon-Wert) verwendet. Dabei wird bei Betrachtung des Verhältnisses aus Durchflussrate (l/min) und Injektionsdruck (bar) jeweils entschieden, ob die verwendete Suspensionsmischung die richtige Wahl für die aktuelle Passe ist. Bleibt der [q/p]-Wert (oder scheinbare Lugeon-Wert) konstant, wird die Suspensionsmischung angepasst. Hat der [q/p]-Wert (oder scheinbare Lugeon-Wert) einen Zielwert erreicht, wird die Injektion abgebrochen. [7, 4]

5.1 Beschreibung

Die ACG-Methode unterscheidet sich von der GIN-Methode in der Hinsicht, dass zum einen das maximale Injektionsvolumen pro Passe kein fix festgelegter Wert ist, sondern anhand der vorhandenen Durchlässigkeit in der Passe (Lugeon-Wert) ausgewählt wird. Zusätzlich werden die Suspensionen variiert, während bei der GIN-Methode nur eine einzige Suspensionsmischung empfohlen wird. Bei der GIN-Methode wird mit der Beobachtungsmethode auf angetroffene Verhältnisse immer wieder reagiert, während bei der ACG-Methode die Injektion im Vorfeld detailliert geplant wird. [7, 4]

5.1.1 Erkundung

Zu Beginn werden durch Kernaufnahmen und Bohrlochaufnahmen¹ die Verteilung der Kluftscharen und die minimalen und maximalen Öffnungsweiten der Klüfte aufgenommen. Für jede Erdkundungsbohrung werden die charakteristischen Daten der Kluftscharen wie die Tiefe, Lage, Neigung, Richtung, Öffnungsweite, Füllung oder hydraulische Durchlässigkeit aufgenommen. Diese Parameter sind die Eingangsdaten in das Modell für die Simulation. Gleichzeitig werden in den Abschnitten, in denen das Kluftsystem aufgenommen wurde, Wasserabpressversuche durchgeführt. Das Ziel dabei ist, anhand der Erkundungsbohrungen Zuordnungen von Kluftigenschaften zu den Ergebnissen aus Wasserabpressversuchen herzustellen. Diese Zuordnungen dienen als Grundlagen für alle weiteren Injektionsbohrungen in Bereichen mit gleichen geologischen Verhältnissen. [7, 4]

5.1.2 Discrete Fracture Network Modelle (DFN-Modelle)

Für die Simulation der Injektion werden Discrete Fracture Network (DFN) Modelle verwendet. Diese Modelle sind realistische Modelle des Kluftsystems. Jede durchlässige Kluft wird als 1D-, 2D- oder 3D-Element modelliert. Alle Eigenschaften wie die Durchlässigkeit, Kluftöffnungsweite oder Neigung sind den Polygonen anhand der geologischen Erkundung oder der statistischen Verteilung (auf Basis der Erkundung) zugeordnet. Typischerweise kombiniert ein DFN-Modell sowohl deterministisch als auch stochastisch ermittelte Klüfte. Die deterministischen Klüfte werden direkt durch die Erkundung aufgenommen. Kleinere Klüfte, welche durch die Erkundung nicht aufgenommen werden können, werden stochastisch abgeschätzt.² [7]

Sowohl geophysikalische als auch geotechnische Untersuchungen können für die Entwicklung der DFN-Modelle verwendet werden. Bei der ACG-Methode ist es üblich, die Injektion vor der Ausführung mithilfe dieser Modelle im Detail zu planen. Die Philosophie dahinter ist, dass es der Ansicht nach effektiver und wirtschaftlicher ist, den Injektionsablauf vor der Ausführung am Computer mit Simulationen zu optimieren. Mit folgenden vier Schritten wird unter Benützung von DFN-Modellen³ die Injektion geplant: [7]

¹ Carter [7] verweist dabei auf Bohrlochkameras wie dem *Acoustic Tele Viewer* oder *Optical Tele Viewer*.

²Für die Entwicklung von DFN-Modellen wird von Carter [7] die Software *FracMan* (<http://www.fracman.com>) empfohlen.

³Für nähere Informationen zu DFN-Modellen wird auf *Golder Associates Inc* (<http://www.golder.com>) verwiesen.

1. Aus den Ergebnissen der Erkundung wird ein DFN-Modell erstellt. Insbesondere spielen dabei die Neigung, Richtung und Öffnungsweiten der Klüfte eine große Rolle. Abbildung 5.1 zeigt ein DFN-Modell für einen Bereich von 500 m x 500 m x 150 m. Die unterschiedlichen Farben zeigen die unterschiedlichen Durchlässigkeiten.

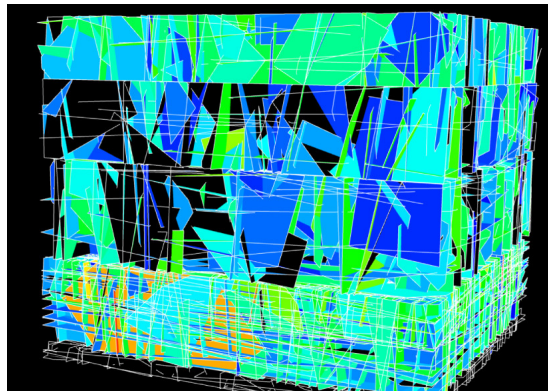


Abbildung 5.1: DFN-Modell, aus [7]

2. Der Bohrlochraster und die Injektionsabfolge werden definiert und die Ausbreitung der Suspension im DFN-Modell simuliert. Abbildung 5.2 zeigt eine solche Simulation. Grau dargestellt sind die verfüllten Bereiche, injiziert aus der Injektionsbohrung (braun).

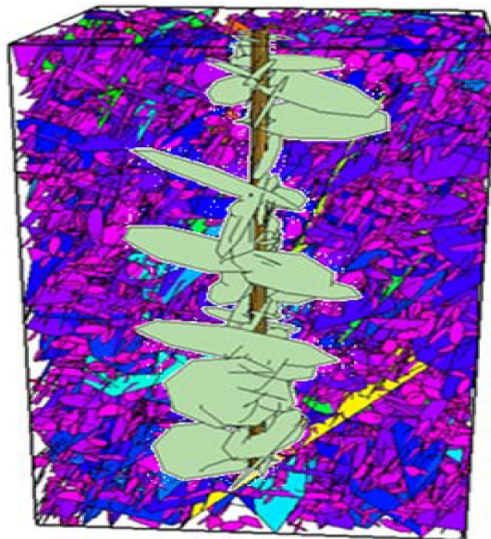


Abbildung 5.2: Simulation der Injektion im DFN-Modell, aus [7]

3. Nach der Simulation der Injektion wird die Grundwasserströmung in den injizierten Klüften ausgewertet und mit den anfänglichen Grundwasserströmungen verglichen. Daraus wird eine Aussage über die Effizienz der Injektion getroffen.
4. Der Bohrlochraster und die Injektionsabfolge werden so lange verändert und optimiert, bis eine maximale Effizienz der Injektion erreicht wurde.

5.1.3 Maximales Injektionsvolumen in Abhängigkeit der Lugeon-Werte

In den Bereichen, in denen das Kluftsystem in der Erkundung aufgenommen wird, werden ebenso Wasserabpressversuche durchgeführt. Somit ist es möglich, den Durchlässigkeiten in den Passen (ermittelt aus Lugeon-Tests) ein notwendiges Injektionsvolumen zuzuordnen. Ziel der Planung ist es, das notwendige Injektionsvolumen zum Erreichen einer vorgegebenen Reichweite (mindestens der halbe Bohrlochabstand) zu bestimmen, das je nach Lugeon-Werten in den Passen unterschiedlich ist. [7]

Das notwendige Injektionsvolumen wird für ein Injektionsprojekt (oder einen Bereich mit gleichen geologischen Eigenschaften) in Abhängigkeit der Lugeon-Werte in einer Grafik aufgetragen. Für die Grafik werden als Eingangsparmeter das notwendige Injektionsvolumen aus der Simulation und die Lugeon-Werte im betreffenden Abschnitt benötigt. Das Volumen ist abhängig vom verwendeten Bohrlochrastrer und den Kluftöffnungsweiten (ausgedrückt durch die Lugeon-Werte). Diese Grafik wird in der Planung erstellt und dient der Ausführung. Eine höhere Anzahl von Wasserabpressversuchen in der Erkundung und Simulationen in den jeweiligen Abschnitten erhöhen die Genauigkeit. Ein Beispiel für die Zuordnung von notwendigen Injektionsvolumen zu Durchlässigkeiten in den Passen ist in Abbildung 5.3 dargestellt. [4]

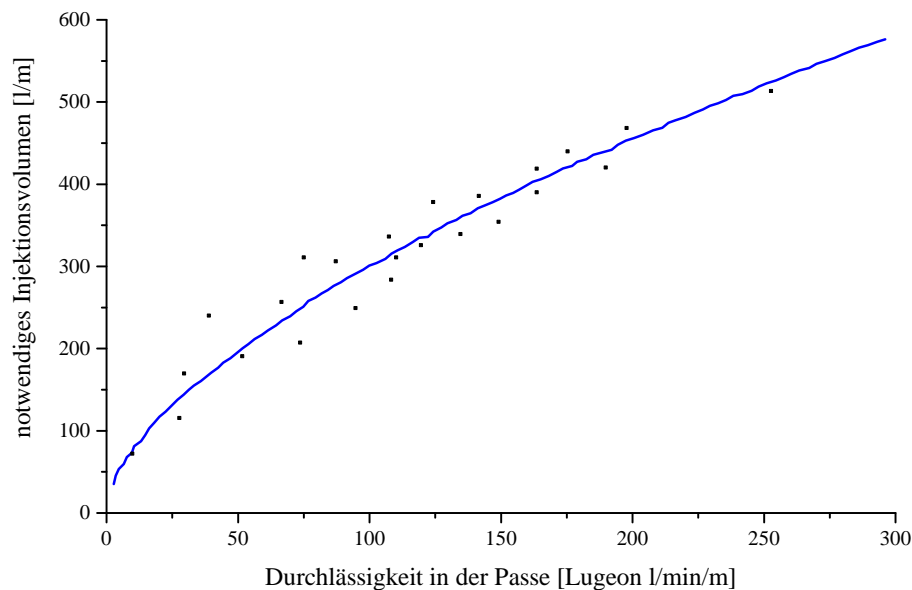


Abbildung 5.3: Zuordnung von notwendigen Injektionsvolumen zu Durchlässigkeiten in den Passen, adaptiert aus [4]

Bei der Ausführung wird für jede zu injizierende Passe der Lugeon-Wert (entweder aus Wasserabpressversuchen oder mit dem scheinbaren Lugeon-Wert in Kapitel 3) ermittelt. Aus Abbildung 5.3 wird abhängig vom Lugeon-Wert das notwendige Injektionsvolumen für jede Passe abgelesen. In der anfänglichen Phase der Injektion sollten die Injektionsaufnahmen in Abhängigkeit vom Lugeon-Wert für jede Passe aufgetragen werden, um zu kontrollieren, ob das aus den DFN-Modellen berechnete Injektionsvolumen korrekt ist. Gegebenenfalls wird während der Ausführung diese Zuordnungsgrafik angepasst. [4]

5.1.4 Auswahl der Suspension in Abhängigkeit der Lugeon-Werte

Zusätzlich zur Ermittlung der notwendigen Injektionsvolumen in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten in den jeweiligen Passen (ermittelt aus Lugeon-Tests oder Berechnung über den scheinbaren Lugeon-Wert) wird eine Zuordnung verschiedener Suspensionsmischungen zu den Durchlässigkeiten durchgeführt. Eine Suspension muss die Eigenschaften besitzen, in der vorliegenden Kluft bei Erreichen der Reichweite den Injektionsdruck so aufzubauen, dass ein Weitergehen in die nächste Passe möglich ist, ohne dass die darauffolgende Injektion in die bereits ausgeführte Passe zurückfließt. Für einen Abschluss der Passe muss entweder bei einer konstanten Durchflussrate der Injektionsdruck aufgebaut werden oder die Durchflussrate bei konstantem Injektionsdruck zurückgehen. Somit kann sichergestellt werden, dass die Suspension nicht in die gerade fertiggestellte Passe eindringt und keine Wartezeit für das Anhängen der Suspension notwendig ist. [4]

Verschiedene Kluftöffnungsweiten benötigen verschiedene Suspensionsmischungen (um die gleichen Reichweiten zu erzielen). In der Simulation werden dabei die Parameter Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η_{pl} so lange variiert, bis das Optimum für jede Kluftöffnungsweite gefunden ist. Diese Abhängigkeit der Suspension von der Kluftöffnungsweite (ausgedrückt durch den Lugeon-Wert) kann ebenfalls in einer Grafik dargestellt werden. [4]

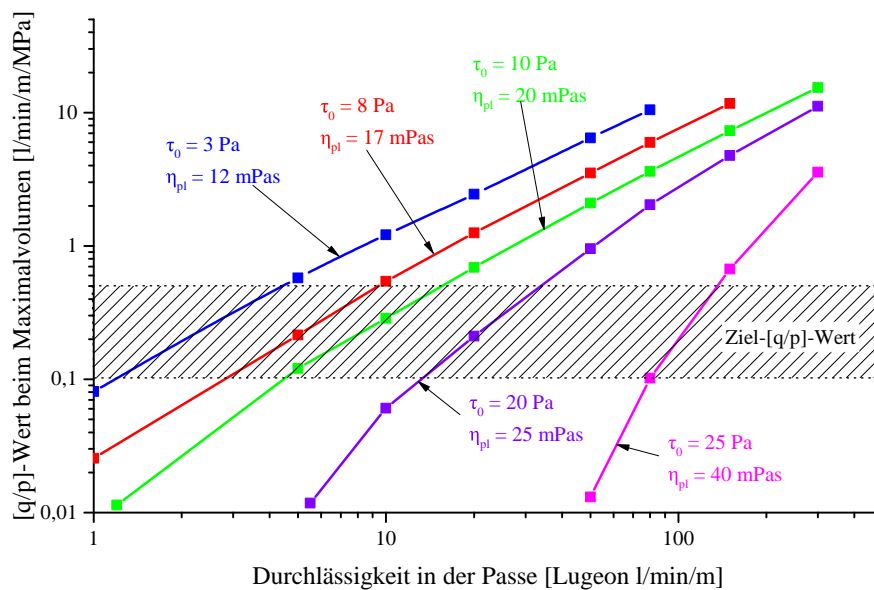


Abbildung 5.4: Zuordnung von Suspensionsmischungen zu Durchlässigkeiten in den Passen, adaptiert aus [4]

In Abbildung 5.4 ist die Zuordnung verschiedener Suspensionsmischungen zu vorhandenen Durchlässigkeiten in den Passen dargestellt. Ziel der Injektion ist es, ein Ziel-[q/p]-Verhältnis bei den maximalen Injektionsvolumen zu erreichen (in der Regel zwischen $0,1 \text{ l/min/m/MPa}$ und $0,5 \text{ l/min/m/MPa}$). Die Grafik zeigt, mit welcher Suspension diese Zielwerte erreicht werden können. Die oberste Linie (blau) zeigt dabei eine niedrigviskose Suspensionsmischung mit den Parametern $\tau_0 = 3 \text{ Pa}$ und $\eta_{pl} = 12 \text{ mPas}$. Mit dieser Suspension kann die Ziel-Durchlässigkeit für Passen mit einer anstehenden Durch-

lässigkeit $< 2 Lu$ erreicht werden.⁴ Die untere Linie (rosa) zeigt eine sehr dickflüssige Suspensionsmischung mit sehr hoher Fließgrenze und plastischer Viskosität ($\tau_0 = 40 Pa$ und $\eta_{pl} = 24 mPas$). Diese Suspension wird dabei nicht in Passen eindringen, die eine anstehende Durchlässigkeit von $< 40 Lu$ haben. Diese Suspensionsmischung würde sich somit für Lugeon-Werte von 70 bis 100 Lu eignen. [4]

In der Praxis wird beim ACG-Kriterium eine Palette von Suspensionsmischungen vorgehalten, die je nach Bedarf eingesetzt werden. Durch Eignungsprüfungen werden die Suspensionsmischungen festgelegt. Dabei wird mit Zusatzmitteln und der Steuerung des W/Z-Werts die Suspension so angepasst, dass die von der Planung vorgegebenen Parameter der Suspension (plastische Viskosität und Fließgrenze) erreicht werden und eine beliebige Palette an verwendbaren Suspensionen entsteht. Mit Viskosimetern werden bei der Eignungsprüfung die Parameter überprüft. In den Ausschreibungen werden die Suspensionsmischungen dann durch die Marsh-Zeiten definiert und klassifiziert. Für ein typisches Injektionsprojekt wird üblicherweise eine Palette von 4 bis 6 Suspensionsmischungen bereitgestellt. Jede Mischung muss in der Regel so hergestellt werden, dass das Absetzmaß nach zwei Stunden kleiner als 5% ist und der Druckfiltrationskoeffizient (siehe Kapitel 2.3) kleiner als $0,04 min^{-1/2}$ ist. Tabelle 5.1 zeigt eine mögliche Palette von Suspensionsmischungen, die in der Ausschreibung festgelegt sind und mit der Marsh-Zeit klassifiziert werden. [4]

Tabelle 5.1: Beispiel für verschiedene Suspensionsmischungen, adaptiert aus [4]

Lugeon-Wert aus WAPs	Kluftöffnungsweite	Mischung	Marsh-Zeit
<10	< 0,5 mm	A	30 s bis 33 s
10 bis 25	< 1,5 mm	B	35 s bis 38 s
25 bis 50	1,5 mm – 2,5 mm	C	45 s bis 50 s
50 bis 100	2,5 mm – 5,0 mm	D	60 s bis 75 s
100 bis 300	5,0 mm – 10,0 mm	E	> 90 s
>300	> 10,0 mm	F	> 120 s

Die angegebenen Werte für die Marsh-Zeiten gelten für den in den USA verwendeten Marsh-Trichter aus der ASTM D6910 (*Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries*). Dieser Trichter ist so dimensioniert, dass eine Viertelgallone (946 ml) Wasser bei einer Öffnung von 3/16" (4,76 mm) in 26 Sekunden ausfließt. [52]

5.1.5 Abbruchkriterien

Neben dem Abbruchkriterium des maximalen Injektionsdrucks p_{max} und des maximalen Injektionsvolumens pro Passe V_{max} , dient als Abbruchkriterium der [q/p]-Wert⁵ (oder der scheinbare Lugeon-Wert).⁶ Beide Parameter ([q/p]-Wert und scheinbarer Lugeon-Wert) sind eine Verhältniszahl und geben schlussendlich qualitativ die gleiche Auskunft. Der [q/p]-Wert wird ähnlich wie der scheinbare Lugeon-Wert wie folgt berechnet: [4]

$$[q/p] - Wert = \frac{q}{L \cdot p} (< 0,1 \text{ ltr}/\text{min}/\text{m}/\text{bar}) \quad (5.1)$$

⁴Im Originalkontext des ACG-Kriteriums werden die Lugeon-Werte mit U_L notiert.

⁵Im Originalkontext wird der [q/p]-Wert als *penetrability* beschrieben.

⁶Im Originalkontext wird der scheinbare Lugeon-Wert als *GuL* (Grouting Lugeon Unit) notiert.

q Durchflussrate [l/min]
 L Passenlänge [m]
 p Injektionsdruck [bar]

Die Berechnung des scheinbaren Lugeon-Werts Lu_{gr} ist bereits aus Kapitel 3 bekannt.

$$Lu_{gr} = \frac{q}{L} \cdot \frac{10 \text{ (bar)}}{p} \cdot \frac{t_{M.Suspension} \text{ (s)}}{t_{M.Wasser} \text{ (s)}} (< 1,0 \text{ GuL (Grouting Lugeon Unit)}) \quad (5.2)$$

$t_{M.Suspension}$ Marsh-Zeit der Suspension [s]
 $t_{M.Wasser}$ Marsh-Zeit des Wassers [s]

Durch die detaillierte Planung und Zuordnung der notwendigen Injektionsvolumen zu vorliegenden Durchlässigkeiten gilt es als optimales Ergebnis der Injektion, wenn das maximale Injektionsvolumen als Abbruchkriterium erreicht wird. Ein zu frühes Erreichen des maximalen Injektionsdrucks oder des $[q/p]$ -Werts ist ein Anzeichen, dass Ansätze der Planung nicht richtig sind.

5.2 Praktische Anwendung der Methode

Grundsätzlich sollten bei jeder Passe zu Beginn Wasserabpressversuche durchgeführt und anhand deren Ergebnissen zum einen die Suspensionsmischung und zum anderen das maximale Passenvolumen ausgewählt werden. In der Praxis wird nicht bei jeder Passe ein Wasserabpressversuch durchgeführt, da eine sehr große Anzahl an Versuchen notwendig wäre und dies unwirtschaftlich ist. Nach einer gewissen Vorlaufzeit wird aus den Echtzeit-Injektionsdaten (zu Beginn jeder Passe) auf scheinbare Lugeon-Werte (nach der Amenability Theory in Kapitel 3) rückgerechnet und anhand dieser Werte die Suspensionsmischung und das maximale Injektionsvolumen ausgewählt. [4]

Die Wasserabpressversuche oder die Rückrechnung aus den Echtzeit-Injektionsdaten am Anfang der Passe sollten nicht als einziger Indikator für die Klufteigenschaften herangezogen werden. Mehrere kleine Klüfte in einer Passe können die gleichen Lugeon-Werte liefern wie eine einzelne große Kluft (näheres dazu befindet sich unter Kapitel 2.6). Die Suspensionsmischungen für kleine Klüfte unterscheiden sich jedoch sehr stark von Suspensionsmischungen für große Klüfte. Bei gleichen Lugeon-Werten, aber verschiedenen Klüften (mehrere kleine oder eine große) könnte es somit passieren, dass die Suspension falsch ausgewählt wird. [4]

In der Praxis hat sich aus diesem Grund eine schrittweise Verdickung der Suspensionsmischung (Erhöhung der Marsh-Zeiten oder Verringerung des W/Z-Werts) durchgesetzt. Die Injektion beginnt mit Mischung A (sehr geringe plastische Viskosität und Fließgrenze) und wird bis zur Mischung F (sehr hohe plastische Viskosität und Fließgrenze) durchgeführt. Die Entscheidung, wann eine Suspensionsmischung gewechselt wird, wird auf Basis der Echtzeit-Injektionsaufzeichnungen getroffen. Einzig und allein die Kriterien, wann und ob eine Suspensionsmischung geändert werden sollte, werden vor der Ausführung festgelegt. Ein Beispiel solcher Kriterien ist in Abbildung 5.5 dargestellt. [4]

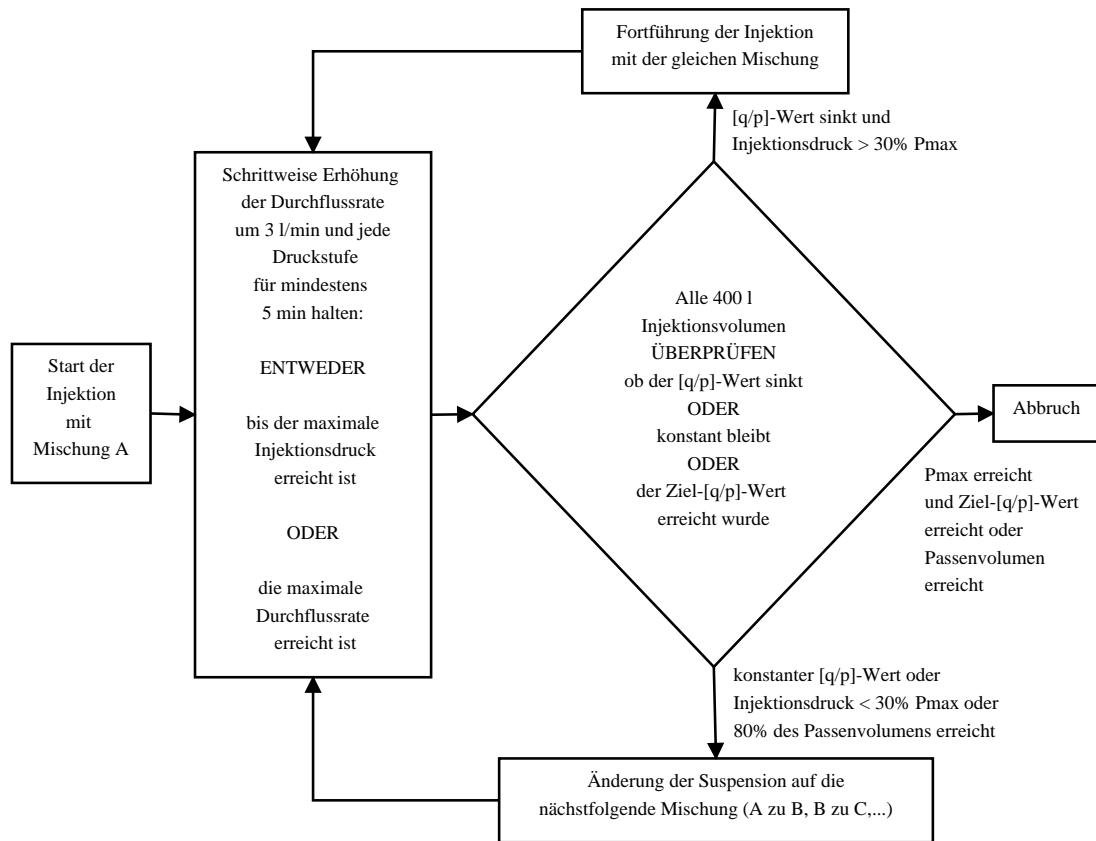


Abbildung 5.5: Mögliche Entscheidungskriterien, adaptiert aus [4]

In diesem Beispiel startet die Injektion mit Mischung A bei 3 l/min für 10 Minuten. Die Durchflussrate erhöht sich danach schrittweise um 3 l/min. Sobald sich der Injektionsdruck gegen die Durchflussrate stabilisiert hat (im Normalfall nach 2 bis 5 Minuten) kann eine Trendlinie⁷ gezogen werden. In Abbildung 5.6 ist diese Linie dargestellt. [4]

⁷Im Originalkontext wird die Trendlinie als *Safe-Grouting-Line* bezeichnet.

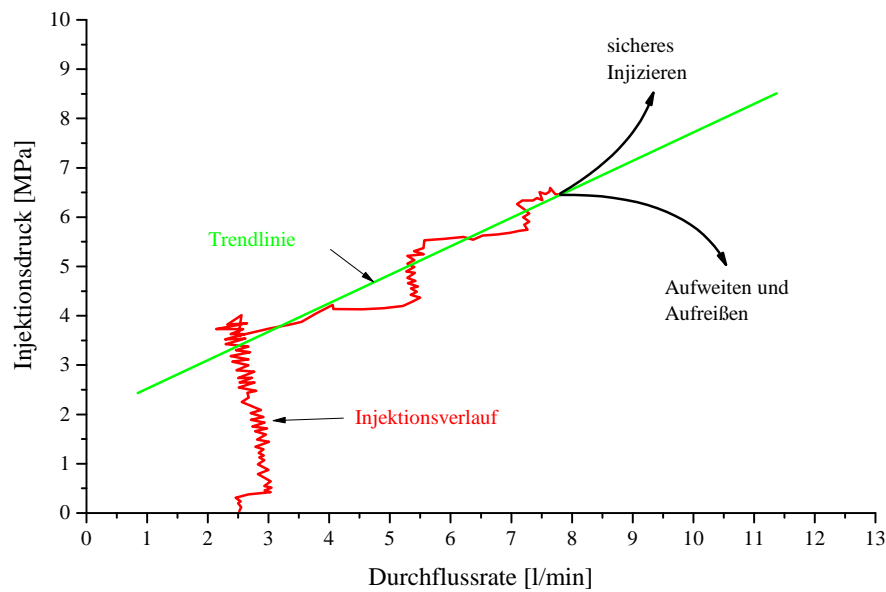


Abbildung 5.6: Trendlinie aus Injektionsdruck und Durchflussrate, adaptiert aus [4]

Unter Beobachtung dieser Trendlinie (oder *Safe-Grouting-Line*) kann der Durchfluss immer weiter erhöht werden, bis entweder der maximale Injektionsdruck oder die maximale Durchflussrate (die durch das Equipment und möglicherweise durch die Suspensionsmischung bestimmt wird) erreicht wird. Mit der Linie kann das erwartete Verhalten der Druckantwort bei einer Erhöhung der Durchflussrate projiziert werden. Sobald sich ein Aufweiten oder Aufreißen ausbildet, bewegt sich die Kurve auf die rechte Seite der Linie. In diesem Fall ist die Durchflussrate zu verringern. Die Projektion dieser Trendlinie auf die Druckachse zeigt außerdem den hydrostatischen Druck der Formation. [4]

Die nächste Entscheidung ist, ob die verwendete Mischung A die richtige Wahl für die injizierte Masse ist oder ob eine dickflüssigere Suspensionsmischung notwendig ist. Diese Entscheidung kann durch Prüfen des $[q/p]$ -Werts (oder des scheinbaren Lugeon-Werts) in Abhängigkeit von der Zeit oder Injektionsmenge getroffen werden. Wenn die Mischung richtig gewählt wurde, sinkt der $[q/p]$ -Wert (oder der scheinbare Lugeon-Wert). Eine unpassende Suspensionsmischung ist sichtbar als konstanter $[q/p]$ -Wert (oder konstanter scheinbarer-Lugeon-Wert). In Abbildung 5.7 sind unterschiedliche Verläufe der $[q/p]$ -Werte dargestellt. [4]

Sollte eine Verwendung unpassender Suspensionsmischungen festgestellt werden, muss die Umstellung auf die neue Suspensionsmischung ebenfalls wieder bewertet werden. Jede Änderung der Suspension benötigt eine erneute Überprüfung des $[q/p]$ -Werts (oder des scheinbaren Lugeon-Werts) in Abhängigkeit der Zeit oder des Injektionsvolumens, um zu bestimmen, ob die neue Mischung passend ist. In der Praxis ist es üblich, dass immer eine Charge injiziert wird, bevor sie gewechselt wird. Normalerweise ist dies ausreichend, um die Eignung der Mischung festzustellen. [4]

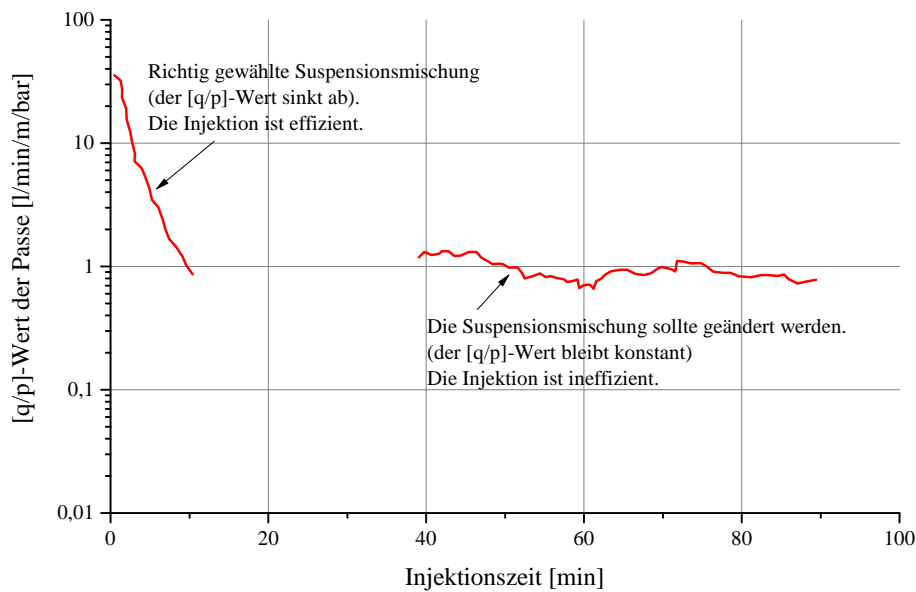


Abbildung 5.7: $[q/p]$ -Wert aufgetragen gegen die Injektionszeit, adaptiert aus [4]

5.3 Vor- und Nachteile

Die ACG-Methode ist eine Weiterentwicklung der GIN-Methode und der Amenability Theory. Die Nachteile beider Methoden werden mit dieser Methode sozusagen in Vorteile umgewandelt. Bei der GIN-Methode wird das notwendige Injektionsvolumen aus dem GIN-Wert und dem Injektionsdruck berechnet. Dieses wäre somit theoretisch bei jeder Passe – unabhängig von den geologischen und hydrologischen Bedingungen – gleich. Bei der ACG-Methode ist das notwendige Injektionsvolumen abhängig von der Durchlässigkeit in der beaufschlagten Passe (ermittelt durch Wasserabpressversuche oder durch den scheinbaren Lugeon-Wert). In praktischer Hinsicht betrachtet, ist auch bei der GIN-Methode das Injektionsvolumen abhängig von der Durchlässigkeit, da die Injektion bei Erreichen der maximalen Intensität stoppt, sobald das Produkt aus Injektionsvolumen und Injektionsdruck erreicht ist. Ob jedoch die gewünschte Reichweite erzielt ist, lässt sich dabei nicht sagen. Bei der ACG-Methode kann bei Erreichen des maximalen Injektionsvolumens davon ausgegangen werden, dass das Ziel erreicht wurde.

Für die ACG-Methode müssen sehr genaue geologische Erkundungen ausgeführt werden. Die Lugeon-Werte aus Wasserabpressversuchen müssen dabei Kluftöffnungsweiten und Kluftverteilungen in jedem Abschnitt zugeordnet werden, die sehr schwierig zu ermitteln sind. Mit Bohrlochkameras können die größeren Klüfte gut aufgenommen werden, die kleineren Klüfte müssen jedoch aus Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Für das DFN-Modell wird eine statistische Verteilung von kleinen Klüften, die nicht erkundet werden können, angenommen. Auch wenn alle Klüfte detailliert aufgenommen wurden, kann damit kein sicheres 3D-Modell gewährleistet werden. Im Allgemeinen werden die DFN-Modelle aus punktuellen Erkundungen erstellt. Bei stark inhomogenen Verhältnissen sind diese Modelle mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die notwendigen Injektionsvolumen und die Suspensionsmischung werden anhand der

Lugeon-Werte jeder Passe (ermittelt durch Wasserabpressversuche oder durch den scheinbaren Lugeon-Wert) ermittelt. Mehrere kleine Klüfte können den gleichen Lugeon-Wert liefern wie eine einzige große Kluft. Somit ist die Gefahr einer falschen Auswahl des Injektionsvolumens oder der Suspensionsmischung gegeben.

Bei der ACG-Methode wird zwar der scheinbare Lugeon-Wert nicht mehr direkt als Abbruchkriterium benützt (wie bei der Amenability Theory), jedoch noch immer verwendet. Für die Zuordnung des notwendigen Injektionsvolumens und der Suspensionsmischung wird der Lugeon-Wert der Passe benötigt. Ein Wasserabpressversuch pro Passe würde eine Vielzahl an Versuchen benötigen und wäre unwirtschaftlich. Somit wird für die Bestimmung des Lugeon-Werts der scheinbare Lugeon-Wert aus den Echtzeit-Injektionsdaten verwendet. In Kapitel 3 wurde bereits die Problematik des scheinbaren Lugeon-Werts diskutiert. In die Berechnung geht die Marsh-Zeit der Suspension mit ein, die keine wirkliche Aussage über die Viskosität liefert. Die Fließgrenze und die Dichte der Suspension, die Seitenreibung im Marsh-Trichter sowie die Messungenauigkeit haben einen größeren Einfluss auf die Marsh-Zeit als die Viskosität selbst. Die scheinbaren Lugeon-Werte, die die Grundlage für die Auswahl des notwendigen Injektionsvolumens und der Suspension sind, können aus diesem Grund verfälscht sein.

Auch in den Ausschreibungen werden die zu verwendenden Suspensionsmischungen anhand der Marsh-Zeiten klassifiziert. Diese Vorgangsweise ist ebenso fragwürdig, denn durch Zusatzmittel kann die Marsh-Zeit sehr verändert werden, ohne dass sich der W/Z-Wert dabei ändert. Eine Klassifizierung der Suspension sollte auf jeden Fall mit dem W/Z-Wert und der Fließgrenze sowie der Viskosität durchgeführt werden.

In der Praxis werden einer Mischanlage oft mehrere Injektionspumpen zugeordnet. Die Pumpen beaufschlagen dabei verschiedenen Passen in verschiedenen Injektionsbohrungen. In der Regel sind nicht alle Klüfte, die durch die einzelnen Passen beaufschlagt werden, gleich. Große Klüfte benötigen eine Suspensionsmischung mit niedrigem W/Z-Wert, kleine Klüfte eine mit hohem W/Z-Wert. Bei dieser Methode gilt das Prinzip der immer dickflüssiger werdenden Suspension. Bei nur einer Mischanlage könnte eine Passe somit nicht komplett fertiggestellt werden, da zuerst alle Passen mit Suspension A fertiggestellt werden und dann schrittweise alle Passen mit Suspension B und so weiter. Dies widerspricht dem Grundsatz, dass der Injektionsdruck in der Passe angestiegen sein muss, bevor die nächste Passe injiziert werden kann. Ein korrektes Injizieren wäre somit nur mit einem Vorhalten aller Suspensionen in verschiedenen Mischanlagen möglich.

Eine Entwicklung von DFN-Modellen sowie die Betreuung auf der Baustelle erfordert qualifiziertes und gut ausgebildetes Personal. Diese Betreuung muss während der gesamten Injektionsmaßnahme gewährleistet sein. Der Personaleinsatz sowie die genauen geologischen Erkundungen und die gesamte Planung machen diese Methode zu einer sehr aufwändigen und kostspieligen.

5.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- Genaue geologische Erkundungen mit Bohrlochkameras und Wasserabpressversuchen
- Simulation der Injektion

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Durchflussrate [l/min]
- Injektionsdruck [bar]
- (Marsh-Zeit der Suspension [s])

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher [$-$]
- Maximaler Injektionsdruck erreicht [bar]
- Maximales Injektionsvolumen erreicht [l]
- Ziel-[q/p]-Wert erreicht [$l/min/bar$]

5.4.1 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe

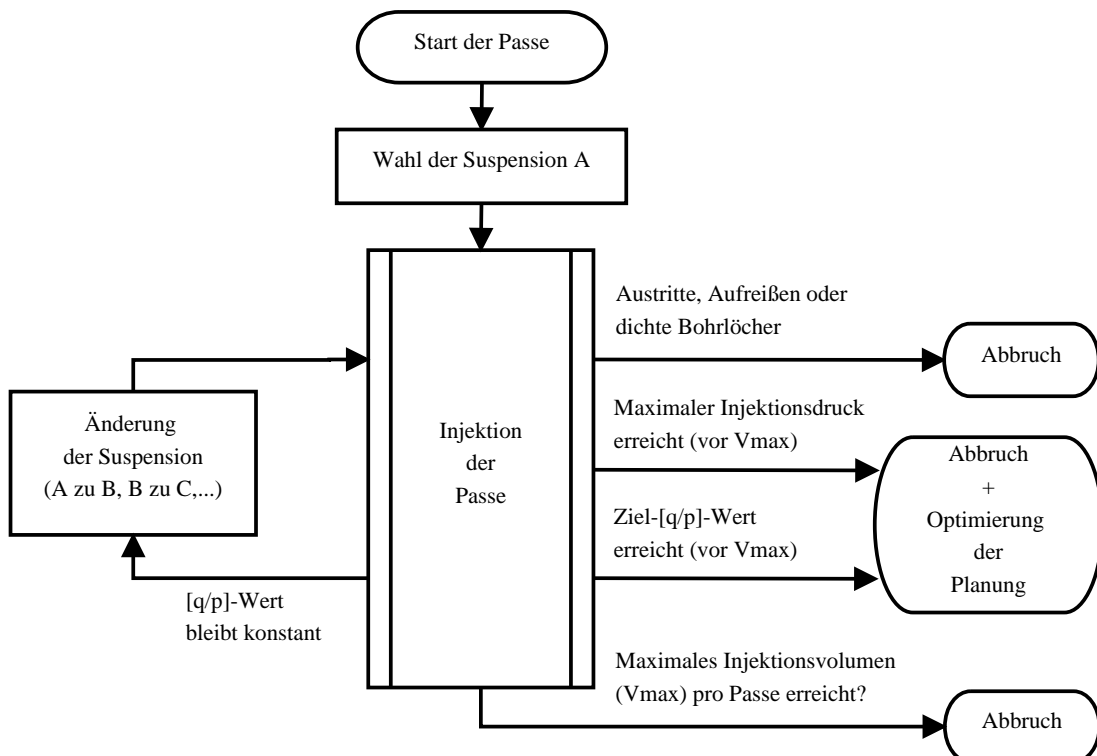


Abbildung 5.8: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der ACG-Methode

Transient Pressure Analysis (TPA-Methode)

Eine Analyse der Druckänderungen über die Zeit wird als Transient Pressure Analysis (TPA) bezeichnet. Die TPA-Methode wurde als erstes von *Stadler* [37] vorgeschlagen, dessen Idee es war, die Injektion anhand der Druckabfallkurven nach einem Pumpenstopp zu steuern. Diese Methode kommt ursprünglich aus den Erdölwissenschaften. Mit sogenannten *Well Tests* wird dort die Qualität einer Erdöllagerstätte bewertet. Dabei wird bei einem Bohrloch zur Förderung von Erdöl der Schieber schlagartig geschlossen und die Druck-Zeit-Antwort der erdölführenden Schicht aufgezeichnet. Dieser Druckaufbau wird in einem doppelt-logarithmischen Diagramm (*log-log-Plot*) über die Zeit aufgetragen und anhand dieser Kurve die Erdöllagerstätte bewertet. In der Injektionstechnologie nutzt man das selbe Prinzip, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Bei einem Pumpenstopp (oder nach Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) wird der Druckabfall über die Zeit aufgezeichnet und interpretiert.

Die Hauptidee dabei war, den doppelt-logarithmischen Plot zu verwenden, um zu entscheiden, ob die Injektion ein Kluftfüllen oder ein Kluftaufweiten ist. Zusätzlich kann aus der rein visuellen Beurteilung der Druckabfallkurven und der Betrachtung des Verhältnisses zwischen Ruhe- und Injektionsdruck auf die erreichte Sättigung der Klüfte und die vorherrschenden Kluftgeometrien geschlossen werden. Aus der Druckabfallkurve kann der Injektionsdruck am Anfang der Kluft (im Vergleich zum Injektionsdruck, gemessen am Bohrlochmund) sowie der Ruhedruck im Kluftsystem abgelesen werden. Erfahrungen aus dem Umgang mit Druckabfallkurven führten später zum Pressure Sensitive Grouting (PSG-Methode) (Kapitel 7). [34, 43, 37, 21]

6.1 Beschreibung

Die Injektion wird in regelmäßigen Intervallen unterbrochen. Nach Abstellen der Pumpe während der Injektion (oder nach Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) ist das hydraulische System einseitig geschlossen. Die Suspension dringt jedoch weiter in das Gebirge vor, weshalb der Druck in der Injektionsleitung entsprechend einer exponentiellen Funktion zu fallen beginnt. Trägt man in einem Diagramm diese Druckentwicklung auf, so erhält man die Druckabfallkurve (Abbildung 6.1). Unter Ruhedruck wird jener Druck verstanden, welcher sich nach Abstellen der Pumpe und nach Verstreichen einer

gewissen, festgelegten Zeit einstellt. Mit zunehmendem Verfüllungsgrad der Klüfte sinkt der Druck nach einem Pumpenstopp weniger rasch ab und die Druckabfallkurven werden flacher. Der Ruhedruck erreicht mit jedem Pumpenstopp höhere Werte, woraus qualitativ auf einen zunehmenden Verfüllungsgrad und auf eine abnehmende Durchlässigkeit des Kluftsystems geschlossen werden kann. [35, 21, 34]

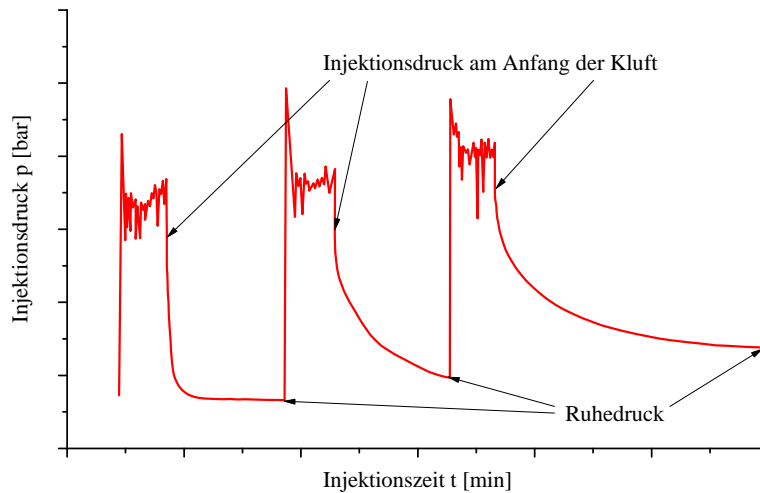


Abbildung 6.1: Verlauf einer Injektion, adaptiert aus [37, 34]

Der Druckverlauf nach Unterbrechung der Injektion liefert folgende Hinweise:

- Der erste Druckwert, gemessen nach Abstellen der Pumpe, entspricht dem wirksamen Injektionsdruck am Anfang der Kluft (*Shut-In-Pressure*). [37]
- Das Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck ist ein Maß für die Sättigung bzw. den Füllungsgrad des erreichten Hohlraums. [37]
- Die Form der Druckabfallkurve ist ein Maß für die Rückverformung der hydraulisch belasteten Rissflanken. Damit kann einerseits die Dimensionalität der Strömung bestimmt werden, andererseits können Hinweise auf die Zustände an den hydraulischen und geometrischen Grenzen der Injektion gefunden werden. [37] [34]
- Die Entwicklungen der Druckabfallkurven während der Injektion können Auskunft über die Kluftgeometrie geben. [37]

6.1.1 Injektionsdruck am Anfang der Kluft

Mit der TPA-Methode kann sehr gut festgestellt werden, welcher wahre Injektionsdruck am Anfang der Kluft wirksam ist. Unmittelbar nach dem Anhalten der Pumpe beginnt der Druck sofort sehr markant innerhalb der ersten Zehntelsekunden zu fallen. Der gemessene Druckabfall zeigt die Druckverluste im Injektionsschlauch, im Packer und am Eintritt in die Kluft. Der erste Druckwert nach diesen Druckverlusten ist per Definition aus den Erdölwissenschaften der *Shut-In-Pressure* und entspricht in dieser Form dem wirksamen Injektionsdruck am Anfang der Kluft. Diesen *Shut-In-Pressure*

zu bestimmen ist im Normalfall keine leichte Aufgabe, denn manche Kurven zeigen keinen deutlichen, abrupten Druckabfall, sondern einen etwas trägen Verlauf. Der Grund für diese Unterschiede liegt zum einen im verwendeten Injektionsequipment und zum anderen in der Art der Aufzeichnung. [21, 37]

6.1.2 Abbruchkriterien

Bei der TPA-Methode wird als Abbruchkriterium üblicherweise das Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck verwendet.

$$\omega = \frac{p_{Ruhe}}{p_{Injektion}} \quad (6.1)$$

ω	Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck [–]
p_{Ruhe}	Ruhedruck nach Verstreichen einer festgelegten Zeit (Ruhezeit) [bar]
$p_{Injektion}$	Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Shut-In-Pressure) [bar]

Für die Berechnung von ω sollte als Injektionsdruck der wirksame Injektionsdruck am Anfang der Kluft (*Shut-In-Pressure*) verwendet werden, da der Injektionsdruck noch den Druckabfall im Injektionsschlauch, im Packer und den Eintritt in den Riss beinhaltet. Für die Bestimmung des Ruhedrucks muss die Ruhezeit genau definiert sein, da der Druck über die Zeit immer kleiner wird. Wichtig ist, dass diese Zeit groß genug ist, damit der Druck Zeit hat, sich zum Bohrloch zu entspannen. [37, 21]

Das Verhältnis ω strebt – bei gleichzeitiger Verzögerung der Injektionsrate und im Falle der Verwendung kohäsiver Injektionsmittel – dem Wert 1,0 zu. Bei der Sanierung der Kölnbreinsperre¹ (Injektion von porösem Massenbeton) wurde als Abbruchkriterium ein Verhältnis ω von 0,6 bei einer Ruhezeit von 6 Minuten festgelegt. Die Angabe eines Abbruchkriteriums mit dem Verhältnis ω ist nur bei gleichzeitiger Angabe einer Ruhezeit sinnvoll. [37, 21]

6.1.3 Form der Druckabfallkurve

Unter der Vielzahl an verschiedenen Druckabfallkurven gibt es tatsächlich nur wenige verschiedene charakteristische Krümmungen der Kurven. In Abbildung 6.2 sind der Shut-In-Pressure (wirksamer Injektionsdruck am Anfang der Kluft) und die charakteristischen Krümmungen der Druckabfallkurven dargestellt. Dabei kann schon aus der rein visuellen Beurteilung festgestellt werden, ob die Suspension sich am Anfang einer offenen Kluft befindet, ob sich die Kluft bereits elastisch rückverformt oder ob es sich um eine plötzliche Verjüngung der Kluft handelt. [34]

¹Die Anwendung der TPA-Methode bei der Sanierung der Kölnbreinsperre wird in [37] und [21] beschrieben.

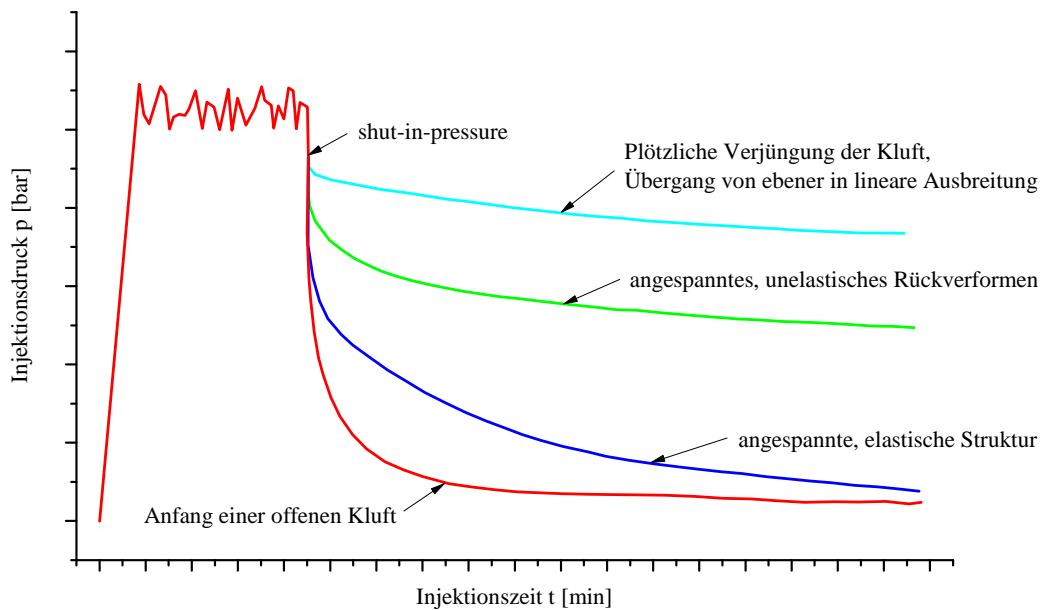


Abbildung 6.2: Shut-In-Pressure und charakteristische Krümmungen der Druckabfallkurven, adaptiert aus [21]

6.1.4 Analyseverfahren aus den Erdölwissenschaften

In der Lagerstättenkunde ist es üblich, mit sogenannten *Well Tests* die Qualität einer Erdöllagerstätte zu erkunden. *Stadler* [37] und *Kiss* [21] beschäftigten sich in den jeweiligen Arbeiten damit, die Analyseverfahren aus den Erdölwissenschaften an Felsinjektionen anzupassen. Grundlage dafür bietet der *Pressure Build-Up (PBU) Test* (oder auch *Shut-In Test* genannt). Aus einem Bohrloch wird dabei bei konstanter Durchflussrate Erdöl aus einer Lagerstätte entnommen. Nach dem Einstellen eines konstanten Drucks wird das Bohrloch geschlossen und der Druckaufbau an diesem aufgezeichnet. Der Druck baut sich dabei in Richtung des initialen Lagerstättendrucks auf. Die Form dieses Druckaufbaus gibt dabei Informationen über die Produktivität des Bohrlochs und den Lagerstättentyp. [41, 21, 37]

Bei Felsinjektionen verhält sich das System genau umgekehrt. Nach Injizieren mit konstanter Durchflussrate kann das Abstellen der Pumpe (oder das Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) als *Shut-In-Test* betrachtet werden. Dabei wird der Druckabfall am Bohrlochmund beobachtet (umgekehrtes Vorzeichen). Die Kluft wird als radiale Lagerstätte mit geringer Mächtigkeit und einer Porosität von 1 definiert. Die Form der Druckabfallkurve gibt dabei Auskunft über den Typ und Füllungsgrad der Kluft. [21]

Diagnosediagramm

In einem doppelt-logarithmischen Diagramm (Injektionsdruck-Injektionszeit) kann die Druckdifferenz² Δp und die erste Ableitung der Druckdifferenz nach der Zeit $d\Delta p/dt$

²Die Druckdifferenz wird jeweils gebildet aus der Differenz des Injektionsdrucks am Anfang der Kluft (beim Pumpenstopp oder Schließen des Schiebers) zum aufgezeichneten Druck beim Druckabfall.

aufgetragen werden. Die möglichen Verläufe von Druckabfallkurven sind in Abbildung 6.3 dargestellt, die *Diagnosediagramm* genannt wird. Die Druckdifferenz ist blau aufgetragen während die Ableitung der Druckdifferenz nach der Zeit rot dargestellt ist. Die Form dieser Kurven bildet kurz nach dem Schließen des Systems die Strömungsverhältnisse nahe der Bohrlochwand ab (anfänglicher Verlauf). Der Druckabfall nach einigen Minuten bildet die Strömungsverhältnisse in einem größeren Radius um das Bohrloch ab (mittlerer Verlauf). Bei noch längerer Zeitdauer (späterer Verlauf) werden die geometrischen und hydraulischen Grenzen des durchströmten Kluftsystems (*boundaries*) sichtbar. Beispiele solcher Grenzen (*boundaries*) sind einengende Verwerfungen, Versätze, Störungen, offene Durchlässigkeiten des unbehandelten Gebirges oder Austritte. Anhand der Form der Druckabfallkurve zu den bestimmten Zeiten kann die jeweilige Art der Ausbreitung (linear, radial oder sphärisch) abgelesen werden. Über eine statistische Auswertung der jeweils charakteristischen Erscheinungsbilder der Druckabfallkurven kann an einem Injektionsprojekt festgestellt werden, ob ein Kluftsystem nach außen abdichtet worden ist. [34]

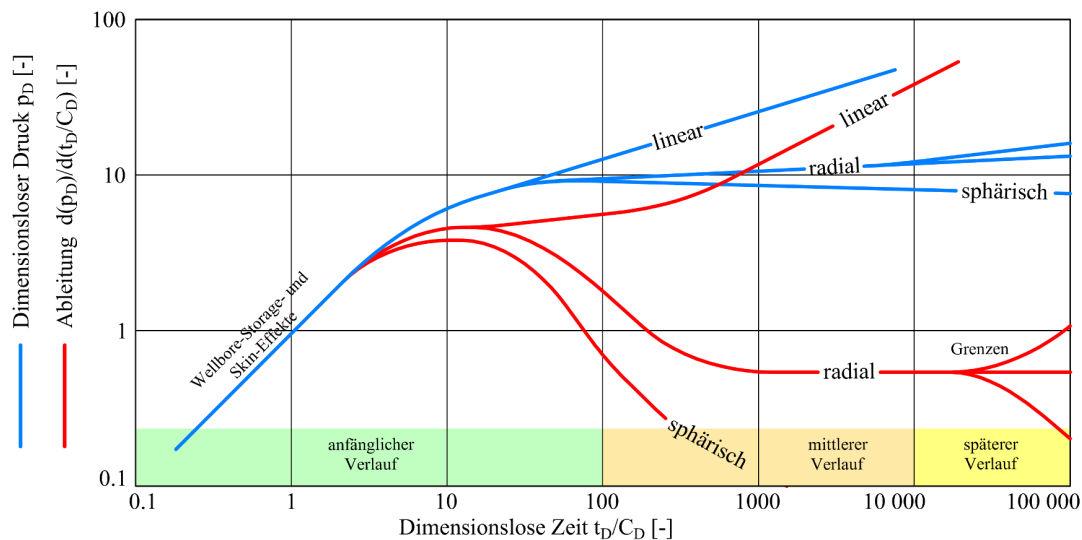


Abbildung 6.3: Diagnosediagramm, adaptiert aus [34]

Geht die Ableitungskurve im späteren Verlauf steiler nach oben, deutet das auf eine zunehmende Verengung der Strömungswege hin. Dies kann mit zunehmend dichteren Zonen im Gebirge in größerer Entfernung von der Bohrung zusammenhängen. Ein solcher Verlauf lässt auf eine positive Dichtwirkung schließen. Eine horizontale Ableitungskurve im späteren Verlauf deutet auf keine Veränderung der Strömungsbedingungen in diesem Bereich hin. Dies kann bedeuten, dass keinerlei Anzeichen von Abdichtungswirkung oder verringerter Durchlässigkeit im weiteren Abstand von den Bohrungen eingetreten sind. Diese Art der Ableitungskurve sollte eine Warnung sein, dass das Injektionsziel nicht mit der angestrebten Qualität erreicht wird. Fällt die Ableitungskurve im späteren Verlauf nach unten ab, weist das auf einen Abfluss in ein weiteres (größeres) Kluftsystem hin. Dieser Druckabfall markiert den Übergang zu unbehandeltem Gebirge. [34]

Skin-Faktor

In den Erdölwissenschaften gibt es die Bezeichnung des Skin-Effekts. Dieser Effekt beschreibt die Veränderung der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs durch die zerstörende Einwirkung des Bohrprozesses. Dabei wird im Allgemeinen die Durchlässigkeit in der Nähe des Bohrlochs reduziert. In der Folge wird die Produktivität des Bohrlochs durch eine verringerte Durchlässigkeit in der geschädigten Zone beschränkt. In Abbildung 6.4 ist die geschädigte und ungeschädigte Zone um das Bohrloch dargestellt. In der Lagerstättenkunde wird für die Berücksichtigung des Skin-Effekts der dimensionslose Skin-Faktor als Korrekturterm verwendet, um die Druckverteilung um das Bohrloch zu bestimmen und damit den Produktivitätsverlust abzuschätzen. Er ist definiert als: [41]

$$s = \left[\frac{k}{k_{skin}} - 1 \right] \ln \left(\frac{r_{skin}}{r_w} \right) \quad (6.2)$$

s	Skin-Faktor [-]
k	Durchlässigkeitsbeiwert der ungeschädigten Zone [m/s]
k_{skin}	Durchlässigkeitsbeiwert der geschädigten Zone [m/s]
r_w	Bohrlochradius [m]
r_{skin}	Radius der geschädigten Zone [m]

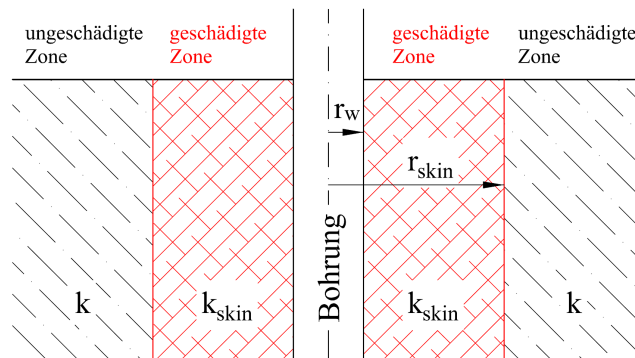


Abbildung 6.4: Skin-Effekt, adaptiert aus [41]

Der Skin-Faktor kann bei der Ausführung von *Well Tests* aus Druckabfallkurven ermittelt werden und hat folgende Bedeutung: [41]

- **Positiver Skin-Faktor $s > 0$:** Die Durchlässigkeit in der geschädigten Zone k_{skin} ist kleiner als die Durchlässigkeit in der ungeschädigten Zone k .
- **Negativer Skin-Faktor $s < 0$:** Die Durchlässigkeit in der geschädigten Zone k_{skin} ist größer als die Durchlässigkeit in der ungeschädigten Zone k .
- **Skin-Faktor $s = 0$:** Die Durchlässigkeit in der geschädigten und ungeschädigten Zone ist gleich.

Diese Theorie des Skin-Effekts lässt sich auf Felsinjektionen umlegen. Die geschädigte Zone wird als Klufteingang und die ungeschädigte Zone als Injektionsfront definiert. Folglich hat man durch eine Analyse der Druckabfallkurve qualitative Aussagen zu den Durchlässigkeiten am Klufteingang und an der Injektionsfront. Für eine Felsinjektion kann der Skin-Faktor daher folgende Bedeutung haben: [38, 37, 21]

- **Positiver Skin-Faktor $s > 0$:** Die Durchlässigkeit am Klufteingang ist kleiner als die Durchlässigkeit an der Injektionsfront. Das heißt, dass in der Kluft der Zustand des Kluftfüllens vorherrscht.
- **Negativer Skin-Faktor $s < 0$:** Die Durchlässigkeit am Klufteingang ist größer als die Durchlässigkeit an der Injektionsfront. Das heißt, dass die Kluft gefüllt ist und bereits ein Kluftaufweiten stattfindet.
- **Skin-Faktor $s = 0$:** Die Durchlässigkeit am Klufteingang und an der Injektionsfront ist gleich. Dies markiert den Übergang von Kluftfüllen in Kluftaufweiten.

Wellbore-Storage

Für die Auswertung des Skin-Faktors ist es wichtig, die Effekte der Wellbore Storage zu berücksichtigen. Wenn in der Erdölkunde ein Bohrloch geschlossen wird, gibt es den *Afterflow-Effekt* oder *Wellbore-Storage-Effekt*. Der Druckaufbau, der am Bohrlochmund gemessen wird, wird nicht alleine aus der erdölführenden Schicht hervorgerufen, sondern gerade im anfänglichen Verlauf des Druckabfalls vom Bohrlochvolumen (*Wellbore Volume*) dominiert. Dieses hat die Bestrebung, nachzuffließen, auch wenn das Ventil schon geschlossen ist. Dieser Effekt wird *Wellbore Storage* genannt. Die Wellbore Storage C ist jenes Volumen, welches innerhalb des Bohrlochs pro Einheitsänderung des Drucks aufgenommen (oder abgegeben) werden kann. [41]

Die in der Erdölkunde verwendete dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante C_D gibt Auskunft über dieses Volumen und wird für die Berechnung des Skin-Faktors verwendet. Sie wird durch die Kompressibilität der Flüssigkeit im Bohrloch dominiert. Je höher die Kompressibilität, umso länger dauern die Effekte der Wellbore-Storage. Die Kompressibilität beschreibt die Eigenschaft eines Körpers, unter Einwirkung von Druckkräften das Volumen zu verringern und wird in Pa^{-1} angegeben. [41]

Für die Bestimmung der Wellbore-Storage und des Skin-Faktors bieten sich in den Erdölwissenschaften eine Vielzahl an Möglichkeiten an. *Kiss* [21] zeigte die Möglichkeit einer Bestimmung des Skin-Faktors mit einer Typenkurvenanalyse.

Typenkurvenanalyse nach Gringarten und Bourdet

Für die verschiedenen Verhältnisse, unter denen das Bohrloch mit seiner Umgebung kommuniziert (in Abhängigkeit der Wellbore-Storage und des Skin-Faktors), gibt es verschiedene Typenkurven, die durch die Differentialgleichung 6.3 definiert sind. Diese Differentialgleichung beschreibt den Druckaufbau eines Bohrlochs in einer homogenen Lagerstätte nach Schließen des Schiebers (unter Berücksichtigung der Wellbore Storage und dem Skin-Effekt). [41, 21]

$$p_{DW}(t_D) = \frac{1}{2} \cdot \left[\ln \left(\frac{t_D}{C_D} \right) + 0,80907 + \ln \left(C_D \cdot e^{2 \cdot s} \right) \right] \quad (6.3)$$

p_{DW}	Dimensionsloser Druckaufbau [–]
C_D	Dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante [–]
t_D	Dimensionslose Zeit [–]
s	Skin-Faktor [–]

Die verschiedenen Kurven werden durch den Term $C_D \cdot e^{2 \cdot s}$ charakterisiert. Mit einer Variation der Parameter (Dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante C_D und Skin-Faktor s) erhält man die in Abbildung 6.5 dargestellten Typenkurven nach Gringarten und Bourdet. Blau aufgetragen sind die Lösungen der Differentialgleichung, rot die Ableitungen dieser Kurven. [5]

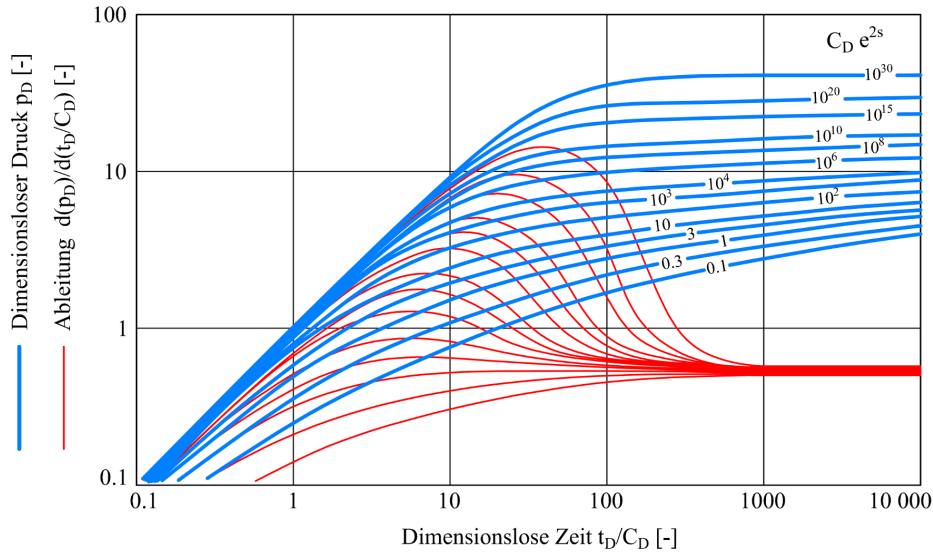


Abbildung 6.5: Typenkurven, adaptiert aus [5]

Nun versucht man, den gemessenen Druckabfall mit einer Typenkurve nach Gringarten und Bourdet in Übereinstimmung zu bringen und daraus den Skin-Faktor zu berechnen. Stimmt der Trend des gemessenen Druckabfalls mit einer Typenkurve überein, so bekommt man einen erfolgreichen *Type-Curve-Match*. Dieser Ablauf wird in drei Schritten durchgeführt: [41, 21]

1. Die Druckdifferenz $\Delta p = p_{ws} - p_{wf}$ wird gegen die Zeit t mit der gleichen doppelt-logarithmischen Einteilung wie die Typenkurve aufgetragen (Abbildung 6.6).

p_{ws} Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Shut-In-Pressure) [bar]
 p_{wf} Aufgezeichneter Druck aus der Druckabfallkurve [bar]

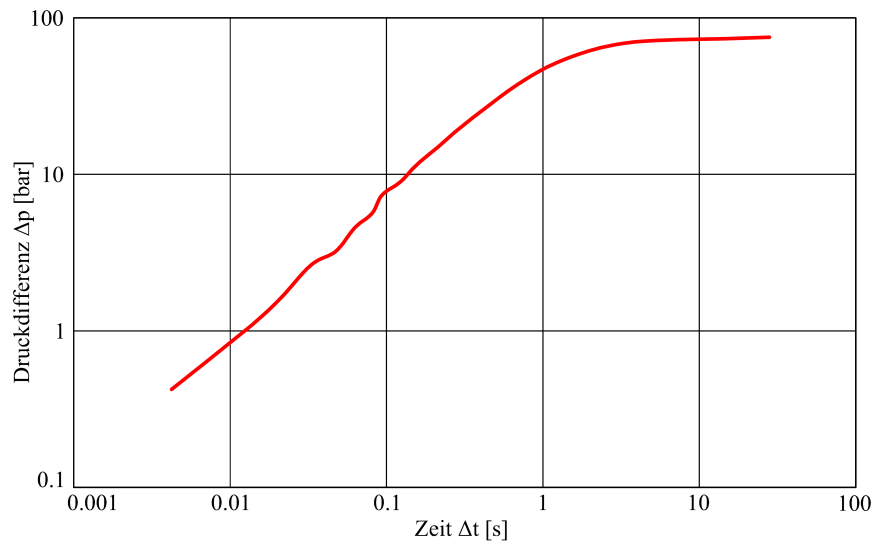


Abbildung 6.6: Druckdifferenz Δp im doppelt-logarithmischen Diagramm, aus [5]

2. Die beiden Graphen werden übereinander gelegt und in Übereinstimmung gebracht. Die Koordinatenachsen müssen dabei parallel gehalten werden (Abbildung 6.7).
3. Sobald eine Übereinstimmung gefunden wurde, wird für jede Achse ein Match-Punkt (MP) definiert. Dies ist ein Punkt, der auf beiden Graphen bei der Übereinstimmung festgehalten wird (Abbildung 6.7). Die Koordinaten dieses Punkts sind für die Berechnung des Skin-Faktors erforderlich. Aus den beiden Graphen sind folgende Kennwerte abzulesen:

$$\frac{P_{DM}}{\Delta P_M} \cdot \frac{\Delta t_M}{(t_D/C_D)_M} \text{ und } C_D \cdot e^{2s}$$

Der Index D steht für *dimensionslos*, der Index M für *Match-Point*.

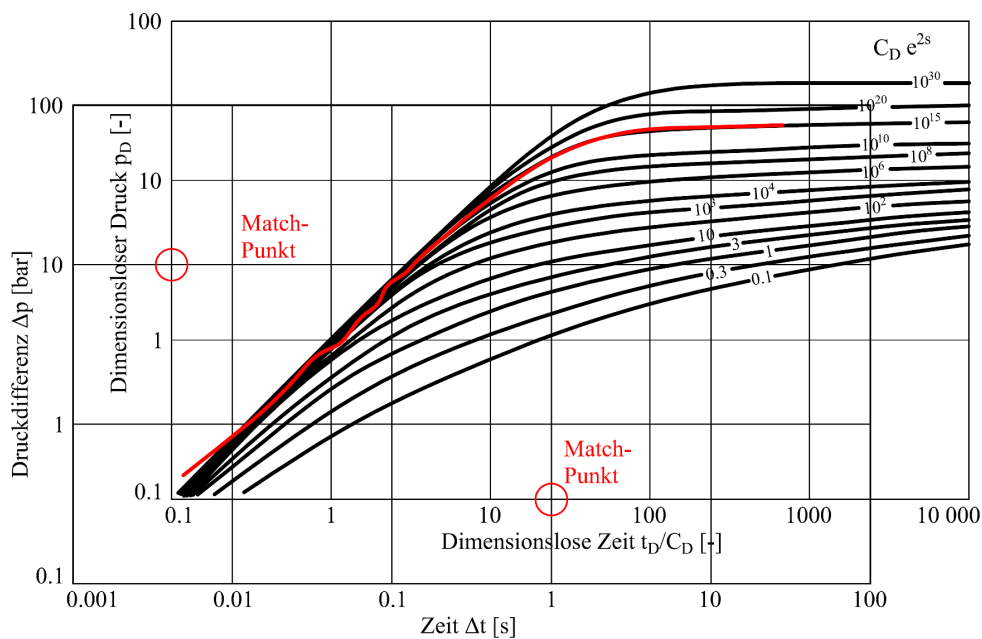


Abbildung 6.7: Übereinstimmung mit einer Typenkurve, aus [5]

Aus den Kennwerten der Übereinstimmung kann zunächst die Transmissibilität T_K (Produkt aus Permeabilität und hydraulischer Kluftöffnungsweite) und in weiterer Folge der Skin-Faktor s berechnet werden. Die Transmissibilität T_K berechnet sich nach Kiss [21] wie folgt:

$$T_K = K \cdot h = \frac{\eta \cdot q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{p_{DM}}{\Delta p_M} \quad (6.4)$$

T_K	Transmissibilität [m^3]
K	Permeabilität [m^2]
h	Hydraulische Kluftöffnungsweite [m]
η	Dynamische Viskosität [$Pa \cdot s$]
q	Durchflussrate [m^3/s]
p_{DM}	Dimensionsloser Druck aus dem Match-Punkt [-]
Δp_M	Druckdifferenz Δp aus dem Match-Punkt [bar]

Die Transmissibilität T_K gibt Auskunft über die Durchlässigkeit in der Kluft. Sie ist das Produkt aus der Permeabilität K und der hydraulischen Öffnungsweite der Kluft h . Auch wenn die hydraulische Öffnungsweite der Kluft h nicht bekannt ist, gibt die Transmissibilität T_K qualitativ eine gute Auskunft über eine Verringerung der Durchlässigkeit bei Betrachtung von mehreren Druckabfallkurven in Folge. [21]

Die Wellbore-Storage C ist für die Berechnung der dimensionslosen Wellbore-Storage-Konstante C_D notwendig und kann mit Formel 6.5 berechnet werden.

$$C = q \cdot \frac{p_{DM}}{\Delta p_M} \cdot \frac{t_M}{(t_D/C_D)_M} \quad (6.5)$$

C	Wellbore-Storage [m^3/bar]
t_M	Zeit aus dem Match-Punkt [s]
$(t_D/C_D)_M$	Dimensionslose Zeit t_D/C_D aus dem Match-Punkt [-]

Die dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante C_D , die für die Berechnung des Skin-Faktors notwendig ist, kann mit Formel 6.6 berechnet werden. Dabei sind mehrere Parameter (Kluft-Kompressibilität, Fluidkompressibilität und hydraulische Kluftöffnungsweite) erforderlich, deren Bestimmung im Allgemeinen sehr aufwändig ist. [21]

Die Fluidkompressibilität (der Suspension) kann in der Regel im Labor noch einfach bestimmt werden, während die Kluft-Kompressibilität sehr schwierig zu evaluieren ist. Dabei kann man sich auf Richtwerte der Literatur stützen. Kiss [21] verwendete bei seiner Analyse eine Totale Kompressibilität (Kluft-Kompressibilität + Fluidkompressibilität) von $c_t = 1,5 \cdot 10^{-7} Pa^{-1}$. [21]

Weiters ist die Bestimmung der hydraulischen Kluftöffnungsweite h problematisch. Sie kann in der Regel nur sehr schwer gemessen werden und muss durch aufwändige geologische Untersuchungen bestimmt werden. Ein theoretischer Wert für eine mittlere

hydraulische Kluftöffnungsweite lässt sich aus dem Injektionsvolumen und der Rissfläche ermitteln. [21]

$$C_D = \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot c_t \cdot h \cdot r_w^2} \quad (6.6)$$

C_D	Dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante [-]
C	Wellbore-Storage [m^3/bar]
Φ	Porosität (=1) [-]
c_t	Totale Kompressibilität: $c_t = c_f + c_{fl}$ [Pa^{-1}]
c_f	Kluft(Fracture)-Kompressibilität [Pa^{-1}]
c_{fl}	Fluidkompressibilität [Pa^{-1}]
h	Hydraulische Kluftöffnungsweite [m]
r_w	Bohrlochradius [m]

Nach der Berechnung der dimensionslosen Wellbore-Storage-Konstante C_D lässt sich der Skin-Faktor s berechnen. Er kann Werte zwischen -5 und $+\infty$ annehmen. In *Stadler* [37], *Kiss* [21] sowie *Stadler* [38] wird angegeben, dass eine elastische Kluftaufweitung im Skin-Faktor sichtbar ist. Wenn die Kluft gefüllt ist und ein Kluftaufweiten stattfindet, bewirkt das einen negativen Skin-Faktor. Dieser wird mit der laufenden Injektion immer negativer, da sich die Kluftaufweitung mit zunehmendem injiziertem Volumen immer weiter fortsetzt. Der Skin-Faktor lässt sich mit der Formel 6.7 ermitteln.

$$s = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{C_D \cdot e^{2 \cdot s}}{C_D} \right] \quad (6.7)$$

s	Skin-Faktor [-]
C_D	Dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante [-]
$C_D \cdot e^{2 \cdot s}$	Kennzahl aus dem Type-Curve-Matching [-]

Ausblick für weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Stadler [37] zeigte, dass grundsätzlich die Analysemethoden³ der *Well Testing Analysis* möglich sind. *Kiss* [21] verwendete eine Analyseverfahren mithilfe von Typenkurven und zeigte, dass eine Kluftaufweitung im Skin-Faktor sichtbar ist. Seit dieser Veröffentlichung im Jahr 1992 beschäftigte sich niemand mehr mit dem Skin-Faktor in Zusammenhang mit Felsinjektionen. Deshalb hat sich in der Praxis bis dato auch noch keine Anwendung des Skin-Faktors als Abbruchkriterium durchgesetzt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Ermittlung über eine Typenkurvenanalyse sich als sehr aufwändig darstellt. Jedoch gibt es in der *Well Testing Analysis* nicht nur die Typenkurvenanalyse, sondern noch weitere analytische Methoden für die Berechnung des Skin-Faktors mithilfe von Druckabfallkurven aus dem *Pressure Build-Up Test*: [41]

- Horner Plot
- Miller-Dyes-Hutchinson Methode

³In Tarek [41] sind ausführliche Analysemethoden für das *Well Testing* aus den Erdölwissenschaften angeführt.

- MBH Methode
- Ramey-Cobb Methode
- Dietz Methode

Für die TPA-Methode würde sich die Verwendung von Horner Plots anbieten, da die Analyse der Druckabfallkurven dabei analytisch erfolgen könnte und kein grafischer Vergleich von Typenkurven notwendig wäre. Eine analytische Methode ist in der Injektionssoftware besser zu automatisieren.

Während bis dato ausschließlich *Pressure Build-Up Tests* als Analyseverfahren aus den Erdölwissenschaften verwendet wurden, ergeben sich weitere Entwicklungsmöglichkeiten mithilfe von *Drawdown Tests*. Der Drawdown Test analysiert die Druckentwicklung bei Öffnen des Schiebers und Entnahme mit konstantem Durchfluss. In Abbildung 6.8 ist schematisch ein idealer Verlauf eines Drawdown-Tests dargestellt. Mit dieser Analyse können ebenfalls Aussagen zum Skin-Effekt, zur Durchlässigkeit und zur Kluftlänge bzw. Grenzen des Kluftsystems getroffen werden.

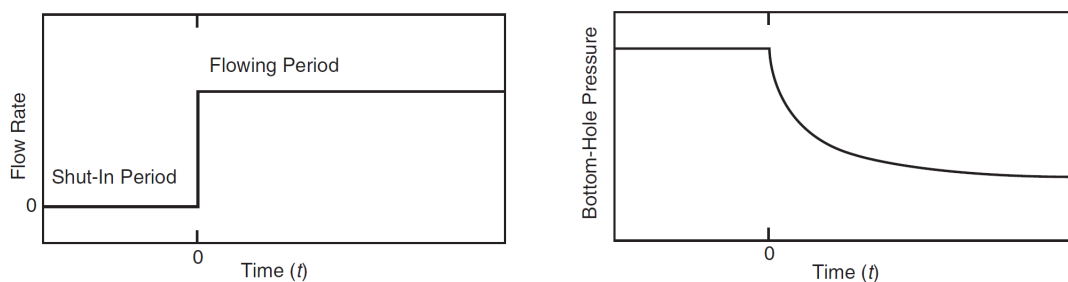


Abbildung 6.8: Schematischer Verlauf eines Drawdown Tests, aus [41]

Dabei kann der Start der Injektionspumpe den Beginn des Drawdown Tests initiieren. Während einer konstanten Injektionsrate kann eine Analyse der Art des Druckanstiegs Aussagen zum Kluftsystem zulassen. In diesem Fall ist wieder das Vorzeichen umzudrehen, denn in den Erdölwissenschaften wird bei konstanter Entnahmerate der Druckabfall aufgezeichnet. In der Injektionstechnologie wird bei konstanter Injektionsrate der Druckaufbau aufgezeichnet. Möglich ist in dieser Hinsicht auch eine Analyse der Druckentwicklung bei einer Veränderung der Durchflussrate. Die Durchflussrate kann während der Injektion laufend verändert werden. Dies hätte somit keine wirtschaftlichen Nachteile, indem die Injektionspumpe gestoppt werden muss, und wäre grundsätzlich nichts anderes als ein Drawdown Test.

6.1.5 Entwicklung der Druckabfallkurven

Analog zur Typenkurvenanalyse kann eine rein visuelle Betrachtung von aufeinander folgenden Druckabfallkurven Auskunft über die vorhandenen Kluftgeometrien geben. *Stadler* [37] verwies in seiner Arbeit auf mögliche Kluftformen, die man anhand der Entwicklung der Druckabfallkurven feststellen kann.

Eine sich plötzlich verjüngende Kluft kann anhand der Druckabfallkurven wie folgt festgestellt werden:

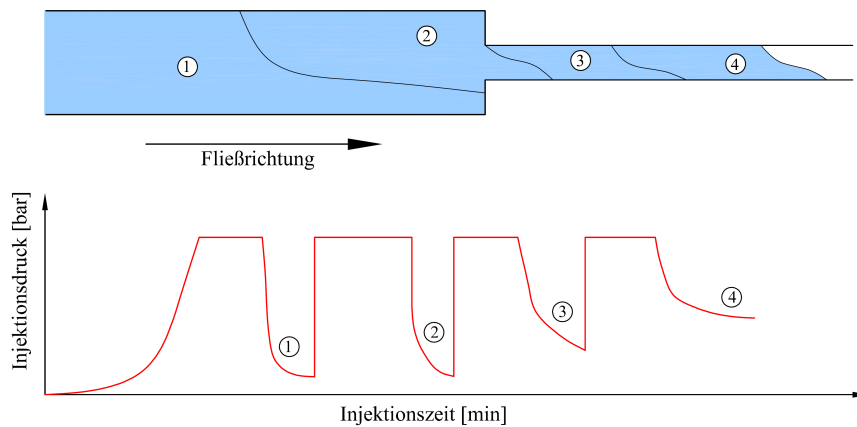


Abbildung 6.9: Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich plötzlich verjüngende Kluft, adaptiert aus [37]

Eine sich plötzlich öffnende Kluft kann anhand der Druckabfallkurven wie folgt festgestellt werden:

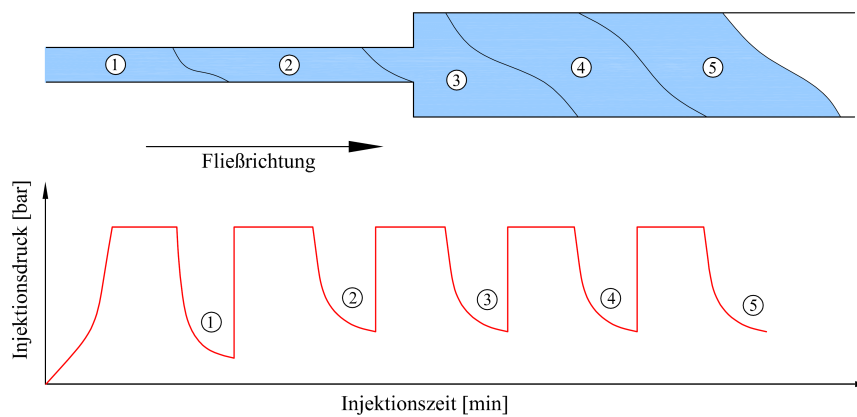


Abbildung 6.10: Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich plötzlich öffnende Kluft, adaptiert aus [37]

Eine Kluft mit einer annähernd konstanten Öffnungsweite kann anhand der Druckabfallkurven wie folgt festgestellt werden:

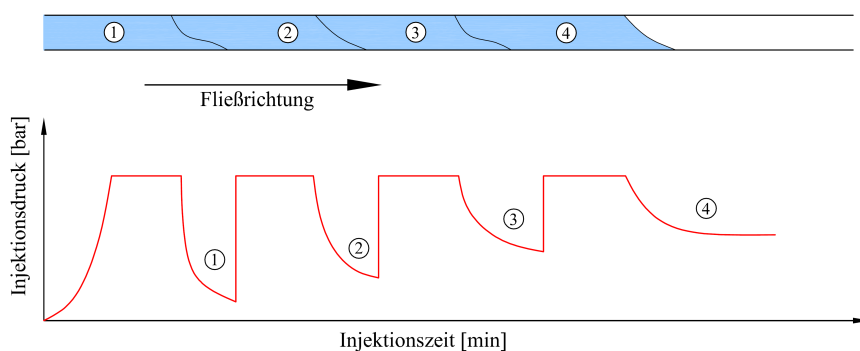


Abbildung 6.11: Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine Kluft mit einer annähernd konstanten Öffnungsweite, adaptiert aus [37]

Eine sich stetig verjüngernde Kluft kann anhand der Druckabfallkurven wie folgt festgestellt werden:

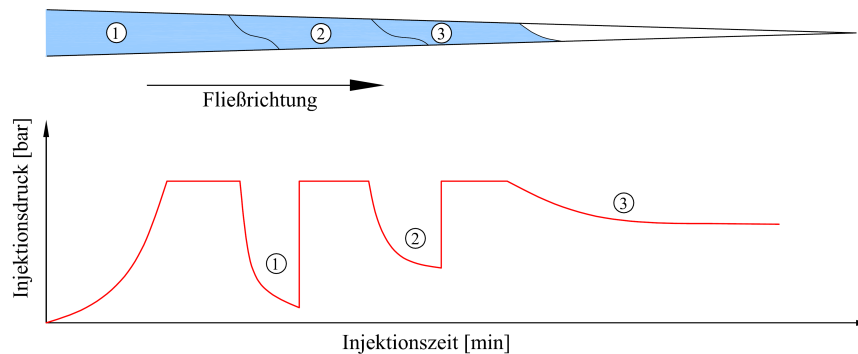


Abbildung 6.12: Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich stetig verjüngernde Kluft, adaptiert aus [37]

6.2 Praktische Anwendung der Methode

Die praktische Anwendung der TPA-Methode ist grundsätzlich darauf beschränkt, so lange zu injizieren, bis der Ruhedruck stabil ist und folglich das Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck (am Anfang der Kluft) einen vorgegebenen Zielwert erreicht. Jedoch bietet eine Analyse der Druckabfallkurven mit den Typenkurven nach Gringarten und Bourdet mehr Möglichkeiten als in der Praxis bekannt und üblich sind. Im Folgenden wird exemplarisch dargestellt, welche Möglichkeiten die TPA-Methode bietet.

Der grundsätzlich übliche praktische Ablauf der Methode gliedert sich folgendermaßen:

1. Die Injektion wird in regelmäßigen Intervallen unterbrochen.
2. Nach dem Abschalten der Pumpe wird der Druckabfall bis zum Erreichen eines Ruhedrucks beobachtet und aufgezeichnet.
3. Aus der Form der Druckabfallkurve und dem Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck wird die Injektion beurteilt.
4. Es wird überprüft, ob ein Abbruchkriterium erfüllt wurde.
5. Mit der Druckabfallkurve kann zusätzlich eine Typenkurvenanalyse durchgeführt werden, um auf die Art der Ausbreitung und Grenzen der Injektion zu schließen sowie zwischen Kluftfüllen und Kluftaufweiten zu unterscheiden.

In Abbildung 6.13 und Tabelle 6.1 sind exemplarisch Daten aus der Injektion eines Dichtschrims dargestellt. Mit diesen acht Druckabfallkurven wird im Folgenden die TPA-Methode erläutert und eine Typenkurvenanalyse durchgeführt.

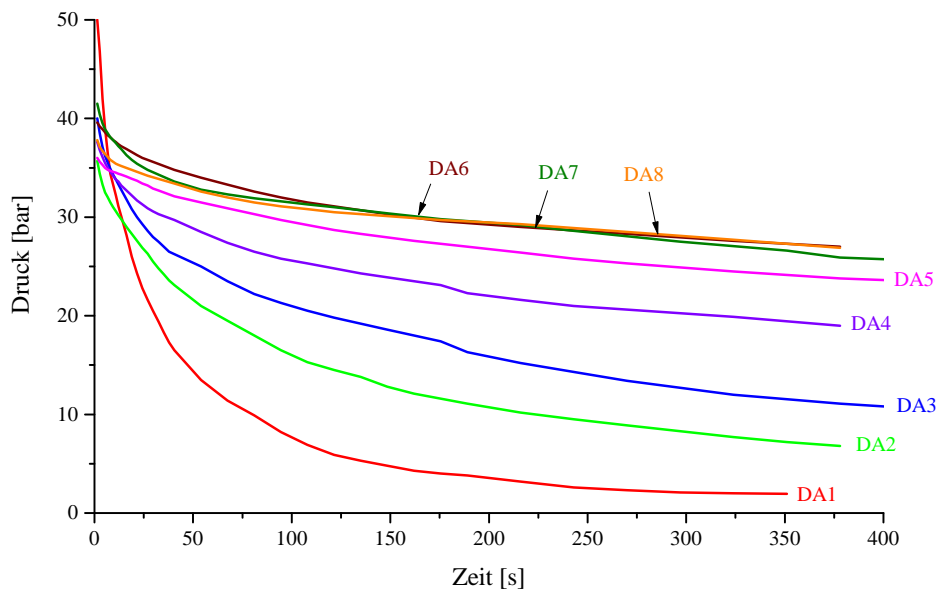


Abbildung 6.13: Aufgezeichnete Druckabfallkurven aus einer Dichtschirminjektion, mit Daten aus [21]

Tabelle 6.1: Gemessene Daten für die Auswertung der Druckabfallkurven, mit Daten aus [21]

Druckabfallkurve	Injektionsmenge	Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Shut-In-Pressure) p_{ws}	Verhältnis zwischen Ruhe- und Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Shut-In-Pressure) ω
DA1	10 l in 27 min	54,0 bar	0,04
DA2	10 l in 28 min	36,8 bar	0,18
DA3	10 l in 25 min	42,5 bar	0,25
DA4	10 l in 26 min	38,4 bar	0,49
DA5	10 l in 30 min	36,5 bar	0,64
DA6	10 l in 30 min	40,7 bar	0,66
DA7	10 l in 26 min	43,2 bar	0,59
DA8	10 l in 22 min	39,2 bar	0,69

Für die Druckabfallkurve DA1 wird das Type-Curve-Matching schrittweise durchgeführt. Für alle anderen Kurven werden lediglich die Ergebnisse dargestellt.

Im ersten Schritt wird die Druckdifferenz (Injektionsdruck am Anfang der Kluft abzüglich des Drucks aus der Druckabfallkurve) gegen die Zeit t mit der gleichen doppelt-logarithmischen Einteilung wie die Typenkurven aufgetragen:

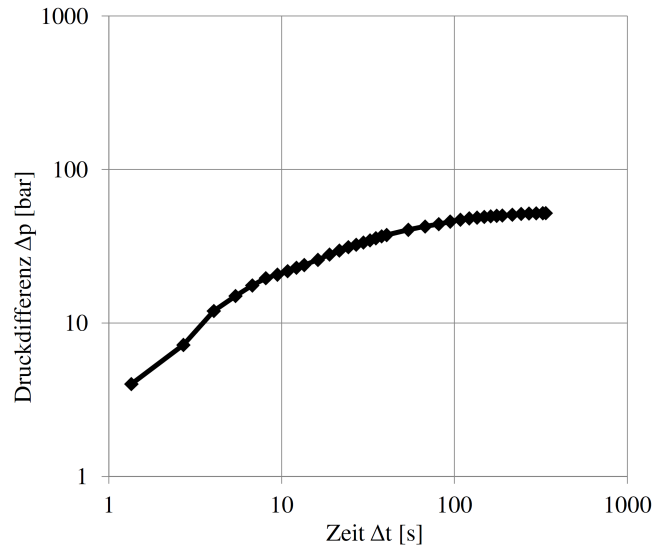


Abbildung 6.14: Doppelt-logarithmischer Plot der Druckdifferenz für DA1

Danach werden die beiden Graphen übereinander gelegt und in Übereinstimmung gebracht. Match-Points werden definiert und die Werte abgelesen.

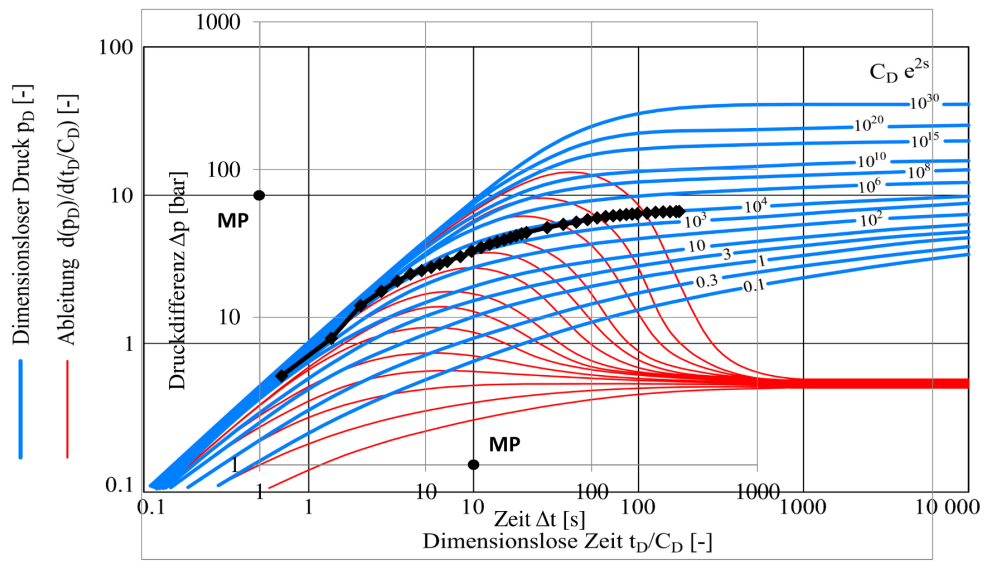


Abbildung 6.15: Type-Curve-Matching für DA1

$$\frac{p_{DM}}{\Delta p_M} = \frac{10}{67 \text{ bar}} \tag{6.8}$$

$$\frac{t_M}{(t_D/C_D)_M} = \frac{19 \text{ s}}{10} \tag{6.9}$$

$$C_D \cdot e^{2 \cdot s} = 10^4 \tag{6.10}$$

Für die Berechnung der Transmissibilität T_K und des Skin-Faktors s sind folgende zusätzliche Kennwerte notwendig:

Dynamische Viskosität η :	$5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Durchflussrate q :	$10 \text{ l} / 27 \text{ min} = 6,173 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
Totale Kompressibilität c_t :	$1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$
Hydraulische Kluftöffnungsweite h :	3 mm
Bohrlochradius r_w :	23 mm

Damit ergeben sich die Werte für T_K , C , C_D und s wie folgt:

$$T_K = K \cdot h = \frac{\eta \cdot q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{p_{DM}}{\Delta p_M} = \frac{5 \cdot 6,173 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{10}{67 \cdot 10^5} = 7,33 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \quad (6.11)$$

$$C = q \cdot \frac{p_{DM}}{\Delta p_M} \cdot \frac{t_M}{(t_D/C_D)_M} = 6,173 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10}{67 \cdot 10^5} \cdot \frac{19}{10} = 1,75 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Pa} \quad (6.12)$$

$$C_D = \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot c_t \cdot h \cdot r_w^2} = \frac{1,75 \cdot 10^{-11}}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,003 \cdot 0,023^2} = 11,70 \quad (6.13)$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{C_D \cdot e^{2 \cdot s}}{C_D} \right] = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{10^4}{11,70} \right] = 3,38 \quad (6.14)$$

Die Transmissibilität T_K , die dimensionslose Wellbore-Storage-Konstante C_D und der Skin-Faktor s berechnen sich für alle weiteren Druckabfallkurven DA2 bis DA8 auf äquivalente Weise. In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse für alle Druckabfallkurven dargestellt.

Tabelle 6.2: Auswertung des Skin-Faktors für die Druckabfallkurven

Druckabfallkurve	$C_D \cdot e^{2 \cdot s}$ [-]	Transmissibilität $K \cdot h$ [10^{-12} m^3]	Wellbore-Storage C [$10^{-11} \text{ m}^3/\text{Pa}$]	Wellbore-Storage-Konstante C_D [-]	Skin-Faktor s [-]
DA1	10000	7,33	1,75	11,70	3,38
DA2	100	7,52	5,95	39,80	0,46
DA3	1	4,82	2,42	16,21	-1,39
DA4	0,3	4,55	4,86	32,53	-2,34
DA5	0,3	4,56	13,92	93,05	-2,87
DA6	0,3	5,53	6,53	43,64	-2,49
DA7	0,1	6,62	0,92	6,12	-2,06
DA8	0,03	8,61	1,41	9,41	-2,87

In Abbildung 6.16 ist der Skin-Faktor s und die Transmissibilität T_K grafisch dargestellt. Aus der Auswertung der Ergebnisse und der Grafik geht hervor, dass die Injektion zwar bis Druckabfallkurve DA8 durchgeführt wurde, jedoch aber schon ab Druckabfallkurve 3 ein Kluftaufweiten eintrat. Diese Tatsache ist im Speziellen im Skin-Faktor s zu

sehen, der ab der Druckabfallkurve DA3 in das Negative wechselt. Jedoch auch in der Transmissibilität T_K ist bis zur Druckabfallkurve DA3 ein deutlicher Rückgang ersichtlich. Bis zur DA8 wird sie jedoch durch das zusätzliche Aufweiten wieder größer.

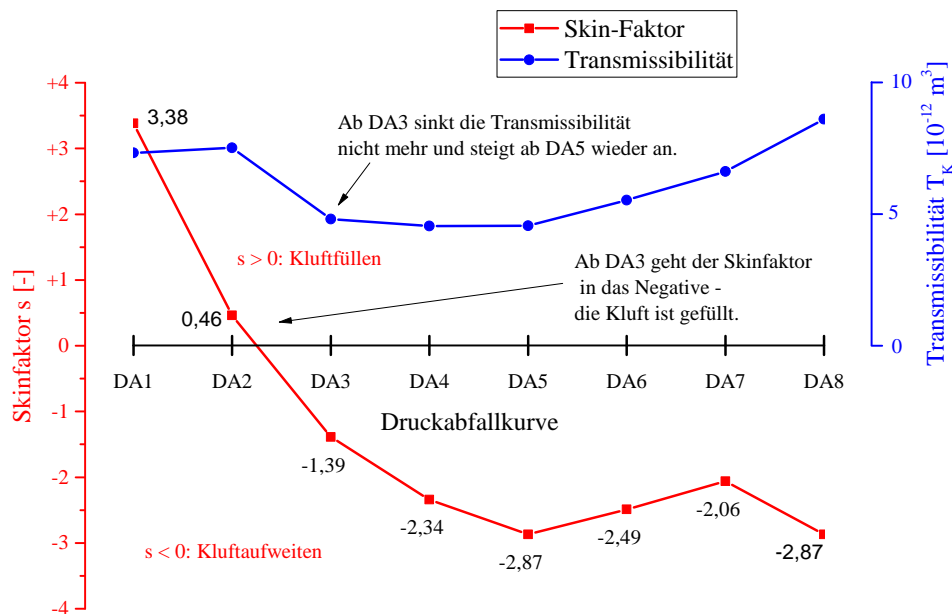


Abbildung 6.16: Darstellung des Skin-Faktors s und der Transmissibilität T_K

6.3 Vor- und Nachteile

Seit den Arbeiten von *Stadler* [37] und *Kiss* [21] beschäftigte sich niemand mehr ausführlich mit dem Skin-Faktor in Zusammenhang mit Abbruchkriterien bei Felsinjektionen. Deshalb hat sich in der Praxis bis dato auch noch keine Anwendung des Skin-Faktors als Abbruchkriterium durchgesetzt. Dies ist überdies verständlich, da sich die Ermittlung des Skin-Faktors mit einer Typenkurvenanalyse als sehr aufwändig darstellt. Die Verwendung des Skin-Faktors zur Unterscheidung zwischen Kluftfüllen und Kluftaufweiten ist außerdem noch nicht einwandfrei nachgewiesen. Die einzigen Studien und Versuche zum Skin-Faktor fanden im Jahr 1992 von *Kiss* [21] statt. Die Anwendung dieses Kennwerts ist zwar vielversprechend, jedoch wären weitere Studien und Versuche für die Anwendung als Abbruchkriterium notwendig. Des Weiteren ist für die Berechnung des Skin-Faktors die hydraulische Kluftöffnungsweite und die Kompressibilität der Kluft und der Suspension notwendig. Diese Werte sind in der Praxis sehr schwer auszumachen und können in der Regel kaum genau ermittelt werden, wodurch die Anwendung des Skin-Faktors als Abbruchkriterium daher mit Unsicherheiten behaftet ist.

Es gibt nur wenige Projekte, die unter alleiniger Anwendung der TPA-Methode ausgeführt wurden. Bei diesen wurde weitgehend ein zu erreichendes Verhältnis von Ruhedruck zum Injektionsdruck am Anfang der Kluft (Shut-In-Pressure) mit einer zugehörigen Ruhezeit als Abbruchkriterium angegeben (*Stadler* [37], *Kiss* [21]). Dieses Verhältnis und der Ruhedruck eignen sich sehr gut, um die Injektion zu beurteilen, zumal sie tatsächlich Auskunft über den Füllungsgrad der Kluft geben. Für eine Anwendung dieses Abbruchkriteriums oder einer rein qualitativen Beurteilung der Druckabfallkurve sind keine Voraussetzungen oder Eingangsparameter notwendig. Die Methode kann sofort

für jede Art von Injektionen angewandt werden.

Im *Dounreay Shaft Isolation Project* [34] wurden die Abbruchkriterien über die statistische Auswertung der charakteristischen Erscheinungsbilder von Druckabfallkurven festgelegt. Die Auswertung zeigte, dass sich die Anzahl der rasch fallenden Druckabfallkurven mit der Zeit verringerte und sich die flachen Druckabfallkurven häuften. Mit dieser Auswertung konnte der Abdichtungserfolg nachgewiesen werden, der sich mit Wasserabpressversuchen schlussendlich bestätigte. Dies zeigte, dass schon eine rein qualitative Auswertung der Form von Druckabfallkurven zu klaren Hinweisen auf eine Reduktion der Durchlässigkeit des Kluftsystems führt.

Durch eine Analyse der Druckabfallkurven kann nicht nur zwischen Kluftaufweiten und Kluftfüllen unterschieden werden sondern es können zusätzlich die Art der Ausbreitung (linear, radial oder sphärisch) sowie die Grenzen der Injektion (boundaries) ausgewertet werden. Das einzige Problem dabei ist, dass den Grenzen der Injektion und der Art der Ausbreitung nur Zeiten zugeordnet werden können, jedoch keine Entfernungen. Handelt es sich bei den Fluiden um *Newton'sche Flüssigkeiten* (wie Wasser oder Rohöl) mit bekannten Eigenschaften, können – durch Anwendung der Interpretationsmethodik aus dem Erdölwesen – den Druckabfallkurven Entfernungen zugeordnet werden. Dies ist mit *Bingham'schen Flüssigkeiten* wie der Zementsuspension nicht möglich, da sich einerseits die Eigenschaften der Suspension im Verlauf der Injektion ändern und bei einem Pumpenstopp (oder Schließen des Schiebers) die Fließgrenze der Suspension einen entscheidenden Einfluss auf den Druckabfall hat.

Ein großer Nachteil der Methode ist die Wirtschaftlichkeit. Um aus den Druckabfallkurven Aussagen über Kluftaufweiten und Kluftfüllen, die Art der Ausbreitung oder die Grenzen der Injektion (boundaries) treffen zu können, muss die Injektion zyklisch für längere Zeit gestoppt werden. Insbesondere sind die Grenzen der Injektion (boundaries) erst im späteren Verlauf sichtbar. Bei der Sanierung der Kölnbreinsperre (*Stadler* [37], *Kiss* [21]) wurde der Druckabfall über 6 Minuten beobachtet. Damit konnten nur Aussagen zu Kluftaufweiten und Kluftfüllen getroffen werden. Beim *Dounreay Shaft Isolation Project* [34] wurde die Injektion teilweise für 20 bis 30 Minuten unterbrochen, um die Grenzen der Injektion (boundaries) beurteilen zu können. Bei mehrmaligem Pumpenstopp im Verlauf einer Injektion können diese langen Unterbrechungen schnell zur Unwirtschaftlichkeit führen. Außerdem schreitet die Hydratation der Suspension mit zunehmender Zeit voran, was dazu führen kann, dass der maximale Injektionsdruck schnell erreicht wird, ohne die notwendige Reichweite erzielt zu haben.

Die Methode eignet sich sehr gut für die Kombination mit anderen Methoden. Da in jedem Abbruchkriterium der Injektionsdruck verwendet wird, schafft die TPA-Methode die Möglichkeit einer Verwendung des wirksamen Injektionsdrucks am Anfang der Kluft. Bei der Bestimmung des GIN-Werts wird dieser Injektionsdruck bereits teilweise verwendet. Außerdem kann die Form der Druckabfallkurve bei der GIN-Methode Aussagen liefern, ob der verwendete GIN-Wert richtig ist. Beim Abbruch einer Injektion bei Erreichen der maximalen Intensität sollte die Druckabfallkurve flach sein (das heißt, dass die Kluft gefüllt ist). Fällt der Druck bei Erreichen der maximalen Intensität rasch ab, ist das ein Anzeichen dafür, dass der GIN-Wert (die Intensität) zu gering ist.

6.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- Zyklischer Pumpenstopp und Aufzeichnung des Druckabfalls

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Injektionsdruck [*bar*]
- Ruhedruck [*bar*]
- (Durchflussrate [*l/min*], Dynamische Viskosität [*Pa · s*], Öffnungsweite der Kluft [*m*], Bohrlochradius [*m*])

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher [–]
- Maximaler Injektionsdruck erreicht [*bar*]
- Ziel-Ruhedruck erreicht [*bar*] oder Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck erreicht [–]
- (Ziel-Skin-Faktor erreicht [–])

6.4.1 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe

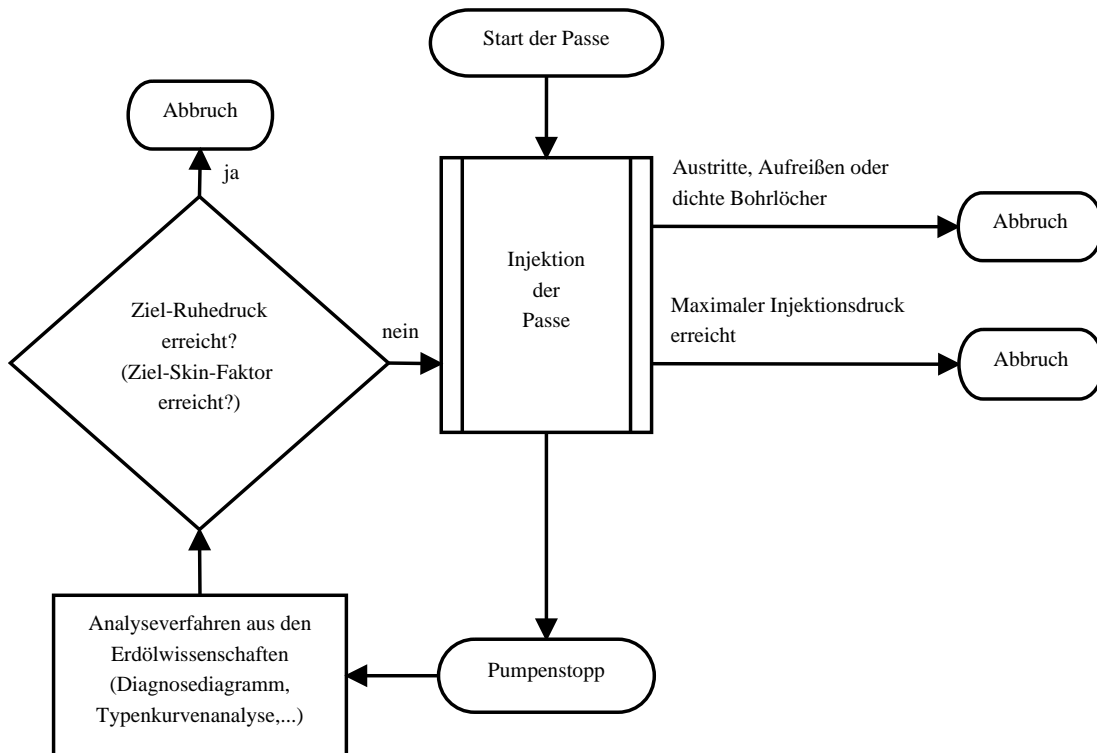


Abbildung 6.17: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der TPA-Methode

Pressure Sensitive Grouting (PSG-Methode)

Die Methode des *Druckföhigen Injizierens* oder *Pressure Sensitive Grouting* ist eine Weiterentwicklung der TPA-Methode (siehe Kapitel 6). In Versuchen (*Zettler* [43], *Reichl* [35]) wurde nachgewiesen, dass nach einem Pumpenstopp der Gradient der Druckabfallkurve und der Ruhedruck am Ende der Druckabfallkurve Auskunft über die Druckverhältnisse in den angesprochenen Hohlräumen und deren Sättigung geben. Die aus dem Tunnelbau (Neue österreichische Tunnelbaumethode) bekannte *Design-As-You-Go-Philosophie* wird dabei auf Injektionen übertragen. Während des Injektionsvorgangs werden die Druckveränderungen beim Pumpenstopp (oder Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) beobachtet, aus denen Rückschlüsse auf die Qualität der Injektionsmaßnahme gegeben werden können. Die Injektion wird gemäß Regelkreis in Abbildung 7.1 laufend beobachtet und bei jeder Unterbrechung beurteilt und angepasst. Für die Beurteilung dienen die Druckabfallgeschwindigkeit (Gradient der Druckabfallkurve) und der Ruhedruck sowie die Änderungen des Ruhedrucks und der Druckabfallgeschwindigkeit im Vergleich zum letzten Druckabfall. Mithilfe von *Wenn-Dann-Regeln* in einer Regelbasis werden Entscheidungen wie *Injektionsdruck erhöhen*, *Injektionsdruck verringern* oder *Abbruch der Injektion* getroffen. [44, 39]

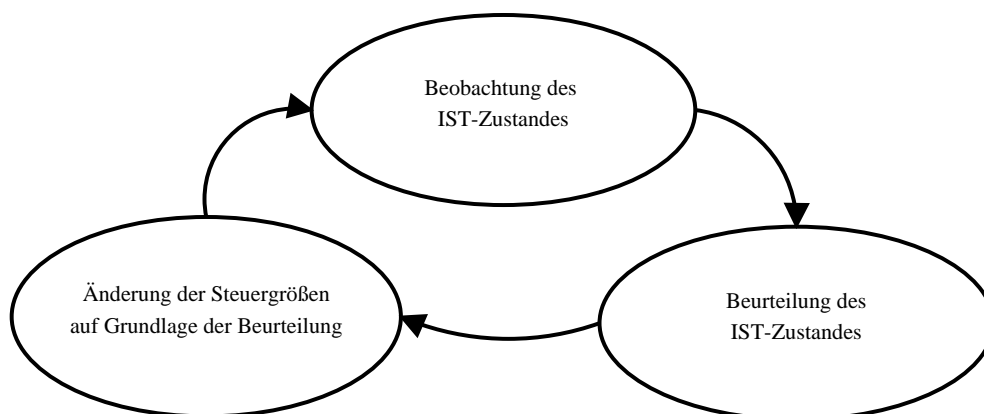


Abbildung 7.1: Regelkreis der PSG-Methode, adaptiert aus [44]

7.1 Beschreibung

Das Problem der Dimensionierung und Steuerung von Injektionen besteht darin, dass die für eine Beurteilung der Injektion wichtigen Parameter wie die Kluftöffnungsweite, die Kluftauigkeit oder der initiale Füllungsgrad der Klüfte bei der Ausführung nicht bekannt sind. Deshalb bedient man sich bei der PSG-Methode ausschließlich beobachtbaren und messbaren Kenngrößen wie der Druckabfallgeschwindigkeit und dem Ruhedruck. Ebenso wie in der TPA-Methode in Kapitel 6 werden dafür die Druckabfallkurven nach Pumpenstopp (oder Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) herangezogen. Die Abbildung 7.2 zeigt schematisch den Injektionsdruck gegen die Zeit nach mehreren Unterbrechungen der Injektion. Bei einer Sättigung der Klüfte werden die Druckabfallkurven immer flacher. Der Ruhedruck und die Druckabfallgeschwindigkeit sowie die Änderung des Ruhedrucks und der Druckabfallgeschwindigkeit von Druckabfallkurve zu Druckabfallkurve werden als Kennwerte herangezogen, um zu beurteilen, ob eine Druckabfallkurve als steil oder flach gilt und ob sie im Verlauf der Injektion flacher oder steiler werden. [43, 44]

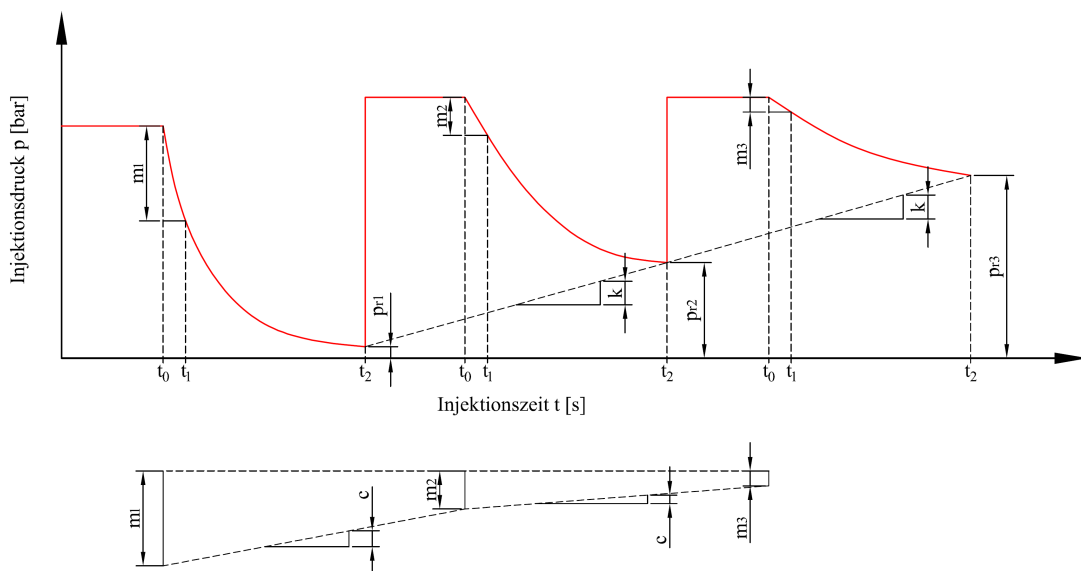


Abbildung 7.2: Parameter für die Beurteilung der Injektion nach der PSG-Methode, adaptiert aus [43]

- t_0 Zeitpunkt des Pumpenstopps oder Schließen des Schiebers am Bohrlochmund [s]
- t_1 Zeitpunkt für die Bestimmung der Druckabfallgeschwindigkeit [s]
- t_2 Zeitpunkt für die Bestimmung des Ruhedrucks [s]
- m Druckabfallgeschwindigkeit [–]
- p_r Ruhedruck [–]
- k Entwicklung des Ruhedrucks über den Injektionsverlauf [–]
- c Entwicklung der Druckabfallgeschwindigkeit über den Injektionsverlauf [–]

Die Kombination von Ruhedruck und Druckabfallgeschwindigkeit als Beurteilungsparameter erlaubt eine genaue Aussage über den Füllungsgrad des injizierten Kluftsystems und eine Unterscheidung zwischen Kluftfüllen und Kluftaufweiten. Aus diesen Parametern ist es möglich, Abbruchkriterien zu erstellen, mit denen ein unerwünschtes Aufweiten oder Aufreißen vermieden werden kann. Die Steuergröße der Injektion ist dabei der Injektionsdruck. Aus diesem Grund wird diese Methode *Druckfühliges Injizieren*

oder *Pressure Sensitive Grouting* genannt. [43, 44, 35]

Zusammenfassend sind die vier Parameter zur Beurteilung und Steuerung der Injektion dargestellt: [44]

- Druckabfallgeschwindigkeit (m)
- Entwicklung der Druckabfallgeschwindigkeit über die Zeit (m_1, m_2, m_3 als c ausgedrückt)
- Ruhedruck (p_r)
- Ruhedruckentwicklung über die Zeit (p_{r1}, p_{r2}, p_{r3} als k ausgedrückt)

Zusätzlich ist es sinnvoll, dass bei der Injektion das GIN-Kriterium (Kapitel 4) verwendet wird, um die Injektionsenergie nach oben zu begrenzen. [44]

7.1.1 Druckabfallgeschwindigkeit

Die Druckabfallgeschwindigkeit ist definiert als Gradient der Druckabfallkurve. Bei der PSG-Methode wird dazu üblicherweise nicht die Tangente, sondern die Sekante zwischen zwei Drücken zu den Zeiten t_0 und t_1 verwendet (Abbildung 7.2). Dieser Zeitabstand muss bei jeder Unterbrechung gleich sein und kann je nach erforderlicher Genauigkeit beliebig gewählt werden. In der Regel wird für diesen Zeitabstand eine Dauer von 5 Sekunden festgelegt. Aus der Druckabfallgeschwindigkeit und der Entwicklung dieser im Verlauf der Injektion können folgende Aussagen getroffen werden: [43, 44, 35]

- Eine von Druckabfall zu Druckabfall kleiner werdende Druckabfallgeschwindigkeit weist auf einen steigenden Füllungsgrad hin. Der Injektionsdruck muss demnach reduziert werden. [44]
- Eine von Druckabfall zu Druckabfall gleich bleibende Druckabfallgeschwindigkeit weist auf das Füllen einer größeren Kluft hin. Der Injektionsdruck kann demnach erhöht werden. [44]
- Eine von Druckabfall zu Druckabfall größer werdende Druckabfallgeschwindigkeit weist auf das Aufreißen einer neuen Wegigkeit hin. Der Injektionsdruck muss demnach rasch reduziert werden. [44]

7.1.2 Ruhedruck

Der Ruhedruck ist jener Druck, der sich nach dem Pumpenstopp im Kluftsystem einstellt (Abbildung 7.2). Normalerweise ist eine Erfassung des Ruhedrucks erst ab einer Zeitdauer von mindestens 5 Minuten nach Pumpenstopp (oder Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) möglich, da sich der Druck in Richtung Bohrlochmund erst entspannen muss. Da eine Injektionsunterbrechung von jeweils 5 Minuten in der Praxis nicht annehmbar ist, wird dafür eine geringere Zeitspanne verwendet. Für die Beurteilung der Injektion nach der PSG-Methode wird der Ruhedruck bei der vorgegebenen Zeit t_2 ermittelt. Für den Zeitabstand zwischen t_2 und t_0 (Beginn des Druckabfalls) wird üblicherweise eine Dauer von 30 Sekunden festgelegt. Sobald sich in einem Kluftsystem ein Ruhedruck einstellt, bedeutet das, dass alle beaufschlagten Klüfte, deren Ansprechdruck kleiner

oder gleich dem Ruhedruck ist, vollständig gefüllt sind. Je höher der Ruhedruck, desto feinere Klüfte wurden verfüllt. [43, 44, 35]

Der Ruhedruck reagiert sehr sensibel auf die Füllung der Kluft. Er steigt im Verlauf der Injektion rasch an, wenn die Kluft gefüllt wird und bleibt niedrig bei einer offenen Kluft. Der Ruhedruck sollte mit jedem Druckabfall zunehmen. Ein von Druckabfallkurve zu Druckabfallkurve stark verminderter Ruhedruck weist – wie eine größer werdende Druckabfallgeschwindigkeit – auf das Aufreißen neuer Wegigkeiten hin. [43, 44, 35]

7.1.3 Fuzzy-Logic-Steuerung

Da es nicht möglich ist, die vier technischen Eingangsgrößen (Druckabfallgeschwindigkeit, Ruhedruck, Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit und Änderung des Ruhedrucks) in eine mathematisch lösbare Funktion zu kombinieren, ist es notwendig, eine *Fuzzy-Logic-Steuerung* zu verwenden. Mit dieser ist es möglich, aus einer Kombination von technischen Eingangsgrößen, die einen Systemzustand beschreiben, eine technische Ausgangsgröße zu ermitteln, die die gewünschten Systemänderungen bewirkt. Man muss dabei die inneren Vorgänge – wie die Geschwindigkeitsverteilung im Injektionsgut – nicht kennen, sondern muss nur wissen, bei welchen Systemzuständen welche Systemänderungen notwendig sind. Diese *Fuzzy-Logic-Steuerung* ist Grundlage für das druckfühlige Injizieren (Pressure Sensitive Grouting) [43, 35].

Die Verwendung der *Fuzzy-Logic-Steuerung* beinhaltet sowohl das Verhalten der Felsmasse als auch das Verhalten des Injektionsmaterials in einem gesamten Modell. Wenn zum Beispiel die Viskosität der Suspension sich über die Zeit verändert oder die Kluft sich füllt, ändert sich damit die Druckantwort. Auf Basis dieser immer wieder neuen Druckantworten werden die Systemzustände beurteilt. Mit einer Steuerung des Injektionsdrucks wird entsprechend darauf reagiert. Die *Fuzzy-Logic-Steuerung* benützt Begriffe aus der Umgangssprache, um das Systemverhalten zu beschreiben. Die Anwendung erfolgt wie in Abbildung 7.3 dargestellt in drei Schritten: [35, 43]

- **Fuzzifizierung:** Die technischen Eingangsgrößen (Druckabfallgeschwindigkeit, Ruhedruck, Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit und Änderung des Ruhedrucks) werden sprachlich interpretiert und in linguistische Eingangsvariablen umgewandelt (z.B. 5 bar = niedrig, 30 bar = hoch).
- **Fuzzy-Inferenz:** Die Kombination dieser vier linguistischen Eingangsvariablen wird einer linguistischen Ausgangsvariablen zugeordnet (z.B. wenn Druckabfallgeschwindigkeit hoch und Ruhedruck niedrig, dann Druck stark erhöhen). Diese Zuordnung erfolgt anhand von *Wenn-Dann-Regeln* in einer Regelbasis.
- **Defuzzifizierung:** Die linguistische Ausgangsvariable wird wieder in eine technische Ausgangsgröße rückübersetzt (z.B. stark erhöhen = 40 bar).

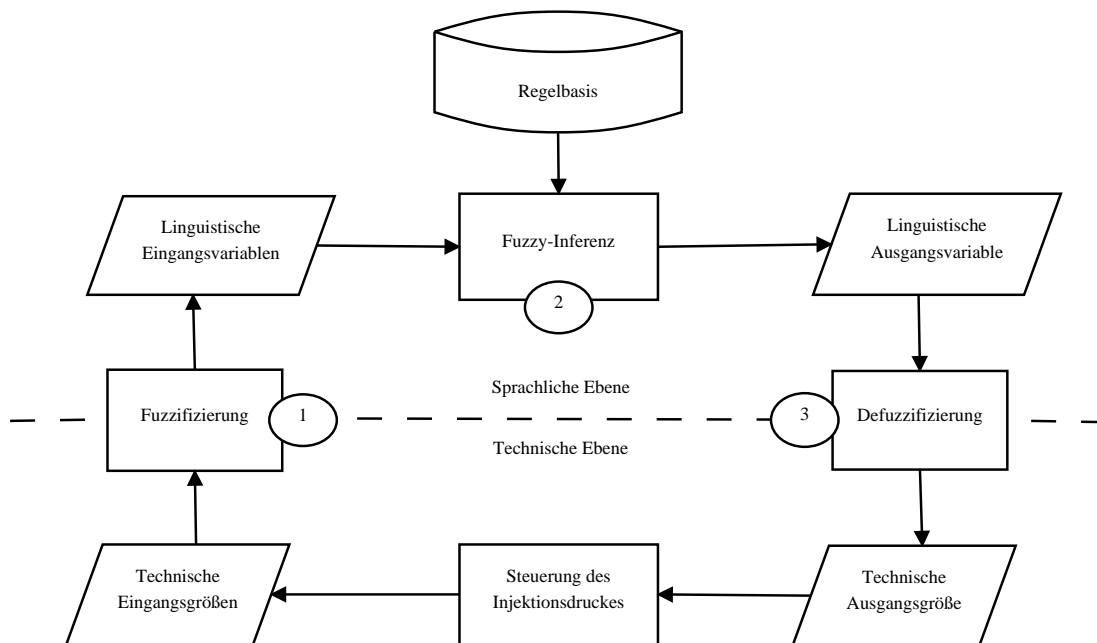


Abbildung 7.3: Fuzzy-Regelung, adaptiert aus [35]

Fuzzifizierung

Bei der Fuzzifizierung werden die am Anfang beschriebenen technischen Eingangsgrößen (Druckabfallgeschwindigkeit, Ruhedruck, Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit und Änderung des Ruhedrucks) sprachlich interpretiert und in linguistische Eingangsvariablen umgewandelt. Die sprachliche Interpretation erfolgt mit sogenannten Zugehörigkeitsfunktionen. Dies sind Funktionen, die jedem Wert der technischen Eingangsgröße eine linguistische Eingangsvariable zuordnen. Für diese Zuordnung muss jede technische Eingangsgröße dimensionslos sein. Für eine Relativierung der Druckabfallgeschwindigkeit und des Ruhedrucks auf eine dimensionslose technische Eingangsgröße zwischen 0 und 1 gibt es grundsätzlich mehrere Möglichkeiten. Sie stimmen grafisch nicht mit den in Abbildung 7.2 dargestellten technischen Eingangsgrößen überein, denn diese wurden für die allgemeine Verständlichkeit der Methode nur schematisch skizziert. [35]

Die Fuzzifizierung der **Druckabfallgeschwindigkeit** erfolgt mit den Zugehörigkeitsfunktionen *hoch*, *mittel* und *niedrig*. In Abbildung 7.4 sind die Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Für die Bestimmung der dimensionslosen technischen Eingangsgröße m , die die Druckabfallgeschwindigkeit beschreibt, kann die Formel 7.1 verwendet werden: [35, 3]

$$m = \frac{p(t_0) - p(t_1)}{p(t_0)} \quad (7.1)$$

m	Dimensionslose technische Eingangsgröße für die Druckabfallgeschwindigkeit [–]
$p(t_0)$	Injektionsdruck am ersten Sekantenpunkt (t_0) zu Beginn des Druckabfalls [bar]
$p(t_1)$	Injektionsdruck am zweiten Sekantenpunkt (t_1) in der Regel nach einigen Sekunden [bar]

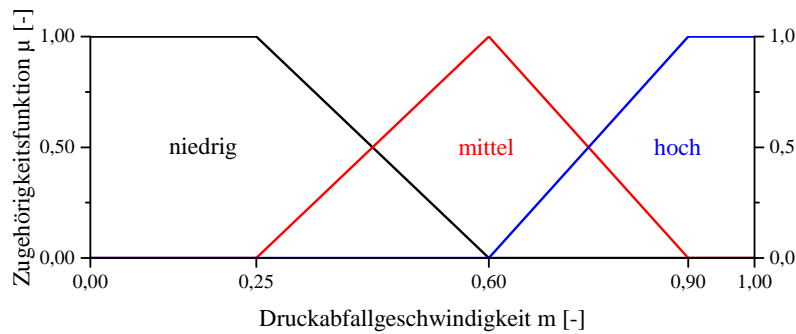


Abbildung 7.4: Fuzzifizierung der Druckabfallgeschwindigkeit, adaptiert aus [35, 3]

In Formel 7.1 wird für die Bestimmung von m die Differenz der Injektionsdrücke zu den Zeiten t_0 und t_1 durch den Injektionsdruck zum Zeitpunkt t_0 dividiert. Die technische Eingangsgröße m , die die Druckabfallgeschwindigkeit beschreibt, kann somit Werte zwischen 0 (niedrige Druckabfallgeschwindigkeit) und 1 (hohe Druckabfallgeschwindigkeit) annehmen. Der Zeitabstand zwischen t_0 (Beginn des Druckabfalls) und t_1 beträgt in der Praxis üblicherweise 5 Sekunden. [35, 3]

Die Fuzzifizierung der **Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit** erfolgt mit den Zugehörigkeitsfunktionen *Abnahme*, *konstant* und *Zunahme*. In Abbildung 7.5 sind die Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Für die Bestimmung der dimensionslosen technischen Eingangsgröße c , die die Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit beschreibt, kann die Formel 7.2 verwendet werden: [35, 3]

$$c = m_{n-1} - m_n + 0,5 \tag{7.2}$$

- c Dimensionslose technische Eingangsgröße für die Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit [-]
- m_{n-1} Dimensionslose technische Eingangsgröße für die Druckabfallgeschwindigkeit beim Druckabfall $n - 1$ [-]
- m_n Dimensionslose technische Eingangsgröße für die Druckabfallgeschwindigkeit beim Druckabfall n [-]
- n Aktueller Druckabfall [-]

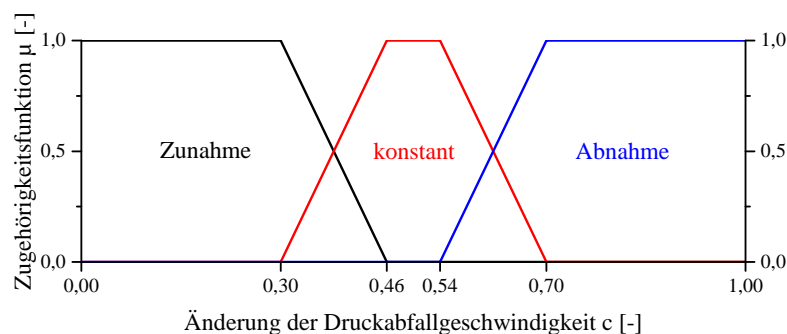


Abbildung 7.5: Fuzzifizierung der Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit, adaptiert aus [35, 3]

Bei Verwendung der Formel 7.2 ist das Ergebnis bei konstant bleibender Druckabfallgeschwindigkeit 0,5, bei flacher werdenden Druckabfallkurven größer als 0,5 und bei steiler werdenden Druckabfallkurven kleiner als 0,5. [3]

Die Fuzzifizierung des **Ruhedrucks** erfolgt mit den Zugehörigkeitsfunktionen *niedrig*, *mittel* und *hoch*. In Abbildung 7.6 sind die Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Für die Bestimmung der dimensionslosen technischen Eingangsgröße p_r , die den Ruhedruck beschreibt, kann die Formel 7.3 verwendet werden: [35, 3]

$$p_r = \frac{p(t_2)}{p(t_0)} \quad (7.3)$$

p_r	Dimensionslose technische Eingangsgröße für den Ruhedruck [-]
$p(t_0)$	Injektionsdruck zum Zeitpunkt t_0 (Beginn des Druckabfalls) [bar]
$p(t_2)$	Injektionsdruck zum Zeitpunkt t_2 (entspricht dem Ruhedruck) [bar]

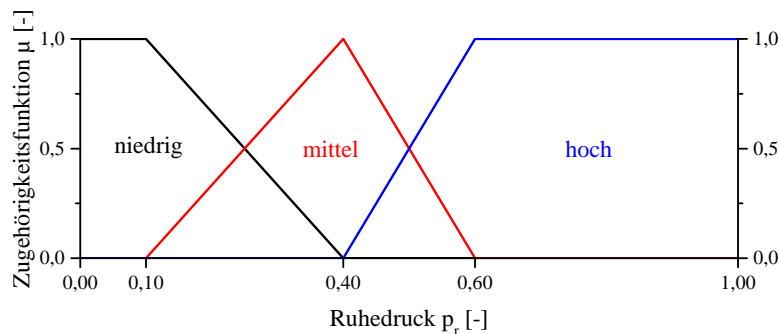


Abbildung 7.6: Fuzzifizierung des Ruhedrucks, adaptiert aus [35, 3]

In Formel 7.3 ist die dimensionslose technische Eingangsgröße p_r , die den Ruhedruck beschreibt, der Prozentsatz des Drucks beim Abstellen der Pumpe, der nach einer vorgegebenen Zeit noch wirksam ist. Sie kann ebenfalls Werte zwischen 0 (niedriger Ruhedruck) und 1 (hoher Ruhedruck) annehmen. Der Zeitabstand zwischen t_0 (Beginn des Druckabfalls) und t_2 beträgt in der Praxis üblicherweise 30 Sekunden. [3]

Die Fuzzifizierung der **Änderung des Ruhedrucks** erfolgt mit den Zugehörigkeitsfunktionen *Abnahme*, *konstant* und *Zunahme*. In Abbildung 7.7 sind die Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Für die Bestimmung der dimensionslosen technischen Eingangsgröße k , die die Änderung des Ruhedrucks beschreibt, kann die Formel 7.4 verwendet werden: [35, 3]

$$k = p_{r,n} - p_{r,n-1} + 0,5 \quad (7.4)$$

k	Dimensionslose technische Eingangsgröße für die Änderung des Ruhedrucks [–]
$p_{r,n-1}$	Dimensionslose technische Eingangsgröße für den Ruhedruck beim Druckabfall $n - 1$ [–]
$p_{r,n}$	Dimensionslose technische Eingangsgröße für den Ruhedruck beim Druckabfall n [–]
n	Aktueller Druckabfall [–]

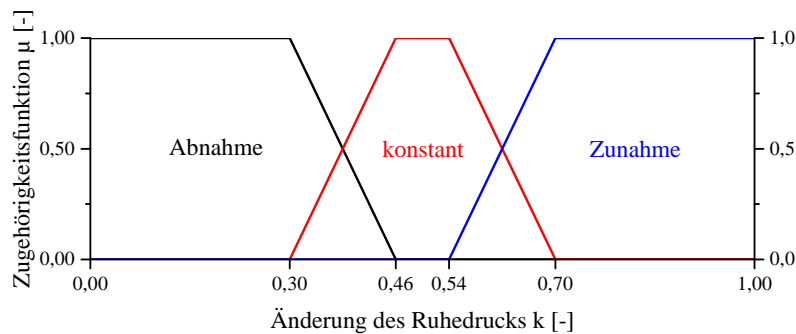


Abbildung 7.7: Fuzzifizierung der Änderung des Ruhedrucks, adaptiert aus [35, 3]

Bei Verwendung der Formel 7.4 ist das Ergebnis bei konstant bleibendem Ruhedruck 0,5, bei Abnahme des Ruhedrucks kleiner als 0,5 und bei einer Zunahme des Ruhedrucks größer als 0,5. [3]

Fuzzy-Inferenz

Zettler [43] entwickelte in seiner Arbeit eine Regelbasis aus den Erfahrungen von Injektionsbaustellen. Mithilfe dieser Regelbasis kann jeder Kombination der vier linguistischen Eingangsvariablen eine linguistische Ausgangsvariable zugeordnet werden, die einen neuen relativen Injektionsdruck beschreibt. Dieser Ablauf wird Fuzzy-Inferenz genannt. Aus den vier linguistischen Eingangsvariablen mit jeweils drei Möglichkeiten entstehen 81 mögliche *Wenn-Dann-Regeln* in der Regelbasis. Diese können durch Injektionsexperten sehr einfach auf ihre Plausibilität überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. [44]

Die linguistische Ausgangsvariable, die einen neuen relativen Injektionsdruck beschreibt und durch die Fuzzy-Inferenz ermittelt wird, kann nach Zettler [43] die Werte *stark verringern*, *verringern*, *konstant*, *erhöhen* und *stark erhöhen* annehmen. In dieser Regelbasis war noch kein klares Kriterium für den Abbruch angegeben. Reichl [35] ergänzte in seiner Arbeit die linguistische Ausgangsvariable in der Regelbasis mit dem Wert *Abbruch*. Eine weitere Entwicklung der Regelbasis wurde durch Baminger [3] durchgeführt. An einer österreichischen Tunnelbaustelle wurde die von Reichl [35] und Zettler [43] entwickelte Regelbasis in der Praxis erprobt. Das Ergebnis dieses Feldversuchs war, dass diese Regelbasis zwar für eine zufriedenstellende Injektion benutzt werden kann, jedoch diese für jedes spezifische Injektionsprojekt angepasst werden muss. Auch die Zugehörigkeitsfunktionen bei der Fuzzifizierung und Defuzzifizierung müssen an die gegebenen Verhältnisse immer wieder angepasst werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen und die Regelbasis gelten somit nicht automatisch für jede Injektionsmaßnahme.

In den Tabellen 7.1, 7.1 und 7.1 ist die Regelbasis nach Zettler [35] und Reichl [35] dargestellt. Die Abbruchkriterien bei der PSG-Methode sind in den 81 Regeln dieser

Regelbasis versteckt. Bestimmte Kombinationen der linguistischen Eingangsvariablen werden dabei der linguistischen Ausgangsvariable *Abbruch* zugeordnet. Zusammenfassend sind in der Regelbasis folgende Werte für die linguistische Ausgangsvariable, die den neuen relativen Injektionsdruck beschreibt, möglich:

- *stark verringern*
- *verringern*
- *konstant*
- *erhöhen*
- *stark erhöhen*
- *Abbruch*

Zusammengefasst die wichtigsten Überlegungen in der Regelbasis:

- Wenn die Druckabfallgeschwindigkeit von Druckabfall zu Druckabfall abnimmt, darf nur vorsichtig weiter injiziert werden, da sich die Kluft schon langsam füllt. Dies ist zum Beispiel in den Regeln 7–9, 16–18, 34–36, 43–45, 61–63 und 70–72 sichtbar. [3]
- Wenn die Druckabfallgeschwindigkeit hoch ist und sich von Druckabfall zu Druckabfall kaum ändert und gleichzeitig nur ein niedriger Ruhedruck vorhanden ist, kann gefahrlos mit einem höheren Injektionsdruck injiziert werden, da ein großer Hohlraum gefüllt wird. Dies ist zum Beispiel in den Regeln 19–27 sichtbar. [3]
- Bleibt nach dem Abschalten der Pumpe der Ruhedruck im System hoch, ist das Ziel der Injektion erreicht. Die Injektion kann abgebrochen werden. Dies ist zum Beispiel in den Regeln 1–9, 28–36 und 55–63 sichtbar. [3]

Tabelle 7.1: Regelbasis (1-27) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]

Regel	Linguistische Eingangsvariablen				Linguistische Ausgangsvariable
	Ruhe- druck	Änderung des Ruhe- drucks	Druckabfall- geschwindig- keit	Änderung der Druck- abfallge- schwindig- keit	Injektions- druck
1	hoch	Zunahme	hoch	Zunahme	Abbruch
2	hoch	konstant	hoch	Zunahme	Abbruch
3	hoch	Abnahme	hoch	Zunahme	Abbruch
4	hoch	Zunahme	hoch	konstant	Abbruch
5	hoch	konstant	hoch	konstant	Abbruch
6	hoch	Abnahme	hoch	konstant	Abbruch
7	hoch	Zunahme	hoch	Abnahme	konstant
8	hoch	konstant	hoch	Abnahme	Abbruch
9	hoch	Abnahme	hoch	Abnahme	Abbruch
10	mittel	Zunahme	hoch	Zunahme	erhöhen
11	mittel	konstant	hoch	Zunahme	stark erhöhen
12	mittel	Abnahme	hoch	Zunahme	Abbruch
13	mittel	Zunahme	hoch	konstant	konstant
14	mittel	konstant	hoch	konstant	konstant
15	mittel	Abnahme	hoch	konstant	Abbruch
16	mittel	Zunahme	hoch	Abnahme	konstant
17	mittel	konstant	hoch	Abnahme	stark verringern
18	mittel	Abnahme	hoch	Abnahme	Abbruch
19	niedrig	Zunahme	hoch	Zunahme	stark erhöhen
20	niedrig	konstant	hoch	Zunahme	stark erhöhen
21	niedrig	Abnahme	hoch	Zunahme	stark erhöhen
22	niedrig	Zunahme	hoch	konstant	erhöhen
23	niedrig	konstant	hoch	konstant	stark erhöhen
24	niedrig	Abnahme	hoch	konstant	stark erhöhen
25	niedrig	Zunahme	hoch	Abnahme	konstant
26	niedrig	konstant	hoch	Abnahme	erhöhen
27	niedrig	Abnahme	hoch	Abnahme	stark erhöhen

Tabelle 7.2: Regelbasis (28-54) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]

Regel	Linguistische Eingangsvariablen				Linguistische Ausgangsvariable
	Ruhe- druck	Änderung des Ruhe- drucks	Druckabfall- geschwindig- keit	Änderung der Druck- abfallge- schwindig- keit	Injektions- druck
28	hoch	Zunahme	mittel	Zunahme	Abbruch
29	hoch	konstant	mittel	Zunahme	Abbruch
30	hoch	Abnahme	mittel	Zunahme	Abbruch
31	hoch	Zunahme	mittel	konstant	Abbruch
32	hoch	konstant	mittel	konstant	Abbruch
33	hoch	Abnahme	mittel	konstant	Abbruch
34	hoch	Zunahme	mittel	Abnahme	konstant
35	hoch	konstant	mittel	Abnahme	Abbruch
36	hoch	Abnahme	mittel	Abnahme	Abbruch
37	mittel	Zunahme	mittel	Zunahme	konstant
38	mittel	konstant	mittel	Zunahme	erhöhen
39	mittel	Abnahme	mittel	Zunahme	Abbruch
40	mittel	Zunahme	mittel	konstant	konstant
41	mittel	konstant	mittel	konstant	konstant
42	mittel	Abnahme	mittel	konstant	Abbruch
43	mittel	Zunahme	mittel	Abnahme	konstant
44	mittel	konstant	mittel	Abnahme	stark verringern
45	mittel	Abnahme	mittel	Abnahme	Abbruch
46	niedrig	Zunahme	mittel	Zunahme	stark erhöhen
47	niedrig	konstant	mittel	Zunahme	stark erhöhen
48	niedrig	Abnahme	mittel	Zunahme	stark erhöhen
49	niedrig	Zunahme	mittel	konstant	erhöhen
50	niedrig	konstant	mittel	konstant	stark erhöhen
51	niedrig	Abnahme	mittel	konstant	stark erhöhen
52	niedrig	Zunahme	mittel	Abnahme	konstant
53	niedrig	konstant	mittel	Abnahme	erhöhen
54	niedrig	Abnahme	mittel	Abnahme	stark erhöhen

Tabelle 7.3: Regelbasis (55-81) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]

Regel	Linguistische Eingangsvariablen				Linguistische Ausgangsvariable
	Ruhe- druck	Änderung des Ruhe- drucks	Druckabfall- geschwindig- keit	Änderung der Druck- abfallge- schwindig- keit	Injektions- druck
55	hoch	Zunahme	niedrig	Zunahme	Abbruch
56	hoch	konstant	niedrig	Zunahme	Abbruch
57	hoch	Abnahme	niedrig	Zunahme	Abbruch
58	hoch	Zunahme	niedrig	konstant	Abbruch
59	hoch	konstant	niedrig	konstant	Abbruch
60	hoch	Abnahme	niedrig	konstant	Abbruch
61	hoch	Zunahme	niedrig	Abnahme	Abbruch
62	hoch	konstant	niedrig	Abnahme	Abbruch
63	hoch	Abnahme	niedrig	Abnahme	Abbruch
64	mittel	Zunahme	niedrig	Zunahme	konstant
65	mittel	konstant	niedrig	Zunahme	konstant
66	mittel	Abnahme	niedrig	Zunahme	Abbruch
67	mittel	Zunahme	niedrig	konstant	konstant
68	mittel	konstant	niedrig	konstant	konstant
69	mittel	Abnahme	niedrig	konstant	Abbruch
70	mittel	Zunahme	niedrig	Abnahme	stark verringern
71	mittel	konstant	niedrig	Abnahme	stark verringern
72	mittel	Abnahme	niedrig	Abnahme	stark verringern
73	niedrig	Zunahme	niedrig	Zunahme	erhöhen
74	niedrig	konstant	niedrig	Zunahme	stark erhöhen
75	niedrig	Abnahme	niedrig	Zunahme	stark erhöhen
76	niedrig	Zunahme	niedrig	konstant	erhöhen
77	niedrig	konstant	niedrig	konstant	erhöhen
78	niedrig	Abnahme	niedrig	konstant	stark erhöhen
79	niedrig	Zunahme	niedrig	Abnahme	konstant
80	niedrig	konstant	niedrig	Abnahme	erhöhen
81	niedrig	Abnahme	niedrig	Abnahme	stark erhöhen

Defuzzifizierung

Bei der Defuzzifizierung wird die linguistische Ausgangsvariable, die den neuen relativen Injektionsdruck p_{rel} beschreibt, wieder in eine technische Größe rückübersetzt. Die Interpretation erfolgt wieder mit Zugehörigkeitsfunktionen (Abbildung 7.8). Jeder linguistischen Ausgangsvariable wird zuerst eine technische Ausgangsgröße in Form eines neuen relativen Injektionsdrucks p_{rel} zugeordnet. Dieser neue relative Injektionsdruck p_{rel} kann mit den Formeln 7.5 und 7.6 in einen neuen absoluten Injektionsdruck p_{soll} umgerechnet werden.

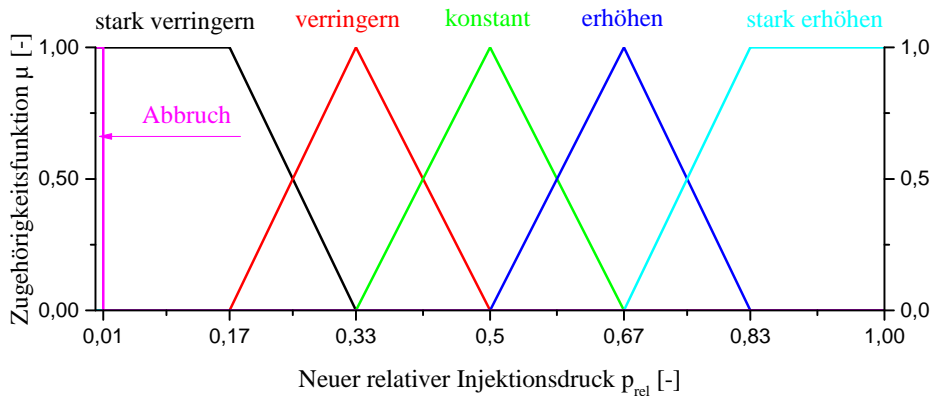


Abbildung 7.8: Defuzzifizierung, adaptiert aus [35, 3]

Für einen neuen relativen Injektionsdruck von $> 0,5$ gilt: [3]

$$p_{soll} = p_{ist} + \frac{p_{rel} - 0,5}{0,5} \cdot (p_{max} - p_{ist}) \quad (7.5)$$

Für einen neuen relativen Injektionsdruck p_{rel} von $< 0,5$ gilt: [3]

$$p_{soll} = \frac{p_{rel}}{0,5} \cdot p_{ist} \quad (7.6)$$

- p_{max} Maximaler Injektionsdruck [bar]
- p_{soll} Neuer absoluter Injektionsdruck [bar]
- p_{ist} Aktueller absoluter Injektionsdruck [bar]
- p_{rel} Neuer relativer Injektionsdruck [-]

7.2 Praktische Anwendung der Methode

An einer Tunnelbaustelle in Österreich wurden bei einer Injektion im Bereich der Ulme die in Abbildung 7.9 dargestellten Druckabfallkurven einer Passe aufgezeichnet. Anhand dieses Beispiels wird nachfolgend die Anwendung der Fuzzy-Logic exemplarisch erläutert.

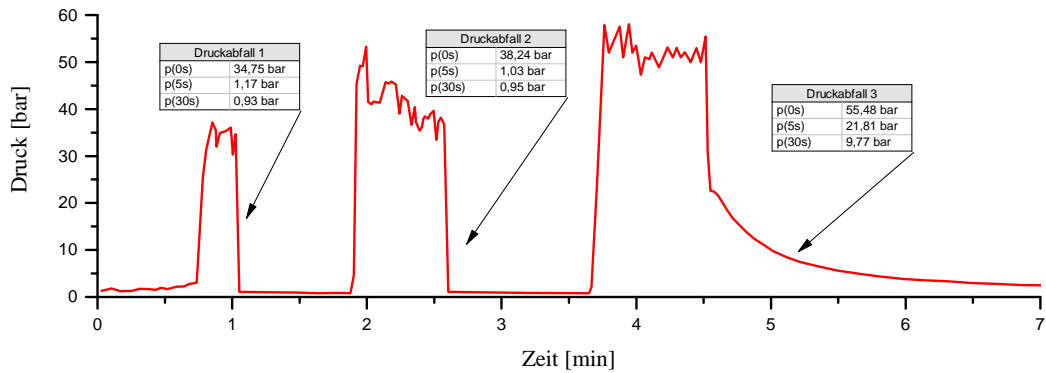


Abbildung 7.9: Druckaufzeichnung an einer Tunnelbaustelle, mit Daten aus [3]

Aus den drei Druckabfallkurven lassen sich die technischen Eingangsgrößen für die Fuzzy-Logic-Steuerung (p_r = Ruhedruck, k = Änderung des Ruhedrucks von Druckabfall zu Druckabfall, m = Druckabfallgeschwindigkeit, c = Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit von Druckabfall zu Druckabfall) ermitteln. Diese sind in Tabelle 7.4 dargestellt.

Tabelle 7.4: Eingangsdaten in die Fuzzy-Logic-Steuerung (ermittelt aus der Druckabfallkurve), mit Daten aus [3]

	Einheit	Druckabfall 1	Druckabfall 2	Druckabfall 3
p_{0s}	bar	34,75	38,24	55,48
p_{5s}	bar	1,17	1,03	21,81
p_{30s}	bar	0,93	0,95	9,77
$p_{0s} - p_{5s}$	bar	33,48	37,21	33,67
p_r	-	0,03	0,03	0,18
k	-	-	0,50	0,65
m	-	0,97	0,97	0,61
c	-	-	0,49	0,87

Dadurch, dass sich die Druckabfallkurve 3 hinsichtlich der Form wesentlich von der Druckabfallkurve 2 unterscheidet, wird für die exemplarische Erläuterung der Anwendung der Fuzzy-Logic die Druckabfallkurve 3 (und somit die Entwicklung von Druckabfallkurve 2 zu 3) analysiert.

7.2.1 Fuzzifizierung für Druckabfallkurve 3

Der technische Eingangsgröße p_r , die den **Ruhedruck** beschreibt, kann gemäß Abbildung 7.10 zu 73% der linguistischen Eingangsvariablen *niedrig* (Erfüllungsgrad 0,73) und zu 27% der linguistischen Eingangsvariablen *mittel* (Erfüllungsgrad 0,27) zugeordnet werden.

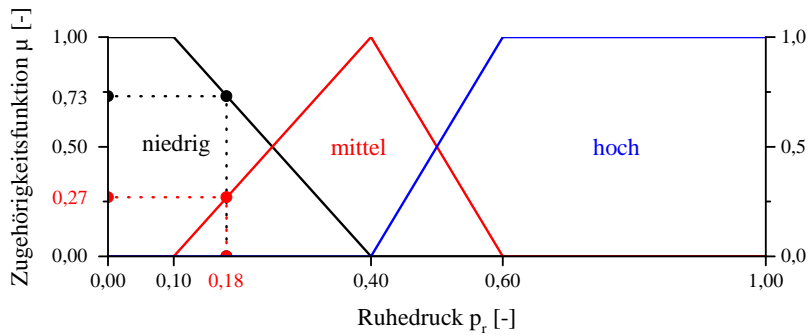


Abbildung 7.10: Fuzzifizierung des Ruhedrucks für Druckabfallkurve 3

Die technische Eingangsgröße k , die die **Änderung des Ruhedrucks** beschreibt, kann gemäß Abbildung 7.11 zu 68% der linguistischen Eingangsvariablen *Zunahme* (Erfüllungsgrad 0,68) und zu 32% der linguistischen Eingangsvariablen *konstant* (Erfüllungsgrad 0,32) zugeordnet werden.

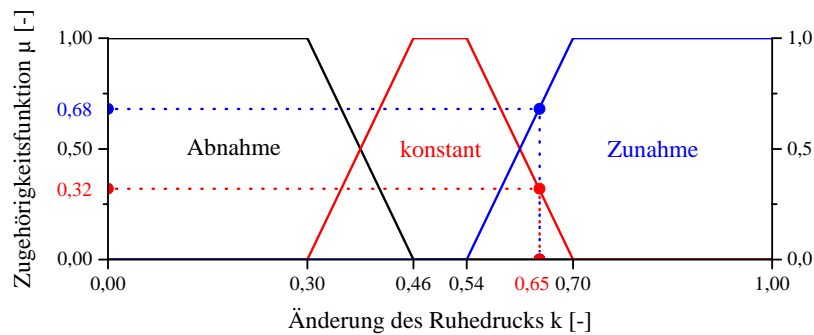


Abbildung 7.11: Fuzzifizierung der Änderung des Ruhedrucks für Druckabfallkurve 3

Die technische Eingangsgröße m , die die **Druckabfallgeschwindigkeit** beschreibt, kann gemäß Abbildung 7.12 zu 97% der linguistischen Eingangsvariablen *mittel* (Erfüllungsgrad 0,97) und zu 3% der linguistischen Eingangsvariablen *hoch* (Erfüllungsgrad 0,03) zugeordnet werden.

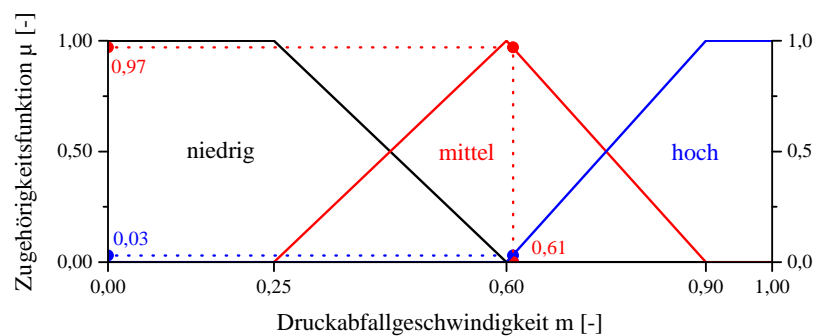


Abbildung 7.12: Fuzzifizierung der Druckabfallgeschwindigkeit für Druckabfallkurve 3

Die technische Eingangsgröße c , die die **Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit** beschreibt, kann gemäß Abbildung 7.13 zu 100% der linguistischen Eingangsvariablen *Abnahme* (Erfüllungsgrad 1,00) zugeordnet werden.

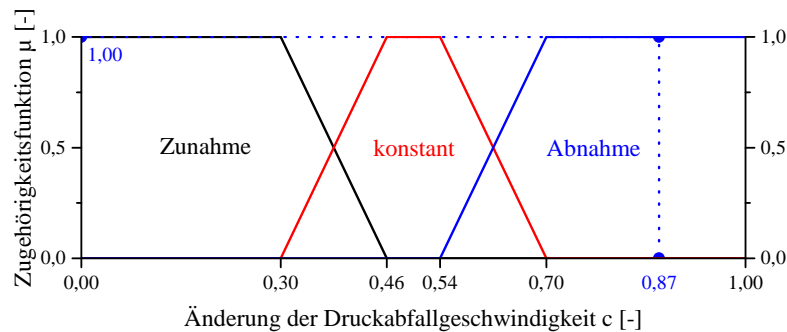


Abbildung 7.13: Fuzzifizierung der Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit für Druckabfallkurve 3

7.2.2 Fuzzy-Inferenz für Druckabfallkurve 3

Für alle Kombinationen dieser technischen Eingangsvariablen werden aus den 81 *Wenn-Dann-Regeln* in der Regelbasis 8 Regeln benötigt. In der Tabelle 7.5 sind die einzelnen Regeln mit den jeweiligen Erfüllungsgraden dargestellt. Die einzelnen Erfüllungsgrade der linguistischen Eingangsvariablen werden bei der Kombination mit dem Operator *UND* verknüpft. Das heißt, dass jeweils der kleinste Wert für den Erfüllungsgrad der linguistischen Ausgangsvariable, die den neuen relativen Injektionsdruck beschreibt, verwendet wird.

Tabelle 7.5: Angewandte Regeln zur Fuzzy-Inferenz von Druckabfallkurve 3

Regel	Linguistische Eingangsvariablen				Linguistische Ausgangsvariable
	Ruhe- druck	Änderung des Ruhe- drucks	Druckabfall- geschwindig- keit	Änderung der Druck- abfallge- schwindig- keit	Injektions- druck
16	mittel 0,27	Zunahme 0,68	hoch 0,03	Abnahme 1,0	konstant 0,03
17	mittel 0,27	konstant 0,32	hoch 0,03	Abnahme 1,0	stark verringern 0,03
25	niedrig 0,73	Zunahme 0,68	hoch 0,03	Abnahme 1,0	konstant 0,03
26	niedrig 0,73	konstant 0,32	hoch 0,03	Abnahme 1,0	erhöhen 0,03
43	mittel 0,27	Zunahme 0,68	mittel 0,97	Abnahme 1,0	konstant 0,27
44	mittel 0,27	konstant 0,32	mittel 0,97	Abnahme 1,0	stark verringern 0,27

52	niedrig 0,73	Zunahme 0,68	mittel 0,97	Abnahme 1,0	konstant 0,68
53	niedrig 0,73	konstant 0,32	mittel 0,97	Abnahme 1,0	erhöhen 0,32

Diese 8 Regeln in der Tabelle 7.5 beschreiben den Zustand im System. Jede einzelne Regel trifft dabei mit einem entsprechenden Erfüllungsgrad zu. Gibt es für einen Wert der linguistischen Ausgangsvariablen (z.B. *konstant* oder *stark verringern*) mehrere Erfüllungsgrade aus verschiedenen Regeln, so gilt der jeweils höchste Wert. Somit treffen für die neue linguistische Ausgangsvariable, die den neuen relativen Injektionsdruck beschreibt, folgende Erfüllungsgrade zu:

- *stark verringern*: 0,27
- *konstant*: 0,68
- *erhöhen*: 0,32

7.2.3 Defuzzifizierung für Druckabfallkurve 3

Aus den ermittelten Erfüllungsgraden der Werte in der linguistischen Ausgangsvariablen wird mit der Defuzzifizierung ein neuer relativer Injektionsdruck ermittelt. Die Defuzzifizierung ist in Abbildung 7.14 dargestellt. In den einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Ausgangsvariablen werden die jeweiligen Erfüllungsgrade aufgetragen. Die Fläche unter den jeweiligen Erfüllungsgraden in der Zugehörigkeitsfunktion wird ermittelt und daraus der Schwerpunkt berechnet. Die Lage des Schwerpunkts ist der neue relative Injektionsdruck.

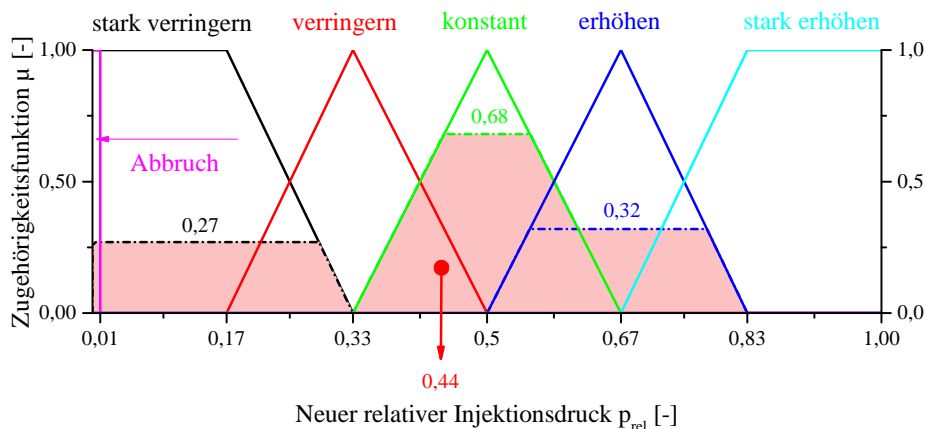


Abbildung 7.14: Defuzzifizierung für Druckabfallkurve 3

Bei die Analyse der Druckabfallkurve 3 ergibt sich nach Anwendung der Fuzzy-Logic ein neuer relativer Injektionsdruck p_{rel} von 0,44. Dieser neue relative Injektionsdruck muss für die weitere Injektion noch in einen neuen absoluten Injektionsdruck umgewandelt werden. Dafür wird die Formel 7.6 verwendet. Aktuell wurde mit einem absoluten Injek-

tionsdruck p_{ist} von 50 bar injiziert. Somit ergibt sich ein neuer absoluter Injektionsdruck p_{soll} von:

$$p_{soll} = \frac{0,44}{0,50} \cdot 50 = 44 \text{ bar} \quad (7.7)$$

Der Druck muss somit bei der weiteren Injektion auf 44 bar leicht verringert werden. Diese Prozedur wird so lange durchgeführt, bis die Regelbasis einen Abbruch verlangt.

7.3 Vor- und Nachteile

Für die Ausführung der PSG-Methode sind nur wenige Eingangsparameter erforderlich. Klufteigenschaften wie die Kluftöffnungsweite oder Kennwerte der Suspension wie die Fließgrenze oder Viskosität müssen dafür nicht bekannt sein. Für die Anwendung der Fuzzy-Logic muss lediglich die Injektionspumpe gestoppt werden (oder der Schieber am Bohrlochmund geschlossen werden) und der Druckabfall aufgezeichnet werden. Alleine aus der Druckabfallgeschwindigkeit und dem Ruhedruck wird die Injektion beurteilt und der Injektionsdruck gesteuert. Eine Planung der Injektion oder eine genaue geologische Erkundung ist somit nicht notwendig.

Das System der Fuzzy-Logic ist sehr einfach zu verstehen. Die Beschreibung der technischen Zusammenhänge erfolgt mit Begriffen aus der Umgangssprache. Praktisches Wissen, Expertenwissen oder Vorgaben aus der Planung können sehr einfach, übersichtlich und schnell in die Steuerung eingebracht werden. Dieses Wissen oder die Vorgaben können direkt in Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen umgesetzt werden, ohne sich mit mathematischen Formulierungen zu beschäftigen. Dadurch, dass die Regelbasis sehr überschaubar und nachvollziehbar ist, können auch Laien innerhalb kurzer Zeit die logischen Regeln verstehen und ändern. Außerdem ist die Fuzzy-Logic ein sehr fehlertolerantes System. Bei Abweichungen in den Messungen wird nicht die gesamte Steuerung gekippt, da jeder Eingangswert fuzzifiziert wird und nicht als scharfe Zahl in die Berechnungen eingeht.

Das Problem der Fuzzy-Logic allerdings ist, dass die Zugehörigkeitsfunktionen und die Grund-Regelbasis nicht universal für alle Injektionsmaßnahmen anwendbar sind. *Baminger* [3] zeigte in seiner Arbeit, dass die Regelbasis und die Zugehörigkeitsfunktionen an jede Injektionsbaustelle angepasst werden müssen. Werden diese nicht adäquat angepasst, ist die Gefahr groß, dass trotz eines Abbruchs das Injektionsziel nicht erreicht wurde oder die Drücke erhöht werden, auch wenn dies unerwünscht ist. Eine Anpassung benötigt in der Regel eine lange Vorlaufzeit bis zur optimalen Regelbasis und zu den optimalen Zugehörigkeitsfunktionen. Diese langwierige Vorlaufzeit macht diese Methode zu einer sehr aufwändigen. Aus praktischer Hinsicht sei zu erwähnen, dass die PSG-Methode bis dato nur an einer Versuchsbaustelle ausgeführt wurde und somit keine Erfahrungen mit unterschiedlichen Regelbasen und Zugehörigkeitsfunktionen vorhanden sind.

Ein großer Nachteil der Methode ist wie bei der TPA-Methode die Wirtschaftlichkeit. Um die Injektion mit der Fuzzy-Logic steuern zu können, muss die Injektion zyklisch für längere Zeit gestoppt werden. Diese Stillstandszeiten sind zwar nicht so lange wie bei

der TPA-Methode (sie bewegen sich in einer Größenordnung von etwa 30 Sekunden), jedoch können beim mehrmaligen Pumpenstopp im Verlauf einer Injektion auch diese Unterbrechungen schnell zur Unwirtschaftlichkeit führen. Um diese Unwirtschaftlichkeit zu umgehen, wurde in *Reichl* [35] eine Verwendung von Minidruckabfallkurven zur Steuerung der Injektion angedacht. Minidruckabfallkurven entstehen zwischen den Kolbenhüben der Pumpe und würden den gleichen Effekt wie Druckabfallkurven bei Pumpenstopps (oder einem Schließen des Schiebers am Bohrlochmund) zeigen. Aus praktischer Sicht ist dies jedoch nur beschränkt bis gar nicht möglich. Neuere Injektionspumpen sind technologisch so weit entwickelt, dass sie beim Wechsel von einem Kolben auf den anderen keine Druckabfälle mehr erzeugen und der Injektionsdruck nahezu konstant bleibt.

Die PSG-Methode wurde grundsätzlich ins Leben gerufen, um den Pumpenfahrer von Entscheidungen zu entlasten. Alle Entscheidungen wie *Injektionsdruck erhöhen*, *Injektionsdruck verringern* oder *Abbruch der Injektion* sind in der Regelbasis verankert und werden automatisch gefällt. Dabei wird immer die Antwort des Kluftsystems abgewartet und anhand der beobachtbaren, messbaren Kennwerte (Druckabfallgeschwindigkeit und Ruhedruck) die Injektion beurteilt und der Injektionsdruck gesteuert. Das Problem dabei ist, dass die Injektion ausschließlich mit dem Injektionsdruck gesteuert wird. Ein Aufreißen oder Aufweiten, das mit großer Wahrscheinlichkeit bei hohen Injektionsdrücken und gleichzeitig hohen Injektionsvolumen auftritt, kann bei dieser Methode nicht zur Gänze verhindert werden. Das bereits injizierte Volumen hat keinen Einfluss auf die Auswahl des Injektionsdrucks. Zudem gibt es in dieser Methode keine Begrenzung der Reichweite. Es wird so lange injiziert, bis sich in der Kluft ein Ruhedruck aufbaut. Bei großen Klüften wird dabei eine sehr große Reichweite erzielt, die in den meisten Fällen nicht notwendig ist. Aus diesem Grund ist es durchaus sinnvoll, zusätzlich die Injektionsintensität nach der GIN-Methode zu begrenzen.

7.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- Zyklischer Pumpenstopp und Aufzeichnung des Druckabfalls

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Dimensionslose Druckabfallgeschwindigkeit $[-]$
- Dimensionslose Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit über die Zeit $[-]$
- Dimensionsloser Ruhedruck $[-]$
- Dimensionslose Änderung des Ruhedrucks über die Zeit $[-]$

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher $[-]$
- Abbruch durch Anwendung der *Wenn-Dann-Regeln* in der Regelbasis $[-]$
- (Maximaler Injektionsdruck erreicht $[bar]$)
- (GIN-Wert erreicht $[bar \cdot l/m]$)

7.4.1 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe (ohne Darstellung der Fuzzy-Logic)

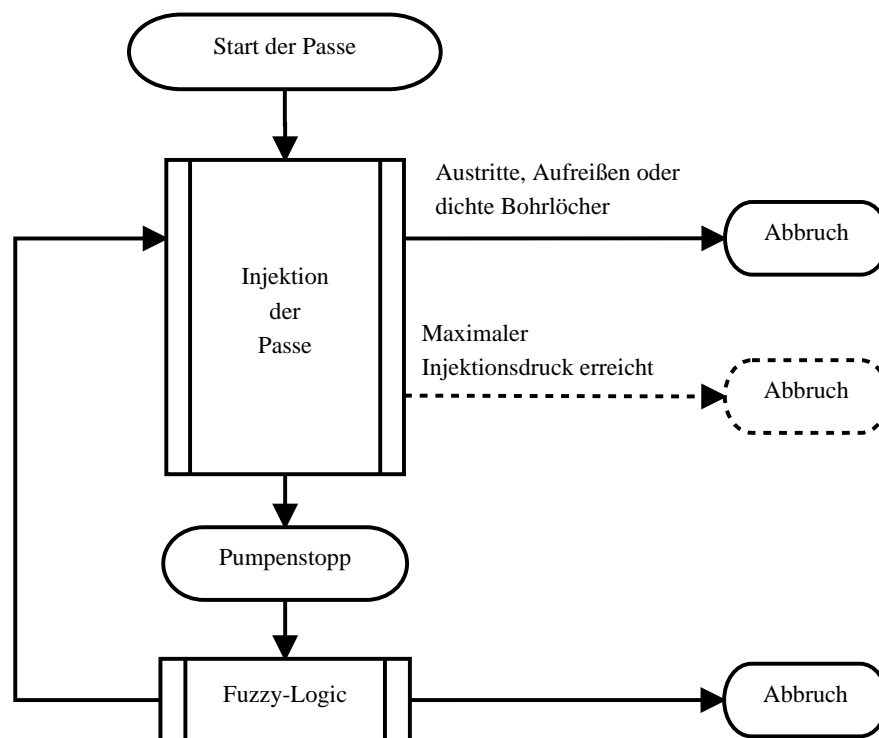


Abbildung 7.15: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der PSG-Methode (ohne Darstellung der Fuzzy-Logic)

7.4.2 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe (mit Darstellung der Fuzzy-Logic)

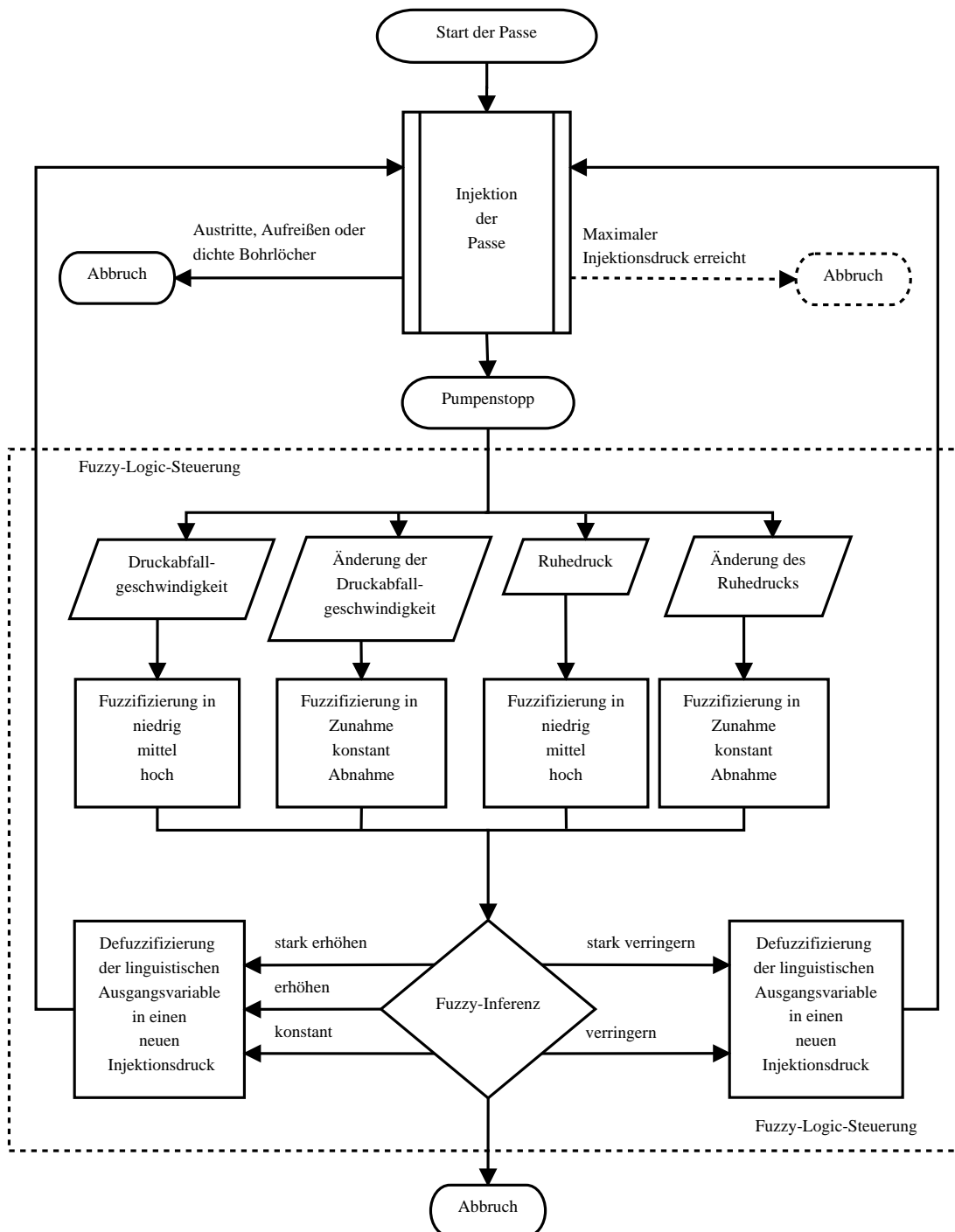


Abbildung 7.16: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der PSG-Methode (mit Darstellung der Fuzzy-Logic)

Real Time Grouting Control (RTGC-Methode)

In Schweden hat sich die Methode der Echtzeit-Injektionssteuerung (Real Time Grouting Control) etabliert. Sie wurde von *Stille* [40] und *Kobayashi* [22] ins Leben gerufen. Die Entwicklungen bauen auf Veröffentlichungen *Gustafson und Claesson* [14] sowie *Hässler* [17] auf. Die Grundidee war die Entwicklung einer analytischen Lösung für die Reichweite der Injektion. Aus den Grundgleichungen der Theorie einer *Bingham'schen Flüssigkeit* und einfachen Gleichgewichtsbedingungen an der Injektionsfront wurden Differentialgleichungen aufgestellt, die die Reichweite der Injektion in Abhängigkeit der Injektionszeit beschreiben. Bei dieser Methode wird nach Berechnung einer notwendigen Injektionszeit so lange injiziert, bis die Reichweite der Suspension in der kleinsten Kluft über einem bestimmten Zielwert liegt (minimale Reichweite) und gleichzeitig die Reichweite der Suspension in der größten Kluft einen bestimmten Grenzwert (maximale Reichweite) nicht überschreitet. [40, 22]

Real Time Grouting Control (RTGC) basiert auf der Annahme, dass sich die Suspension entweder linear in Fließkanälen (1D) ausbreitet oder dass eine ebene radiale Ausbreitung in Klüften (2D) stattfindet. Die Kluftöffnungen werden unabhängig vom Injektionsdruck als konstant angenommen. Die Injektion selbst wird in der Regel druckgesteuert ausgeführt. Alle Abweichungen zu konstanter Kluftöffnung, konstantem Injektionsdruck und konstanten Suspensionseigenschaften werden mithilfe von Zeitkorrekturen berücksichtigt. Während der Injektion wird mit dem Ausdruck der Dimensionalität das vorherrschende Strömungsregime (1D oder 2D) beurteilt. Anhand der Echtzeit-Injektionsaufzeichnungen wird dann auf die aktuelle Kluftöffnungsweite rückgerechnet und dabei die Reichweite in der größten und kleinsten Kluft bestimmt. Mit diesen Informationen werden die Entscheidungen zur Injektionssteuerung getroffen. Bei Erreichen der Ziel-Reichweite in der kleinsten Kluft oder Erreichen der Grenz-Reichweite in der größten Kluft wird die Injektion abgebrochen. [40, 22]

8.1 Beschreibung

Während alle gängigen Abbruchkriterien empirischen Ursprungs sind, wurden im Jahr 2005 von *Gustafson und Claesson* [14] die ersten analytischen Lösungen einer Ausbreitung der Suspension abgeleitet. Diese basieren auf dem *Bingham'schen Modell* einer Flüssigkeit in planparallelen Klüften mit konstanter Öffnungsweite bei konstantem Injektionsdruck. In den Veröffentlichungen von *Kobayashi und Stille* [23] im Jahr 2007 wurde diese Theorie weiterentwickelt und an reale Injektionsverhältnisse angepasst (wie z.B. einen ansteigenden Injektionsdruck oder einer Veränderung der Suspensionseigenschaften).

8.1.1 Reichweite der Injektion bei konstantem Injektionsdruck

Grundgleichungen

Zementbasierte Suspensionen können wie bereits unter Kapitel 2.4 beschrieben als *Bingham'sches Fluid* charakterisiert werden (mit der Fließgrenze τ_0 und der plastischen Viskosität η_{pl}). Die Abbildung 8.1 zeigt das Eindringen eines *Bingham'schen Fluids* in eine planparallele Kluft mit konstanter Öffnungsweite b bei konstantem effektiven Injektionsdruck. [22]

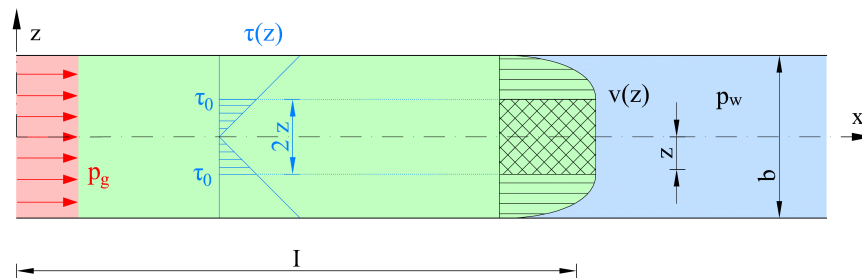


Abbildung 8.1: Eindringen eines *Bingham'schen Fluids* in eine planparallele Kluft, adaptiert aus [22, 17]

Δp	Effektiver Injektionsdruck $\Delta p = p_g - p_w$ [bar]
p_g	Injektionsdruck [bar]
p_w	Hydrostatischer Druck [bar]
I	Reichweite der Injektion [m]
τ_0	Fließgrenze der Suspension [Pa]
η_{pl}	Plastische Viskosität der Suspension [Pa · s]
b	Öffnungsweite der Kluft [m]
z	Bereich, in dem die Schubspannung τ kleiner als die Fließgrenze τ_0 ist [m]
$v(z)$	Geschwindigkeitsprofil der Suspension in der Kluft [m/s]
\bar{v}	Mittelwert der Geschwindigkeit [m/s]

Aus diesem Modell wurde die erste Differentialgleichung für die RTGC-Methode abgeleitet. Das Geschwindigkeitsprofil in der Kluft wird mit der Funktion $v(z)$ dargestellt. Der Mittelwert davon wird mit \bar{v} angegeben. Eine Integration des Mittelwerts der Geschwindigkeit \bar{v} führt schließlich zur Reichweite I . Der Durchfluss dI/dt nach *Hässler* [17] in Formel 8.1 ist damit die erste Grundgleichung für die RTGC-Methode.

$$\frac{dI}{dt} = \bar{v} = \frac{d\Delta p}{dx} \cdot \frac{b^2}{12 \cdot \eta_{pl}} \cdot \left[1 - 3 \cdot \frac{z}{b} + 4 \cdot \left(\frac{z}{b} \right)^3 \right] \quad (8.1)$$

mit

$$z = \tau_0 \cdot \left| \frac{d\Delta p}{dx} \right|^{-1}, z < \frac{b}{2} \quad (8.2)$$

Die maximale Reichweite der Injektion I_{max} nach *Hässler* [17] in Formel 8.3 basiert auf dem Kräftegleichgewicht an der Injektionsfront und geht als zweite Grundgleichung in die RTGC-Methode ein.

$$I_{max} = \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot b \quad (8.3)$$

Die Gleichungen nach *Hässler* [17] erfüllen alle Anforderungen eines echten *Bingham'schen Fluids* in einer planparallelen Kluft (1D Ausbreitung in einem linearen Fließkanal). Für den Fall einer ebenen radialen Ausbreitung in einer Kluft basiert die Lösung auf einer weniger starren Interpretation des *Bingham'schen Modells*. [40]

Analytische Lösung der Grundgleichungen

Die Differentialgleichungen für die Beziehung zwischen der Injektionszeit und der Reichweite wurden im Jahr 2005 von *Gustafson und Claesson* [15, 14] analytisch gelöst und veröffentlicht. In den Jahren 2008 und 2013 wurden von *Kobayashi* [22] und *Holmberg* [16] jeweils Details über die praktische Anwendung der Lösung und die Auswirkungen auf Abbruchkriterien veröffentlicht und diskutiert. Um die Gleichungen analytisch zu lösen, wurde die charakteristische Injektionszeit t_0 , die relative Injektionszeit t_D und die relative Reichweite I_D eingeführt. Die relative Injektionszeit t_D ist definiert als Injektionszeit (*Real Time*) dividiert durch die charakteristische Zeit t_0 . [22]

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (8.4)$$

$$t_0 = \frac{6 \cdot \Delta p \cdot \eta_{pl}}{\tau_0^2} \quad (8.5)$$

t	Injektionszeit [min]
t_0	Charakteristische Injektionszeit [min]
t_D	Relative Injektionszeit [–]

Die relative Reichweite I_D ist definiert als die Reichweite I dividiert durch die maximale Reichweite I_{max} .

$$I_D = \frac{I}{I_{max}} \quad (8.6)$$

I_D	Relative Reichweite [–]
I_{max}	Maximale Reichweite [m]
I	Reichweite [m]

Mithilfe der Grundgleichungen wurde die relative Reichweite I_D als Funktion der relativen Injektionszeit t_D sowohl für die lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) als auch für die ebene radiale Ausbreitung in Klüften (2D) analytisch gelöst. Die Lösungen – publiziert von *Gustafson und Stille* [15] im Jahr 2005 – sind in der Abbildung 8.2 ersichtlich. In dieser Grafik ist die relative Reichweite I_D in Abhängigkeit der relativen Injektionszeit t_D dargestellt. Die Zeitachse ist logarithmisch skaliert.

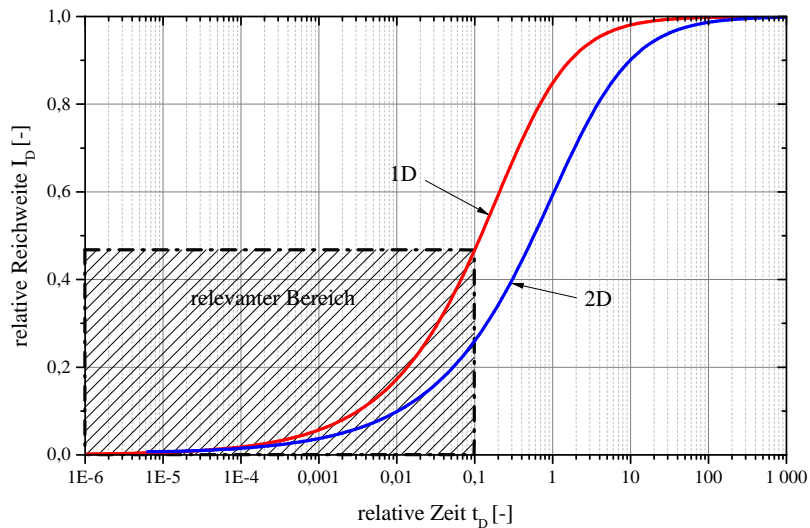


Abbildung 8.2: Die relative Reichweite als Funktion der relativen Injektionszeit in logarithmischer Skalierung, adaptiert aus [22]

Dabei ist im Allgemeinen für die praktische Anwendung nur der Bereich bis zu einer relativen Injektionszeit t_D von 0,1 relevant. Dieser Bereich ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Die Zeitachse ist dabei normal skaliert. In dieser Grafik sind bereits die typischen Verläufe der Reichweite während der Injektion ersichtlich.

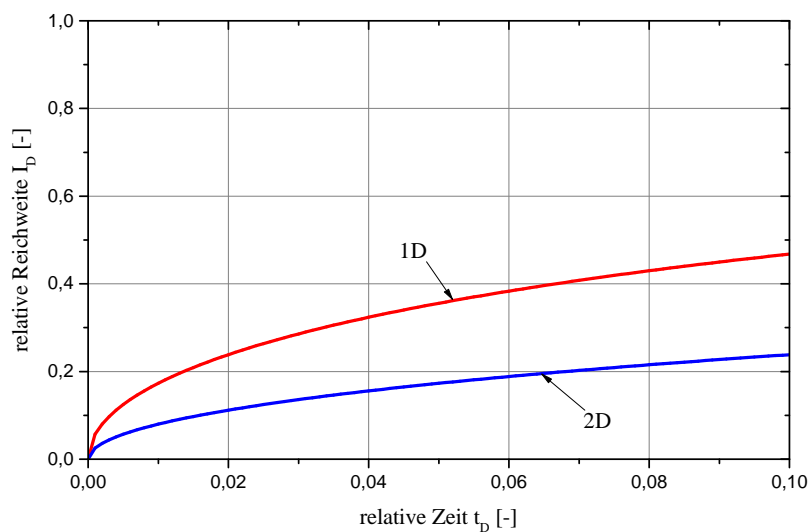


Abbildung 8.3: Die relative Reichweite als Funktion der relativen Injektionszeit, adaptiert aus [22]

Aus den Ergebnissen dieser analytischen Lösungen wurden folgende Aussagen getroffen [40]:

- Die relative Reichweite I_D kann als unabhängig von der Öffnungsweite der Kluft betrachtet werden. Sie ist lediglich abhängig von der relativen Zeit t_D und somit für alle Klüfte gleich, die über ein Bohrloch angetroffen werden.
- Die notwendige Injektionszeit t ist eine Funktion des effektiven Injektionsdrucks Δp und kann somit von der Planung festgelegt werden.
- Während einer Injektionszeit gleich der charakteristischen Zeit ($t_D = 1,0$) werden 60 – 80% der maximalen Reichweite erreicht, hauptsächlich abhängig von der Art des Durchflusses (1D oder 2D).
- Ab einer relativen Penetration von 40% ($t_d = \text{ca. } 0.6$) steigt die Injektionszeit für die weitere Penetration (Reichweite I_D) überproportional an. Die Injektion wird unwirtschaftlich.

Volumen und Durchfluss

Das injizierte Volumen V [l] und Durchfluss Q [l/min] wurden von *Gustafson und Stille* [15] im Jahr 2005 abgeleitet.

Für die **lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D)** kann das Volumen V [l], das in die planparallele Kluft mit einer Weite w und einer Kluftöffnungsweite b injiziert wird, mit Formel 8.7 berechnet werden.

$$V = I \cdot w \cdot b = I_D \cdot I_{max} \cdot w \cdot b = I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot w \cdot b^2 \quad (8.7)$$

Für mehrere planparallele Klüfte kann das Gesamtvolumen V_{tot} [l] mit Formel 8.8 berechnet werden.

$$V_{tot} = I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot \sum (w \cdot b^2) \quad (8.8)$$

Der Durchfluss Q [l/min], der die Ableitung des Volumens nach der Zeit ist, kann nach Formel 8.9 berechnet werden.

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right) \cdot \sum (w \cdot b^2) \quad (8.9)$$

Für die **ebene radiale Ausbreitung (2D)** kann das Volumen V [l], das sich in einer planparallelen Kluft mit einer Kluftöffnungsweite b flächig ausbreitet, mit Formel 8.10 berechnet werden.

$$V = \pi \cdot I^2 \cdot b = \pi \cdot (I_D \cdot I_{max})^2 \cdot b = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot b^3 \quad (8.10)$$

Für mehrere aufeinanderfolgende flächige Ausbreitungen kann das Gesamtvolumen V_{tot} [l] mit Formel 8.11 berechnet werden.

$$V_{tot} = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \sum (b^3) \quad (8.11)$$

Der Durchfluss Q [l/min], der die Ableitung des Volumens nach der Zeit ist, kann nach Formel 8.12 berechnet werden.

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \right)^2 \cdot \sum (b^3) \quad (8.12)$$

Begriff und Analyse der Dimensionalität

Um die bereits erwähnte Art der Ausbreitung, die linear in Fließkanälen (1D) oder eben radial in Klüften (2D) sein kann, zu überprüfen und zu charakterisieren, wurde der Begriff der sogenannten Dimensionalität eingeführt. Die Dimensionalität DIM ist das Verhältnis von $Q \cdot t$ zu V . [15]

$$DIM = \frac{Q \cdot t}{V} \quad (8.13)$$

Wie in Abbildung 8.4 ersichtlich, zeigt die Analyse der Dimensionalität, welche Art der Ausbreitung (1D oder 2D) vorliegt. Für lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) liegt die Dimensionalität zwischen 0,3 und 0,5. Für ebene radiale Ausbreitung (2D) liegt sie zwischen 0,8 und 1,0. [40]

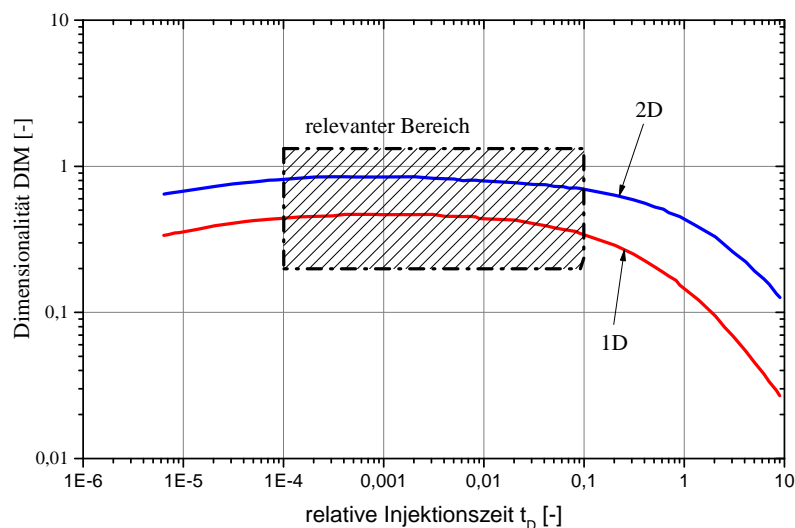


Abbildung 8.4: Die Dimensionalität DIM zur Analyse der Art der Ausbreitung, adaptiert aus [22]

Die Dimensionalität eignet sich zum Interpretieren von Injektionsauswertungen, denn sie ist im Anwendungsbereich ($t_D = 0,0$ bis ca. $0,1$) annähernd konstant. Außerdem wird

das Verhältnis bei einer Aufsummierung des Durchflusses oder Volumens in ähnlichen Klufftypen nicht verändert. Dadurch ist es möglich, die Dimensionalität als Indikator für die Art der Ausbreitung zu benutzen. [40]

Näherungen für die analytische Lösung der Reichweite

Um die Reichweite gegenüber der Injektionszeit zu berechnen, muss die inverse Funktion zu *Gustafsons und Claessons* [14] Lösungen gebildet werden. Sie sind für die lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) und die ebene radiale Ausbreitung in Klüften (2D) jeweils unterschiedlich. In den Formeln 8.14, 8.15 und 8.16 sind die Lösungen nach *Stille* [40] und *Kobayashi* [22] dargestellt.

$$I_D = \sqrt{\Theta^2 + 4 \cdot \Theta} - \Theta \quad (8.14)$$

Für 1D-Durchfluss:

$$\Theta_{1D} = \frac{t_D}{2 \cdot (0.6 + t_D)} \quad (8.15)$$

Für 2D-Durchfluss:

$$\Theta_{2D} = \frac{t_D}{2 \cdot (3 + t_D)} \quad (8.16)$$

Von *Eriksson und Stille* [10] wurden 2005 die Näherungslösungen mit den Formeln 8.17 und 8.18 erarbeitet. Die Lösungen können für Werte von t_D im Intervall 0.001 bis 1 benutzt werden. Der Vorteil dieser Lösungen ist, dass die Ableitungen einfacher gebildet werden können, was die Berechnung vereinfacht.

Für 1D-Durchfluss:

$$I_D = 0.820 + 0.343 \cdot \log(t_D) - 0.0195(\log(t_D))^2 - 0.0065(\log(t_D))^3 \quad (8.17)$$

Für 2D-Durchfluss:

$$I_D = 0.580 + 0.450 \cdot \log(t_D) + 0.135(\log(t_D))^2 + 0.015(\log(t_D))^3 \quad (8.18)$$

8.1.2 Reichweite der Injektion bei veränderlichem Injektionsdruck

Die Theorie der Reichweite der Injektion gilt grundsätzlich nur unter Annahme eines konstanten Injektionsdrucks, einer konstanten Klufföffnungsweite und konstanten Suspensionseigenschaften. Da jedoch eine Injektion nach der RTGC-Methode im Normalfall mit niedrigem Injektionsdruck startet und schrittweise zum Maximaldruck angehoben wird und ebenso die Suspensionseigenschaften während der Injektionszeit nicht konstant bleiben, müssen diese Abweichungen mithilfe von Zeitkorrekturen berücksichtigt werden. Der Durchfluss und die Reichweite der Injektion können unter Verwendung der Grundgleichungen nach wie vor abgeschätzt werden, jedoch unter Berücksichtigung

einer Zeitkorrektur. Die in Abbildung 8.5 dargestellte Anwendung der Zeitkorrektur bezieht sich auf eine Veränderung des Injektionsdrucks. Dabei wird angenommen, dass die schrittweise Zunahme des effektiven Injektionsdrucks von P_a zu P_b unmittelbar bei der Injektionszeit t_1 auftritt. [22]

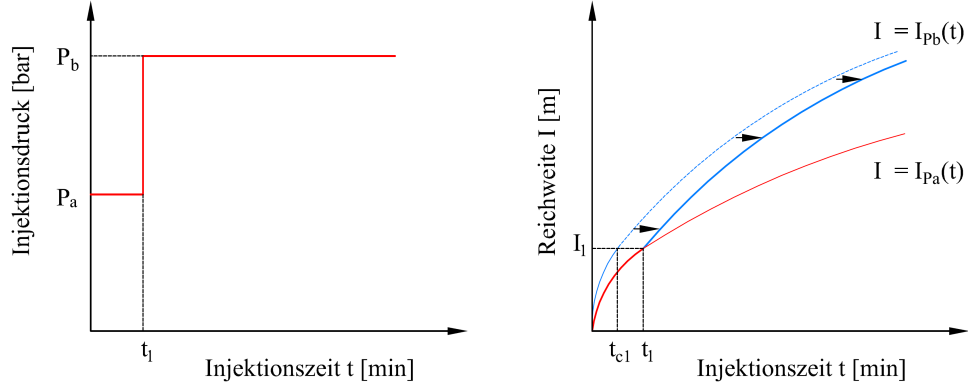


Abbildung 8.5: Zusammenhang zwischen Injektionszeit und Reichweite bei veränderlichem Injektionsdruck, adaptiert aus [22]

Die in Abbildung 8.5 dargestellte Zeitkorrektur für die Ermittlung der Reichweite I bei veränderlichem Injektionsdruck kann wie folgt durchgeführt werden: [40]

1. Berechnung der relativen Reichweite I_{D,P_a} zur Zeit t_1
2. Berechnung der relativen Reichweite I_{D,P_b} zur Zeit t_1 , jedoch für P_b
3. Berechnung der zugehörigen relativen Injektionszeit t_{D,P_b}
4. Berechnung der Zeitkorrektur t_{c1}
5. Berechnung der korrigierten Zeit t_{corr}

$$I_{D,P_b} = I_{D,P_a} \cdot \frac{P_a}{P_b} \quad (8.19)$$

$$t_{c1} = t_{D,P_b} \cdot \frac{6 \cdot P_b \cdot \eta_{pl}}{\tau_0^2} \quad (8.20)$$

$$t_{corr} = t - (t_1 - t_{c1}) \quad (8.21)$$

P_a	Effektiver Injektionsdruck vor der Druckerhöhung [bar]
P_b	Effektiver Injektionsdruck nach der Druckerhöhung [bar]
I_{D,P_b}	Relative Reichweite der Injektion für P_b [-]
I_{D,P_a}	Relative Reichweite der Injektion für P_a [-]
t_{D,P_b}	Zugehörige relative Injektionszeit [-]
t	Injektionszeit [s]
t_1	Zeitpunkt der Druckänderung [s]
t_{c1}	Zeitkorrektur [s]
t_{corr}	Korrigierte Injektionszeit [s]

Für die Berechnung der zugehörigen relativen Injektionszeit werden die inversen Funktionen zwischen relativer Reichweite und relativer Zeit in den Formeln 8.22, 8.23 und 8.24 verwendet. [40]

$$\theta = \frac{I_{D,Pb}^2}{4 - 2 \cdot I_{D,Pb}} \quad (8.22)$$

Für die lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D):

$$t_{D,Pb(1D)} = \frac{1.2 \cdot \theta}{1 - 2 \cdot \theta} \quad (8.23)$$

Für die ebene radiale Ausbreitung in Klüften (2D):

$$t_{D,Pb(2D)} = \frac{6 \cdot \theta}{1 - 3 \cdot \theta} \cdot [1 + 0.115 \cdot \ln(t_{D,Pb(2D)})] \quad (8.24)$$

Die korrigierte Zeit sollte für alle Berechnungen wie für die Reichweite oder die Dimensionalität verwendet werden. Zusätzlich muss die Zeit bei einer Änderung der Suspensionseigenschaften korrigiert werden. [40]

8.1.3 Reichweite der Injektion bei veränderlichen Suspensionseigenschaften (Berücksichtigung der Hydratation)

Die Reichweite der Injektion kann nur vernünftig abgeschätzt werden, wenn die veränderlichen Suspensionseigenschaften infolge der Hydratation berücksichtigt werden. Die Zeitkorrektur dafür kann äquivalent zur Bestimmung der Zeitkorrektur bei veränderlichem Injektionsdruck wie folgt durchgeführt werden: [22]

1. Berechnung der relativen Reichweite I_{Da} zur Zeit t_1 für eine Suspension mit den Parametern τ_{0a} und $\eta_{pl.a}$
2. Berechnung der relativen Reichweite I_{Db} zur Zeit t_1 , jedoch für eine Suspension mit den Parametern τ_{0b} und $\eta_{pl.b}$
3. Berechnung der zugehörigen relativen Injektionszeit t_{Db}
4. Berechnung der Zeitkorrektur t_{c1}
5. Berechnung der korrigierten Zeit t_{corr}

$$I_{Db} = I_{Da} \cdot \frac{\tau_{0b}}{\tau_{0a}} \quad (8.25)$$

$$t_{c1} = t_{Db} \cdot \frac{6 \cdot \Delta p \cdot \eta_{pl.b}}{\tau_{0b}^2} \quad (8.26)$$

τ_{0a}	Fließgrenze vor der Änderung der Suspensionseigenschaften [Pa]
τ_{0b}	Fließgrenze nach der Änderung der Suspensionseigenschaften [Pa]
$\eta_{pl.a}$	Plastische Viskosität vor der Änderung der Suspensionseigenschaften [$Pa \cdot s$]
$\eta_{pl.b}$	Plastische Viskosität nach der Änderung der Suspensionseigenschaften [$Pa \cdot s$]
I_{Da}	Relative Reichweite vor der Änderung der Suspensionseigenschaften $[-]$
I_{Db}	Relative Reichweite nach der Änderung der Suspensionseigenschaften $[-]$
t_{Db}	Zugehörige relative Injektionszeit $[-]$

Die zugehörige relative Injektionszeit sowie die korrigierte Zeit werden auf gleiche Weise wie bei einem verändlichen Injektionsdruck mit den Formeln 8.22, 8.23 und 8.24 berechnet.

Kobayashi [22] hat für die Berechnung der zeitabhängigen Suspensionseigenschaften (Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität η_{pl}) infolge der Hydratation Näherungsformeln aufgestellt. Die Zeitabhängigkeit der Fließgrenze und der plastischen Viskosität kann mit den Formeln 8.27 und 8.28 beschrieben werden. [22]

$$\tau_0(t) = \tau_0(t_0) \cdot e^{0,0004 \cdot t} \quad (8.27)$$

$$\eta_{pl}(t) = \eta_{pl}(t_0) \cdot e^{0,0004 \cdot t} \quad (8.28)$$

t	Injektionszeit [s]
$\tau_0(t)$	Fließgrenze der Suspension in Abhängigkeit der Injektionszeit [Pa]
$\tau_0(t_0)$	Fließgrenze der Suspension zum Zeitpunkt $t = 0$
$\eta_{pl}(t)$	Plastische Viskosität der Suspension in Abhängigkeit der Injektionszeit [Pa]
$\eta_{pl}(t_0)$	Plastische Viskosität der Suspension zum Zeitpunkt $t = 0$

Wird gleichzeitig eine Zeitkorrektur bei veränderlichem Injektionsdruck und unter Berücksichtigung der Hydratation der Suspension berechnet, kann die Berechnung der relativen Reichweite $I_{D,Pb}$ nach der Druckänderung mit Formel 8.29 zusammengefasst werden.¹

$$I_{D,Pb} = I_{D,Pa} \cdot \frac{P_a}{P_b} \cdot \frac{\tau_{0b}}{\tau_{0a}} \quad (8.29)$$

¹In der Veröffentlichung von *Kobayashi* [22] sind alle möglichen und notwendigen Zeitkorrekturen und deren praktische Anwendung beschrieben. Neben einer Korrektur für einen veränderlichen Injektionsdruck und einer Änderung der Suspensionseigenschaften gibt es zum Beispiel auch eine Zeitkorrektur für eine verringerte Durchflussrate aufgrund begrenzter Kapazität der Injektionspumpen.

8.1.4 Abbruchkriterien

Grundlage der RTGC-Methode ist das von *Kobayashi* [22] definierte Injektionsziel, das in Abbildung 8.6 dargestellt ist.

Die Injektion ist abgeschlossen, sobald die Reichweite der Suspension in der kleinsten Kluft über einem bestimmten Zielwert liegt (minimale Reichweite) und die Reichweite der Suspension in der größten Kluft einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet (maximale Reichweite). (Kobayashi [22])

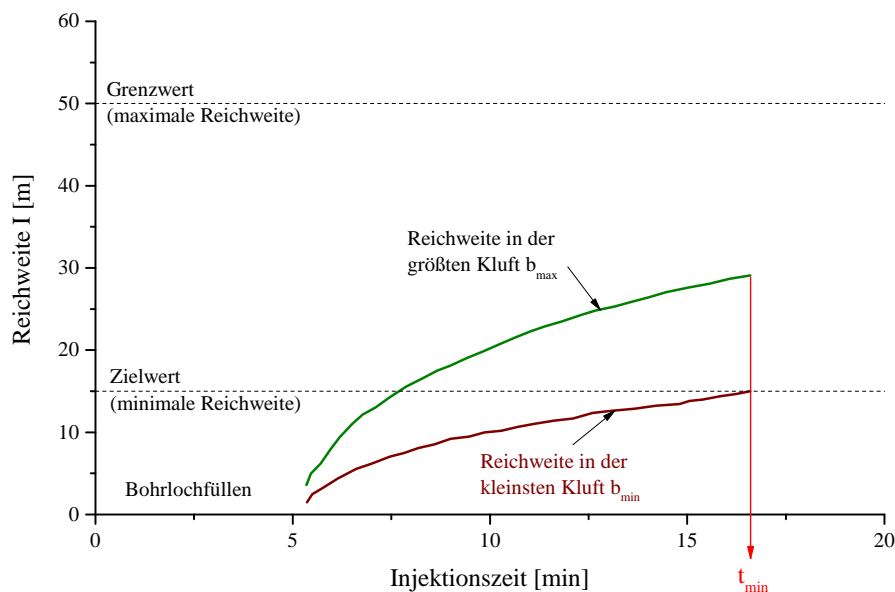


Abbildung 8.6: Abbruchkriterien der RTGC-Methode, adaptiert aus [22]

Der Zielwert (minimale Reichweite) lässt sich aus dem Bohrraster ableiten und sollte in einem Bereich liegen, in dem keine Lücke zwischen den injizierten Löchern entsteht. Quantitativ ausgedrückt bedeutet das, dass der Zielwert zwischen dem halben und dem 1-fachen Lochabstand liegt. Ein Wert von 70% hat sich in der Praxis bewährt. [40, 16]

Der Grenzwert (maximale Reichweite) soll zum einen den Zielwert bzw. die Länge der zu injizierenden Zone überschreiten. Zum anderen soll der Grenzwert nach oben so eingeschränkt werden, dass keine negativen Auswirkungen auf die Umgebung entstehen und nicht unnötig große Mengen an Suspension injiziert werden. Am City-Tunnel-Projekt in Stockholm [16] wurde der Grenzwert mit 30 Meter definiert, was in etwa die dreifache notwendige Soll-Dicke der zu injizierenden Zone war. Dabei ist wichtig, dass ein korrekter Wert für die größte Kluft abgeschätzt werden kann. Die Öffnungsweite der größten Kluft hat einen großen Einfluss auf die Reichweite, ist aber mit großen Unsicherheiten behaftet. [16]

Unter Anwendung der Theorie der Reichweite der Injektion kann die notwendige Injektionszeit zum Erreichen der geforderten Reichweite abgeschätzt werden. Diese Zeit wird

als Abbruchkriterium benützt. Nachdem das Bohrloch gefüllt ist, startet die Zeitkontrolle. Zusätzliche Abbruchkriterien sind Austritte, ein Aufreißen oder dichte Bohrlöcher. Aufgrund dieser zusätzlichen Kriterien kann die Injektion schon abgebrochen werden, bevor die Injektionszeit erreicht ist. [40]

8.2 Praktische Anwendung der Methode

Die Grundlage für die praktische Anwendung der RTGC-Methode ist die beschriebene Theorie der Reichweite der Injektion. Mit dieser kann der Injektionsverlauf vorhergesagt und geplant werden. Für die praktische Anwendung werden ebenfalls die analytischen Lösungen der Grundgleichungen verwendet. Anstatt jedoch den Injektionsverlauf basierend auf den Daten der Kluftgeometrie vorherzusagen, werden die Reichweite, Dimensionalität und Kluftöffnungsweite anhand der aktuellen Durchflussrate und des aktuellen Injektionsdrucks berechnet und verifiziert. Der Kern der RTGC-Methode ist die Echtzeit-Berechnung der Reichweite in der größten und kleinsten Kluft während der Ausführung. Sind die theoretischen Reichweiten in der größten und kleinsten Kluft bekannt², kann davon ausgegangen werden, dass bei allen anderen Kluftöffnungsweiten (zwischen der größten und kleinsten) die Reichweiten innerhalb der beiden Werte liegen. Die praktische Anwendung der RTGC-Methode erfolgt in Echtzeit mit folgenden Punkten: [40]

1. Anwendung der **Zeitkorrektur**, bedingt durch die Dauer der Bohrlochfüllung, veränderliche Injektionsdrücke und zeitabhängige Suspensionseigenschaften
2. Auswertung der **Dimensionalität**
3. Beurteilung des **Durchflussverlaufs**
4. Auswertung der **größten Kluftöffnungsweite**
5. Abschätzung der **Reichweite** in der kleinsten und größten Kluft

8.2.1 Vorhersage des Injektionsverlaufs

Für eine Vorhersage des Injektionsverlaufs in der Planung sind Eingangsparameter wie Öffnungsweite der kleinsten Kluft b_{min} , Öffnungsweite der größten Kluft b_{max} , Fließgrenze der Suspension τ_0 , plastische Viskosität der Suspension η_{pl} , das Bohrlochvolumen V_{hole} und der effektive Injektionsdruck Δp notwendig. Mit einer Modellierung nach der Theorie der Reichweite der Injektion kann im Voraus die notwendige Injektionszeit berechnet werden, um eine minimale Reichweite (Zielwert) in der kleinsten Kluft zu erreichen. Diese Berechnungen können mit einfachen Hilfsmitteln wie z.B. Microsoft Excel durchgeführt werden. Für die Veranschaulichung der RTGC-Methode wird in der weiteren Arbeit ein Beispiel aus der Praxis (mit Daten aus [23]) verwendet. Die geologischen Verhältnisse, Randbedingungen sowie die Injektionsaufzeichnungen einer Pässe stehen damit für die Darstellung zur Verfügung: [23]

²Die tatsächlichen Reichweiten sind in der Regel nicht bekannt, die Reichweiten werden nur theoretisch berechnet.

Öffnungsweite der kleinsten Kluft b_{min} :	0,1	mm
Öffnungsweite der größten Kluft b_{max} :	0,2	mm
Zielwert der Reichweite für die kleinste Kluft R_{min} :	15,0	m
Grenzwert der Reichweite für die größte Kluft R_{max} :	40,0	m
Fließgrenze der Suspension τ_0 :	$0,296 \cdot e^{0,0004 \cdot t}$	Pa
Plastische Viskosität der Suspension η_{pl} :	$0,0056 \cdot e^{0,0004 \cdot t}$	Pa · s
Bohrlochvolumen V_{hole} :	70,0	l
Hydrostatischer Druck p_w :	3,36	MPa
Injektionsdruck p_g :	5,00	MPa

In den Vorhersagen für die Reichweite zeigt sich für die lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) in Abbildung 8.7, dass nach einer Injektionszeit von 13,3 min die Reichweite in der kleinsten Kluft $b_{min} = 0,1$ mm erreicht wird. Dabei wird die Reichweite in der größten Kluft $b_{max} = 0,2$ mm nicht überschritten.

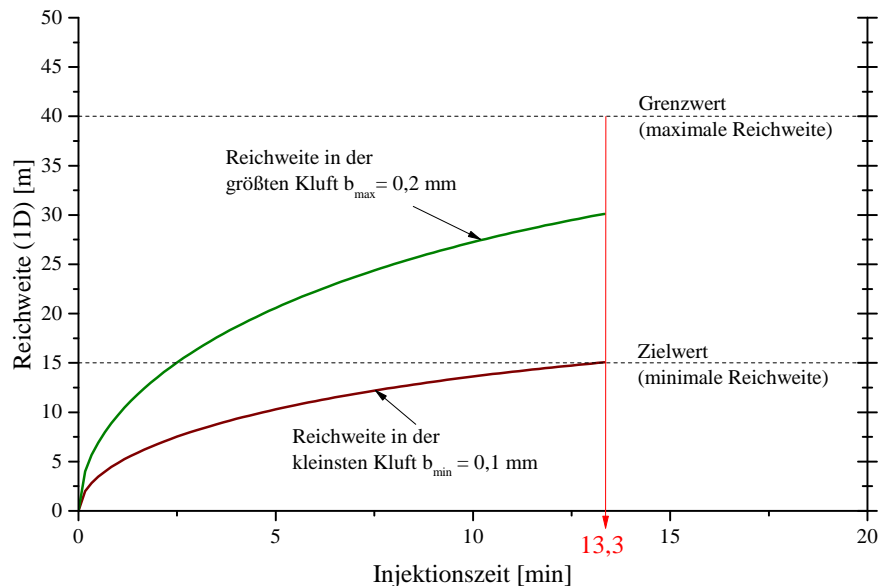


Abbildung 8.7: Vorhersage der Reichweite in Abhängigkeit der Injektionszeit für die 1D-Ausbreitung, mit Daten aus [23]

Bei der ebenen radialen Ausbreitung in Klüften (2D) in Abbildung 8.8 kann mit dem vorgegebenen Injektionsdruck und den Suspensionseigenschaften die Reichweite in der kleinsten Kluft $b_{min} = 0,1$ mm nicht erreicht werden. In erster Linie ist dabei der Injektionsdruck zu gering. Aufgrund der Tatsache, dass zeitabhängige Suspensionseigenschaften (Fließgrenze und plastische Viskosität) verwendet wurden, ist nach dieser Injektionszeit die Fließgrenze und die plastische Viskosität bereits zu hoch, sodass eine weitere Ausbreitung der Suspension nicht mehr möglich ist. Eine mögliche Abhilfe würde hierfür eine Erhöhung der Injektionsdrücke sowie eine Änderung des Bohrlochrasters, sodass eine geringere Reichweite notwendig ist, sein.

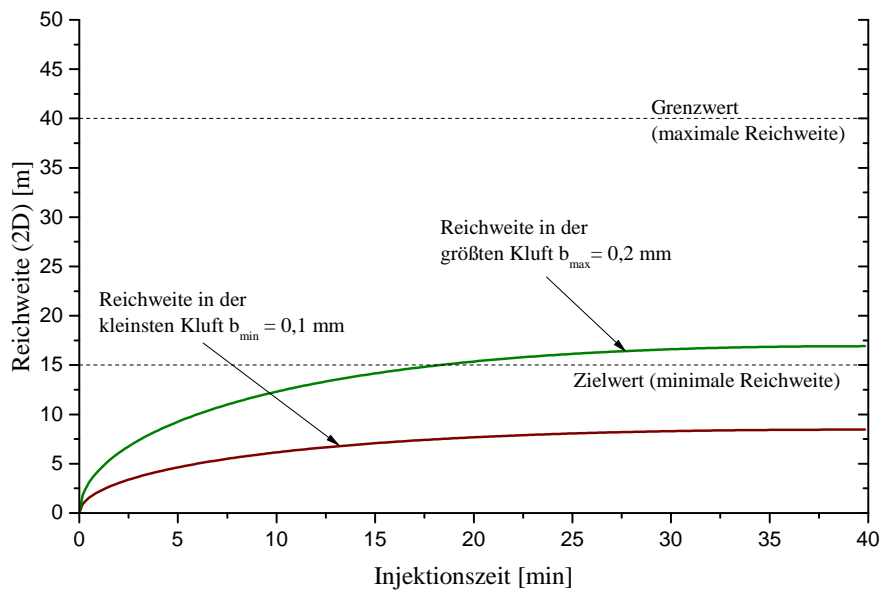


Abbildung 8.8: Vorhersage der Reichweite in Abhängigkeit der Injektionszeit für die 2D-Ausbreitung, mit Daten aus [23]

8.2.2 Anwendung der Zeitkorrektur

Für das für die Vorhersage des Injektionsverlaufs verwendete Beispiel eines Injektionsverlaufs (mit Daten aus [23]) stehen die in Abbildung 8.9 dargestellten Injektionsaufzeichnungen einer Passe zur Verfügung. Mit diesen Verläufen von Injektionsdruck und Durchflussrate wird die Anwendung der RTGC-Methode – beginnend mit der Zeitkorrektur – exemplarisch ausgeführt.

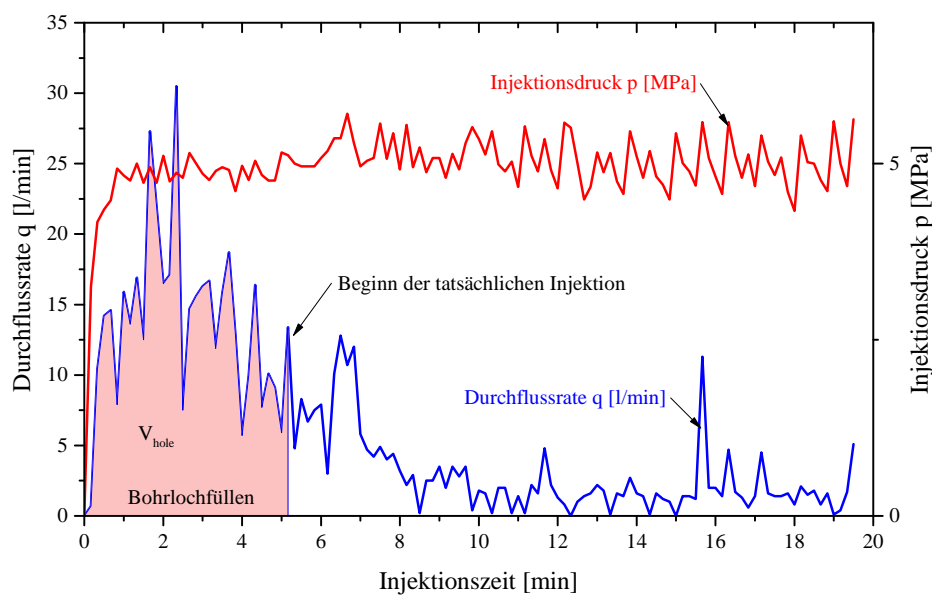


Abbildung 8.9: Injektionsaufzeichnungen einer Passe, mit Daten aus [23]

Die erste Zeitkorrektur berücksichtigt die Zeit, die benötigt wird, um das Bohrloch zu füllen. Die Injektion startet erst, nachdem das Bohrloch gefüllt ist. Dazu wird, wie in Abbildung 8.9 dargestellt, die Zeit ermittelt, bei der das Integral der Durchflusskurve (Fläche unter der Kurve = Volumen) gleich dem Bohrlochvolumen V_{hole} ist. Die Zeit t_{fill} für die Bohrlochfüllung beläuft sich dabei auf 5,2 Minuten.

Dadurch, dass der Injektionsdruck starken Schwankungen ausgesetzt ist und sich die Suspensionseigenschaften (Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität η_{pl}) mit der Zeit verändern, muss für eine korrekte Ermittlung der Reichweite I die Zeit ebenfalls korrigiert werden. Diese Zeitkorrektur muss während der Injektion in Echtzeit durchgeführt werden. Die vollständig korrigierte Zeit t_{corr} kann mit Formel 8.30 berechnet werden. [40]

$$t_{corr} = (t - t_{fill}) - (t_1 - t_{fill}) - t_{c1} \quad (8.30)$$

- t Injektionszeit [min]
 t_{fill} Zeit, die benötigt wird um das Bohrloch zu füllen [min]
 t_1 Zeitpunkt einer Druckänderung [min]
 t_{c1} Zeitkorrektur [min]

In Abbildung 8.10 ist die Reichweite für eine lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) dargestellt. Die dünnen Linien zeigen die berechnete Reichweite ohne Zeitkorrekturen, die dicken Linien die berechnete Reichweite mit den Zeitkorrekturen.

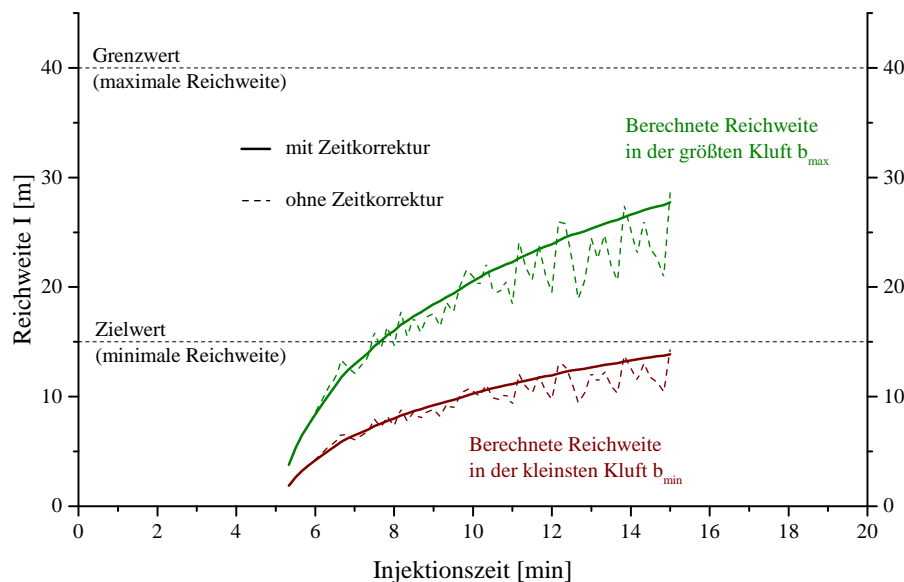


Abbildung 8.10: Reichweite für lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D), mit Daten aus [23]

Gemäß Abbildung 8.10 wurde nach einer Injektionszeit von 15 min der Zielwert in der kleinsten Kluft noch nicht erreicht. Folglich müsste so lange weiter injiziert werden, bis die berechnete Reichweite in der kleinsten Kluft b_{min} den Zielwert (minimale Reichweite) erreicht. Die Berechnung der Reichweite ist nur für die lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D) dargestellt. Die gleichen Kurven könnte man für eine ebene radiale

Ausbreitung in Klüften (2D) darstellen. Welche Art der Ausbreitung bei der Injektion wirklich vorliegt, kann anhand der aktuellen Injektionsverläufe durch eine Auswertung der Dimensionalität bestimmt werden. [40]

8.2.3 Auswertung der Dimensionalität

Mithilfe des Ausdrucks der Dimensionalität DIM kann das aktuelle Durchflussregime (1D, 2D) bestimmt werden. Für die Berechnung mit Formel 8.31 muss die korrigierte Injektionszeit t_{corr} verwendet werden.

$$DIM = \frac{Q \cdot t_{corr}}{V} \quad (8.31)$$

In Abbildung 8.11 ist für die Injektionsaufzeichnungen der Passe (mit Daten aus [23]) die Dimensionalität über die Injektionszeit aufgezeichnet. Man sieht in der Darstellung, dass sich die Mehrheit der Werte im Bereich der 1D-Ausbreitung befinden und es sich somit um eine lineare Ausbreitung in einem Fließkanal (1D) handelt.

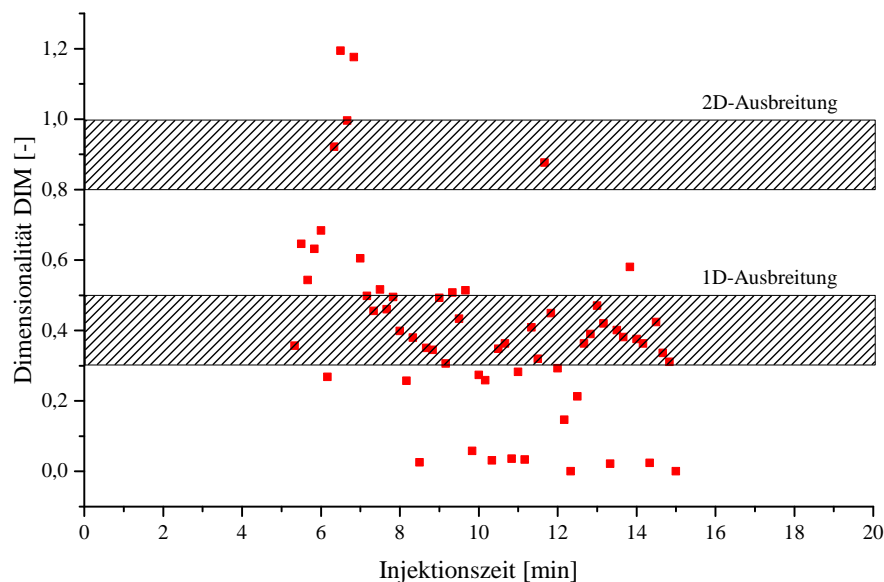


Abbildung 8.11: Dimensionalität über die Injektionszeit, mit Daten aus [23]

In der Theorie ergibt sich für eine lineare Ausbreitung in einem Fließkanal (1D) eine Dimensionalität zwischen 0,3 und 0,5 und für eine flächige, radiale Ausbreitung in einer Kluft (2D) eine Dimensionalität zwischen 0,8 und 1,0. Alle tatsächlichen geometrischen Abweichungen zum Kluftmodell sind in der Dimensionalität sichtbar. [40, 22]

8.2.4 Beurteilung des Durchflussverlaufs

Mit der Untersuchung des Durchflussverlaufs soll identifiziert werden, ob es sich um ein *normales* Injektionsverhalten handelt. Dabei wird besonders darauf geachtet, ob Widersprüche zwischen beobachtetem und prognostiziertem Verlauf vorhanden sind. Als Indikator wird in der RTGC-Methode die Dimensionalität verwendet, mit der ein widersprüchliches Verhalten festgestellt werden kann. [40]

- Ansteigende DIM-Werte Richtung 1,0 deuten an, dass der Durchfluss konstant ist. Ein stationärer Zustand ist somit vorherrschend und die Injektion hat eine freie Oberfläche erreicht (es handelt sich um einen Austritt).
- Ansteigende DIM-Werte weit über 1,0 sind klare Indikatoren, dass ein Aufreißen der Klüfte aufgetreten ist. Dies ist außerdem in einem Ansteigen der Durchflussrate sichtbar.
- Abfallende DIM-Werte Richtung 0,0 sind klare Indikatoren, dass die Kluft, die mit dem Bohrloch verbunden ist, dicht ist.

Die in Abbildung 8.11 dargestellten DIM-Werte für die Injektionsaufzeichnungen der Passe (mit Daten aus [23]) zeigen kein ungewöhnliches Verhalten. Die Dimensionalität bewegt sich hauptsächlich im Bereich von 0,3 bis 0,5. Somit kann die Injektion bis zum Erreichen des Zielwerts fortgesetzt werden.

8.2.5 Auswertung der größten Kluftöffnungsweite

Für die genaue Bestimmung der Reichweite in der größten Kluft muss die größte Kluftöffnungsweite aus den Injektionsaufzeichnungen ermittelt werden. Die Berechnung dafür ist in zwei Schritte geteilt. Zuerst muss die Funktion der Kluftöffnung ($(\sum b^3$ bzw. $(\sum w \cdot b^2)$) mit den Formeln 8.32 und 8.34 bestimmt werden. Danach kann unter der Annahme einer statistischen Verteilung der Kluftöffnungsweiten mit den Formeln 8.33 und 8.35 die maximale Öffnungsweite der Kluft bestimmt werden. [40]

Für 1D-Durchfluss:

$$\sum w \cdot b_g^2 = \frac{V_{tot}}{I_d \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0}\right)} \quad (8.32)$$

$$b_{g,max} = k \cdot \sqrt{\sum b_g^2} \quad (8.33)$$

Für 2D-Durchfluss:

$$\sum b_g^3 = \frac{V_{tot}}{\pi \cdot I_d^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0}\right)^2} \quad (8.34)$$

$$b_{g,max} = k \cdot \sqrt[3]{\sum b_g^3} \quad (8.35)$$

k	Parameter für die statistische Verteilung der Kluftöffnungsweiten [–]
$\sum w \cdot b_g^2$	Funktion der Kluftöffnung für 1D-Durchfluss [mm^3]
$\sum b_g^3$	Funktion der Kluftöffnung für 2D-Durchfluss [mm^3]
w	Kluftweite bei 1D-Durchfluss [m]
b_g	Kluftöffnungsweite [mm]
$b_{g,max}$	Maximale Kluftöffnungsweite [mm]

Die statistische Verteilung der Kluftöffnungsweiten kann als zufällig verteilt angenommen werden. Wenn nur eine Kluft mit dem Bohrloch kreuzt, so ist $k = 1$. Der wahrscheinlichste Wert der größten Kluftöffnungsweite ist in der Größenordnung von $k = 0,8$. Trägt man die Funktionen der Kluftöffnungsweiten für verschiedene Werte des injizierten Volumens oder Zeitdauer auf, kann die beste Schätzung mithilfe von Regressionsanalysen berechnet werden. Für einen 1D-Durchfluss muss die durchschnittliche Kluftweite w abgeschätzt werden. In Voruntersuchungen kann sie mit 5 bis 10 m abgeschätzt werden. In den meisten Fällen beginnt eine Injektion mit einem 2D-Durchfluss und geht dann in einen 1D-Durchfluss über. Das heißt, in den ersten Minuten der Injektion kann die injizierte Öffnung am besten abgeschätzt werden. Die Öffnungsweite der größten Kluft kann basierend auf den Injektionsaufzeichnungen der Passe (mit Daten aus [23]) folgendermaßen abgeschätzt werden: [40]

$$b_{g,max} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{250mm^3}{5m \cdot 10^3}} = 0,18 \text{ mm}$$

8.2.6 Abschätzung der Reichweite in der kleinsten und größten Kluft

Basierend auf der Abschätzung der Dimensionalität und der größten Kluftöffnungsweite kann die Reichweite jeweils für die kleinste Kluft und die größte Kluft berechnet werden. Abbildung 8.12 zeigt die korrigierte Reichweite in der größten Kluft.

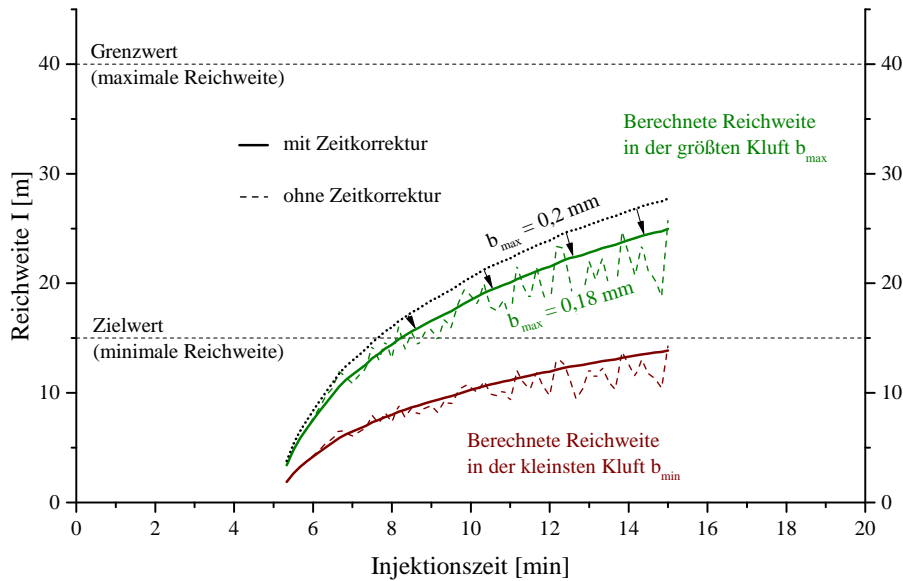


Abbildung 8.12: Reichweite mit Anpassung der größten Kluftöffnungsweite, mit Daten aus [23]

Da der Zielwert (minimale Reichweite) in der kleinsten Kluft noch nicht erreicht ist, muss die Injektion noch fortgeführt werden. Dabei kann wieder berechnet werden, wie lange die Injektion notwendig ist, um die Reichweite zu erreichen. Abbildung 8.13 zeigt das korrigierte prognostizierte Injektionsziel.

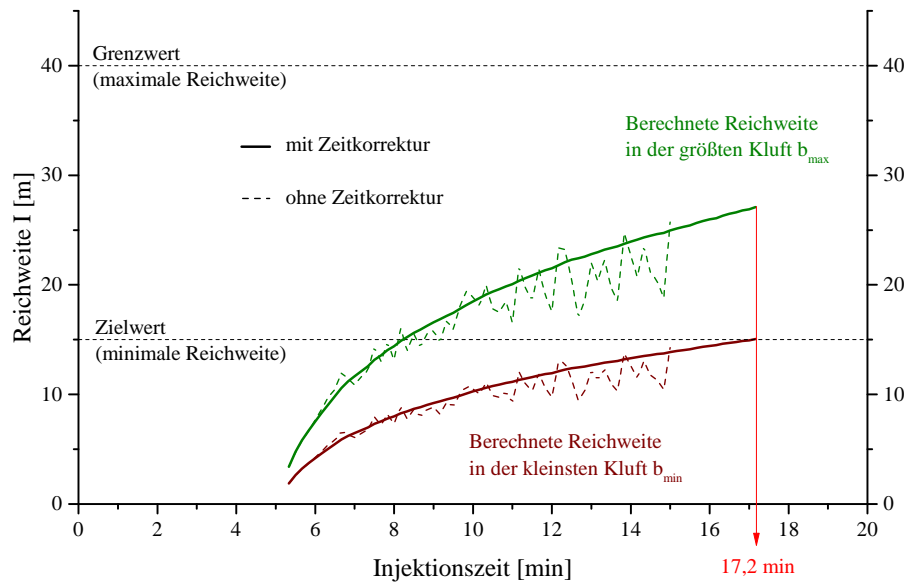


Abbildung 8.13: Prognose der Reichweite mit Anpassung der größten Kluftöffnung, mit Daten aus [23]

Nach einer Injektionszeit von 17,2 min wäre demnach das Injektionsziel erreicht. Zusätzlich zu diesem Abbruchkriterium gelten natürlich noch andere Abbruchkriterien wie Austritte an freien Oberflächen, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher. Kommt es zu Austritten an freien Oberflächen oder in andere Bohrlöcher, die visuell oder durch die diskutierten Indikatoren (Dimensionalität) festgestellt werden, muss die Injektion auf jeden Fall abgebrochen werden. [40, 22]

8.3 Vor- und Nachteile

Die RTGC-Methode ist die erste Methode, die auf einem analytischen Ansatz zur Definition des Abbruchkriteriums basiert. Anhand der Grundgleichungen aus der Theorie der *Bingham'schen Flüssigkeiten* wurden analytische Lösungen ermittelt, um aus der Durchflussrate und dem Injektionsdruck eine rechnerische Reichweite der Injektion in Abhängigkeit der Zeit ermitteln zu können. Die RTGC-Methode ist die einzige Methode, in der der effektive Injektionsdruck (Injektionsdruck abzüglich hydrostatischer Druck) explizit in die Berechnung der Reichweite eingeht. Ausschließlich dieser Druck ist für die richtige Ermittlung einer Reichweite zulässig, denn eine Suspension kann nur in ein Kluftsystem eindringen, wenn der Injektionsdruck größer als der hydrostatische Druck ist. Zusätzlich gehen in die RTGC-Methode die zeitabhängigen Suspensionseigenschaften ein. Bei einer längeren Injektionsdauer kann die zeitabhängige Veränderung der Viskosität und der Fließgrenze einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Reichweite haben. Dies wird bei dieser Methode berücksichtigt.

Die Injektion wird bei der RTGC-Methode druckgesteuert ausgeführt. Das heißt, dass während der gesamten Injektion der Injektionsdruck aufrecht erhalten werden muss. Bei großen Klüften wäre für die Aufrechterhaltung des Drucks eine sehr hohe Durchflussrate notwendig, die durch die Kapazität der Injektionspumpe und der Mischanlage beschränkt ist. Der gewünschte Injektionsdruck kann in vielen Fällen gar nicht aufgebaut werden,

vor allem in inhomogenem Festgestein mit großen Hohlräumen.

Im analytischen Ansatz nach der Theorie der *Bingham'schen Flüssigkeiten* wird eine konstante Kluftöffnungsweite angenommen. Dabei wird zwischen der geometrischen und der hydraulischen Kluftöffnungsweite nicht unterschieden. Auch elastische Kluftaufweitungen in Folge von hohen Injektionsdrücken werden gänzlich ignoriert. Auf Basis der Öffnungsweite der kleinsten und größten Kluft werden allerdings die Reichweite der Injektion berechnet und die Abbruchkriterien definiert. Schon eine kleine rechnerische Veränderung in der Kluftöffnungsweite wirkt sich erheblich auf die Reichweite aus. Somit ist die Entscheidung für den Abbruch der Injektion abhängig vom verwendeten rechnerischen Wert der Kluftöffnungsweiten. Damit stellt sich die Frage, welche Öffnungsweite der Klüfte verwendet werden soll. Die geometrischen Kluftöffnungsweiten lassen sich aus den geologischen Erkundungen nur sehr schwierig bis gar nicht ermitteln. Außerdem hat in der Natur eine Kluft niemals eine konstante Kluftöffnungsweite und vor allem der Durchfluss einer Flüssigkeit ist definiert durch die hydraulische Kluftöffnungsweite.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Methode werden somit nur auf einfache Kluftsysteme reduziert. Ein Beispiel dafür wäre homogenes Festgestein mit klar definierten Klüften. Für kompliziertere Kluftsysteme bzw. stark inhomogene Verhältnisse müsste die RTGC-Methode weiterentwickelt werden. Grundsätzlich ist diese Methode die jüngste aller Methoden, was bedeutet, dass hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeiten noch sehr großes Potenzial in der Methode steckt, denn der theoretische analytische Ansatz ist klar nachvollziehbar und einwandfrei. In der Praxis wurde diese Methode außerhalb von Schweden bis dato noch nicht durchgeführt. Entsprechende unabhängige Erfahrungen aus Injektionsprojekten sind daher noch nicht vorhanden.

Eine der Basis-Ideen der Methode war, die Injektion einer Pässe nur so lange durchzuführen, so lange sie wirtschaftlich ist. Aus den Ergebnissen der analytischen Lösungen konnte festgestellt werden, dass ab einer relativen Reichweite von 40% die Injektionszeit überproportional ansteigt und die Injektion unwirtschaftlich wird. Die Methode eignet sich somit sehr gut, um notwendige Injektionszeiten abzuschätzen oder eine Injektion zu optimieren. Mit den einfachen analytischen Lösungen können bereits mit einfachen Hilfsmitteln (Taschenrechner oder Microsoft Excel) die Reichweiten und die notwendigen Injektionszeiten abgeschätzt werden. Dadurch kann ein optimaler Bohrlochrastrer ohne eine aufwändige Simulation geplant werden.

Die Theorie der RTGC-Methode basierte ursprünglich neben der Annahme der konstanten Kluftöffnungsweiten auch auf einem konstanten Injektionsdruck und konstanten Suspensionseigenschaften. Durch die Erweiterung der Theorie mit Zeitkorrekturen wurde auch eine Anwendung mit veränderlichem Injektionsdruck und veränderlichen Suspensionseigenschaften möglich. Diese Anwendung der Zeitkorrekturen ist jedoch mathematisch sehr komplex und auf den ersten Blick schwer verständlich.

Für die Ausführung der Methode sind außerdem sehr viele Eingangsparameter wie die Fließgrenze und die Viskosität der Suspension, die Öffnungsweiten der größten und kleinsten Kluft, der hydrostatische Druck oder das Bohrlochvolumen notwendig. Die Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität machen die Verwendung eines Viskosimeters auf der Baustelle notwendig. Die Öffnungsweiten der größten und kleinsten

Kluft müssen durch genaue geologische Erkundungen und statistischen Auswertungen von Kluftverteilungen ermittelt werden. Während der Injektion wird zwar anhand der Durchflussrate und des Injektionsdrucks auf die Öffnungsweite der größten Kluft zurückgerechnet, jedoch liegen auch in dieser Berechnung Unsicherheiten. Außerdem ist es unverständlich, dass die größte Kluftöffnungsweite aus den Injektionsaufzeichnungen berechnet wird und nicht die kleinste Kluftöffnungsweite. Die Injektion wird abgebrochen, sobald die Reichweite der Suspension in der kleinsten Kluft über einem bestimmten Zielwert liegt. Die Annahme der kleinsten Kluftöffnungsweite wird allerdings während der Injektion nicht mehr verifiziert.

8.4 Zusammenfassung

Voraussetzungen für die Ausführung der Methode

- Genaue geologische Erkundungen

Eingangsdaten in die Abbruchkriterien

- Durchflussrate [q]
- Injektionsdruck [bar]
- Fließgrenze der Suspension in Abhängigkeit der Zeit [Pa]
- Viskosität der Suspension in Abhängigkeit der Zeit [$Pa \cdot s$]
- Öffnungsweite der kleinsten Kluft [m]
- Öffnungsweite der größten Kluft [m]
- Hydrostatischer Druck [bar]
- Bohrlochvolumen [l]

Abbruchkriterien

- Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher [$-$]
- Ziel-Reichweite erreicht [m]
- Grenz-Reichweite erreicht [m]

8.4.1 Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe

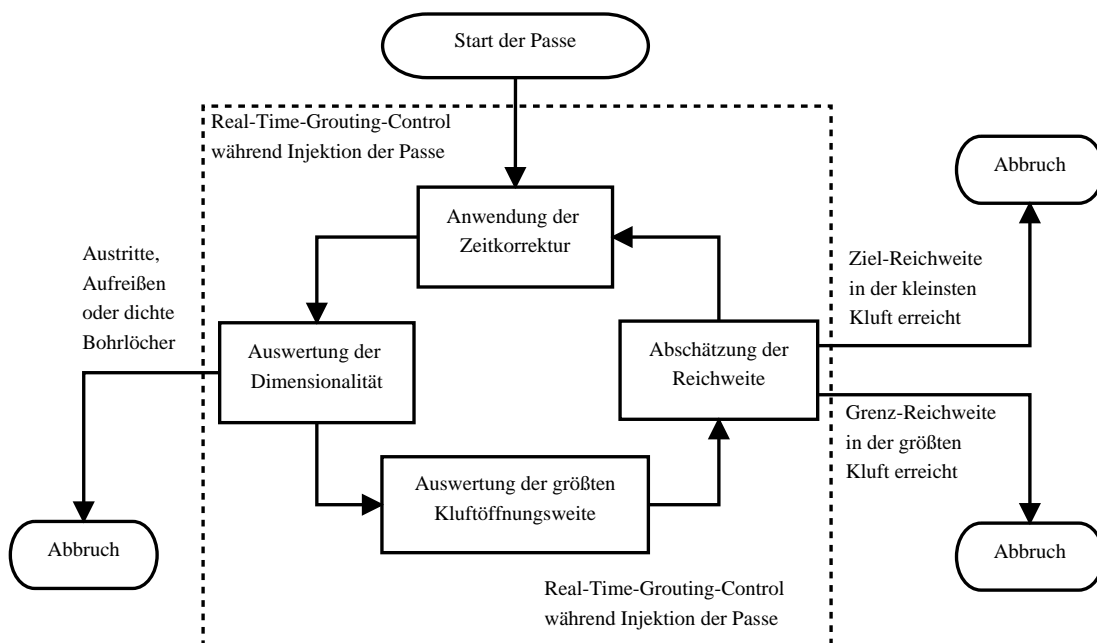


Abbildung 8.14: Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der RTGC-Methode

Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die gängigen Abbruchkriterien für Felsinjektionen detailliert beschrieben und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Jede dieser Methoden wurde – basierend auf den theoretischen Hintergründen – aufgerollt und die Anwendung eines Praxisbeispiels erläutert. Zusätzlich wurde für jede Methode ein Ablaufdiagramm zur besseren Veranschaulichung erstellt. Nachfolgend werden die Voraussetzungen, Eingangsdaten und Abbruchkriterien der einzelnen Methoden miteinander verglichen und die Vor- und Nachteile beurteilt. Einleitend für diesen Vergleich sind in den folgenden Punkten alle Methoden kurz erklärt:

- Die *Apparent-Lugeon-Methode* wird vorwiegend in den USA verwendet. Die Injektion wird als eine Art kontinuierlicher Wasserabpressversuch gesehen, in dem aus den Injektionsverläufen scheinbare Lugeon-Werte berechnet werden. Mit diesen wird bewertet, wie viele Klüfte mit der jeweiligen Suspension erreicht werden – gegebenenfalls wird die Suspensionsmischung adaptiert. Die Injektion wird abgebrochen, sobald der scheinbare Lugeon-Wert einen Zielwert erreicht.
- Die *GIN-Methode* wird vorwiegend in Europa verwendet. Die Injektion wird direkt gesteuert durch Erkenntnisse aus bereits injizierten Passen. Primäre Injektionsbohrungen werden in weitem Raster hergestellt – bei großen Injektionsvolumen wird der Raster verdichtet. Für die Ausführung wird nur eine einzige Suspensionsmischung verwendet. Die Injektion wird entweder nach Erreichen des maximalen Injektionsvolumens pro Bohrlochmeter, eines maximalen Injektionsdrucks oder einer definierten Injektionsintensität abgebrochen.
- Die *ACG-Methode* wird vorwiegend in den USA und in Kanada verwendet und ist die Weiterentwicklung der *Apparent-Lugeon-* und *GIN-Methode*. Anhand von numerischen Modellen des Untergrunds wird die Injektion im Detail geplant. Angetroffenen Durchlässigkeiten in den Passen (ausgedrückt durch Lugeon-Werte) werden notwendige Injektionsvolumen und Suspensionsmischungen zugeordnet. Die Injektion wird entweder nach Erreichen eines Ziel-[q/p]-Werts oder nach Erreichen des maximalen Injektionsvolumens abgebrochen.
- Die *TPA-Methode* kommt aus den Erdölwissenschaften und wird vorwiegend in Europa verwendet. Die Injektion wird in regelmäßigen Intervallen unterbrochen.

Nach dem Pumpenstopp wird der Druckabfall über die Zeit aufgezeichnet und interpretiert. Anhand einer Analyse und der rein visuellen Betrachtung der Druckabfallkurven kann zwischen Kluftfüllen und Kluftaufweiten unterschieden werden und auf vorherrschende Kluftgeometrien geschlossen werden. Die Injektion wird abgebrochen, sobald ein Ruhedruck aufgebaut wird und dieser einen vorgegebenen Wert erreicht.

- Die *PSG-Methode* ist die Weiterentwicklung der *TPA-Methode*. Die Injektion wird ebenfalls in regelmäßigen Intervallen unterbrochen und die Druckabfallkurven betrachtet. Für die Beurteilung dienen die Druckabfallgeschwindigkeit und der Ruhedruck sowie die Änderungen des Ruhedrucks und der Druckabfallgeschwindigkeit im Vergleich zum letzten Druckabfall. Mithilfe von *Wenn-Dann-Regeln* in einer Regelbasis werden Entscheidungen wie *Injektionsdruck erhöhen*, *Injektionsdruck verringern* oder *Abbruch der Injektion* getroffen.
- Die *RTGC-Methode* wird vorwiegend in Schweden verwendet. Bei dieser Methode wird in Echtzeit die rechnerische Reichweite der Suspension in der kleinsten und größten Kluft ermittelt. Aus den Injektionsverläufen wird dabei die Art der Ausbreitung (1D oder 2D) ermittelt und die aktuelle Kluftöffnungsweite berechnet. Bei Erreichen der Ziel-Reichweite in der kleinsten Kluft oder Erreichen der Grenz-Reichweite in der größten Kluft wird die Injektion abgebrochen.

Bei der Analyse der Abbruchkriterien hat sich gezeigt, dass alle Methoden auf dem gleichen Prinzip basieren. Eine Injektion kann entweder mit konstanter Durchflussrate bis zum Anstieg des Injektionsdrucks beim Beenden der Passe oder mit konstantem Injektionsdruck bis zum Abfall der Durchflussrate beim Beenden der Passe ausgeführt werden. Beide Herangehensweisen führen dazu, dass sich während der Injektion im Kluftsystem ein Ruhedruck aufbaut. Sobald sich ein Ruhedruck aufbaut, heißt das, dass alle Klüfte, deren Ansprechdruck kleiner oder gleich dem Druck im Kluftsystem ist, verfüllt sind. Bei der *Apparent-Lugeon-Methode* und der *ACG-Methode* ist dieses Prinzip im scheinbaren Lugeon-Wert oder dem $[q/p]$ -Wert selbst erkennbar, der während der Injektion absinkt. Bei der *GIN-Methode* steigt der Injektionsdruck bei einer konstanten Durchflussrate durch eine Anwendung der *Split-Spacing-Methode* schrittweise bis zum maximalen Injektionsdruck an. Bei der *RTGC-Methode* wird unter einem konstanten Injektionsdruck injiziert, wobei die Durchflussrate bis zum Erreichen der Reichweite abnimmt. Bei der *TPA-Methode* und der *PSG-Methode* sieht man dieses Prinzip am deutlichsten. Bei einer Injektion mit konstanter Durchflussrate steigt bei aufeinanderfolgenden Druckabfallkurven der Ruhedruck langsam an und die Druckabfallgeschwindigkeit sinkt. Alle beschriebenen Methoden beinhalten somit grundsätzlich die gleichen Abbruchkriterien, welche jedoch unterschiedlich zum Vorschein kommen.

Jede der beschriebenen Methoden funktioniert gut bei simplen Kluftsystemen in homogenem Festgestein. Bei Diskontinuitäten und Inhomogenitäten jedoch zeigen sich bei jeder Methode die gleichen Probleme und es steigen die Unsicherheiten. Als einzige Methode, die auch bei Inhomogenitäten und Diskontinuitäten akzeptable Ergebnisse liefert, hat sich in der Praxis die *GIN-Methode* bewiesen. Durch die Anwendung der *Split-Spacing-Methode* kann gut auf diese Inhomogenitäten und Diskontinuitäten reagiert werden.

9.2 Vergleich der unterschiedlichen Methoden

In den Tabellen 9.1, 9.2, 9.3 und 9.4 findet ein Vergleich der Methoden hinsichtlich Voraussetzungen, Eingangsdaten, Abbruchkriterien sowie den Vor- und Nachteilen statt. Die einzelnen Methoden wurden für die Darstellung folgendermaßen abgekürzt:

- Amenability Theory (Apparent-Lugeon-Methode): **LUAPP**
- Grouting Intensity Number (GIN-Methode): **GIN**
- Aperture Controlled Grouting (ACG-Methode): **ACG**
- Transient Pressure Analysis (TPA-Methode): **TPA**
- Pressure Sensitive Grouting (PSG-Methode): **PSG**
- Real Time Grouting Control (RTGC-Methode): **RTGC**

9.2.1 Voraussetzungen für die Ausführung der Methoden

In Tabelle 9.1 sind die Voraussetzungen für die Ausführung der Methoden gegenübergestellt. Unter Voraussetzungen versteht man alle notwendigen Grundlagen zum Ausführen der jeweiligen Methode, seien es Wasserabpressversuche, sehr genaue geologische Erkundungen, Simulationen oder zyklische Pumpenstopps während der Injektion. Die in der Tabelle 9.1 verwendeten Symbole bedeuten dabei:

- Voraussetzung ist zwingend erforderlich
- ☒ Voraussetzung ist nur unter speziellen Umständen erforderlich

Tabelle 9.1: Vergleich der Voraussetzungen für die Anwendung der Methoden

	LUAPP	GIN	ACG	TPA	PSG	RTGC
Durchführung von Wasserabpressversuchen	■		■			☒ ¹
Testinjektionen		☒ ²				
Genaue geologische Erkundungen			■	☒ ³		■
Simulation der Injektion mit DFN-Modellen			■			
Zyklischer Pumpenstopp mit Ruhedruckermittlung		☒ ⁴		■	■	

¹Wasserabpressversuche werden bei der RTGC-Methode nur durchgeführt, um daraus auf die Öffnungsweiten der größten und kleinsten Kluft zu schließen. Dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich – wenn, dann nur in Kombination mit anderen geologischen Erkundungen.

²Testinjektionen werden bei der GIN-Methode nur durchgeführt, wenn der GIN-Wert nicht nach der mathematischen Methode oder der Beobachtungsmethode ermittelt wird.

³Genaue geologische Erkundungen zur Ermittlung der hydraulischen Kluftöffnungsweite und der Kluft-Kompressibilität sind bei der TPA-Methode nur notwendig, wenn der Skin-Faktor ausgewertet wird.

⁴Ein Pumpenstopp muss für die genaue Ermittlung des GIN-Werts zwar durchgeführt werden, da für die Berechnung der Injektionsdruck am Anfang der Kluft verwendet wird, jedoch muss die Pumpe nicht so lange gestoppt werden, dass sich ein Ruhedruck einstellt. Außerdem muss der Pumpenstopp nicht unbedingt zyklisch erfolgen.

9.2.2 Eingangsdaten in die Abbruchkriterien der Methoden

In Tabelle 9.2 sind die Eingangsdaten in die Abbruchkriterien der Methoden gegenübergestellt. Unter Eingangsdaten in die Abbruchkriterien versteht man die notwendigen Messgrößen aus den Injektionsaufzeichnungen, die in die Abbruchkriterien eingehen. Die verwendeten Symbole in Tabelle 9.2 bedeuten dabei:

- Eingangsdaten sind zwingend erforderlich
- ☒ Eingangsdaten sind nur unter speziellen Umständen erforderlich

Tabelle 9.2: Vergleich der Eingangsdaten in die Abbruchkriterien der Methoden

	LUAPP	GIN	ACG	TPA	PSG	RTGC
Durchflussrate	■	■	■	☒ ¹		■
Injektionsdruck	■	■	■	■		■
Ruhedruck				■	■	
Änderung des Ruhedrucks					■	
Druckabfallgeschwindigkeit					■	
Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit					■	
Fließgrenze der Suspension						■
Viskosität der Suspension				☒ ¹		■
Marsh-Zeit der Suspension	■		☒ ²			
Öffnungsweite der Kluft				☒ ¹		■
Hydrostatischer Druck der Formation						■
Bohrlochvolumen				☒ ¹		■

¹Nur für die Auswertung des Skin-Faktors benötigt.

²Die Marsh-Zeit wird nur benötigt, wenn keine Wasserabpressversuche durchgeführt werden und die scheinbaren Lugeon-Werte aus der Injektion berechnet werden müssen.

9.2.3 Abbruchkriterien der Methoden

In Tabelle 9.3 sind die Abbruchkriterien der einzelnen Methoden selbst gegenübergestellt. Die verwendeten Symbole in Tabelle 9.3 bedeuten dabei:

- Abbruchkriterium wird zwingend verwendet
- ☒ Abbruchkriterium wird nur unter speziellen Umständen verwendet

Tabelle 9.3: Vergleich der Abbruchkriterien der Methoden

	LUAPP	GIN	ACG	TPA	PSG	RTGC
Austritte, Aufreißen oder dichte Bohrlöcher	■	■	■	■	■	■
Maximaler Injektionsdruck erreicht	■	■	■	■	☒ ¹	
Maximales Injektionsvolumen erreicht		■	■			
Ziel-Lugeon-Wert erreicht	■					
GIN-Wert erreicht		■			☒ ²	
Ziel-[q/p]-Wert erreicht			■			
Ziel-Ruhedruck oder Ziel-Verhältnis zwischen Ruhedruck und Injektionsdruck erreicht				■		
Ziel-Skin-Faktor erreicht				☒ ³		
Abbruch durch Anwendung von definierten <i>Wenn-Dann-Regeln</i> in der Regelbasis					■	
Ziel-Reichweite erreicht						■
Grenz-Reichweite erreicht						■

¹Die Injektion wird in der Regel druckgesteuert ausgeführt, somit kann der maximale Injektionsdruck nicht erreicht werden. Sollte die Injektion jedoch durchflussgesteuert ausgeführt werden, gilt das Abbruchkriterium des maximalen Injektionsdrucks.

²Als zusätzliches Abbruchkriterium kann das GIN-Kriterium verwendet werden.

³Die Verwendung des Skin-Faktors als Abbruchkriterium ist in der Praxis bis dato noch nicht erprobt.

9.2.4 Vor- und Nachteile der Methoden

In Tabelle 9.4 sind die einzelnen Methoden hinsichtlich Einfachheit der Methode, Praxistauglichkeit, Theorie hinter der Methode, Effizienz, Verhalten bei Inhomogenitäten und Diskontinuitäten und der Möglichkeiten der Weiterentwicklung gegenübergestellt und bilden somit die in den einzelnen Kapiteln erläuterten Vor- und Nachteile der Methoden ab. Die verwendeten Symbole in Tabelle 9.4 bedeuten dabei:

- gut
- ☒ mittel
- schlecht

Tabelle 9.4: Vergleich einiger Vor- und Nachteile der Methoden

	LUAPP	GIN	ACG	TPA	PSG	RTGC
Einfachheit der Methode (Praxistauglichkeit)	■ ¹	■ ¹	□ ¹	■ ¹	☒ ¹	□ ¹
Theorie hinter der Methode (Begrenzung des Risikos von Aufreißen)	□ ²	■ ²	☒ ²	☒ ²	☒ ²	☒ ²
Effizienz	■ ³	■ ³	■ ³	□ ³	☒ ³	■ ³
Verhalten bei Inhomogenitäten und Diskontinuitäten	☒ ⁴	■ ⁴	□ ⁴	☒ ⁴	☒ ⁴	□ ⁴
Möglichkeiten der Weiterentwicklung	☒ ⁵	☒ ⁵	☒ ⁵	■ ⁵	☒ ⁵	■ ⁵

¹Die Einfachheit der Methode und die Praxistauglichkeit wurden unter den Gesichtspunkten bewertet, wie einfach die jeweilige Theorie hinter der Methode zu verstehen ist, wie gut das Personal für den Einsatz der Methode ausgebildet sein muss und wie ausführlich die Planung für die Ausführung ist. Die einfachsten Methoden für die Ausführung sind zweifelsfrei die Apparent-Lugeon-Methode, die GIN-Methode und die TPA-Methode. Bei der PSG-Methode muss die Fuzzy-Steuerung implementiert werden und bedarf einer Planung durch gut ausgebildetes Personal. Die ACG-Methode und die RTGC-Methode sind hinsichtlich der zugrunde liegenden Theorie und der Planung sehr komplex und bedürfen einer sehr guten Ausbildung des Personals.

²Die Theorie hinter der Methode wurde unter den Gesichtspunkten bewertet, wie jeweils das Risiko von Aufreißen auf ein verträgliches Maß begrenzt wird und wie exakt die zugrunde liegende Theorie ist. Bei der GIN-Methode wird die Intensität der Injektion begrenzt. Bei einer korrekten Auswahl des GIN-Werts kann ein Aufreißen verhindert werden. Die ACG-Methode, TPA-Methode, PSG-Methode und RTGC-Methode begrenzen das Risiko von Aufreißen nicht direkt, es wird aber durch die richtige Wahl des Injektionsdrucks und der Durchflussrate auf ein verträgliches Maß begrenzt. Die

Apparent-Lugeon-Methode begrenzt das Risiko von Aufreißen ebenfalls nicht direkt und weist zudem Ungenauigkeiten in der Theorie.

³Die Effizienz wurde in Bezug auf die Ausführung bewertet. Lange Unterbrechungen der Injektion wirken sich negativ auf die Bewertung aus. Die Apparent-Lugeon-Methode, die GIN-Methode, die ACG-Methode und die RTGC-Methode sehen keine längeren Pumpenstopps vor. Die PSG-Methode sieht kurze zyklische Pumpenstopps vor, die TPA-Methode lange zyklische Pumpenstopps in der Größenordnung von 6 bis 20 Minuten.

⁴Das Verhalten bei Inhomogenitäten und Diskontinuitäten wurde unter den Gesichtspunkten bewertet, wie die einzelnen Methoden darauf reagieren. Die GIN-Methode reagiert mit der Split-Spacing-Methode sehr gut auf Inhomogenitäten und Diskontinuitäten. Durch Beobachtung wird auf die abweichenden geologischen Verhältnisse immer adäquat reagiert. Die Apparent-Lugeon-Methode, die TPA-Methode und die PSG-Methode empfehlen zwar keine Verhaltensweisen, jedoch kann auf Inhomogenitäten und Diskontinuitäten wenn nötig reagiert werden. Die ACG-Methode und die RTGC-Methode können aufgrund der vielen Eingangsparameter und der ausführlichen Planung nicht kurzerhand auf abweichende geologische Verhältnisse reagieren.

⁵Die Möglichkeiten der Weiterentwicklung wurde unter den Gesichtspunkten bewertet, welche Methoden noch großes Potenzial in der Weiterentwicklung haben. Bei der TPA-Methode könnte durch eine Anwendung zusätzlicher Analyseverfahren aus den Erdölwissenschaften die Theorie entsprechend erweitert werden. Ein Einsatz des Skin-Faktors als Abbruchkriterium wäre dabei möglich. Die RTGC-Methode basiert auf einem guten Modell für einfache Kluftsysteme und könnte für komplexere Kluftsysteme weiterentwickelt werden.

9.3 Ausblick

Die fortschreitende Urbanisierung und die damit einhergehende Verringerung der Verfügbarkeit von freien Bauplätzen verlangt, dass in Zukunft vermehrt Spezialtiefbaumaßnahmen zur Verbesserung von nicht geeigneten Untergründen ausgeführt werden. Generell kann davon ausgegangen werden, dass Injektionen in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle spielen.

Bis dato hat sich in Europa bei der Ausführung von Felsinjektionen vor allem die Anwendung der GIN-Methode durchgesetzt. Mit dieser konnten international sehr gute Ergebnisse – unter sehr geringem Planungsaufwand – erzielt werden. In jüngerer Vergangenheit hat sich die Anwendung einer Kombination aus der TPA- und der GIN-Methode entwickelt. Eine Kombination mehrerer Methoden sollte auch in Zukunft angestrebt werden. Nur durch eine sinnvolle Anwendung mehrerer Methoden können die in der Arbeit beschriebenen Probleme jeder einzelnen Methode behoben werden. Eine Darstellung der Auswertungen der unterschiedlichen Methoden, die auf einen Blick sichtbar sind, können Sicherheit und Redundanz durch verschiedene Betrachtungsweisen geben. Das Erreichen des Injektionsziels könnte somit durch mehrere Methoden bestätigt werden. Im Speziellen wird eine gleichzeitige Darstellung des Injektionsdruck-Zeit-Verlaufs, Durchflussrate-Zeit-Verlaufs, Injektionsdruck-Injektionsmengen-Verlaufs und des $[q/p]$ -Verhältnis-Zeit-Verlaufs empfohlen. Ebenso würde sich zusätzlich eine Darstellung der Reichweite und der Dimensionalität nach der RTGC-Methode oder eine Typenkurvenauswertung nach der TPA-Methode anbieten.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass im Bereich der Abbruchkriterien noch viel Potenzial für Weiterentwicklungen besteht. Bei der TPA-Methode bieten sich weitere Analyseverfahren aus den Erdölwissenschaften zur Anwendung in der Injektionstechnologie an, um dieses Verfahren zu erweitern. Mit diesen Analyseverfahren könnte analytisch der Skin-Faktor ermittelt werden, der ein Unterscheiden zwischen Kluftfüllen und Kluftaufweiten ermöglicht. Auf Basis des Skin-Faktors könnten in Zukunft Abbruchkriterien definiert werden. Gelingt es, den in den Erdölwissenschaften verwendeten *Drawdown Test* an die Injektionstechnologie zu adaptieren, so könnte man ohne zyklische Pumpenstopps den Skin-Faktor schon während der Injektion ermitteln, ohne diese unterbrechen zu müssen. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten würden sich auch bei der RTGC-Methode anbieten. Bis dato funktioniert die Methode nur bei simplen Kluftsystemen in homogenem Festgestein. Aufbauend auf die Theorie der *Bingham'schen Flüssigkeiten* könnte diese Methode in Zukunft auch auf komplexere Kluftsysteme erweitert werden.

Mit zunehmenden Anforderungen an die Injektionstechnik steigen auch die Anforderungen an die dahinterstehenden Kriterien und Methoden. Die Auswahl der Methode selbst ist immer abhängig von der Größe und der Komplexität der Injektionsmaßnahme sowie von den Anforderungen an das Injektionsziel. Allerdings kann selbst die beste Methode eine iterative Anpassung an die Verhältnisse vor Ort nicht ersetzen. Eine kritische ingenieurmäßige Beurteilung der Injektionsdaten und die Zusammenarbeit aller Beteiligten ist auf jeden Fall immer erforderlich.

Exkurs: Abbruchkriterien im Lockergestein

Im Lockergestein ist das Ausbreitverhalten der Suspension generell leichter zu beschreiben als in Klüften, da man es nicht mit zufällig verteilten Kluftscharen und Kluftöffnungsweiten zu tun hat, sondern Lockergestein vergleichsweise homogen ist. Sogar in Wechsellagerungen bestehen einzelne Schichten aus relativ einheitlichen Korngemischen. Bei der Injektion von Lockergestein von einem Punkt aus (z.B. einer Manschette) breitet sich die Suspension radial in alle Richtungen gleichmäßig in Form einer Kugel mit dem Radius R aus. Wächst dieser Radius über den Rand einer Schichtgrenze hinweg, die weniger durchlässig als die injizierte Schicht oder gar undurchlässig ist, so breitet sich die Suspension zylinderförmig in der durchlässigen Schicht weiter aus. [9]

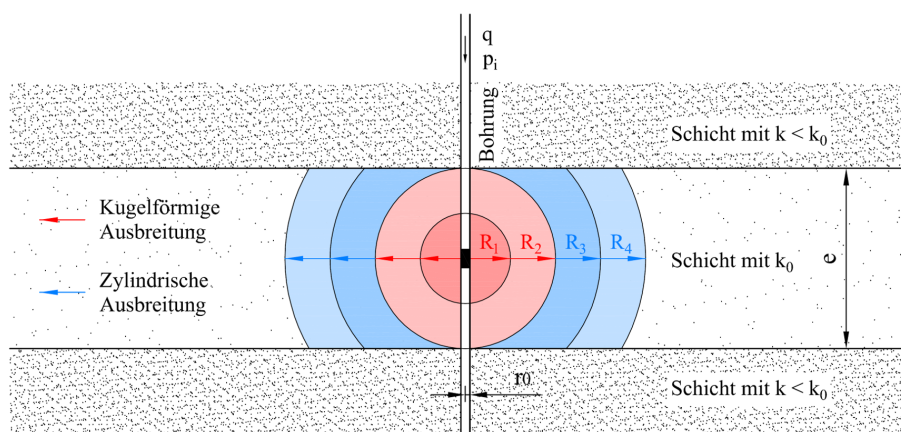


Abbildung 10.1: Kugelförmige und zylindrische Ausbreitung, adaptiert aus [9]

10.1 Kugelförmige Ausbreitung

Eine kugelförmige Ausbreitung entsteht bei einer Injektion von homogenem und isotropem Material mit der Durchlässigkeit k_0 . [9]

Injektionsdruck

Mit folgender Formel kann der notwendige Injektionsdruck zur Injektion eines Materials mit der Durchlässigkeit k_0 abgeschätzt werden. Der Injektionsdruck ist direkt proportional zur Durchflussrate q , der Wichte der Suspension γ sowie der Viskosität η und indirekt proportional zur Durchlässigkeit k_0 . [9]

$$p_i - p_0 = \frac{q \cdot \gamma \cdot \eta_i}{4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot k_0 \cdot \eta_0} \quad \text{für } R \leq e \quad (10.1)$$

p_i	Injektionsdruck [bar]
p_0	Hydrostatischer Gegendruck [bar]
q	Durchflussrate [l/min]
γ	Wichte der Suspension [kN/m ³]
k_0	k-Wert für Wasser [m/s]
r_0	Bohrlochradius [m]
η_i	Viskosität der Suspension [Pa · s]
η_0	Viskosität von Wasser [Pa · s]
e	Mächtigkeit der durchlässigeren Schicht [m]

Injektionszeit

Aus dem Volumen einer Kugel und dem Porenanteil n erhält man folgende Abschätzung der Injektionszeit: [9]

$$t = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot (R^3 - r_0^3)}{3 \cdot q} \quad \text{für } R \leq e \quad (10.2)$$

n	Porenanteil [-]
R	Radius der kugelförmigen Injektion (Reichweite) [m]

Aus der Formel ist zu erkennen, dass die notwendigen Injektionszeiten mit zunehmender Reichweite stark ansteigen.

10.2 Zylindrische Ausbreitung

Homogene und isotrope Böden bilden in der Natur eher eine Ausnahme. Tatsächlich stößt man auf Wechsellagerungen mit verschiedenen Durchlässigkeiten. Innerhalb der durchlässigeren Schichten breitet sich die Suspension radial in alle Richtungen gleichmäßig in Form einer Kugel aus. Wächst jedoch der Radius der Kugel über den Rand der Schichtgrenze hinweg und bilden die anliegenden Schichten eine dichte Grenze, so breitet sich die Suspension zylindrisch weiter aus. [9]

Injektionsdruck

Mit der Formel nach Dupuit kann der notwendige Injektionsdruck für die zylindrische Ausbreitung abgeschätzt werden: [9]

$$p_i - p_0 = \frac{q \cdot \gamma \cdot \eta_i}{2 \cdot \pi \cdot k_0 \cdot \eta_0 \cdot e} \cdot \ln \left(\frac{R}{r_0} \right) \quad \text{für } R > e \quad (10.3)$$

R Radius der zylinderförmigen Injektion (Reichweite) [m]

Injektionszeit

Aus dem Volumen des Zylinders und dem Porenanteil n erhält man folgende Abschätzung der Injektionszeit: [9]

$$t = \frac{\pi \cdot n \cdot e \cdot (R^2 - r_0^2)}{q} \text{ für } R > e \quad (10.4)$$

10.3 Abbruchkriterien

Die notwendige Reichweite ist direkt abhängig vom Bohrlochraster. In der Regel kann als Injektionsziel das Erreichen von mindestens dem halben Achsabstand gesehen werden. In der Praxis haben sich für die Planung folgende Anhaltswerte etabliert:

Tabelle 10.1: Anhaltswerte für Reichweiten im Lockergestein, aus [9]

	Reichweite	Bohrloch- raster	Manschetten- abstand
Bodenverfestigung	0,3 – 0,6 m	0,6 – 1,2 m	0,33 m
Abdichtungsinjektion	0,4 – 0,9 m	0,8 – 1,8 m	0,33 – 0,50 m

In die Abschätzung der Injektionszeit (für das Erreichen einer vorgegebenen Reichweite) geht die Durchflussrate q ein. Eine Injektion, die nach dem Erreichen dieser Injektionszeit abgebrochen wird, ist in der Praxis nicht möglich, da die Durchflussrate Schwankungen ausgesetzt ist. Aus diesem Grund hat sich etabliert, eine Lockergesteinsinjektion entweder nach Erreichen des maximalen Injektionsdrucks oder nach dem Erreichen des notwendigen Injektionsvolumens zu beenden. Ein Injektionskörper kann umso einheitlicher hergestellt werden, je kleiner die Durchlässigkeitsunterschiede in den einzelnen Schichten sind. Praktisch werden die durchlässigen Schichten zuerst mit zäher Suspension injiziert, um die Unterschiede zu minimieren. [9]

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung der Komponenten einer Felsinjektion mit Einfachpacker	4
2.2	Fließverhalten von Suspensionen, adaptiert aus [20]	7
2.3	Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – in der Nähe der Bohrung, adaptiert aus [18]	8
2.4	Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – in größerem Abstand zur Injektionsbohrung, adaptiert aus [18]	9
2.5	Ausbreitung einer Suspension in einer Kluft – an der Injektionsfront, adaptiert aus [18]	9
2.6	Lineare, eindimensionale Ausbreitung in einem Fließkanal, adaptiert aus [40]	9
2.7	Ebene, zweidimensionale, radiale Ausbreitung in einer Kluft, adaptiert aus [40]	10
2.8	Doppelpacker in dreidimensionalem Kluftsystem, adaptiert aus [40]	11
2.9	Durchführung eines Wasserabpressversuchs, adaptiert aus [50]	12
2.10	Datenaufzeichnung eines Lugeon-Tests, adaptiert aus [50]	13
2.11	Ergebnis eines Lugeon-Tests bei laminarer Strömung	14
2.12	Links: spezifische Durchflussrate bei laminarer Strömung; rechts: p-q-Diagramm bei laminarer Strömung, adaptiert aus [50]	14
2.13	Ergebnis eines Lugeon-Tests bei turbulenter Strömung	15
2.14	Links: spezifische Durchflussrate bei turbulenter Strömung; rechts: p-q-Diagramm bei turbulenter Strömung, adaptiert aus [50]	15
2.15	Ergebnis eines Lugeon-Tests bei elastischer Dehnung	16
2.16	Links: spezifische Durchflussrate bei elastischer Dehnung; rechts: p-q-Diagramm bei elastischer Dehnung, adaptiert aus [50]	16
2.17	Ergebnis eines Lugeon-Tests bei Auswaschen der Klüfte	17
2.18	Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (unter laminarer Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (unter laminarer Strömung), adaptiert aus [50]	17
2.19	Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (unter turbulenter Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (unter turbulenter Strömung), adaptiert aus [50]	17
2.20	Links: spezifische Durchflussrate bei Auswaschen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung); rechts: p-q-Diagramm bei Auswaschen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung), adaptiert aus [50]	18
2.21	Ergebnis eines Lugeon-Tests bei Füllen der Klüfte	18
2.22	Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (unter laminarer Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (unter laminarer Strömung), adaptiert aus [50]	19
2.23	Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (unter turbulenter Strömung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (unter turbulenter Strömung), adaptiert aus [50]	19

2.24	Links: spezifische Durchflussrate bei Füllen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung); rechts: p-q-Diagramm bei Füllen der Klüfte (bei gleichzeitiger elastischer Dehnung), adaptiert aus [50]	19
2.25	Hydraulische Kluftöffnungsweite und geometrische Kluftöffnungsweite, aus [24]	20
2.26	Druck- und Volumenbegrenzung, adaptiert aus [27]	22
2.27	Verlauf des [q/p]-Verhältnisses, adaptiert aus [25, 37]	23
3.1	Mögliche Verläufe des scheinbaren Lugeon-Werts	28
3.2	Vergleich zwischen Marsh-Zeit und Viskosität, aus [19]	31
3.3	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der Apparent-Lugeon-Methode	33
4.1	Injektionsversuch, in dem ein Aufreißen hervorgerufen wurde, adaptiert aus [27]	36
4.2	Abbruchkriterien nach der GIN-Methode	37
4.3	Bestimmung des Injektionsdrucks für den GIN-Wert, adaptiert aus [29]	38
4.4	Empfohlene GIN-Werte, adaptiert aus [28]	40
4.5	[q/p]-Volumen-Diagramm und GIN-Kurve, adaptiert aus [28]	41
4.6	Primäre und sekundäre Injektionsbohrungen im Bohrlochraster	42
4.7	Tertiäre und quartäre Injektionsbohrungen im Bohrlochraster	42
4.8	Primäre, sekundäre, tertiäre und quartäre Injektionsbohrungen im Injektionsdruck-Injektionsvolumen-Diagramm, aus [28]	43
4.9	Mögliche Injektionspfade nach der GIN-Methode, adaptiert aus Datenaufzeichnungen einer Injektionsbaustelle	44
4.10	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der GIN-Methode	47
5.1	DFN-Modell, aus [7]	51
5.2	Simulation der Injektion im DFN-Modell, aus [7]	51
5.3	Zuordnung von notwendigen Injektionsvolumen zu Durchlässigkeiten in den Passen, adaptiert aus [4]	52
5.4	Zuordnung von Suspensionsmischungen zu Durchlässigkeiten in den Passen, adaptiert aus [4]	53
5.5	Mögliche Entscheidungskriterien, adaptiert aus [4]	56
5.6	Trendlinie aus Injektionsdruck und Durchflussrate, adaptiert aus [4]	57
5.7	[q/p]-Wert aufgetragen gegen die Injektionszeit, adaptiert aus [4]	58
5.8	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der ACG-Methode	60
6.1	Verlauf einer Injektion, adaptiert aus [37, 34]	62
6.2	Shut-In-Pressure und charakteristische Krümmungen der Druckabfallkurven, adaptiert aus [21]	64
6.3	Diagnosediagramm, adaptiert aus [34]	65
6.4	Skin-Effekt, adaptiert aus [41]	66
6.5	Typenkurven, adaptiert aus [5]	68
6.6	Druckdifferenz Δp im doppelt-logarithmischen Diagramm, aus [5]	69
6.7	Übereinstimmung mit einer Typenkurve, aus [5]	69
6.8	Schematischer Verlauf eines Drawdown Tests, aus [41]	72
6.9	Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich plötzlich verjüngende Kluft, adaptiert aus [37]	73
6.10	Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich plötzlich öffnende Kluft, adaptiert aus [37]	73

6.11	Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine Kluft mit einer annähernd konstanten Öffnungsweite, adaptiert aus [37]	73
6.12	Typologie der Entwicklung des Injektionsdrucks für eine sich stetig verjüngende Kluft, adaptiert aus [37]	74
6.13	Aufgezeichnete Druckabfallkurven aus einer Dichtschirminjektion, mit Daten aus [21]	75
6.14	Doppelt-logarithmischer Plot der Druckdifferenz für DA1	76
6.15	Type-Curve-Matching für DA1	76
6.16	Darstellung des Skin-Faktors s und der Transmissibilität T_K	78
6.17	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der TPA-Methode . .	80
7.1	Regelkreis der PSG-Methode, adaptiert aus [44]	81
7.2	Parameter für die Beurteilung der Injektion nach der PSG-Methode, adaptiert aus [43]	82
7.3	Fuzzy-Regelung, adaptiert aus [35]	85
7.4	Fuzzifizierung der Druckabfallgeschwindigkeit, adaptiert aus [35, 3]	86
7.5	Fuzzifizierung der Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit, adaptiert aus [35, 3]	86
7.6	Fuzzifizierung des Ruhedrucks, adaptiert aus [35, 3]	87
7.7	Fuzzifizierung der Änderung des Ruhedrucks, adaptiert aus [35, 3]	88
7.8	Defuzzifizierung, adaptiert aus [35, 3]	93
7.9	Druckaufzeichnung an einer Tunnelbaustelle, mit Daten aus [3]	94
7.10	Fuzzifizierung des Ruhedrucks für Druckabfallkurve 3	95
7.11	Fuzzifizierung der Änderung des Ruhedrucks für Druckabfallkurve 3	95
7.12	Fuzzifizierung der Druckabfallgeschwindigkeit für Druckabfallkurve 3	95
7.13	Fuzzifizierung der Änderung der Druckabfallgeschwindigkeit für Druckabfallkurve 3	96
7.14	Defuzzifizierung für Druckabfallkurve 3	97
7.15	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der PSG-Methode (ohne Darstellung der Fuzzy-Logic)	100
7.16	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der PSG-Methode (mit Darstellung der Fuzzy-Logic)	101
8.1	Eindringen eines <i>Bingham'schen Fluids</i> in eine planparallele Kluft, adaptiert aus [22, 17]	104
8.2	Die relative Reichweite als Funktion der relativen Injektionszeit in logarithmischer Skalierung, adaptiert aus [22]	106
8.3	Die relative Reichweite als Funktion der relativen Injektionszeit, adaptiert aus [22]	106
8.4	Die Dimensionalität <i>DIM</i> zur Analyse der Art der Ausbreitung, adaptiert aus [22]	108
8.5	Zusammenhang zwischen Injektionszeit und Reichweite bei veränderlichem Injektionsdruck, adaptiert aus [22]	110
8.6	Abbruchkriterien der RTGC-Methode, adaptiert aus [22]	113
8.7	Vorhersage der Reichweite in Abhängigkeit der Injektionszeit für die 1D-Ausbreitung, mit Daten aus [23]	115
8.8	Vorhersage der Reichweite in Abhängigkeit der Injektionszeit für die 2D-Ausbreitung, mit Daten aus [23]	116
8.9	Injektionsaufzeichnungen einer Passe, mit Daten aus [23]	116
8.10	Reichweite für lineare Ausbreitung in Fließkanälen (1D), mit Daten aus [23]	117
8.11	Dimensionalität über die Injektionszeit, mit Daten aus [23]	118

8.12	Reichweite mit Anpassung der größten Kluftöffnung, mit Daten aus [23]	120
8.13	Prognose der Reichweite mit Anpassung der größten Kluftöffnung, mit Daten aus [23]	121
8.14	Ablaufdiagramm für die Ausführung einer Passe nach der RTGC-Methode	124
10.1	Kugelförmige und zylindrische Ausbreitung, adaptiert aus [9]	135

Tabellenverzeichnis

5.1	Beispiel für verschiedene Suspensionsmischungen, adaptiert aus [4]	54
6.1	Gemessene Daten für die Auswertung der Druckabfallkurven, mit Daten aus [21]	75
6.2	Auswertung des Skin-Faktors für die Druckabfallkurven	77
7.1	Regelbasis (1-27) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]	90
7.2	Regelbasis (28-54) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]	91
7.3	Regelbasis (55-81) der Fuzzy-Logic, adaptiert aus [43, 35, 3]	92
7.4	Eingangsdaten in die Fuzzy-Logic-Steuerung (ermittelt aus der Druckabfallkurve), mit Daten aus [3]	94
7.5	Angewandte Regeln zur Fuzzy-Inferenz von Druckabfallkurve 3	96
9.1	Vergleich der Voraussetzungen für die Anwendung der Methoden	128
9.2	Vergleich der Eingangsdaten in die Abbruchkriterien der Methoden	129
9.3	Vergleich der Abbruchkriterien der Methoden	130
9.4	Vergleich einiger Vor- und Nachteile der Methoden	131
10.1	Anhaltswerte für Reichweiten im Lockergestein, aus [9]	137

Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D.; KOHLBÖCK, D.: *Skriptum Fels- und Tunnelbau*. 4. Auflage. Institut für Geotechnik: Technische Universität Wien, 2011
- [2] ADAM, D.; SZABO, M.: *Skriptum Grundbau und Bodenmechanik*. 2. Auflage. Institut für Geotechnik: Technische Universität Wien, 2010
- [3] BAMINGER, C.: *Entwicklung einer Regelbasis für Injektionssteuerungen auf Basis von Injektionsversuchen an einer Tunnelbaustelle*. Diplomarbeit Institut für Geotechnik: Technische Universität Wien, 1999
- [4] BONIN, G.; ROMBOUGH, V.; CARTER, T.; JEFFERIES, M.: Towards Better Injection Control and Verification of Rock Grouting. In: *Proceedings 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing* (New Orleans, 2012)
- [5] BOURDET, D.: *A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis*. Houston: World Oil, Gulf Publishing Co., 1983
- [6] BROWN, R.: *Practical Foundation Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1996
- [7] CARTER, T.; DERSHOWITZ, W.; SHUTTLE, D.; JEFFERIES, M.: Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock. In: *Proceedings 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing* (New Orleans, 2012)
- [8] DERSHOWITZ, W.: Interpretation and Synthesis of Discrete Fracture Orientation, Size, Shape, Spatial Structure and Hydrologic Data by Forward Modelling. In: *Proceedings of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses* (Lake Tahoe, 1992)
- [9] DONEL, M.: *Bodeninjektionstechnik*. Essen: Verlag Glückauf, 1995
- [10] ERIKSSON, M.; STILLE, H.: *Grouting with Cement Based Grout in Hard Jointed Rock*. Stockholm: SveBeFo, 2005
- [11] EWERT, F.: *Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites*. Paderborn: Springer-Verlag, 1985
- [12] EWERT, F.: The Gin Principle - A Helpful Method for Rock Grouting? In: *International Water Power and Dam Construction* (London, 1996)
- [13] GUSTAFSON, G.: *Hydrogeology for Rock Engineers*. Stockholm: Rock Engineering Research Foundation, 2012
- [14] GUSTAFSON, G.; CLAESSON, J.: *Steering Parameters for Rock Grouting*. Göteborg: School of Civil Engineering, Chalmers University of Technology, 2005

- [15] GUSTAFSON, G.; STILLE, H.: Stop Criteria for Cement Grouting. In: *Fachzeitschrift für Geomechanik und Ingenieurgeologie im Bauwesen und Bergbau* (Salzburg, 2005)
- [16] HOLMBERG, M.; TSUJI, M.; STILLE, B.; RAFI, J.; STILLE, H.: Evaluation of Pre-grouting with the RTGC Method and Results from the City Line Project. In: *Proceedings 7th Nordic Grouting Symposium and 2nd Nordic Rock Mechanics Symposium* (Göteborg, 2013)
- [17] HÄSSLER, L.: *Grouting of Rock - Simulation and Classification*. Stockholm: Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, 1991
- [18] KAINRATH, A.: Prüfmethode und neue Verfahren zur Qualitätssicherung in der Injektionstechnik. In: *Injektionen im Untertagebau* (Leoben, 2012)
- [19] KAINRATH, A.: New Evaluation Methods for Grouts. In: *IYEGEC* (Paris, 2013)
- [20] KAINRATH, A.; ADAM, D.; KRENN, H.: Verfahren zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften zementbasierter Injektionssuspensionen. In: *XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering Paper No. 272* (Wien, 2014)
- [21] KISS, S.: *Analyse transienter Druckentwicklungen nach Injektionsunterbrechungen und Modellierung in Form von Parameterstudien*. Diplomarbeit Institut für Lagerstättenphysik und -technik: Montanuniversität Leoben, 1992
- [22] KOBAYASHI, S.: *Real Time Grouting Control Method - Development And Application Using Äspö HRL Data*. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2008
- [23] KOBAYASHI, S.; STILLE, H.: *Design for Rock Grouting Based on Analysis of Grout Penetration - Verification Using Äspö HRL Data and Parameter Analysis*. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007
- [24] KOHL, T.: *Modellsimulation gekoppelter Vorgänge bei Wärmeentzug aus heissem Gebirge (Diss. ETH Nr. 9802)*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), 1992
- [25] KUTZNER, C.: *Injektionen im Baugrund*. Saarbrücken: SDV Saarbrücker Druckerei und Verlag GmbH, 1991
- [26] LOMBARDI, G.: *Injection des Massifs Rocheux - Deutsche Fassung*. Biel/Bienne: Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, 1987
- [27] LOMBARDI, G.: Gin Principle Revisited. In: *International Water Power and Dam Construction* (London, 1997), S. 33–36
- [28] LOMBARDI, G.: Grouting of Rock Masses - Invited Key Note Lecture. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Grouting And Grout Treatment* (Minusio, 2002)
- [29] LOMBARDI, G.: Selecting the Grouting Intensity. In: *International Journal on Hydropower and Dams* (Wallington, 1996), S. 62–66
- [30] LOMBARDI, G.; DEERE, D.: The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock. In: *Proceedings 15th Congress of Large Dams* (Lausanne, 1985)
- [31] LOMBARDI, G.; DEERE, D.: Grouting Design and Control Using the GIN Principle. In: *International Water Power and Dam Construction* (London, 1993)

- [32] NAUDTS, A.: *Contemporary Issues in Rock Grouting and Formulation of Engineered Cement Based Suspension Grouts*. Montreal: ECO Grouting Specialists Inc., 2004
- [33] NAUDTS, A.; LANDRY, E.; HOOEY, S.; NAUDTS, W.: Additives and Admixtures in Cement-based Grouts. In: *Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference* (New Orleans, 2003)
- [34] POLLARD, R.; JONES, W.; WHITFIELD, J.: The Use of Transient Pressure Analysis at the Dounreay Shaft Isolation Project. In: *Geomechanics and Tunneling* (Salzburg, 2009), S. 469–482
- [35] REICHL, I.: *Fuzzy Logic Steuerung von Injektionen auf der Basis von Modellversuchen*. Diplomarbeit Institut für Geotechnik: Technische Universität Wien, 2000
- [36] RIEDMÜLLER, G.; SCHUBERT, W.; SEMPRICH, S.: Injektionen in Boden und Fels. In: *Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium* (Graz, 2002)
- [37] STADLER, G.: *Transient Pressure Analysis of “RODUR“ Epoxy Grouting in Concrete and Rock at Kölnbrein Dam, Austria*. Dissertation Institut für Lagerstättenphysik und -technik: Montanuniversität Leoben, 1992
- [38] STADLER, G.: Transient Pressure Analysis of RODUR Epoxy Grouting in Concrete and Rock at Kölnbrein Dam, Austria - Untersuchungen zur Kluftinjektion und ihren Beziehungen zu physikalischen Modellen der Erdöllagerstättentechnik. In: *Proceedings of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete* (Salzburg, 1993), S. 457–461
- [39] STADLER, G.; REICHL, I.; CARTER, T.: A How to Guide to a Successful Grouting Process! In: *Proceedings of the Workshop GROUTING in the Course of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium* (Salzburg, 2015)
- [40] STILLE, H.: *Rock Grouting - Theories and Applications*. Storgatan 19, Näringslivets Hus, 2tr, Stockholm: BeFo, 2015
- [41] TAREK, H.: *Well Testing Analysis - Chapter 1*. Amsterdam: Elsevier Inc., 2012
- [42] WARNER, J.: *Practical Handbook of Grouting - Soil, Rock and Structures*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2004
- [43] ZETTLER, A.: *A Hybrid Grouting Control Algorithm Based on Fuzzy Logic Tuned by a Neural Network*. Dissertation Institut für Geotechnik: Technische Universität Wien, 1998
- [44] ZETTLER, A.; POISEL, R.; REICHL, I.; STADLER, G.: Dimensionierungen von Injektionen mittels messender Beobachtung. In: *Proceedings 14. Christian Veder Kolloquium* (Graz, 1999), S. 45–58
- [45] ZETTLER, A.; POISEL, R.; STADLER, G.: Drucksensitives Injizieren (PSG) im Tunnelbau mit Hilfe einer Fuzzy Logic Injektionskontrolle. In: *Proceedings Eurock '97* (Salzburg, 1997), S. 605–611
- [46] ZETTLER, A.; POISEL, R.; STADLER, G.: Ein neues System zur Kontrolle eines Injektionsprozesses mit Hilfe von Fuzzy Logik. In: *Proceedings Eurock '96* (Turin, 1996), S. 1417–1425

- [47] Norm ÖNORM B 1997-2 2012-03-15. *Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen*
- [48] Norm DIN 18130-2 2011-07-11. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 2: Feldversuche*
- [49] Norm DIN EN ISO 22282-2 2012-09-01. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 2: Wasserdurchlässigkeitsversuche in einem Bohrloch unter Anwendung offener Systeme*
- [50] Norm ÖNORM EN ISO 22282-3 2012-02-15. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 3: Wasserdruckversuch im Fels*
- [51] Norm DIN V 4126-100 1996-04. *Diaphragm Walls - Part 100: Analysis in Accordance with the Partial Safety Factor Concept*
- [52] Norm ASTM D6910 / D6910M 2009-04. *Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries*