Bemessungsalgorithmus und Sicherheitskonzept für Penetrationsinjektionen auf der Grundlage einer physikalisch basierten Prognose der Hydromechanik

Yashar Forouzandeh

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor - Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Conrad Boley
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Die Dissertation wurde am 04.05.2021 bei der Universität der Bundewehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 13.08.2021 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 28.09.2021 statt.

Ich widme diese Arbeit
meinen Eltern, Schwestern
und
meiner lieben Frau Ayda

für ihre wahre Liebe und Unterstützung

Danksagung

Ich erinnere mich an all die schönen Momente, die ich in den letzten knapp sechs Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München erlebt habe. Wenn ich zurückblicke und einen Vergleich zu der Zeit ziehe, in der ich meine Promotion begonnen habe, sehe ich viele positive Veränderungen in meinem persönlichen und akademischen Leben. Unabhängig von meinem zukünftigen Schicksal fühle ich mich in diesem Moment glücklich und zufrieden. An dieser Stelle möchte ich einige Worte an jene Menschen richten, denen ich dieses gute Gefühl zu verdanken habe.

In erster Linie bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Conrad Boley, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Promotion zu beginnen, und der mich in all den Jahren weiterhin unterstützt hat. Seine Unterstützung und Ratschläge haben mir den richtigen Weg gezeigt, um meine Forschung zielstrebig fortzusetzen.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz (Fachgebietsleiter für Grundbau und Bodenmechanik an der TU Berlin) für seine Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats sowie für seine wertvollen wissenschaftlichen Beiträge.

Ein großes Dankeschön möchte ich Herrn Götz Tintelnot (CEO der TPH Bausysteme GmbH) aussprechen. Er hat die vorliegende Arbeit persönlich, finanziell und fachlich unterstützt. Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Firmen TPH Bausysteme GmbH und Züblin Spezialtiefbau GmbH, die mich beim großmaßstäblichen Injektionsversuch unterstützt haben.

Mein Dank gilt all meinen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Institutes sowie Labormitarbeiterinnen und -mitarbeitern, die mich persönlich und fachlich direkt oder indirekt unterstützt haben. Ich möchte mich ebenfalls bei meinen Bachelorand/innen und Masterand/innen bedanken, die die Laborversuche zum Teil durchgeführt haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für all ihre Liebe, Unterstützung und Ermutigung bedanken: Bei meinen Eltern, die mich mit Liebe erzogen und in allen Schritten meines Lebens unterstützt haben. Bei meinen Schwestern, die immer liebevoll und hilfsbereit sind. Und vor allem bei meiner lieben Frau Ayda, die in all den schwierigen und glücklichen Phasen meines Lebens an meiner Seite war und ist. Ich schätze ihre Unterstützung und Geduld in den letzten Phasen meiner Promotion sehr.

Kurzfassung

Viele Injektionsmaßnahmen werden im Wesentlichen unter Nutzung langjähriger empirischer Erfahrungen geplant und ausgeführt. Diese empirischen Ansätze haben überwiegend keinen vertieften theoretischen Hintergrund und liefern daher auch keine reproduzierbaren Algorithmen, die dann wiederum für eine zuverlässige Prognose im Rahmen der Planung und Entwicklung von Injektionsmaßnahmen und -verfahren dienen könnten. An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an.

Die Injektionsreichweite mit drei Injektionsmaterialien (zwei Acrylatgelen und einem Polyurethanharz) wurde durch eindimensionale Injektionsversuche unter Berücksichtigung der Bodenart (von Kies über Sand zu Schluff), der Bodensättigung und des Injektionsdruckes untersucht. Die zeitliche und temperaturabhängige Entwicklung der Viskosität sowie der Speicher- und Verlustmodule wurde mit einem Rheometer gemessen. Die Gelierungszeit, die sogenannte kritische Zeit (Beginn der Reaktion der Injektionskomponenten) und die Sol-/Gel-Übergangszeit wurden ebenfalls festgestellt. Die experimentellen Daten dienen wiederum als Referenz für die numerische Modellierung sowie zur Verbesserung der Parameter der verwendeten Stoffgesetze.

Um numerische Strömungssimulationen (engl. Computational Fluid Dynamics, kurz CFD) durchführen zu können, wurde ein einphasiges Strömungsberechnungsverfahren für die Ermittlung der Injektionsreichweite entwickelt. Das entwickelte Verfahren wurde für die verschiedenen Ausbreitungsformen der Injektionsmaterialien, vereinfacht z. B. zylinder- und kugelförmig, erweitert. Die mechanischen Materialkennwerte der Injektionskörper wurden ermittelt. Hierbei war eine sicherheitsrelevante Änderung des Materialverhaltens in Bezug auf die Scherfestigkeit nach der Injektion festzustellen. Befindet sich der Injektionspunkt in einem bereits hergestellten und ausreagierten Injektionskörper bzw. in einem festen Körper, steigt der Injektionsdruck im Injektionsaustrittspunkt an und dadurch verbreiten sich mehrere Risse und Mikrorisse im Injektionskörper, bis das Injektionsmaterial für sich einen Fließweg nach außen bildet. Der Injektionsvorgang ist in diesem Fall ein thermo-hydro-mechanischer Prozess (THM). Um eine THM-Simulation durchführen zu können, wurden die Programme „iTough2“ und „FLAC3D“ gekoppelt und gekoppelte thermisch-hydrologisch-mechanische mehrphasige Strömungssimulationen (CFD-THM) wurden unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften durchgeführt.

Mittels experimenteller und theoretischer Untersuchungen wurde eine physikalisch abgesicherte Prognose des Ausbreitungsverhaltens des Injektionsguts erarbeitet. Hierauf aufbauend wurde ein Bemessungsalgorithmus einschließlich eines Sicherheitskonzeptes auf der Grundlage des EC 7-1 vorgestellt. Durch eine sichere Bemessung von

Injektionsmaßnahmen wird der erforderliche Materialverbrauch optimiert. Dies ist die Voraussetzung für eine Optimierung in ökonomischer und ökologischer Hinsicht.

Abstract

Many grouting activities are essentially planned and executed using long-term empirical experience. These empirical approaches mostly do not have an in-depth theoretical background and therefore do not provide reproducible algorithms, which in turn could be used for reliable prediction in the context of planning and development of grouting measures and procedures.

In this study, the grouting performance of three grouting materials (two acrylate gels and one polyurethane resin) was investigated using one-dimensional grouting tests considering soil type (gravel, sand, and silt), soil saturation and grouting pressure. The time and temperature-dependent development of the viscosity, as well as the storage modulus and loss modulus, were measured with a rheometer. The gelation time (start of the reaction of the grouting mix) and the sol-gel transition were also determined. In this case, the experimental data also serve as a reference for the numerical modeling and improvement of the parameters of the material laws used.

Subsequently, to perform computational fluid dynamics (CFD) simulations, a single-phase flow calculation method was developed to determine the grout area. The developed process was extended for the different propagation forms of the grouting materials, e.g., cylindrical and spherical. The mechanical material properties of the grouted body were determined and a safety-related change in the material behavior in terms of the shear strength after grouting was observed.

If the grout point is located in an already produced and reacted grout body or in a solid body, the grout pressure in the grout outlet point increases and thus several cracks and micro-cracks spread in the grout body until the grout material forms a flow path to the outside for itself. The grouting process in this case is a thermo-hydro-mechanical process (THM). To perform THM simulation, the programs "iTough2" and "FLAC3D" were interfaced and coupled thermal-hydrological-mechanical multiphase flow simulations (CFD-THM) were executed considering the material properties.

Finally, using experimental and theoretical investigations, a physically validated prediction of the dispersion behavior of the injection grout was developed. Hereupon, a design algorithm including a safety concept based on EC 7-1 was presented. A safe design of grouting measures optimizes the required material consumption. This is the prerequisite for optimization in economic and ecological terms.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG V

ABSTRACT VII

INHALTSVERZEICHNIS IX

ABBILDUNGSVERZEICHNIS XV

TABELLENVERZEICHNIS XXIII

VERWENDETE SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN XXV

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG 1

2 GESCHICHTE DER INJEKTION 3

3 STAND DES WISSENS 5

3.1 Einordnung der Penetrationsinjektion in die Baugrundverbesserungsmethoden 5

3.2 Forschungen zur Injizierbarkeit von Boden 7

4 INJEKTIONSMATERIALIEN 13

4.1 Organische Injektionsmaterialien 13

4.2 Mineralische Injektionsmaterialien 14

4.2.1 Injektionsmaterialien auf Zementbasis 14

4.2.2 Kolloidales Silica 15

4.2.3 Silikastaub 15

4.3 Chemische Injektionsmaterialien 16

4.3.1 Acrylate 16

4.3.2 Polyurethane 17

4.3.3 Silikate 17

4.3.4 Epoxide 18

5 INJEKTIONSTECHNIK 19

5.1 Mischanlage 19

5.2 Injektionspumpe 20

5.2.1 Kolbenpumpe 20

5.2.2 Membranpumpe 21

5.2.3 Schneckenpumpe 21

5.3 Injektionslanzen 22

5.3.1 Rammverpresslanzen 22

5.3.2 Injektionsleitungen mit Fußventil 22

5.3.3 Manschettenrohre 23

6 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE INJIZIERBARKEIT DES BODENS 25

6.1 Bodenparameter 25

6.1.1 Durchlässigkeit des Bodens 26

6.1.2 Porosität des Bodens 29

6.1.3 Saugspannung 31

6.2 Eigenschaften des Injektionsmaterials 33

6.2.1 Rheologische Eigenschaften des Injektionsmaterials 33

6.2.2 Verdünnungseffekt des Injektionsmaterials (Diffusion) 38

6.3 Betriebsparameter der eingesetzten Injektionstechnik 41

7 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR INJIZIERBARKEIT DES BODENS 43

7.1 Untersuchte Injektionsmaterialien 43

7.2 Rheologische Untersuchung der Injektionsmaterialien 44

7.2.1 Versuchsbeschreibung 44

7.2.2 Ergebnisse und Auswertungen 46

7.3 Ermittlung der Betriebsparameter der Injektionspumpe 49

7.3.1 Übersetzungsverhältnis der Pumpe 50

7.3.2 Druckverluste in Pumpe, Leitungen und Anschlüssen 50

7.3.3 Fördermenge der Pumpe (Pumpenförderrate) 55

7.4 Eindimensionaler Injektionsversuch 55

7.4.1 Aufbau des Versuchsstands 56

7.4.2 Bodenparameter 57

7.4.3 Ergebnisse und Auswertungen 59

7.5 Großmaßstäblicher Injektionsversuch 61

7.5.1 Versuchsbeschreibung 61

7.5.2 Bodenparameter 62

7.5.3 Ergebnisse und Auswertungen 64

8 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN 67

8.1 Entwicklung und Validierung eines einphasigen Berechnungsverfahrens (Bemessungstool) 68

8.1.1 Ermittlung der Ausbreitung von Injektionsmaterialien im Zylinder 69

8.1.2 Validierung des entwickelten Verfahrens zur Simulation der einphasigen Strömung 73
8.1.3 Erweiterung des vorgestellten Strömungsberechnungsverfahrens für eine kugel- bzw. ellipsoidförmige Ausbreitung 74
8.1.4 Erweiterung des vorgestellten Strömungsberechnungsverfahrens für eine kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmige Ausbreitung 76
8.1.5 Absenkung des Injektionskörpers durch die Gravitationskraft 78
8.1.6 Vergleich der Ausbreitung der vorgestellten Injektionsmaterialien 79
8.1.7 Einfluss der Fördermenge der Pumpe auf die Injektionsreichweite 80
8.1.8 Entwicklung der Smartphone-Version des Bemessungstools 81
8.2 Einwirkung der Injektionsreihenfolge 85
8.2.1 Vergleich zwischen dreieckigen und quadratischen Injektionsrastern 85
8.2.2 Interaktion benachbarter Injektionspunkte 89
8.2.3 Auswirkung der Injektionsstrategie auf den erzeugten Injektionskörper 91
8.3 Ermittlung der Injektionsreichweite (großmaßstäblicher Injektionsversuch) 96
8.3.1 Einphasiges Strömungsberechnungsverfahren mit Bemessungstool unter Berücksichtigung des Wasserdruckes 96
8.3.2 Mehrphasiges Strömungsberechnungsverfahren mit iTough2 (CFD) 98
8.3.3 Validierung der Simulationsergebnisse 100

9 MATERIALVERHALTEN VON FESTKÖRPERN 103
9.1 Grundlagen der Materialmodelle 104
9.1.1 Grundelemente 104
9.1.2 Zusammengesetzte Modelle 105
9.2 Stoffgesetze 107
9.2.1 Mohr-Coulombsches Bruchkriterium 109
9.2.2 Hoek-Brownsches Bruchkriterium 109

10 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR TRAGFÄHIGKEIT 113
10.1 Probenzusammensetzung und -herstellung 113
10.2 Zugversuch 114
10.2.1 Versuchsbeschreibung 114
10.2.2 Ergebnisse und Auswertungen 117
10.3 Einaxialer Druckversuch 119
10.3.1 Versuchsbeschreibung 119

10.3.2 Ergebnisse und Auswertungen 121
10.3.3 Vergleich mit den Ergebnissen aus den Spaltzugversuchen 124
10.4 Triaxialer Druckversuch 124
10.4.1 Versuchsbeschreibung 124
10.4.2 Scherparameter nach dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium 126
10.4.3 Scherparameter nach dem Hoek-Brownschen Bruchkriterium 128
10.4.4 Steifigkeit der Injektionskörper 135

11 GEKOPPELTE THM-SIMULATIONSMETHODE 139
11.1 Allgemeine Betrachtung 139
11.2 Einphasige thermo-hydro-mechanische Simulation 139
11.3 Mehrphasige thermo-hydro-mechanische Simulation 142

12 PLANUNG UND AUSFÜHRUNG 149
12.1 Untersuchung zur Injizierbarkeit 149
12.2 Untersuchung zur Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit 151
12.3 Untersuchung zum Abdichtungseffekt 152

13 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 153
13.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 153
13.2 Vorschläge für weitere Untersuchungen 155

LITERATURVERZEICHNIS 157

ANHÄNGE 171

ANHANG A RHEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN DER UNTERSUCHTEN INJEKTIONSMATERIALIEN 173
A.1 Acrylatgel II 173
A.2 Polyurethanharz 175

ANHANG B BETRIEBSPARAMETER DER INJEKTIONSPUMPE 177
B.1 2K–Injektionspumpe I 177
B.2 2K–Injektionspumpe II 180

ANHANG C TIME-OF-FLIGHT-KAMERA (TOF) 181

ANHANG D NUMERISCHE INTEGRATIONSMETHODE 183
D.1 Trapezregel 183
D.2 Mittelpunktregel (Verfeinerung der Trapezregel) 183

ANHANG E VALIDIERUNG DES ENTWICKELTEN VERFAHRENS ZUR SIMULATION DER EINPHASIGEN STRÖMUNG 185
E.1 Acrylatgel II 185
E.2 Polyurethanharz 185

ANHANG F EINWIRKUNG DER INJEKTIONSREIHENFOLGE 187
F.1 Variante 2 – Überspringend linear 187
F.2 Variante 3 – Abwechselnd Zentrifugal-Zentripetal 188
F.3 Variante 4 – Diagonal mit Rahmen 189
F.4 Variante 5 – Überspringend zentripetal mit Rahmen 190
F.5 Variante 6 – Zentripetal mit Rahmen 191

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Einordnung der Injektionsverfahren in die Baugrundverbesserungsmethoden (Eigene Darstellung nach [2, 37, 171]) 5
Abbildung 3-2: Arten der Baugrundinjektion 6
Abbildung 3-3: Eindringfähigkeit von Injektionsgut in Lockergestein nach Cambefort (In Anlehnung an Kutzner 1991, S. 32) [99] 8
Abbildung 3-4: Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln (Eigene Darstellung nach Kutzner 1991, S. 34) 10
Abbildung 3-5: Porenengstelle zwischen den drei sich berührenden Körnern (Eigene Darstellung nach Schulze 1993, S. 110) 11
Abbildung 3-6: Korngrößen- und Porenengstellenverteilung (Schulze 1993, S. 113) 11
Abbildung 4-1: Unterteilung der Injektionsmaterialien in Bezug auf die Molekülstruktur [9, 92, 103, 180] 13
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Paddelmischers (links) sowie des Kolloidmischers (rechts) mit der Benennung der Bauteile (Hegebarth 2013, S. 12 und 14) 19
Abbildung 5-2: 2K-Kolbenpumpe mit Druckluftantrieb (links); Membranpumpe mit elektrischem Antrieb (rechts) (mit freundlicher Genehmigung der TPH GmbH, © TPH GmbH [169]) 21
Abbildung 5-3: Schneckenpumpe (oben); Stator und Rotor (unten) (Hegebarth 2013, S. 44 und 45) 21
Abbildung 5-4: Rammverpresslanzen (mit freundlicher Genehmigung der TPH GmbH, © TPH GmbH [169]) 22
Abbildung 5-5: Injektionsleitungen mit Fußventil 23
Abbildung 5-6: Manschettenrohre aus Kunststoff (links) und aus Stahl (rechts) mit Doppelpacker (Boley et al. 2019, S. 508) [19] 23
Abbildung 6-1: Erscheinungsformen des Grundwassers und der Porenluft (Boley et al. 2019, S. 20) [19] 26
Abbildung 6-2: Ausbreitung des Injektionsmaterials in einem anisotropen Boden 28
Abbildung 6-3: Schema der Hohlraumanteile im Lockergestein (Fuchs et al. 2017, S. 2) [68] 29
Abbildung 6-4: Beziehung zwischen Gesamtporenanteil, bestehend aus effektivem Porenanteil sowie Haftwasseranteil, und Korngroße (Hölting 2009, S. 15) [84] 30

Abbildung 6-5: Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die untersuchten Versuchsböden nach dem van-Genuchten-Mualem-Modell 33
Abbildung 6-6: Klassifizierung der Fließverhalten (In Anlehnung an Figura 2004, S. 111) 33
Abbildung 6-7: Fließkurven (links) und Viskositätskurven (rechts) für unterschiedliche Fließverhalten (Modifiziert nach Figura 2004, S. 116 und 117) [61] 34
Abbildung 6-8: Bereiche der Verarbeitbarkeit von Injektionsmaterialien: A: Idealer Bereich | B: Praktikabler Bereich | C: Vertretbarer Bereich (Eigene Darstellung nach Kutzner 1991, S. 240) 35
Abbildung 6-9: Rheometer (Anton Paar MCR102) 36
Abbildung 6-10: Geometrien der Messsysteme von Rotationsviskosimetern (Kumpugdee-Vollrath 2011, S. 243) [98] 37
Abbildung 6-11: Zeitliche Entwicklung der Speicher- und Verlustmodule eines aushärtenden bzw. gelbildenden Materials (Eigene Darstellung nach Mezger 2014, S. 132) 38
Abbildung 6-12: Diffusion und chemische Reaktion an der Kontaktfläche der Flüssigkeiten A und B (Paul et al. 2004, S. 759) 40
Abbildung 7-1: Komponenten der untersuchten Injektionsmaterialien 43
Abbildung 7-2: Chemische Zusammensetzung von Acrylatgelen (Lufsky 2009, S. 471) [108] 43
Abbildung 7-3: Untersuchte Injektionsmaterialien im ausreagierten Zustand 44
Abbildung 7-4: Leere Doppelspritze (25 ml) inkl. Mischrohr 45
Abbildung 7-5: Zeitabhängige Viskositätsentwicklung eines aushärtenden bzw. gelbildenden Injektionsmateriales 45
Abbildung 7-6: Zeitliche Entwicklung der Viskosität für verschiedene Temperaturen – Acrylatgel I 46
Abbildung 7-7: Beziehung zwischen Gelierungszeit und Temperatur – Acrylatgel I 47
Abbildung 7-8: Zeitliche Entwicklung der Speicher- und Verlustmodule für verschiedene Temperaturen – Acrylatgel I 49
Abbildung 7-9: Kartuschengerät (links), 2K-Pumpen (rechts) 49
Abbildung 7-10: Auf das Kartuschengerät wirkende Kräfte und Druckspannungen 50
Abbildung 7-11: Resultierender Druckverlust bei einer Hintereinanderschaltung der Bauteile (Grollius 2014, S. 40) 51

Abbildung 7-12: Resultierender Druckverlust bei einer Parallelschaltung der Bauteile (Grollius 2014, S. 40) 52
Abbildung 7-13: Versuchsaufbau – Drucküberset zungsverhältnis 52
Abbildung 7-14: Drucküberset zungsverhältnis und Summe der mechanischen Druckverluste – Kartuschengerät 53
Abbildung 7-15: Injektions- und Luftdruckverlauf in den drei Messungen für die Kalibrierung des Kartuschengerätes 54
Abbildung 7-16: Versuchsaufbau 1D-Injektionsversuch (links); Versuchsaufbauänderung für die Versuche mit den teil- und vollgesättigten Böden (rechts) 56
Abbildung 7-17: Korngrößenverteilung der Versuchsböden 57
Abbildung 7-18: Schichtweise Füllung und Verdichtung des Bodens im Versuchszylinder 58
Abbildung 7-19: Luftdruck-Reichweite-Diagramm – Acrylatgel I 59
Abbildung 7-20: Strukturelle Inhomogenität im Injektionskörper aus Acrylatgel I und Kies 60
Abbildung 7-21: Injektionsdruck-Reichweite-Diagramm – Acrylatgel I | Drei Sättigungsgrade 60
Abbildung 7-22: Exemplarische Anordnung – Probefeld 61
Abbildung 7-23: Bodenprofil auf dem Versuchsfeld 64
Abbildung 7-24: Freigelegter Injektionskörper einer Versuchsreihe 65
Abbildung 7-25: Mit ToF-Kamera erfasste Abmessung des freigelegten Injektionskörpers (Höhe in den Farben von blau nach rot) 65
Abbildung 8-1: Prinzipskizze des Injektionsvorgangs – Injektionsmaterialmassenbilanz am Kontrollvolumen 67
Abbildung 8-2: Druckverlauf im System 69
Abbildung 8-3: Gültigkeitsgrenzen der Darcy-Gleichung in Abhängigkeit vom hydraulischen Gefälle i (Amelung et al. 2018) [1] 70
Abbildung 8-4: Programmablaufplan des entwickelten einphasigen Strömungsberechnungsverfahrens 72
Abbildung 8-5: Validierung des entwickelten Verfahrens (Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Reichweiten von Acrylatgel I) 74
Abbildung 8-6: Ellipsoidförmige Ausbreitung des Injektionsmittels im Boden 74
Abbildung 8-7: Elliptisch-zylinderförmige Ausbreitung des Injektionsmittels im Boden 76

Abbildung 8-8: Absenkung des Injektionskörpers (links), Wasserdruck auf Injektionskörper (rechts) 78
Abbildung 8-9: Beziehung zwischen Injektionsradius und Durchlässigkeitsbeiwert für die vorgestellten Injektionsmaterialien 80
Abbildung 8-10: Einfluss der Fördermenge der Pumpe auf die Injektionsreichweite (Vergleich zwischen Kartuschengerät und 2K-Pumpe) 81
Abbildung 8-11: Benutzeroberfläche des Bemessungstools für den Dateneingabebereich 82
Abbildung 8-12: Benutzeroberfläche im Bereich der Ergebnisse (Datenausgabe) 84
Abbildung 8-13: Schnittdarstellungen des dreieckigen Injektionsrasters 86
Abbildung 8-14: Gegenüberstellung der dreieckigen und quadratischen Injektionsraster 88
Abbildung 8-15: Überlappung zweier Ellipsoide 90
Abbildung 8-16: Untersuchte Injektionsstrategien mit den verschiedenen Injektionsreihenfolgen 92
Abbildung 8-17: Geometrie des untersuchten Injektionsfeldes 93
Abbildung 8-18: Konturdiagramm – Mächtigkeit des Injektionsschirms in den Farben in Metern 94
Abbildung 8-19: Schnittdarstellungen des Injektionsschirms bei der Injektionsstrategie 1 95
Abbildung 8-20: Biegemoment- und Querkraftverläufe im Injektionsschirm 96
Abbildung 8-21: Zeitlicher Verlauf der Injektionsparameter – ermittelt mit Bemessungstool 97
Abbildung 8-22: Mit dem Bemessungstool ermittelte Injektionsreichweiten unter Berücksichtigung der Überlappungen 98
Abbildung 8-23: Ermittelte Injektionsreichweite bzw. Porosität mit iTough2 (Postprocessing mit FLAC3D) 100
Abbildung 8-24: Gegenüberstellung der gemessenen und der mit zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten 101
Abbildung 9-1: Normal- und Schubspannungen in einem dreidimensionalen Kontinuum (Modifiziert nach Borst 2012, S. 18) 103
Abbildung 9-2: Grundelemente rheologischer Modelle: a) Hooke-Element, b) Newton-Element, c) St.-Venant-Element (Eigene Darstellung nach Berezvai 2020, S. 7) 104

Abbildung 9-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei einem linear-elastischen Materialverhalten (links) sowie bei einem nicht linear-elastischen Materialverhalten (rechts); (Rust 2016, S. 134) 104
Abbildung 9-4: Übersicht der in der Geotechnik üblichen zusammengesetzten rheologischen Modelle 106
Abbildung 9-5: Bruchformen im einaxialen Druckversuch (Prinz und Strauß 2011, S. 57) [138] 108
Abbildung 9-6: Plastische Materialverhalten unter Belastung (Rust 2016, S.209) 108
Abbildung 9-7: a) Elastisch-idealplastisches Materialverhalten (Plaxis 2020 Material Models Manual, S. 33); b) 2D-Darstellung der Bruchumhüllende nach Mohr-Coulomb (Burg 2012, S. 47) 109
Abbildung 9-8: Bruchumhüllenden nach Hoek-Brown im σ_1-σ_3-Diagramm (links) sowie im τ-σ_n-Diagramm (rechts) und die für die Auswertung erforderlichen Messdaten 110
Abbildung 9-9: Änderung der Bruchumhüllende nach Hoek-Brown in Abhängigkeit von Konstante m_b (Eberhardt 2012, S. 983) [57] 110
Abbildung 9-10: Gegenüberstellung der Bruchumhüllenden nach Mohr-Coulomb (linear) und Hoek-Brown (nicht linear) im τ-σ-Diagramm 111
Abbildung 10-1: Entnahmestellen der Prüfkörper (oben), Prüfkörper (links), vakuumverpackte Prüfkörper (rechts) 114
Abbildung 10-2: Prüfverfahren für die Ermittlung der Zugfestigkeit (Dachroth 2017, S. 123) [31] 115
Abbildung 10-3: Varianten der Lastübertragung beim Spaltzugversuch 115
Abbildung 10-4: Spannungsverlauf bei den verschiedenen Varianten der Lastübertragung 116
Abbildung 10-5: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart 118
Abbildung 10-6: Zugfestigkeit der untersuchten Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien 119
Abbildung 10-7: Verformungsschema der Probe nach der Belastung 121
Abbildung 10-8: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart 123
Abbildung 10-9: Einaxiale Druckfestigkeit der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien 123
Abbildung 10-10: Vergleich zwischen bodenmechanischen (links) und felsmechanischen (rechts) Triaxialgeräten 125

Abbildung 10-11: Hauptspannungsdifferenz-Dehnungskurve mit Anfangs-Tangentenmodul (E_0) und Sekantenmodul (E_{50}) − (Boley et al. 2019, S. 214) 126
Abbildung 10-12: Schematische Darstellung der Normal- und Tangentialmaterialmodelle vor und nach dem Injektionsvorgang 128
Abbildung 10-13: Hauptspannungskreise und zugehörige Schergeraden als Ergebnis der Triaxialversuche mit der Versuchstechnik für Boden (hellgraue Volllinien) und Fels (hellgraue Strichlinien) – Bruchumhüllende nach Hoek-Brown (schwarze Strich-Punkt-Linie) 129
Abbildung 10-14: Ergebnis der Triaxialversuche mit der Versuchstechnik für Boden und Fels sowie der einaxialen Druck- und Zugversuche – Bruchumhüllenden nach Hoek-Brown 130
Abbildung 10-15: Hoek-Brown-Konstante (m_b) in Abhängigkeit von Bodenart 131
Abbildung 10-16: Scherparameter der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien 131
Abbildung 10-17: Kritische Normalspannung – Schnittpunkt zwischen den Bruchumhüllenden nach Mohr-Coulomb für Boden und nach Hoek-Brown für Injektionskörper (Acrylatgel I + Sand A) 132
Abbildung 10-18: Primärer und sekundärer Spannungszustand (Eigene Darstellung nach Széchy 1969, S. 117) [167] 134
Abbildung 10-19: Typischer Verlauf der Deviatorspannung-Dehnungskurve für den mit Acylatgel bzw. Polyurethanharz erzeugten Injektionskörper 136
Abbildung 10-20: Abminderungsfaktor des Sekantenmoduls 137
Abbildung 10-21: Elastizitätsmodul der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien 138
Abbildung 11-1: Programmablaufdiagramm zur Simulation des Rissbildungsprozesses 139
Abbildung 11-2: Untersuchung des hydraulischen Rissbildungsprozesses (Simulationsnetz und -parameter) 140
Abbildung 11-3: Zugspannungsbrüche in Abhängigkeit vom Spannungszustand einen Schritt vor dem Zusammensturz des Simulationssystems | n: Jetzt (now), p: Vergangenheit (past) 141
Abbildung 11-4: Varianten für die Druckerhöhung (Hyd. Druck-Berechnungsschritt-Kurven) 141

Abbildung 11-5: Zugspannungsbrüche bei den unterschiedlichen Varianten für die Druckerhöhung einen Schritt vor dem Zusammensturz des Simulationssystems | n: Jetzt (now), p: Vergangenheit (past) 142
Abbildung 11-6: Verknüpfung von iTOUGH2 und FLAC3D – Programmablaufplan der gekoppelten THM-Simulation 143
Abbildung 11-7: Randbedingungen und das mit dem gekoppelten Verfahren simulierte 2,5D-Netz 145
Abbildung 11-8: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse – Rissbildung im Injektionskörper – Porendruck (oben), Bruchstellen (Mitte) und Erddruckbeiwert (unten) 146
Abbildung 11-9: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse – Ausbreitung des Injektionsmaterials im Boden 147
Abbildung 11-10: Änderungen der Bodenporosität infolge des Injektionsprozesses (t = 15 [min]) 148
Abbildung 12-1: Nachweiskonzept für die Penetrationsinjektion 150
Abbildung 12-2: Auswahl des zur numerischen Strömungssimulation geeigneten Verfahrens 151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Anwendungsgrenzen von Injektionsmaterialien nach DIN EN 12715:2021-01 [51] 9
Tabelle 3-2: Zusammenfassung der von verschiedenen Autoren empfohlenen Injizierbarkeitskennzahlen (In Anlehnung an Markou et al. 2018, S. 3) [111] 10
Tabelle 6-1: Durchlässigkeit von unterschiedlichen Bodenarten – Erfahrungswerte (Boley et al. 2019, S.30) 27
Tabelle 6-2: Absolute und effektive Porosität in Abhängigkeit von der Bodenart (Garling et al. 1979, S. 34) 31
Tabelle 6-3: Parameter des van-Genuchten-Mualem-Modells für unterschiedliche Bodenarten (In Anlehnung an Odenwald 2011, S. 66) [129] 32
Tabelle 7-1: Viskositätskonstanten und Gelierungszeit – Acrylatgel I 47
Tabelle 7-2: Einwirkung der Schergeschwindigkeit und des Plattenabstandes auf die Gelierungszeit – Acrylatgel I 48
Tabelle 7-3: Ermittlung des Rauigkeitswerts des Kartuschengerätes 54
Tabelle 7-4: Zusammenfassung der Bodenparameter 58
Tabelle 7-5: Gesamtporosität basierend auf Erfahrungswerten (C_u=20; $k_f = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$) 63
Tabelle 7-6: Effektive bzw. durchflusswirksame Porosität (n = 0,3; C_u = 20; $k_f = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$) 63
Tabelle 7-7: Entwässerbare Porosität basierend auf Erfahrungswerten ($k_f = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$) 63
Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Abmessungen des Injektionsschirms bei den verschiedenen Injektionsstrategien 93
Tabelle 8-2: Zusammenfassung der mit zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten 101
Tabelle 10-1: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Injektionsmaterial, Bodenart und Spannungsrate 118
Tabelle 10-2: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche 122
Tabelle 10-3: Verhältnis der Zugfestigkeit zur einaxialen Druckfestigkeit 124
Tabelle 10-4: Scherparameter der Böden vor der Injektion 126
Tabelle 10-5: Ergebnisse der triaxialen Druckversuche und Auswertung nach dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium 127
Tabelle 10-6: Mit Hilfe des bodenmechanischen Triaxialgeräts festgestellte Scherparameter für den Injektionskörper aus Acrylatgel I und Sand A 128

Tabelle 10-7: Gegenüberstellung der mit boden- und felsmechanischen Triaxialgeräten ermittelten Scherparameter von Sand A und Injektionskörper (Sand A + Acrylatgel I) nach Mohr-Coulomb 129
Tabelle 10-8: Ermittelte kritische Normalspannungen sowie Einsatztiefen für die untersuchten Injektionskörper 134
Tabelle 10-9: Mit triaxialen Druckversuchen ermittelte Sekanten- und Anfangs-Tangentenmodule 135
Tabelle 10-10: Gegenüberstellung der mit ein- und triaxialen Druckversuchen ermittelten Elastizitätsmodule 136

Verwendete Symbole und Abkürzungen

Lateinische Zeichen

Symbol	Benennung	Einheit
a	Hoek-Brownscher Scherparameter	[-]
a	Rasterpunktabstand	[m]
a	Viskosität-Konstante	[mPa.s]
A	Fläche bzw. Fließquerschnitt	[m²]
b	Empirische Faktor bei den erweiterten Darcy-Gleichung	[-]
b	Rasterpunktabstand	[m]
b	Viskosität-Konstante	[s^{-1}]
c	Dichte-Konstante	[kg/m³]
c	Gelkonzentration	[%]
C	Konstanten der Viskositätsfunktion (Nach Müller-Kirchenbauer)	[-]
c'	Kohäsion	[kN/m²]
c_{min}	Mindestgelkonzentration	[%]
C_u	Ungleichförmigkeitszahl	[-]
d	Abstand zwischen den Zentren der Injektionskörper	[m]
d	Dichte-Konstante	[-]
d	Korndurchmesser bei Ermittlung der Reynoldszahl	[m]
d	Rohrdurchmesser bei Ermittlung der Injektionreichweite	[m]
D	Diffusionskoeffizient	[m²/s]
D^*	Effektive Diffusionskoeffizient	[m²/s]
d/l	Schlankheitsgrad	[-]
$d_{cyl.}$	Zylinderdurchmesser	[m]
d_i	Plattenabstand bei Messungen mit Rheometer	[mm]
D_{Rohr}	Durchschnittlicher Durchmesser der Injektionskomponenten	[m]
dV	Überlappungsvolumen	[m³]
$D_{x\ (bspw.\ 15)}$	Korndurchmesser des Baugrundes bei x % bspw. 15 % Siebdurchgang	[mm]
$d_{x\ (bspw.\ 85)}$	Korndurchmesser innerhalb des Injektionsgutes bei x % bspw. 85 % Siebdurchgang	[mm]
E	Einwirkungen bzw. Beanspruchungen	[ ]
E	Elastizitätsmodul	[N/m²]

E_0	Anfangs-Tangentenmodul	[N/m²]
E_{50}	Sekantenmodul	[N/m²]
E_s	Steifmodul	[N/m²]
E_u	Einaxiales Elastizitätsmodul	[N/m²]
F	Bruchbelastung	[N]
F	Querschnittsfläche	[m²]
F_c	Abminderungsfaktor	[%]
F_i	Kraft	[N]
g	Gravitationskonstante (g=9,81)	[m/s²]
G'	Speichermodul	[Pa]
G"	Verlustmodul	[Pa]
h	Druckhöhe	[m]
H	Energiehöhe	[m]
H	Probenhöhe bzw. Tiefe	[m]
h_i	Injektionslänge	[m]
$H_{krit.}$	Kritische Einsatztiefe	[m]
H_{min}	Min. Injektionsmächtigkeit	[m]
h_v	Verlusthöhe	[m]
h_w	Wassersäule	[mWS]
i	Hydraulische Gefälle	[-]
i_{th}	Spezifische thermische innere Energie	[-]
J	Wärmestromdichte	[W/m²] bzw. [kg·s^{-3}]
K	Permeabilität	[m²]
K	Seitendruckbeiwert	[-]
k bzw. k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
k_B	Boltzmann-Konstante ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$)	[J/K]
l	Injektionsreichweite im Zylinder	[m]
l	Länge des betrachteten Rohrabschnitts	[m]
L	Probenlänge	[m]
m	Exponent	[-]
m	Konstanten der Viskositätsfunktion (Nach Müller-Kirchenbauer)	[-]
M	Biegemoment	[kN·m]
M	Mächtigkeit der Schicht	[m]

m_a	Hoek-Brownscher Scherparameter	[-]
MDV	Mechanischer Druckverlust	[Pa]
n	Empirischer Parameter bei Van-Genuchten-Gleichung	[-]
n	Porenanteil bzw. Porosität	[-]
N	Injizierbarkeitskennzahl	[-]
n^*	Porosität nach der Erstarrung	[-]
n_a	Wiederauffüllbare Porosität	[-]
n_e	Entwässerbare Porosität	[-]
n_f	Effektive bzw. durchflusswirksame Porosität	[-]
n_{sp}	Speichernutzbare oder nutzbare Porosität	[-]
n_v	Grad der Anisotropie	[-]
p	Überdruck	[Pa]
P_I	Injektionsdruck	[Pa]
P_L	Luftdruck	[Pa]
P_Ψ	Saugspannung	[Pa]
q	Streckenlast	[kN/m]
q	Volumenstrom bzw. Injektionsrat	[m³/s]
Q	Durchfluss	[m³/s]
Q	Querkraft	[kN]
Q^c	Chemiequellterm	[ ]
q_{max}	Maximale Fördermenge	[m³/s]
Q^r	Strahlungsquellterm	[ ]
Q^s	Verdampfungsquellterm	[ ]
r bzw. r_{Inj}	Injektionsradius (Vertikal)	[m]
R	Widerstände	[ ]
R bzw. R_{Inj}	Injektionsradius (Horizontal)	[m]
R_0	Hydrodynamischer Radius der diffundierenden Teilchen	[m]
R_e	Reynolds-Zahl	[-]
r_L	Radius der Injektionslanze	[m]
r_{Rohr}	Radius des Injektionsrohres	[m]
s	Hoek-Brownscher Scherparameter	[-]
S	Spannungstensor	[N/m²]
S_1	Sättigung zum Zeitpunkt der Erstarrung	[%]
S_e	Effektive Sättigung	[%]

S_r	Sättigungsgrad	[%]
T	Temperatur	[°C] bzw. [°K]
t_{CR}	Kritische Zeit	[s]
t_e	Erstarrungszeit	[s]
t_G	Kippzeit bzw. Gelierungszeit	[s]
t_{SG}	Sol-/Gel-Übergangszeit	[s]
u	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
Ue	Überlappungskoeffizient	[%]
u_f	Porendruck	[Pa]
UVP	Übersetzungsverhältnis der Pumpe	[-]
v	Mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v_a	Ausbreitungs bzw. Abstandsgeschwindigkeit	[m/s]
vf	Filtergeschwindigkeit	[m/s]
V_G	Gesamtvolumen	[m³]
V_H	Hohlraumvolumen	[m³]
V_{Inj}	Volumen des Injektionsmaterials	[m³]
V_P	Für die GW-Strömung verfügbares Hohlraumvolumen	[m³]
W	Empirische Faktor bei den erweiterten Darcy-Gleichung	[-]
x	x-Koordinate	[m]
y	y-Koordinate	[m]
z	Relative Druckhöhe / z-Koordinate	[m]

Griechische Zeichen

α	Empirischer Parameter bei Van-Genuchten-Gleichung	[-]
γ	Bodenwichte	[kN/m³]
γ	Deformationsamplitude	[%]
γ	Teilsicherheitsbeiwert	[-]
γ'	Auftriebswichte	[kN/m³]
γ'	Schergeschwindigkeit bzw. -rate	[s^{-1}]
Δh	Hydromechanische Druckdifferenz	[m]
Δl	Eindringdistanz	[m]
Δr	Querverformung	[m]
ΔP_v	Hydraulischer Druckverlust	[Pa]
ε	Dehnung	[%]

η	Dämpfungskonstante bzw. Viskosität	[Pa.s]
θ	Tatsächlicher Wassergehalt	[-]
θ_r	Residualer Wassergehalt	[-]
θ_s	Wassergehalt bei Sättigung	[-]
λ	Dimensionsloser Widerstandsbeiwert	[-]
μ	Dynamische Viskosität	[mPa.s]
μ_0	Viskosität-Konstante	[mPa.s]
ν	Poissonzahl	[-]
ξ	Rauhigkeitswert	[-]
π	Kreiszahl	[-]
ρ	Dichte	[kg/m³]
ρ_{Ende}	Dichte-Konstante	[kg/m³]
σ	Spannung	[N/m²]
$\sigma_{1,3}$	Hauptspannungen	[N/m²]
σ_F	Fließgrenze	[N/m²]
σ_n	Normalspannung	[N/m²]
$\sigma_{n,krit.}$	Kritische Normalspannung	[N/m²]
σ_t	Zugfestigkeit	[N/m²]
$\sigma_{u\ bzw.\ ci}$	Einaxiale Druckfestigkeit	[N/m²]
$\sigma_{u(2)}$	Abgeminderte einaxiale Druckfestigkeit	[N/m²]
τ	Scherspannung	[N/m²]
τ	Tortuositätsfaktor	[-]
τ_f	Scherfestigkeit	[N/m²]
φ	Reibungswinkel	[°]
ω	Kreisfrequenz	[rad/s]

Mathematische Zeichen

∇p	Druckgradient	[-]

Indizes

cal.	Ermittelt (calculated)
cr	Kriechen (creep)
d	Bemessungswert (design)
e bzw. el	Elastisch
erf.	Erforderlich

E	Einwirkungen
F	Flüssigkeit
grav	Gravitation
h	Horizontal
H	Horizontal
HB	Hoek–Brown
i	Schicht- bzw. Stepnummer
I	Injektionsmaterial
k	Charakteristisch
krit.	Kritisch
MC	Mohr–Coulomb
p bzw. pl	Plastisch
R	Widerstände (Resistances)
t	Zeit (time)
tot	Gesamt (total)
T	Temperatur
v	Vertikal bzw. Volumetrisch
V	Vertikal
w	Wasser

1 Einleitung und Zielsetzung

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, die Bodeneigenschaften zu verbessern, jedoch nur wenige genügen den Forderungen nach Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit und Umweltfreundlichkeit. Die Injektion im Tiefbau bezieht sich auf das Einspritzen von pumpbaren Materialien in den Boden oder geklüfteten Fels, um deren physikalische Eigenschaften zu ändern. Durch Baugrundinjektion können folgende Ziele erreicht werden:

- Erhöhung der Steifigkeit
- Erhöhung der Kohäsion bzw. Scherfestigkeit
- Reduzierung der Durchlässigkeit
- Reduzierung der Verformbarkeit bzw. Setzungen
- Hohlraumverfüllung
- Hebungsinjektionen

Der Erfolg eines Injektionsvorgangs hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehören die richtige Analyse des Problems und die Auswahl des effektivsten Injektionsmateriales sowie der geeigneten Injektionsmethode, die letztendlich zur Herstellung des Injektionskörpers an der richtigen Stelle und im richtigen Ausmaß führen. Viele Injektionsmaßnahmen werden im Wesentlichen unter Nutzung der langjährigen empirischen Erfahrungen geplant und ausgeführt. Die empirischen Ansätze haben überwiegend keinen vertieften theoretischen Hintergrund und liefern daher auch keine reproduzierbaren Algorithmen, die wiederum für eine zuverlässige Prognose im Rahmen der Planung und Entwicklung von Injektionsmaßnahmen und -verfahren dienen könnten. Für Injektionen im Baugrund, insbesondere für Penetrationsinjektionen, existieren bis dato keine validierten Bemessungsverfahren. Darüber hinaus fehlt es weiterhin an Sicherheitskonzepten für die Ausführung und Bemessung von Injektionen. Dies unterscheidet diese in hohem Maße sicherheitsrelevanten Maßnahmen und Bauteile von anderen geotechnischen Konstruktionen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an.

Wesentliche Normen für die Ausführung von Injektionen sind:

- DIN 4093, Einpressungen in Untergrund und Bauwerke [49]
- DIN EN 12715, Injektionen [51]
- DIN 19700 Teile 10 bis 15, Stauanlagen [41–46]

Diese Arbeit besteht aus 13 Kapiteln. Nach dem Kapitel „Einleitung und Zielsetzung“ wird die Entstehungsgeschichte des Injektionsverfahrens in Kapitel 2 vorgestellt. Der aktuelle Wissensstand zum Thema Penetrationsinjektionen wird in Kapitel 3 zusammengefasst. Die

üblichen Injektionsmaterialien und -techniken werden in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. In Kapitel 6 werden die Parameter zusammengefasst, die die Injektionsfähigkeit von Boden bestimmen. Die rheologischen Eigenschaften der Injektionsmaterialien, Pumpparameter sowie Injektionsreichweite in verschiedenen Bodenarten werden in Kapitel 7 experimentell untersucht. Unter Nutzung von experimentellen und theoretischen Untersuchungen wird eine physikalisch abgesicherte Prognose des Ausbreitungsverhaltens von Injektionsgut erarbeitet (Kapitel 8). Durch eine sichere Bemessung von Injektionsmaßnahmen wird der erforderliche Materialverbrauch optimiert. Dies ist die Voraussetzung für eine Optimierung in ökonomischer und ökologischer Hinsicht.

Die Injektion verändert die mechanischen Eigenschaften des Bodens. In Kapitel 9 werden die verschiedenen Materialverhalten vorgestellt und in Kapitel 10 werden die Eigenschaften der hergestellten Injektionskörper experimentell untersucht.

Der Injektionsvorgang ist häufig ein thermisch-hydrologisch-mechanischer Prozess. Basierend auf diesem Wissen wird in Kapitel 11 ein gekoppeltes thermisch-hydrologisch-mechanisches mehrphasiges Strömungssimulationsverfahren (CFD-THM) entwickelt und anhand eines Beispiels vorgestellt.

Unter Nutzung von experimentellen und theoretischen Untersuchungen wird eine physikalisch abgesicherte Prognose des Ausbreitungsverhaltens von Injektionsgut erarbeitet. Die sicherheitsrelevanten Hinweise zur Injektionsplanung und -ausführung werden in Kapitel 12 zusammengefasst. Schließlich enthält Kapitel 13 die Schlussfolgerungen, die auf den in den vorhergehenden Kapiteln erzielten Ergebnissen basieren, und es werden Vorschläge und Empfehlungen für weitere Studien auf diesem Gebiet gegeben.

2 Geschichte der Injektion

Der französische Ingenieur Charles Berigny setzte im Jahr 1802 zum ersten Mal Feststoffinjektionen im Baugrund ein. Mit dieser Methode erhöhte er die Bodenfestigkeit im Bereich von gefährdeten Schleusen. Berigny führte erfolgreich Reparaturen an den Schleusen in Treport, Saint Valery und Le Havre durch. Zwischen 1802 und 1809 beschäftigte er sich erstmals mit der Injektion des Hafenbeckens in Dieppe, um den Wasserzufluss zu verringern. Im Jahr 1820 injizierte L. Ch. Mary einen hydraulischen Mörtel im St. Quentin-Kanal. Für diesen Zweck nutzte er das gleiche Verfahren wie Berigny. [30, 177]

Charrie beschrieb 1831 die beim Bau einer Schleuse am Kanal zwischen Rhone und Rhein in der Nähe von Huningue eingesetzte Injektionsmethode: Eine Betonsohle wurde als Flächengründung unter Wasser platziert. Dann wurde ein Mörtel, bestehend aus drei Teilen Zement und einem Teil hydraulischem Kalk, unter das Fundament eingespritzt. Charrie empfahl, den Injektionsbereich mit zwei Öffnungen zu versehen: eine zum Einspritzen des Injektionsmaterials und eine zum Ablassen des Wassers. [177]

Raynal veröffentlichte im Jahr 1837 seine Arbeit über die Verwendung von Injektionsmaterialien zur Reparatur von Mauerwerk. Als Injektionsmaterial verwendete er eine hydraulische Kalksuspension. Der Kalk wurde in einem luftdichten Behälter gelagert und vor dem Mischen gemahlen und gesiebt. Seine Pumpe bestand aus einem 70 [cm] langem Ulmenholz. Es war über den größten Teil seiner Länge mit einem Durchmesser von 6 [cm] durchbohrt, um den Kolben aufzunehmen. Die verbleibende Länge wurde mit einem Durchmesser von 3 [cm] durchbohrt. Das untere Ende war wie eine kleine Düse, die in das Fugenloch passte. Durch die Fortbewegung des Kolbens wurde das Injektionsmaterial in den Boden eingespritzt. [86]

Im Jahr 1839 erläuterte Beaudemoulin die zur Verstärkung von Brückenpfeilern eingesetzte Injektionsmethode. Eine Brücke in Tours erfuhr während des Baus große Setzungen – unter der Brücke wurden große Hohlräume entdeckt. Durch die Injektion eines Mörtels aus hydraulischem Kalk wurden die Brückenpfeiler stabilisiert. [177]

Die Injektionstechnik wird seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in deutschen Bau- und Bergbauprojekten eingesetzt. Die erste bekannte Injektionsmaßnahme kam 1864 in Deutschland zum Einsatz: An einem der Rheinpreußen-Bergwerksschächte bei Homburg wurde ein Bruch im Bereich der Mauerwerksauskleidung durch Einbringen von Zementmilch von der Oberfläche mit Hilfe einer kleinen Handpumpe abgedichtet. Der

Forsttunnel der Schwarzwaldbahn (1872) zählt ebenfalls zu den alten bekannten Beispielen für die Injektionsmaßnahme in Deutschland. [86, 99]

Im Jahr 1876 setzte T. Hawksley zum ersten Mal eine Zementsuspension für die Abdichtung der Felsklüfte unter Erddämmen ein. Er bohrte eine Reihe von Löchern in den Fels und injizierte eine Zementsuspension. [86]

Im Jahr 1887 versuchte Jeziovsky, Sand durch Verfugen mit zwei Lösungen aus einem oder zwei nahegelegenen Bohrlöchern zu verfestigen. Das Vergussmaterial bestand aus Wasserglas und Calciumchlorid. Die Gelierung der beiden Substanzen erfolgt sofort bei Kontakt. 1910 wurde eine chemische Verbindung auf Basis von Lignochrome patentiert. 1911 erhielt Francois ein Patent für eine chemische Verbindung aus Wasserglas und Aluminiumsulfat. Er verwendete diese Verbindung zur Verfestigung und Abdichtung von feinkörnigem Sandstein. Die erste zuverlässige Methode zur Sandverfestigung wurde vom niederländischen Bergbauingenieur Joosten vorgelegt, der 1925 ein Patent erhielt. Er verwendete Natriumsilikat und eine starke elektrolytische Salzlösung. Der Prozess besteht darin, zwei Chemikalien nacheinander zu injizieren. Diese reagieren in situ unter Bildung eines Gels. Joostens Methode fand Anwendung in ganz Deutschland. [177]

Natriumsilikat war von der ersten Verwendung im 19. Jahrhundert bis in die frühen 1950er-Jahre ein Synonym für chemische Injektion – alle in diesem Zeitraum verwendeten chemischen Injektionsmaterialien basierten auf dieser Substanz. Später wurden mehrere silikathaltige Injektionsmaterialien entwickelt und eingesetzt. Zwischen 1930 und 1940 wurden mehrere Injektionsarbeiten mit Natriumbikarbonat, Natriumaluminat, Salzsäure und Kupfersulfat als Reagenzien erfolgreich durchgeführt. In Japan wurde Anfang der 1960er-Jahre ein Injektionsmaterial auf Acrylamidbasis und einige Jahre später wurde ein Polyurethan, das Grundwasser als Reaktanten verwendet, vermarktet. [92]

Als Härter wurde in Deutschland überwiegend eine Natriumaluminat-Lösung verwendet. Dies führte dazu, dass der pH-Wert im Grundwasser auf einen Wert über 10 anstieg, was neben der kritischen Sicht der enthaltenden Anionen dazu geführt hat, dass dieser Stoff in den letzten Jahren aus ökologischen Gründen vielfach nicht mehr genehmigungsfähig war. Die Verwendung von Injektionsmaterialien auf Polyurethan- und Methacrylatbasis hat in den letzten zehn Jahren erheblich zugenommen. Die Untersuchung solcher Injektionsmaterialien ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

3 Stand des Wissens

3.1 Einordnung der Penetrationsinjektion in die Baugrundverbesserungsmethoden

Die Bodenstruktur und -eigenschaften bedingen Einschränkungen und Probleme beim Bau geotechnischer Konstruktionen. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Bauarbeiten auf problematischen Böden gibt es viele kreative Möglichkeiten, die Bodenstruktur zu verbessern. In der Geotechnik wird der Prozess, der zur Erhöhung der Bodenfestigkeit und -elastizität oder zur Verringerung der Durchlässigkeit führt, als Bodenverbesserung bezeichnet.

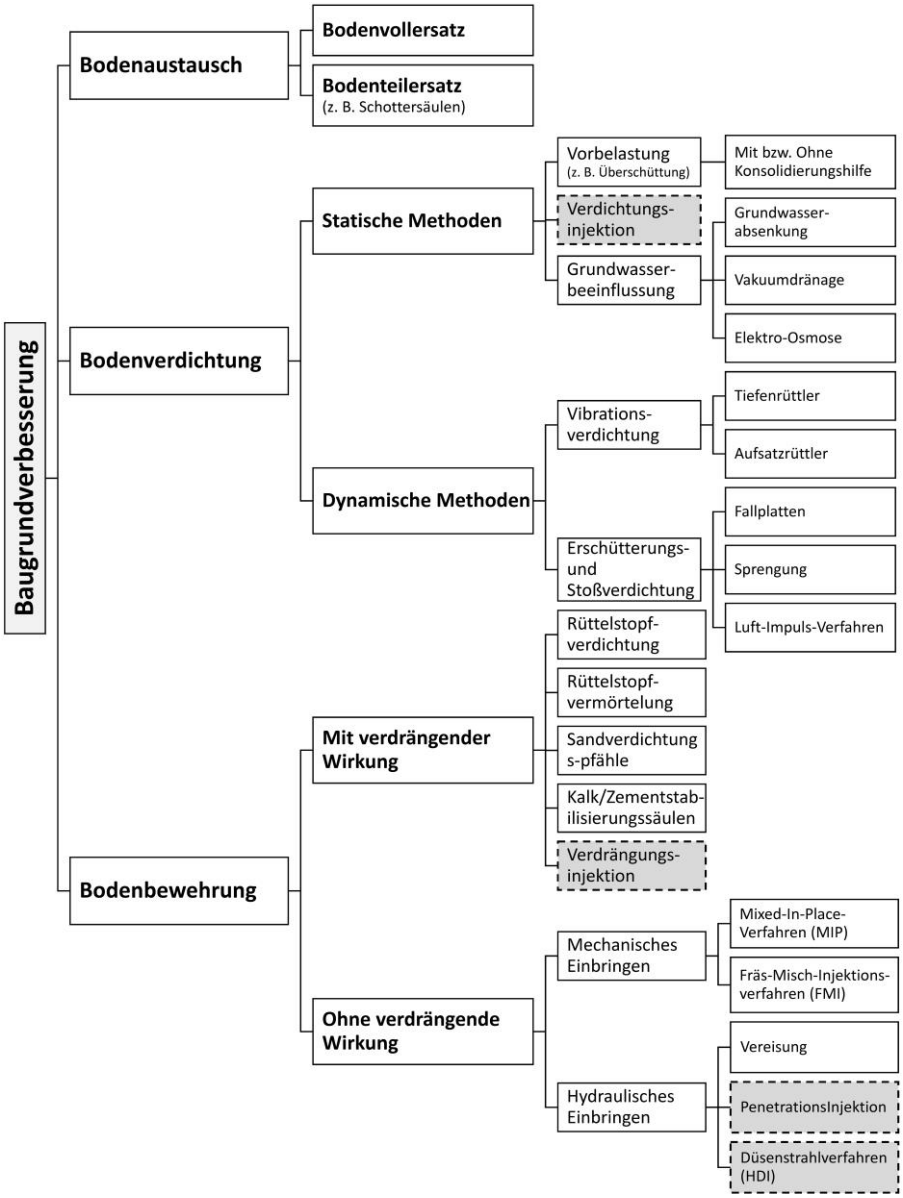


Abbildung 3-1: Einordnung der Injektionsverfahren in die Baugrundverbesserungsmethoden (Eigene Darstellung nach [2, 37, 171])

Bodenaustausch, -verdichtung und -bewehrung sind die wesentlichen Verfahren zur Verbesserung des Bodens. Die bekannten Baugrundverbesserungsmethoden sind in Abbildung 3-1 zusammengefasst.

Der Ersatz von herkömmlichen Bodenverbesserungstechniken durch innovative Verbesserungstechniken wie Injektionsverfahren bringt wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Die Injektionsverfahren können, je nach Wirkungsweise, in die zwei Kategorien Bodenverdichtung und Bodenbewehrung eingeordnet werden. Injektionsverfahren, die im Bereich Tiefbau verwendet werden, können in die folgenden Gruppen unterschieden werden (siehe Abbildung 3-2):

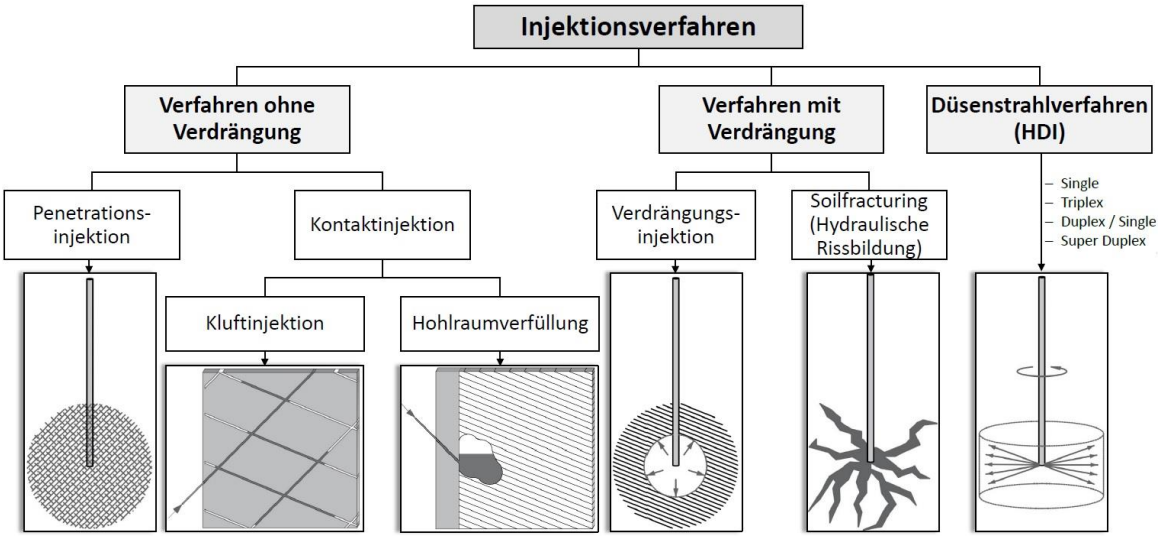


Abbildung 3-2: Arten der Baugrundinjektion

1. **<u>Penetrationsinjektion:</u>** Nach DIN EN 12715 wird der Ersatz des natürlichen Porenwassers bzw. von Luft in den vorhandenen zugänglichen Hohlräumen des Baugrundes durch eine Flüssigkeit oder Mörtel ohne signifikante Baugrundverdrängung als verdrängungsfreie Injektion, Poreninjektion oder Penetrationsinjektion bezeichnet. Das Korngerüst bleibt bei einer Penetrationsinjektion in der ursprünglichen Form erhalten. [51]
2. **<u>Kontaktinjektionen:</u>** Durch eine Kontaktinjektion wird die Kraftübertragung zwischen Bau- bzw. Baugrundelementen ermöglicht. Die Kluftinjektion und Hohlraumverfüllung zählen zu den Kontaktinjektionen.
   2.1. <u>Kluftinjektion:</u> Im Fels naturmäßig vorhandenene Klüfte werden bei der Kluftinjektion mit einem Injektionsmaterial verfüllt. [127]
   2.2. <u>Hohlraumverfüllung:</u> Bei einer Hohlraumverfüllung werden die naturmäßig vorhandenen sowie durch die Baumaßnahme hervorgerufenen Hohlräume mit

einem Injektionsmaterial bzw. Mörtel verfüllt. Als Beispiel kann die Ringspaltverpressung bei Tübbing-Auskleidungen genannt werden. [72]

3. **Verfahren mit Verdrängung:** Durch die Verdrängungsinjektion sowie Soilfracturing wird ein Verdrängungsmechanismus ausgebildet. [97]
   3.1. Verdrängungsinjektion: Bei einer Verdrängungsinjektion wird der Boden durch den Injektionsvorgang verformt, verdichtet oder verdrängt.
   3.2. Soilfracturing (hydraulische Rissbildung): Bei Soilfracturing werden im Boden durch den Injektionsdruck geöffnete Fließwege mit Injektionsmaterialien ausgefüllt. Durch diese Methode kann ebenfalls eine Hebung von Bauwerken erfolgen, weswegen diese Methode auch ‚Hebungsinjektion' oder ‚Kompensationsinjektion' genannt wird. Der Begriff ‚Kontaktinjektion' bei der Hebungsinjektion steht jedoch für den Prozess, bei dem der Spannungszustand im Boden verändert wird.
4. **Düsenstrahlverfahren (DSV):** Das Düsenstrahlverfahren wird auch als Jet-Grouting, Soilcrete und Hochdruckinjektion (HDI) bezeichnet. Bei diesem Verfahren wird der Boden unter Hochdruck (bis zu 600 Bar an der Pumpe) mit einer zementhaltigen Bindemittelsuspension vermischt. Das Korngerüst des Bodens bleibt nicht mehr in der ursprünglichen Form erhalten. [93]

Nachhaltigkeit bei Bodenverbesserungsmaßnahmen wird definiert als die Fähigkeit, im Laufe der Zeit zu überleben und ihre Funktionalität zu erhalten, ohne dass die natürlichen Ressourcen erschöpft werden oder schädliche Auswirkungen auf die Umwelt entstehen [118]. Ein umfassender Ansatz unter Berücksichtigung sozialer, wirtschaftlicher und ökologischer Werte ist für die Entwicklung nachhaltiger Bodenverbesserungsmethoden von wesentlicher Bedeutung [139].

3.2 Forschungen zur Injizierbarkeit von Boden

Nach DIN EN 12715 wird die Eigenschaft eines Baugrundes, Injektionsgut aufzunehmen, als ‚Injizierbarkeit' bezeichnet [51]. Wie aus dieser Definition hervorgeht, ist die Injizierbarkeit ein qualitativer und nicht messbarer Parameter. Im Gegensatz dazu ist die Injektionsreichweite eine quantitative Eigenschaft und eignet sich besser zum Vergleichen der Injektionsfähigkeit verschiedener Materialien. Die Strecke, die von der Austrittsstelle betrachtet wird, auf der der Boden verfestigt wird, wird Reichweite genannt (DIN 4093:2015-11) [49].

Es gibt mehrere Merkmale, die für die Beurteilung der Einpressfähigkeit der Injektionsmaterialien eingesetzt werden. Drei häufig eingesetzte Merkmale zur Beurteilung

der Einpressfähigkeit der Injektionsmaterialien sind die Korngrößenverteilung, die Porengeometrie sowie die Durchlässigkeit des zu injizierenden Bodens.

Die Durchlässigkeit des zu injizierenden Bodens ist das am häufigsten verwendete Merkmal für die Beurteilung der Einpressfähigkeit der Injektionsmaterialien. Cambefort hat im Jahr 1964 ein Diagramm zur Darstellung der Anwendungsgrenzen der verschiedenen Mischungen vorgestellt. Die von ihm festgelegten Grenzen der Eindringfähigkeit der Injektionsmaterialien in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes und von dem mittleren Korndurchmesser des Injektionsgutes sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Das Cambefort-Diagramm liefert zwar brauchbare Informationen, hat jedoch folgende Einschränkungen [30]:

- Der Einfluss der Ungleichförmigkeitszahl wird nicht berücksichtigt.
- Die Durchlässigkeit des Baugrundes gegenüber Injektionsmitteln ist nicht identisch mit derjenigen gegenüber Wasser (Injektionsmittel haben im Gegensatz zu Wasser eine andere, dazu noch zeitabhängige Viskosität, eine Fließgrenze sowie eine andere Dichte).
- Der mittlere Korndurchmesser des Injektionsgutes kann nur für partikuläre Flüssigkeiten wie Zement, Tonzement und Bentonit sowie bedingt für Emulsionen definiert werden und ist für Silikat- und Acrylatgele sowie Harze nicht definierbar.

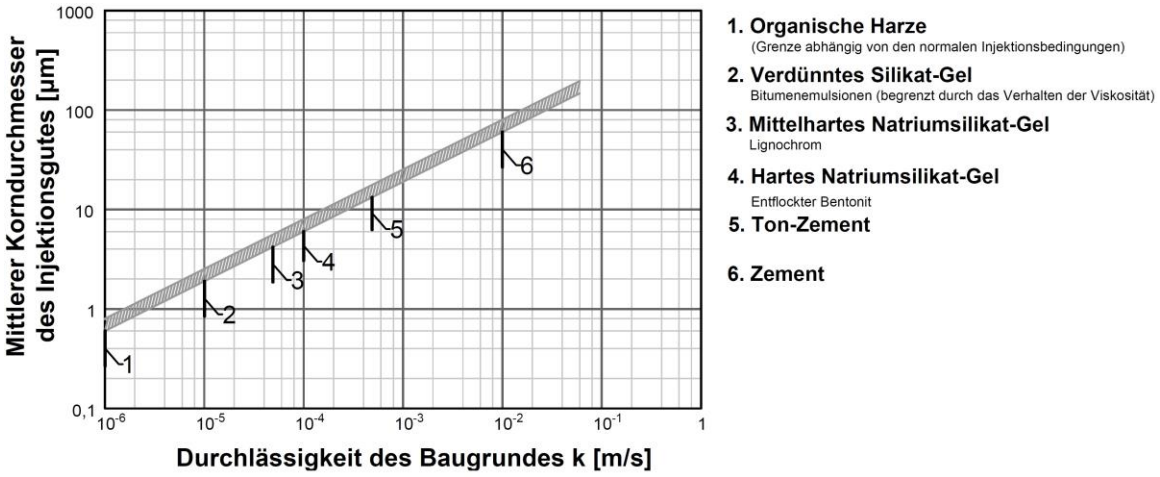


Abbildung 3-3: Eindringfähigkeit von Injektionsgut in Lockergestein nach Cambefort (In Anlehnung an Kutzner 1991, S. 32)

DIN EN 12715 macht Angaben zu den Einsatzmöglichkeiten verschiedener Injektionsmittel in Abhängigkeit von der Bodenart (Kies und Sand) bzw. des Durchlässigkeitsbeiwertes. Diese Angaben sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Anwendungsgrenzen von Injektionsmaterialien nach DIN EN 12715:2021-01 [51]

Bereich	**Verdrängungsfreie Injektion**	**Verdrängungsinjektion**
Kies, grober Sand und sandiger Kies **k** > 5 × 10^{-3} m/s	Reine Zementsuspensionen, Suspensionen auf Zementbasis	Suspensionen auf Zementbasis, Mörtel
Sand 5 × 10^{-5} m/s < **k** < 5 × 10^{-3} m/s	Feinstbindemittel-Suspensionen, Lösungen	
Mittel- bis Feinsand 5 × 10^{-6} m/s < **k** < 1 × 10^{-4} m/s	Feinstbindemittel-Suspensionen, Lösungen, spezielle chemische Produkte	

Das zweithäufigste Merkmal für die Beurteilung der Einpressfähigkeit der Injektionsmaterialien ist die Korngrößenverteilung des Baugrundes. Für die Beurteilung der Einpressfähigkeit von Lockergesteinen haben zahlreiche Autoren, u. a. Mitchell (1981), Kutzner (1991), Krizek et al. (1992), Incecik et al. (1995), Axelsson et al. (2009), Miltiadou-Fezans (2013) sowie Markou et al. (2018) versucht, Beziehungen zwischen der Injizierbarkeit des Bodens und den Korngrößen des Injektionsgutes zu finden. Nach Kutzner (1991) ist ein Baugrund injizierbar, wenn:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \geq 40 \tag{3-1}$$

Nach DIN EN 12715 kann für Lockerböden das von Kutzner vorgestellte Kriterium, alternativ auch in der von Incecik et al. (1995) modifizierten Form, angewendet werden, um damit die Injizierbarkeit des Injektionsgutes abzuschätzen. Die genannten Verhältnisse werden als Injizierbarkeitskennzahl bezeichnet. In Tabelle 3-2 sind die von verschiedenen Autoren empfohlenen Injizierbarkeitskennzahlen zusammengefasst.

Für die Beurteilung der Einpressfähigkeit von Lockergesteinen hatten zahlreiche Experimentatoren versucht, Beziehungen zwischen den Korngrößen des Injektionsgutes und der Korngrößenverteilung zu finden. Anhand von Erfahrungen aus der Praxis sowie aus Ergebnissen der Forschung werden die in Abbildung 3-4 dargestellten Anwendungsgrenzen für verschiedene Injektionsmittel definiert [99]. Die Eigenschaften des bei Experimenten eingesetzten Bodens sind nicht immer identisch, weshalb die festgestellten Anwendungsgrenzen verschiedener Verfasser gewisse Abweichungen haben.

Tabelle 3-2: Zusammenfassung der von verschiedenen Autoren empfohlenen Injizierbarkeitskennzahlen (In Anlehnung an Markou et al. 2018, S. 3)

Herausgeber bzw. Forscher	**Jahr**	**Gleichung**	**Bedingung**	
			Injizierbar	Nicht injizierbar
Mitchell	1981	$N_1 = \frac{D_{15}}{d_{85}}$; $N_2 = \frac{D_{10}}{d_{95}}$	$N_1 > 25$ und $N_2 > 11$	$N_1 < 11$ und $N_2 < 6$
Kutzner	1991	$N_1 = \frac{D_{15}}{d_{85}}$	$N_1 > 40$	–
Krizek, Liao und Borden	1992	$N_1 = \frac{D_{15}}{d_{85}}$; $N_2 = \frac{D_{10}}{d_{95}}$	$N_1 > 15$ und $N_2 > 8$	–
Incecik und Ceren	1995	$N_3 = \frac{D_{10}}{d_{90}}$	$N_3 > 10$	–
Huang, Fan und Yang	2007	$N_1 = \frac{D_{15}}{d_{85}}$; $N_2 = \frac{D_{10}}{d_{95}}$	$N_1 > 9$ oder $N_2 > 4$	–
Axelsson, Gustafson und Fransson	2009	$N_4 = \frac{0{,}15 \cdot D_{50}}{d_{95}}$	$N_4 > 5$ Filtration für $3 < N_4 < 5$	$N_4 \leq 3$
Huang, Fan, Liao und Lien	2013	$N_1 = \frac{D_{15}}{d_{85}}$; $N_2 = \frac{D_{10}}{d_{95}}$	$N_1 > 3{,}125$ und $N_2 > 1{,}5$	$N_1 < 3{,}125$ und $N_2 < 1{,}5$
Miltiadou-Fezans und Tassios	2013	$N_5 \approx \frac{0{,}15 \cdot D_{15}}{d_{85}}$; $N_6 \approx \frac{0{,}15 \cdot D_{15}}{d_{99}}$	$N_5 > 5$ und $N_6 > 2$	–
Markou, Christodoulou, Petala und Atmatzidis	2018	$C_{u,25} = \frac{D_{15}}{D_{2,5}}$; $N_f = \frac{D_{2,5}}{d_{85}}$	**Für Sande mit $C_{u,25} < 1{,}6$**	
			$N_f > 27$	$N_f < 27$
			Für Sande mit $C_{u,25} > 1{,}6$	
			$N_f > 24$ oder $9 < N_f < 24$ und $W/C \geq 2$	$N_f < 9$ oder $9 < N_f < 24$ und $W/C < 2$

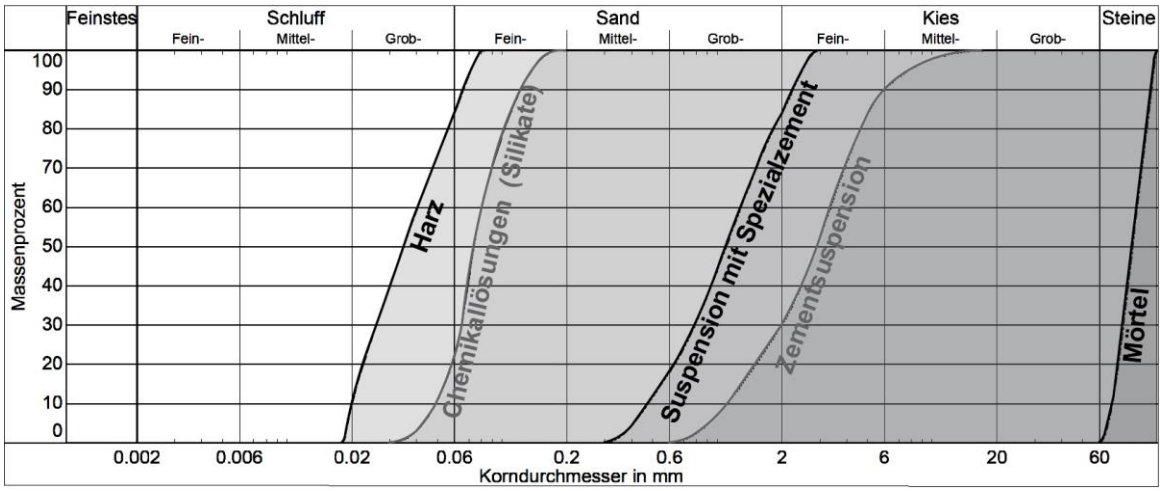


Abbildung 3-4: Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln (Eigene Darstellung nach Kutzner 1991, S. 34)

Die Porengeometrie des Baugrundes ist das nächste Merkmal für die Beurteilung der Einpressfähigkeit der Injektionsmaterialien. Die Porengrößen sind von der Körnungsverteilung und der Kornform abhängig. Das von Silveira (1965) und Schulze (1993) entwickelte Modell ermöglicht eine Aussage über die Porengrößen. Anhand dieses

Modells kann die Injizierbarkeit des Bodens beurteilt werden. Hierbei wird angenommen, dass der Boden dicht gelagert ist. Der durch drei sich berührende kugelförmige Körner gebildete Zwischenraum wird als ‚Porenengstelle' bezeichnet (Abbildung 3-5). [153, 161]

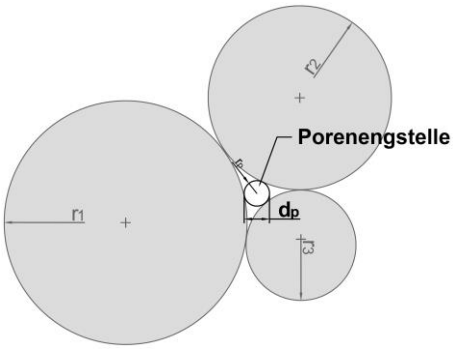


Abbildung 3-5: Porenengstelle zwischen den drei sich berührenden Körnern (Eigene Darstellung nach Schulze 1993, S. 110)

In der folgenden Abbildung wird die Porenengstellenverteilungskurve für den Boden mit dargestellter Korngrößenverteilung abgebildet:

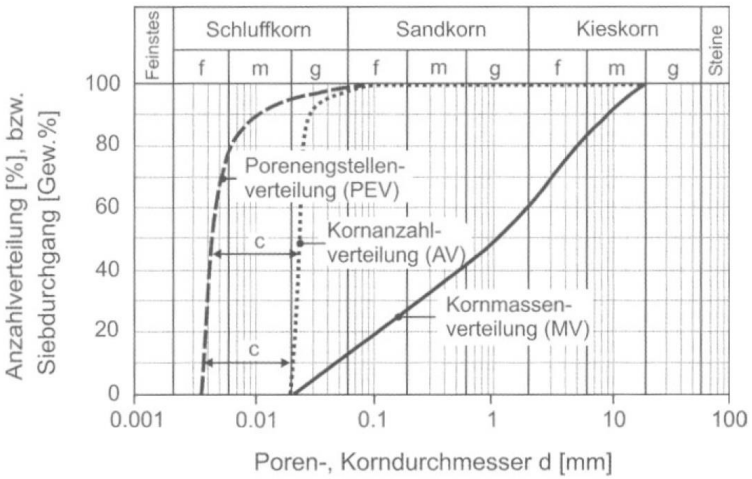


Abbildung 3-6: Korngrößen- und Porenengstellenverteilung (Schulze 1993, S. 113)

Nach Schulze (1993) ist Boden injizierbar, wenn die Körnungslinie der im Injektionsmittel enthaltenen Feststoffe rechts von der Porenengstellenverteilungskurve (PEV) liegt. [153]

Eine kugelförmige Ausbreitung der Injektionsmaterialien lässt sich mittels des von Müller-Kirchenbauer (1968) vorgestellten Modells ermitteln (Gleichung (3-2)). [122]

$$r = \sqrt[3]{\frac{h \cdot k_0 \cdot 3r_L}{n} \cdot t_e \cdot \left(1 - \frac{C}{m+1}\right)} \tag{3-2}$$

Das von Müller-Kirchenbauer (1968) entwickelte Modell ermöglicht eine Aussage über die Reichweite der chemischen Injektionsmaterialien mit newtonschen Eigenschaften. Bei diesem rein geometrischen Modell werden die Saugspannung, der Druckverlauf im System und die Fördermenge der Pumpe nicht berücksichtigt. Es zeigt sich, dass hierdurch eine große Unschärfe in der Prognose entsteht.

4 Injektionsmaterialien

Fließfähiges und erstarrfähiges Material, das zum Füllen von Klüften, Rissen, Poren sowie Hohlräumen verwendet wird, wird Injektionsmaterial genannt. Durch die Injektion werden die physikalischen Eigenschaften von Boden bzw. Fels verändert. Art und Ausmaß der Veränderungen nach der Injektion hängen vom eingesetzten Injektionsmaterial ab.

Injektionsmaterialien können nach unterschiedlichen Kriterien gruppiert werden. In Bezug auf die Molekülstruktur können sie in die drei Hauptkategorien organische, mineralische und chemische Materialien unterteilt werden. Eine detaillierte Unterteilung der praxisüblichen Injektionsmaterialien ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

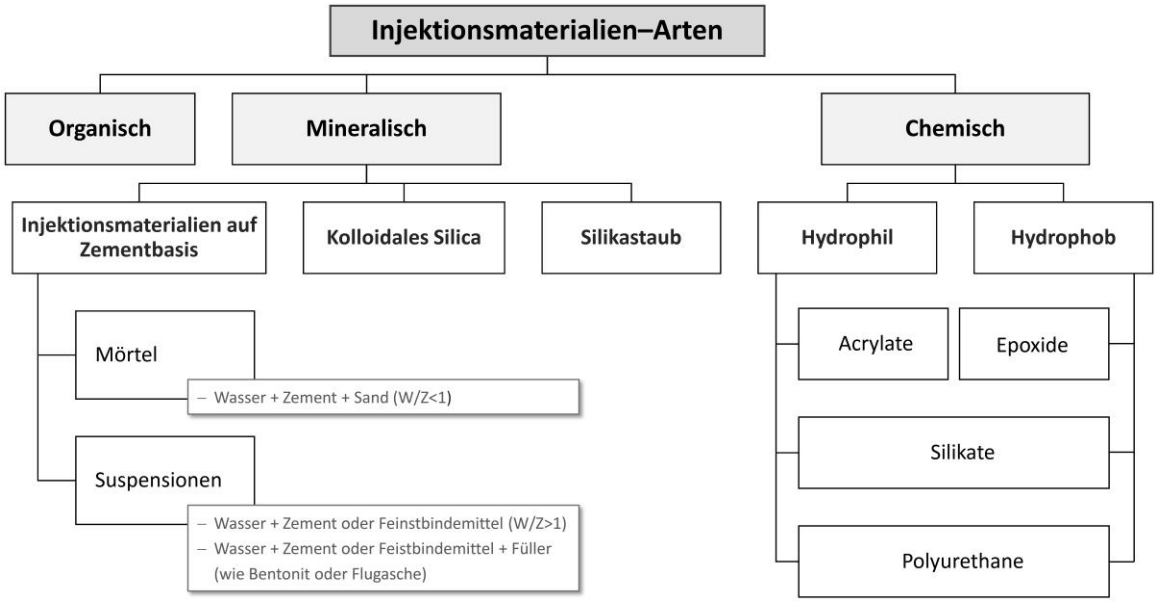


Abbildung 4-1: Unterteilung der Injektionsmaterialien in Bezug auf die Molekülstruktur [9, 92, 103, 180]

Die Injektionsmaterialien werden hinsichtlich ihrer Löslichkeit in Wasser in zwei Gruppen – hydrophob und hydrophil – eingeteilt. Der griechische Begriff ‚hydrophob‘ bedeutet ‚Wasser abweisend‘. Die hydrophoben Substanzen bestehen aus unpolaren Molekülen und lösen sich daher nicht in polaren Lösemitteln wie Wasser. Im Gegensatz dazu bestehen hydrophile (wasserfreundliche) Substanzen aus polaren Molekülen und lösen sich in Wasser. Beispielsweise ist Epoxidharz hydrophob und Acrylatgel hydrophil. [102]

4.1 Organische Injektionsmaterialien

Organische Materialien bestehen aus Substanzen mit natürlichem Ursprung. Bei der Herstellung der organischen Materialeren dürfen keine Chemikalien oder Verfahren

verwendet werden, die die natürlichen Inhaltsstoffe verändern. Auf dem Gebiet der organischen Chemie wird ein Material als organisch bezeichnet, wenn dessen chemische Zusammensetzung Kohlenstoffverbindungen in der Form von Makromolekülen enthält [135].

Jeder Feststoff hat unter bestimmten Bedingungen die Fähigkeit, Hohlräume zu verstopfen. Beispielsweise wurden in der Vergangenheit organische Materialien wie Kleie, Haferhüllen, Stroh und Sägemehl als Verfüllungsmaterial verwendet. Alle genannten Materialien sind Feststoffe, die sich nicht in Wasser lösen. Um eine Suspension zu bilden, müssen sie mit Wasser gemischt werden. Wasser wirkt als Vehikel, das feste Partikel in Hohlräume transportiert. [13]

4.2 Mineralische Injektionsmaterialien

Ein anorganischer nichtmetallischer Feststoff, der aus Kristallen besteht, wird als mineralisches Material betrachtet [135]. Kommen anorganische Bindemittel mit Wasser oder wässrigen Lösungen in Kontakt, treten chemische Reaktionen auf und in der Folge werden körnige Materialien zu einem Feststoff zusammengebunden [80]. Injektionsmaterialien auf Zementbasis, kolloidales Silica und Silikastaub zählen zu den mineralischen Injektionsmaterialien.

4.2.1 Injektionsmaterialien auf Zementbasis

Injektionsmaterialien auf Zementbasis werden seit langem in Bauprojekten verwendet, um Hohlräume, Bodenporen und Felsklüfte zu füllen. Die Beliebtheit dieser Materialien ist auf ihren niedrigen Preis und ihre einfache Handhabung zurückzuführen. Aufgrund ihrer partikulären Struktur hängt die Injektionsfähigkeit dieser Materialien von der Größe der Hohlräume ab. Daher können sie nicht in feinkörnigen Böden eingesetzt werden. Injektionsmaterialien auf Zementbasis können in Bezug auf die Zusammensetzung und auf den Wasserzementwert in die zwei Gruppen Mörtel und Suspensionen unterteilt werden.

4.2.1.1 Mörtel

Die Mischung aus Zement, Kalk oder Gips mit Sand und Wasser, die zum Füllen von Hohlräumen zum Einsatz kommt, wird als Mörtel bezeichnet [92]. Der Zementmörtel kann zur Stabilisierung der Kies- und Steinschichten verwendet werden. Der Wasserzementwert der Mörtel ist häufig kleiner als 1.

Bei den Colcrete- und Prepakt-Verfahren wird Mörtel als Injektionsmaterial verwendet. Beide Verfahren werden für die Herstellung von Unterwasserbeton verwendet. Dabei wird

ein in Wasser eingebrachtes Grobkorngerüst aus Steinschüttung, Schotter oder/und Kies von unten nach oben mit Mörtel injiziert. Zusätzlich wird bei dem Prepakt-Verfahren der Mörtelmischung ein verflüssigendes und quellendes Betonzusatzmittel beigefügt. [13]

4.2.1.2 Suspensionen

Die Injizierbarkeit der Suspensionen in Bodenporen sowie in Klüfte hängt stark von der Korngrößenverteilung im oberen Bereich ab. Die Suspensionen, die herkömmlicherweise mit gewöhnlichem Portlandzement hergestellt werden, können erfolgreich in Kies und groben Sand injiziert werden. Ultrafeinzemente zeichnen sich nach Kutzner (1991) durch eine spezifische Oberfläche größer als 8000 [cm²/g] und eine maximale Korngröße von 0,02 [mm] sowie $d_{90} < 0{,}015$ [mm] aus und können ohne Problem in eng gestuften Feinsand eingesetzt werden. Die Tragfähigkeit des hergestellten Injektionskörpers mit Suspension wird durch die Mahlfeinheit beeinflusst: Je feiner Zement gemahlen wäre, desto höher ist die Tragfähigkeit des hergestellten Injektionskörpers. Zementsuspensionen sind besonders für Injektionen in breite Klüften (> 100 μm) und große Poren geeignet. [99, 159]

4.2.2 Kolloidales Silica

Unter Kolloidwissenschaft wird allgemein die Untersuchung von Systemen verstanden, die kinetische Einheiten enthalten, die im Vergleich zu atomaren Dimensionen groß sind [178]. Silica, Siliciumoxid bzw. Kieselsäure mit der chemischen Formel „SiO_2“ ist die häufigste Oxidverbindung in der Erdkruste. Die Struktur von Silica ist ein Viereck, in dem vier Sauerstoffatome an ein Siliciumatom im Zentrum der Struktur binden [100].

Kolloidales Silica oder Kieselsol ist eine Suspension von amorphen, feinen, nicht porösen und typischerweise kugelförmigen Siliciumdioxidpartikeln in einer flüssigen Phase. Kieselsole sind dichter als Wasser und elektrostatisch stabil, damit die Partikel in Lösung suspendiert bleiben. Es gibt verschiedene Arten von Kieselsolen, die jedoch alle aus Siliciumdioxidpartikeln im Größenbereich von 3 bis 150 [nm] bestehen. Die Morphologie dieser Partikel ist kugelförmig oder quasi-sphärisch und sie können als einzelne Partikel oder in begrenztem Umfang als Klumpen auftreten. Die Größe des Siliciumdioxidpartikels bestimmt die spezifische Oberfläche des Produkts, die eine entscheidende Rolle bei der Injektion spielt. Kolloidale Silica-Suspensionen ohne Zement sind für die Injektion in feinen Rissen (< 100 μm) sowie engen Poren geeignet. [11, 12, 159]

4.2.3 Silikastaub

Silikastaub ist ein amorphes Polymorph aus Siliciumdioxid, das als Nebenprodukt aus Silicium- und Ferrosilicium-Legierungen hergestellt wird. Es handelt sich normalerweise

um ein graues Pulver, das Portlandzement bzw. Flugasche ähnelt und ca. 100-mal feiner als Zement ist. Mehr als 95 % der Silikastaub-Partikel sind kleiner als 1 [µm]. [83, 126]

4.3 Chemische Injektionsmaterialien

Die Materialien, die an sich keine suspendierten festen Partikel enthalten, werden als chemische Injektionsmaterialien bezeichnet. Der Hauptfunktionsunterschied zwischen partikulären und chemischen Injektionsmaterialien besteht darin, dass die Injizierbarkeit der ersteren eine Funktion der Partikelgröße ist, während sie bei chemischen Injektionsmaterialien eine Funktion der Viskosität ist. [92]

Es gibt verschiedene Arten von chemischen Injektionsmaterialien. Jede Art weist Eigenschaften auf, die sie für unterschiedliche Anwendungen geeignet machen. Chemische Injektionsmaterialien bestehen oft aus mehreren Komponenten, die durch Mischen oder Kontakt mit Wasser nach einer bestimmten Zeit zu einem Feststoff, Halbfeststoff oder Gel ausreagieren [34]. Aufgrund ihrer niedrigen Viskosität können sie leicht in feine Sande und sogar in grobe Schluffe eindringen, sie sind jedoch teuer und können teilweise Umwelt- bzw. Gesundheitsprobleme verursachen.

Chemische Injektionsmaterialien werden hinsichtlich der Mischbarkeit in die zwei Kategorien Lösungen und Emulsionen unterteilt. Ein homogenes Gemisch aus mindestens zwei mischbaren chemischen Stoffen oder Flüssigkeiten wird als Lösung bezeichnet. Eine Emulsion besteht dagegen aus mindestens zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten, von denen eine in Tröpfchenform in der anderen dispergiert ist. [47]

4.3.1 Acrylate

Injektionsmaterialien auf Acrylat- bzw. Methacrylatbasis werden heutzutage aufgrund ihrer niedrigen Anfangsviskosität zunehmend als Bauwerks- bzw. Bodenabdichtungs- und Kanalsanierungsmittel eingesetzt. Acrylatgele sind mehrkomponentige chemische Injektionsmaterialien, die aus Polymerlösungen (Acryl- bzw. Methacrylsäure) und ggf. zusätzlichen Additiven bestehen. Die Polymerlösungen bilden infolge einer radikalischen Kettenpolymerisation, die durch die Zugabe eines Initiators gestartet wird, ein gelartiges Endprodukt. „*Um die nötige Energie für diese Reaktion aufzubringen, wird die sogenannte Redox-Polymerisation angewendet.“ [180]* Acrylatgele sind wasserlöslich und können in chemischer Hinsicht als hydrophil betrachtet werden. [85, 114, 164]

4.3.2 Polyurethane

Polyurethane (PU) werden aus einer Mischung von Polyolen und Di- oder Polyisocyanaten sowie ggf. Additiven wie Katalysatoren, Inhibitoren, Vernetzern, Emulgatoren oder Schaumstabilisatoren hergestellt. Diese Materialien können hinsichtlich der Molekülstruktur in die drei Kategorien Polyurethanharze, -schäume und -gele unterteilt werden. Polyurethanharze bestehen häufig aus zwei Komponenten, die gemischt werden müssen, um Polyurethanelastomere herzustellen. Der hergestellte Körper kann je nach Art des verwendeten Rohmaterials flexibel bis steif sein. Polyurethanschäume sowie -gele sind einkomponentige Materialien und erfordern einen kontinuierlichen Wasserfluss zur Aktivierung sowie zur Aufrechterhaltung der Reaktion. Die Stabilisatoren in Zusammensetzung aus Polyurethanschäumen können jedoch verhindern, dass sich Schaum zersetzt, wenn Kohlendioxid freigesetzt wird. Polyurethane können, je nach chemischer Zusammensetzung, hydrophob oder hydrophil sein. [56, 108]

4.3.3 Silikate

Silikate sind anorganische Materialien, die aus Silicium, Sauerstoff und einem oder mehreren Metallen und ggf. Hydroxidionen bestehen. Hinsichtlich der Molekülstruktur können die zur Boden- und Felsinjektion eingesetzten Silikate in die zwei Kategorien Silikatgele und -harze unterteilt werden.

Wasserlösliche Alkalisilikate wie Natrium-, Kalium- oder Lithiumsilicate werden als Wasserglas bezeichnet. Diese Materialien sind im Allgemeinen farblose transparente Feststoffe und reagieren durch Mischung mit einem organischen oder anorganischen Härter zu Festkörpern (Silikagel) aus [9, 90]. Die Verwendung von organischen Härtern führt oft zu einer dauerhaften Verunreinigung des Grundwassers, sodass heute nur noch anorganische Härter eingesetzt werden [130]. Bei Grundbauprojekten in Deutschland wird am häufigsten Natriumsilikat als Injektionsmaterial in Kombination mit Wasser und einem anorganischen Härter (häufig Natriumaluminat) eingesetzt [99, 180]. „*Natriumaluminat führte dazu, dass der pH-Wert im Grundwasser auf einen Wert über 10 anstieg, was, neben der kritischen Sicht der enthaltenen Anionen, dazu geführt hat, dass dieser Stoff in den letzten Jahren vielfach aus ökologischen Gründen nicht mehr genehmigungsfähig war.*“ *[20]* Wassergläser bzw. Silikagele bestehen zu mindestens 80 % aus Wasser und werden aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit als Lösungen eingestuft [26].

Silikatharze sind Mehrkomponenten-Injektionsmittel, die durch Zusammenmischung von anorganischem Alkalisilikat (modifiziertes Wasserglas) und organischem Isocyanat entstehen. Sie können abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung in schäumende

und nicht schäumende Injektionsharzen unterteilt werden. Silikatharze sind hydrophob und lösen sich somit nicht im Wasser. [163]

4.3.4 Epoxide

Epoxidharze (EP) bestehen üblicherweise aus zwei Komponenten. Die Reaktion beginnt mit der Zugabe geeigneter Härter zu den Polymeren der Epoxidgruppen. Die Mischung reagiert nach einer vorbestimmten Zeit zu einem duroplastischen Kunststoff. Härter können in zwei allgemeine Gruppen – Polyamid und Polyamin – unterteilt werden. Polyamin-Epoxide werden für Anwendungen verwendet, die eine hohe Materialdicke erfordern, bspw. in den Bodenbelags-, Form- und Dekorationsindustrien. Polyamid-Epoxide eignen sich dagegen zur Herstellung der dünnen Schichten, daher werden sie in der Farbherstellungsindustrie oft eingesetzt. Für Riss- und Poreninjektionen werden normalerweise Polyamid-Epoxide verwendet. Die Viskosität des Epoxidharzes kann, je nach Bedarf, durch Zugabe von Reaktivverdünnern verringert werden. [8, 75, 155]

5 Injektionstechnik

Injektionsmaterial besteht häufig aus verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichen Dosierungen. Die Injektionskomponenten werden in einem oder in mehreren Schritten von Hand, mit einem Durchlaufmischer und/oder direkt mit einer Pumpe (z. B. 2K-Pumpe) zusammengemischt. Die Pumpe spritzt das Injektionsgemisch durch die Injektionslanzen in den Boden bzw. Fels ein.

5.1 Mischanlage

Die Mischanlage muss in der Lage sein, alle Injektionskomponenten und andere Beimischungen gründlich zu mischen, um eine homogene Suspension bzw. Flüssigkeit zu erzeugen. In Abhängigkeit von der Anwendung und den eingesetzten Injektionsmaterialien kann ein einfacher Mischer, z. B. ein vertikaler Paddelmischer, oder ein spezieller Mischer wie ein Kolloidmischer zum Einsatz kommen. [78]

Paddelmischer verwenden langsam rotierende Paddel, die horizontal oder vertikal in einem Tank montiert sind (links in der Abbildung 5-1). Sie sind nicht allein für die Herstellung von hochwertigen Injektionsmaterialien geeignet und können nur für Projekte verwendet werden, bei denen eine unvollständige Dispersion der Zementpartikel und Unterbrechungen des Injektionsvorgangs von geringer Bedeutung sind, etwa bei der Verfüllung großer Hohlräume. [173]

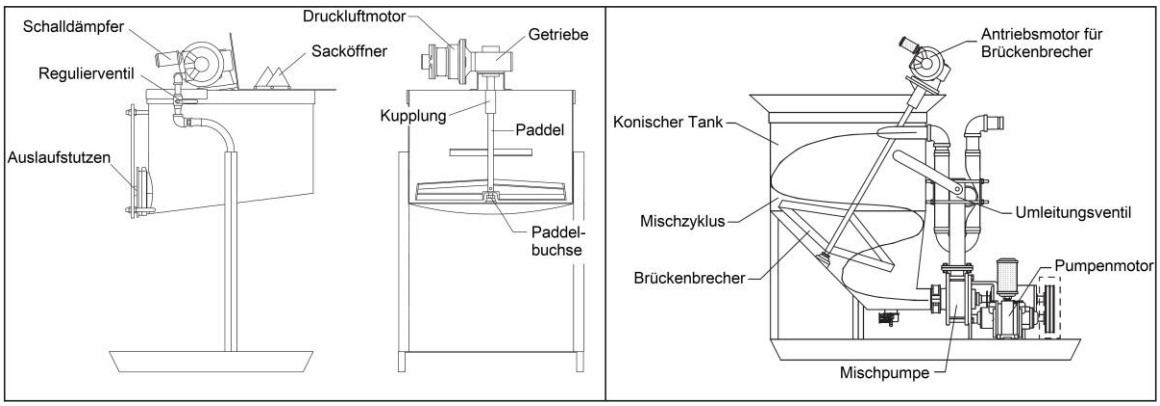


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Paddelmischers (links) sowie des Kolloidmischers (rechts) mit der Benennung der Bauteile (Hegebarth 2013, S. 12 und 14)

Kolloidmischer bestehen in der Regel aus einem vertikalen konischen Tank mit einem Rotor, der sich mit 1.500 bis 2.000 [U/min] umdreht (rechts in der Abbildung 5-1). Das Material wird durch den Rotor gegen das Rotorgehäuse beschleunigt. Dies übt eine hohe Scherkraft auf das Injektionsmaterial aus. Die Mischpumpe zirkuliert das Injektionsmaterial zum Mischtank zurück. Das Material tritt tangential wieder in den Tank

ein, wodurch ein Wirbel entsteht, der den Mischprozess verbessert. Kolloidmischer können zum Zusammenmischen der zementbasierten sowie chemischen Injektionsmaterialien eingesetzt werden. Bei Bedarf können die Bauteile des Mischers durch Beschichtung vor aggressiven Materialien geschützt werden. [99, 173]

5.2 Injektionspumpe

Zahlreiche Kombinationen von Pumpen mit unterschiedlichen Antriebssystemen sowie Druck- bzw. Drehzahlreglern stehen zur Verfügung. Die Art des Injektionsmaterials, der erforderliche Injektionsdruck sowie die Durchflussmenge bestimmen, welche Pumpe am besten zur Injektion geeignet ist. Obwohl es keine schlüssigen Beweise gibt, wird in Europa allgemein geglaubt, dass Pumpen mit einem pulsierenden Druck ein besseres Eindringen von Injektionsmaterialien in den Boden bzw. Fels ermöglichen [92]. Houlsby (1990) weist diese Behauptung zurück und empfiehlt die Verwendung von Pumpen mit einem konstant bleibenden Druck [86]. Die Injektionspumpen können funktional in die drei Gruppen Kolben-, Membran- und Schneckenpumpe eingeteilt werden. Darüber hinaus gibt es Rotations- und Flügelzellenpumpen, die nur selten zur Injektion verwendet werden.

5.2.1 Kolbenpumpe

Kolbenpumpen sind die am häufigsten zum Einspritzen von chemischen Injektionsmaterialien verwendeten Pumpen. Durch die Auf- und Abwärtsbewegung der Kolben werden die Injektionskomponenten in den Zulaufschlauch gedrückt. Bei einer Aufwärtsbewegung des Kolbens wird das Saugventil aufgrund der Saugspannung geöffnet und das Injektionsmittel wird in den Pumpenraum gesaugt. Bei der Abwärtsbewegung wird das Saugventil geschlossen und das Injektionsmittel durch das Druckventil in den Zulaufschlauch gedrückt. Aufgrund der erwähnten Funktionsweise der Kolbenpumpe ist eine signifikante Druckdifferenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Druck während der Kolbenzyklen zu erwarten [157]. Die Pumpe kann von Hand, mit Luft- oder Öldruck[1] oder mit einem Elektromotor betrieben werden. Je nach Bedarf besteht eine Kolbenpumpe aus einem bis drei Kolben. Durch eine Parallelschaltung der Kolben können mehrkomponentige Injektionsmaterialien in vordefinierten Volumenanteilen eingespritzt werden (siehe Abbildung 5-2 links). Aufgrund des genannten Vorteils wird dieser Pumpentyp gerne zur Injektion von mehrkomponentigen Acrylgelen und Polyurethanharzen verwendet.

[1] Pneumatische Pumpen werden mit Luft und hydraulische Pumpen werden mit einer Flüssigkeit wie Öl betrieben.

5.2.2 Membranpumpe

Eine Membranpumpe besteht aus einer oder zwei Membranen. Durch Hin- und Her-Bewegung der Membranen wird die Flüssigkeit bzw. das Gas in Bewegung gebracht [77]. Die Energie, die zum Bewegen der Membranen benötigt wird, wird durch Luftdruck oder einen Elektromotor bereitgestellt (rechts in der Abbildung 5-2). Dieser Pumpentyp wird häufig zur Injektion von Polyurethan- und Epoxidharzen verwendet.

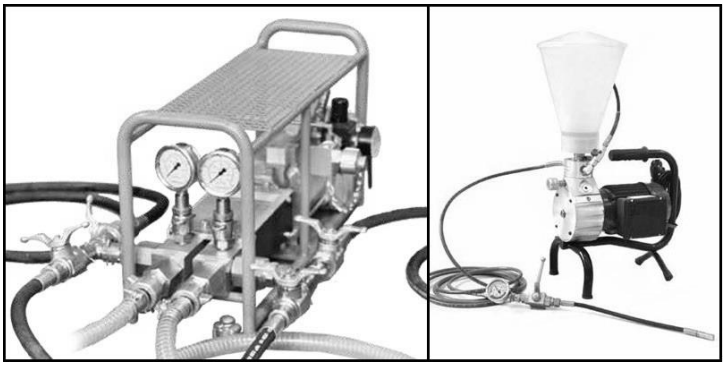


Abbildung 5-2: 2K-Kolbenpumpe mit Druckluftantrieb (links); Membranpumpe mit elektrischem Antrieb (rechts) (mit freundlicher Genehmigung der TPH GmbH, © TPH GmbH [169])

5.2.3 Schneckenpumpe

Mit Schneckenpumpen werden häufig Materialien auf Zementbasis, Mörtel sowie Dichtungsschlämme injiziert. Das Material tritt von der Mischanlage in die Pumpe ein und wird in einer spiralförmigen Bewegung zwischen Stator und schneckenförmigem Rotor nach vorne gedrückt (siehe Abbildung 5-3) [78]. Je hochviskoser das Injektionsmaterial und je länger der Rotor ist, desto höher ist der Injektionsdruck, der mit einer Schneckenpumpe erzeugt wird. Schneckenpumpen mit geringerer Kapazität können bei Bedarf in Reihe geschaltet werden, um einen höheren Druck zu erzielen [157].

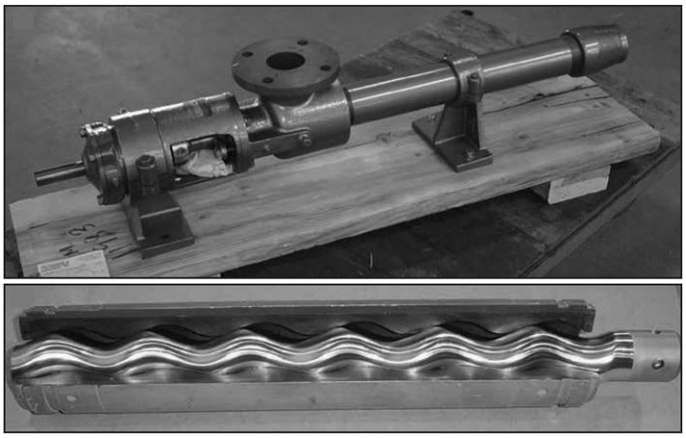


Abbildung 5-3: Schneckenpumpe (oben); Stator und Rotor (unten) (Hegebarth 2013, S. 44 und 45)

5.3 Injektionslanzen

Rammverpresslanzen, Injektionsleitungen mit Fußventil und Manschettenrohre sind die üblichen Injektionslanzentypen, die in der Praxis für eine Penetrationsinjektion eingesetzt werden. Die Injektionslanzen können im Baugrund eingebettet, eingerammt, einvibriert oder mit Spülunterstützung eingebracht werden.

5.3.1 Rammverpresslanzen

Die Lanzen, die mittels einer Rammspitze ohne Vorbohren im Boden eingebracht werden, werden als Rammverpresslanzen bezeichnet. Die Rammspitze fällt ab, indem die Injektionslanze ein paar Zentimeter aus dem Boden gezogen wird. Daher wird die Rammspitze ebenfalls ‚verlorene Spitze' bezeichnet [58]. Die Rammverpresslanze kann Löcher in der Länge haben, wodurch ein kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmiger Injektionskörper im Boden erzeugt werden kann (siehe Abbildung 5-4).

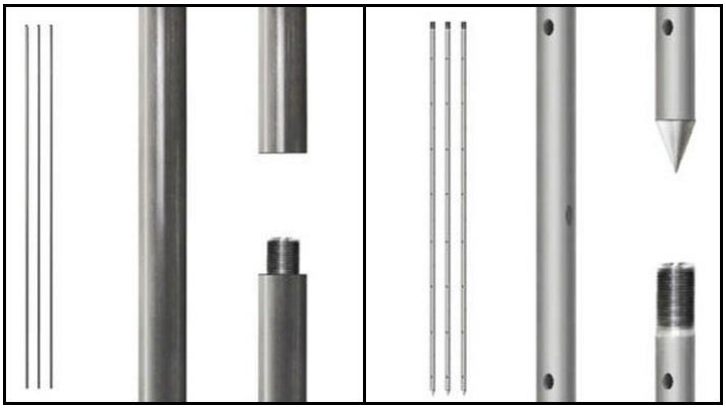


Abbildung 5-4: Rammverpresslanzen (mit freundlicher Genehmigung der TPH GmbH, © TPH GmbH [169])

5.3.2 Injektionsleitungen mit Fußventil

Injektionsleitungen mit Fußventil werden häufig zur Herstellung von Injektionssohlen eingesetzt. Bei der Installation werden die Injektionsleitungen zunächst in die vorgebohrten Bohrungen bis zur Einsatztiefe eingeführt und dann werden die Bohrungen mit einer Mantelmischung gefüllt [20]. Eine Mantelmischung ist eine Bindemittelsuspension, die verhindert, dass das Injektionsmaterial entlang des Bohrlochs fließt [58]. Das Fußventil wird mit einem Gummischlauch geschützt. Dieser Schlauch verhindert die Rückführung von Injektionsmaterialien und das Eindringen von Grundwasser in die Injektionslanze (Abbildung 5-5).

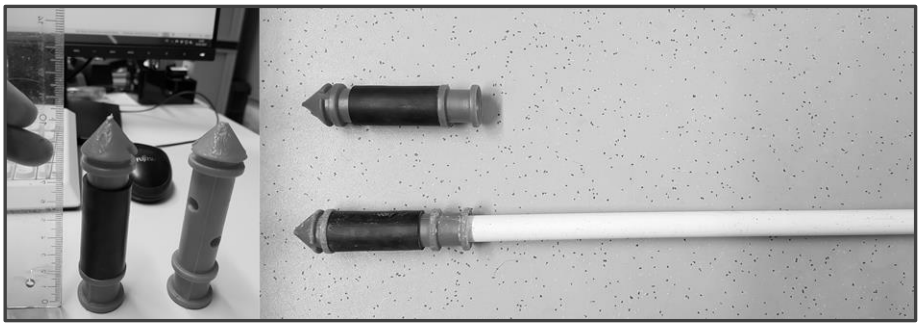


Abbildung 5-5: Injektionsleitungen mit Fußventil

5.3.3 Manschettenrohre

Ein Manschettenrohr ist ein Injektionsrohr aus Kunststoff oder Stahl mit mehreren Öffnungen in der Länge, die durch Gummischläuche vor der Rückführung von Injektionsmaterialien und dem Eindringen von Grundwasser geschützt werden (siehe Abbildung 5-6). Der Abstand zwischen den Öffnungen beträgt üblicherweise zwischen 33 und 100 [cm] und der Innendurchmesser zwischen 40 und 60 [mm]. In jede Öffnung kann einzeln mit einem Doppelpacker injiziert werden. Die Injektion kann in mehreren Durchgängen durchgeführt werden. Bei mehr als zwei Durchgängen ist jedoch ein Manschettenrohr aus Stahl besser geeignet. [19, 112]

Abbildung 5-6: Manschettenrohre aus Kunststoff (links) und aus Stahl (rechts) mit Doppelpacker (Boley et al. 2019, S. 508)

6 Einflussfaktoren auf die Injizierbarkeit des Bodens

Die Injektionsreichweite wird durch die Bodenparameter, Eigenschaften des Injektionsmaterials, Betriebsparameter der Pumpe, das Injektionsraster und die Injektionsreihenfolge beeinflusst. Die Injektionsmenge kann durch eine genaue Einschätzung des Ausbreitungsverhaltens von Injektionsgut optimiert werden. Eine Optimierung der Injektionsmenge hat sowohl finanzielle als auch ökologische Vorteile.

6.1 Bodenparameter

Die drei Phasen Bodenkörner, Porenwasser und Porenluft bilden im Allgemeinen die Gesamtstruktur des Bodens. Porenwasser kann in den folgenden Formen im Boden vorkommen (Abbildung 6-1):

1. Haftwasser: Ein Teil des Porenwassers, der trotz der Wirkung der Schwer- und Strömungskräfte unbeweglich bleibt, wird als Haftwasser betrachtet. Hierzu zählen gebundenes Wasser, Adsorptions- und Kapillarwasser sowie gefrorenes Wasser.
   1.1. Gebundenes Wasser: Die Porenwassermoleküle, die durch die auf der Oberfläche der Bodenkörner vorhandene elektrische Ladung angezogen werden, werden in einem gesättigten Boden als gebundenes Wasser bezeichnet.
   1.2. Adsorptionswasser: In einem teilgesättigten Boden werden die Porenwassermoleküle, die durch die molekularen Anziehungskräfte angezogen werden, Adsorptionswasser genannt.
   1.3. Kapillarwasser: Aufgrund der Oberflächenspannung von Wasser werden die Bodenporen über dem Grundwasserspiegel bis zu einer bestimmten Höhe mit Kapillarwasser gefüllt. Der mit Kapillarwasser gesättigte Bereich wird Kapillarzone genannt. Die Höhe der Kapillarzone hängt von der Porengeometrie ab. Trotz der Schwerkraft bleiben Wassertropfen im halbgesättigten Teil aufgrund des Kapillareffekts zwischen Wasser und Bodenkörnern stehen. [19, 84]
   1.4. Gefrorenes Wasser (Eis): Wasser verliert bei Temperaturen unter 4 °C seine Fließfähigkeit und verwandelt sich in Eis. Diese Zustandsänderung geht mit einer Abnahme der Dichte einher, die zu einer Verformung der Bodenstruktur führen kann.
2. Freies Porenwasser: Das freie Porenwasser fließt unter Einwirkung von Schwer- und Strömungskräften in den Poren. Es ist für die Ermittlung der Bodendurchlässigkeit sowie des injizierbaren Porenanteils entscheidend.

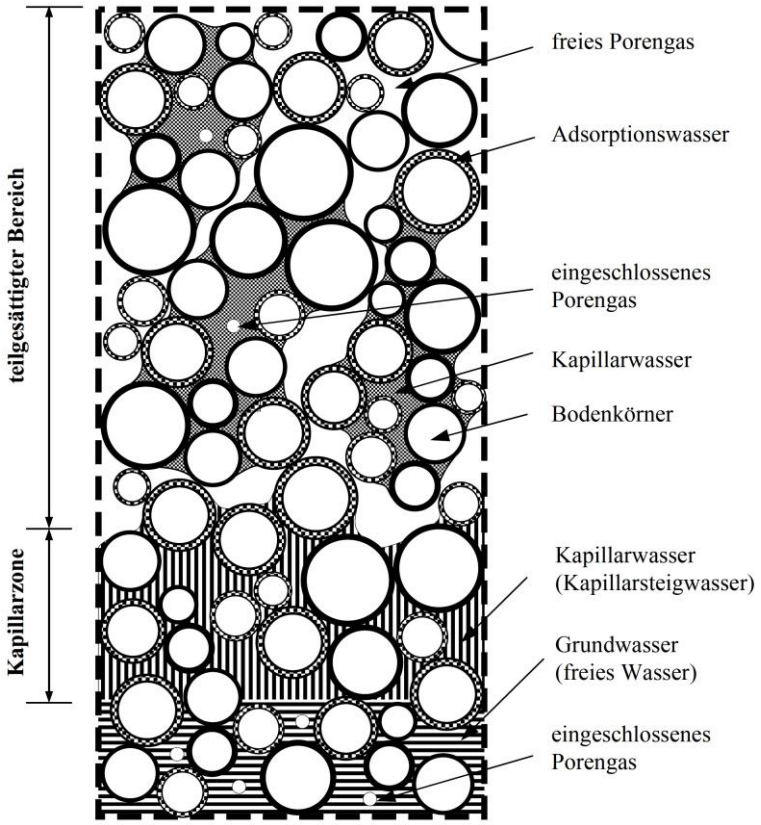


Abbildung 6-1: Erscheinungsformen des Grundwassers und der Porenluft (Boley et al. 2019, S. 20)

6.1.1 Durchlässigkeit des Bodens

Die Durchlässigkeit des Bodens ist das erste bedeutsame Merkmal für die Beurteilung der Injizierbarkeit eines Bodens. Die Lagerungsdichte, die Form der Bodenteilchen und -partikel, die Kornverteilung, die Temperatur und Viskosität der Flüssigkeit etc. bestimmen die Durchlässigkeit des Bodens. Nach Darcy (1856) wird der Durchlässigkeitsbeiwert für ein poröses Medium mit folgender Gleichung ermittelt:

$$k = {Q \cdot L}/{\Delta h \cdot A} \tag{6-1}$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert kann direkt unter Verwendung verschiedener Feldmethoden, z. B. Pump- und Schluckversuche, sowie im Labor mittels des Wasserdurchlässigkeitsversuches mit konstanter oder veränderlicher Druckhöhe ermittelt werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert kann ebenfalls indirekt nach der Korngrößenverteilung abgeschätzt werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert (k) zeigt die Fließfähigkeit von Wasser bei 10 °C. Sollten andere Temperaturen vorhanden sein oder andere Flüssigkeiten zum Einsatz kommen, kann der Durchlässigkeitsbeiwert unter Verwendung der Gleichung (6-2) umgerechnet werden.

$$k = k_{w,\,10°C} = k_{F,\,T} \cdot {}^{\mu_{F,\,T}}/_{\mu_{w,\,10°C}} \tag{6-2}$$

Nach DIN 18130-1 kann der Durchlässigkeitsbeiwert bei Temperaturabweichung nach der folgenden Gleichung umgerechnet werden:

$$k_{10°C} = k_T \cdot \frac{1{,}359}{1 + 3{,}37 \cdot 10^{-2} \cdot T + 2{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2} \tag{6-3}$$

Die erfahrungsmäßigen Durchlässigkeitsbeiwerte verschiedener Bodenarten sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Ein Boden mit einer Durchlässigkeit größer als $1 \cdot 10^{-5}$ [m/s] gilt als stark bis sehr stark durchlässig und ein Boden mit einer Durchlässigkeit niedriger als $1 \cdot 10^{-7}$ [m/s] gilt als gering bis nicht durchlässig. [19]

Tabelle 6-1: Durchlässigkeit von unterschiedlichen Bodenarten – Erfahrungswerte (Boley et al. 2019, S.30)

Bodenart	**Durchlässigkeitsbeiwert k** [m/s]
Sandiger Kies	$2 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$
Sand	$1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$
Schluff-Sand-Gemisch	$5 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$
Schluff	$5 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-8}$
Ton	$1 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-12}$

Bodenschichten wurden im Laufe der Zeit durch Sedimentation und Transport unter Auswirkung physikalischer Faktoren erzeugt. Bei der Untersuchung der Durchlässigkeit von Böden mit einem geschichteten Aufbau sollte zwischen vertikaler und paralleler Durchlässigkeit unterschieden werden.

Die horizontale Durchlässigkeit (k_h) in geschichtetem Baugrund (parallel zur Schichtgrenze) wird durch die am stärksten durchlässigen Schichten beeinflusst und lässt sich mit der folgenden Gleichung ermitteln:

$$k_h = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot M_i \tag{6-4}$$

Im Gegensatz zur horizontalen Durchlässigkeit wird die vertikale Durchlässigkeit (k_v) insbesondere durch die am wenigsten durchlässigen Schichten beeinflusst. Diese kann mit Gleichung (6-5) ermittelt werden [59].

$$k_v = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{M_i}{k_i}} \tag{6-5}$$

Anisotropie im Boden wird häufig durch eine horizontale Ablagerung flacher Bodenpartikel hervorgerufen. Die Durchlässigkeit in Böden, in denen die meisten Partikel plattenförmig sind, ist in der Richtung parallel zur Partikellänge (k_h) größer als in der vertikalen Richtung (k_v). Das k_h/k_v-Verhältnis in Sedimentböden liegt üblicherweise zwischen 2 und 10. [183]

Aufgrund der Anisotropie im Boden neigen die Injektionsmaterialien dazu, sich mehr in Horizontalrichtung auszubreiten. In der Folge wird ein ellipsoidförmiger Injektionskörper erzeugt (siehe Abbildung 6-2). Allerdings muss die Frage beantwortet werden, welches Verhältnis zwischen den vertikalen und horizontalen Reichweiten besteht.

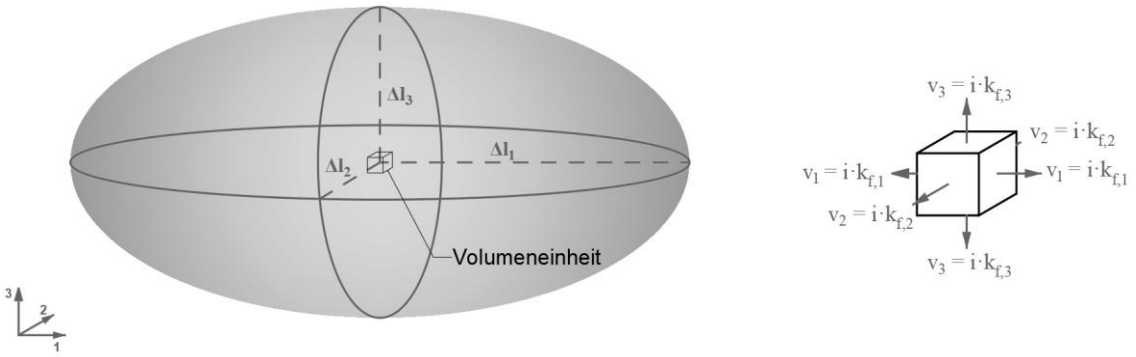


Abbildung 6-2: Ausbreitung des Injektionsmaterials in einem anisotropen Boden

Die Filtergeschwindigkeit (v) kann gemäß der Darcy-Gleichung wie folgt ermittelt werden:

$$v = i \cdot k_f \;\rightarrow\; {}^{\Delta l}/_{\Delta t} = {}^{\Delta h}/_{\Delta l} \cdot k_f \tag{6-6}$$

Durch Umformulierung der Gleichung (6-6) kann die Eindringdistanz (Δl) von Flüssigkeit in jede beliebige Richtung mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\Delta l = \sqrt{k_f \cdot \Delta h \cdot \Delta t} \tag{6-7}$$

Bei einer punktuellen Injektion ist die hydromechanische Druckdifferenz (Δh) in alle Richtungen gleich groß. Mit diesem Wissen kann das Verhältnis zwischen den vertikalen und horizontalen Reichweiten unter Verwendung der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$n_v = {\Delta l_{1\ bzw.\ 2}}/{\Delta l_3} = \sqrt{{k_{f,1\ bzw.\ 2}}/{k_{f,3}}} \tag{6-8}$$

Das Verhältnis zwischen den vertikalen und horizontalen Reichweiten wird in dieser Arbeit als Grad der Anisotropie bzw. Anisotropiegrad (n_v) bezeichnet.

6.1.2 Porosität des Bodens

Die Injizierbarkeit des Bodens wird stark durch die Porengeometrie beeinflusst. Die Porengröße ist von der Körnungsverteilung, Kornform und Lagerungsdichte abhängig. Es muss unterschieden werden zwischen (schematische Darstellung in Abbildung 6-3):

1. Gesamtporosität (n): Das Verhältnis zwischen dem Hohlraumvolumen (V_H) und Gesamtvolumen (V_G) wird als Porenanteil, Gesamtporosität bzw. absolute Porosität bezeichnet (Gleichung (6-9)).

$$n = {V_H}/{V_G} \tag{6-9}$$

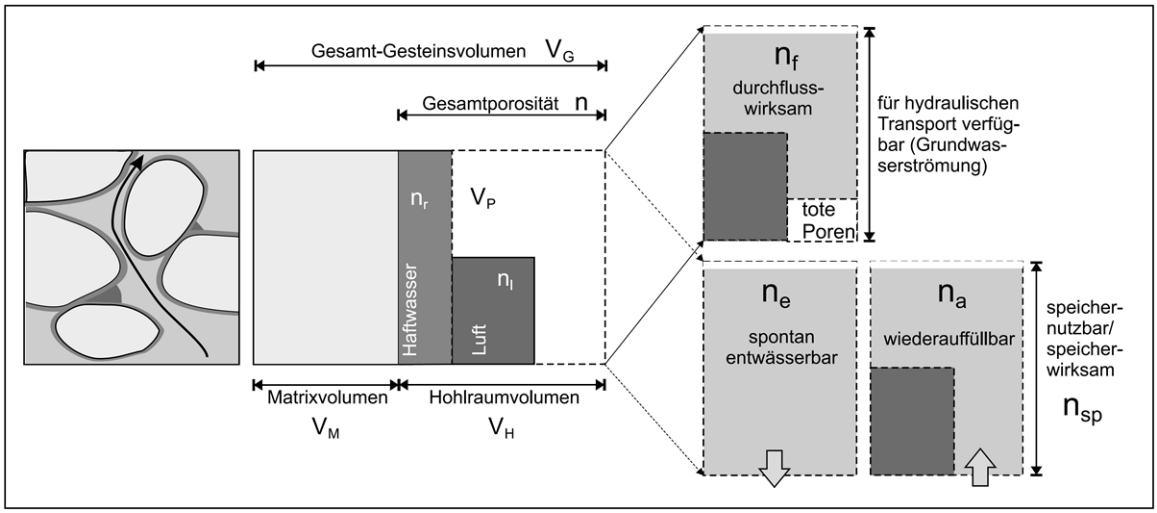


Abbildung 6-3: Schema der Hohlraumanteile im Lockergestein (Fuchs et al. 2017, S. 2)

2. Speichernutzbare oder nutzbare Porosität (n_{sp}): Nach Balke (2000) kann speichernutzbare Porosität in die folgenden zwei Formen unterteilt werden:
   2.1. Entwässerbare Porosität (n_e): Der Quotient aus dem Volumen der Hohlräume, deren Wasser durch die Schwerkraft entleert werden kann, und dem Gesamtvolumen des Bodens wird als entwässerbare Porosität bezeichnet [5].
   2.2. Wiederauffüllbare Porosität (n_a): Das Verhältnis zwischen dem Volumen der Hohlräume, die durch die Schwerkraft mit Wasser aufgefüllt werden

können, und dem Gesamtvolumen des Bodens wird als wiederauffüllbare Porosität bezeichnet.

3. Effektive bzw. durchflusswirksame Porosität (n_f): Der für den hydraulischen Transport bzw. die Injektion verfügbare Porenanteil wird effektive bzw. durchflusswirksame Porosität genannt. Sie lässt sich mir der Gleichung (6-10) ermitteln.

$$n_f = {}^{V_P}/_{V_G} \tag{6-10}$$

Grundwasser und Injektionsmaterialien können nur in miteinander verbundenen und relativ großen Hohlräumen fließen. Hohe Adhäsionskräfte in sehr kleinen Hohlräumen reduzieren oder verhindern sogar den Durchfluss von Flüssigkeiten. Aus diesem Grund ist die effektive Porosität oft kleiner als die absolute Porosität. [14, 48]

Je feinkörniger der Boden ist, desto niedriger ist der effektive Porenanteil und desto höher ist der Haftwasseranteil. Die Beziehung zwischen dem Gesamtporenanteil, bestehend aus dem effektiven Porenanteil sowie dem Haftwasseranteil, und der Korngroße ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

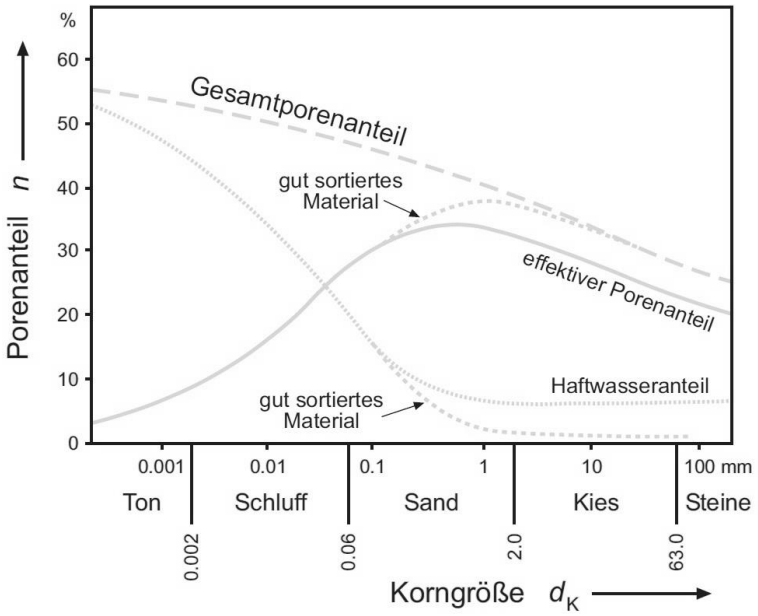


Abbildung 6-4: Beziehung zwischen Gesamtporenanteil, bestehend aus effektivem Porenanteil sowie Haftwasseranteil, und Korngroße (Hölting 2009, S. 15)

Das Verhältnis zwischen den Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten (v_f/v_a) zeigt, wie groß die effektive Porosität ist. Die Abstandsgeschwindigkeit (v_a) ist die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit in den Hohlräumen und kann durch einen Markierungsversuch (Tracerversuch) bestimmt werden [84]. Als Alternative

können die Erfahrungswerte bzw. -gleichungen zum Einsatz kommen. Tabelle 6-2 zeigt die von Garling (1979) zusammengefassten Erfahrungswerte für die absoluten und effektiven Porositäten bei verschiedenen Bodenarten [69].

Tabelle 6-2: Absolute und effektive Porosität in Abhängigkeit von der Bodenart (Garling et al. 1979, S. 34)

	Absolute Porosität (n) [%]	**Effektive Porosität (n_f)** [%]
Sandiger Kies	25 – 35	20 – 25
Kiesiger Sand	28 – 35	15 – 20
Mittlerer Sand	30 – 38	10 – 15
Schluffiger Sand	33 – 40	8 – 12
Sandiger Schluff	35 – 45	5 – 10
Toniger Schluff	40 – 55	3 – 8
Schluffiger Ton	45 – 65	2 – 5

6.1.3 Saugspannung

Die Kapillarkraft ist ein physikalisches Phänomen, das durch Ober- und Grenzflächenspannungen hervorgerufen wird. Je nach Größe der intermolekularen Kräfte bewirkt diese Kraft, dass Flüssigkeit im Kapillarrohr oder in den Bodenhohlräumen auf- oder absinkt. Wenn die Grenzflächenspannung zwischen den Molekülen in Flüssigkeit und starrem Körper stärker ist als die Bindungskraft zwischen den Flüssigkeitsmolekülen, werden diese zu den starren Körpermolekülen gezogen, wodurch eine Saugspannung erzeugt wird [7]. Vergleichbar mit Wasser haben die Injektionsmaterialien oft eine geringe intramolekulare Kraft. Dementsprechend wird die Injizierbarkeit durch die im Boden erzeugte Saugspannung verbessert.

Die Saugspannung im Boden kann durch den Sättigungsgrad sowie die Korngröße beeinflusst werden. Je niedriger der Sättigungsgrad des Bodens ist und je feiner die Bodenpartikel sind, desto größer ist die Saugspannung [105]. Bewässerungs- oder Entwässerungsgeschichte beeinflussen ebenfalls die Saugspannung. Im Allgemeinen ist die Saugspannung bei der Entwässerung größer als bei der Bewässerung. Die Saugspannung kann entweder direkt mit einem Tensiometer auf der Baustelle oder mit einer Druckkammer im Labor gemessen oder indirekt mittels der von unterschiedlichen Autoren bzw. Forschern vorgestellten Modelle ermittelt werden. Es gibt umfangreiche Untersuchungen und Theorien, die den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Saugspannung im Boden beschreiben. Hydraulische Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen (pF-Kurven) können durch Kurvenanpassung der

gemessenen Werte oder durch physikalische Modellierung erhalten werden [67, 186]. Beispielsweise basieren die von Leverett (1941) [104], van Genuchten (1980) [175], Ferrand et al. (1990) [60] und Fredlund (1993) [66] vorgestellten Modelle auf empirischen sowie statistischen Untersuchungen und die von Kovacs (1981) [95] und Zou (2003) [186] vorgestellten Modelle auf physikalischer Modellierung.

Bei numerischen Simulationen sowie im Bereich der Bodenkunde wird die von van Genuchten entwickelte Theorie am häufigsten verwendet [129]. Wie aus der von van Genuchten vorgestellten Gleichung (6-11) hervorgeht, hängt die Saugspannung (P_ψ) von der effektiven Sättigung (S_e) und den experimentell ermittelten Parametern α und n ab.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + \left[\alpha \cdot \left({P_\psi}/{(\rho_w \cdot g)}\right)\right]^n\right)^{{n-1}/{n}}} \tag{6-11}$$

Die vereinfachten Parametersätze nach dem van-Genuchten-Mualem-Modell sind für Kies, Sand, Schluff und Ton in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Parameter des van-Genuchten-Mualem-Modells für unterschiedliche Bodenarten (In Anlehnung an Odenwald 2011, S. 66)

		Kies	Sand	Schluff	Ton
θ_s	[-]	0,3	0,35	0,4	0,45
θ_r	[-]	0,01	0,03	0,1	0,3
α	[1/m]	17,4	3,2	0,6	0,1
n	[1]	3,1	3,1	3,1	3,1

Abbildung 6-5 zeigt die Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die in Tabelle 6-3 vorgestellten Bodenarten. Beim van-Genuchten-Mualem-Modell wird die Bewässerungs- oder Entwässerungsgeschichte nicht berücksichtigt.

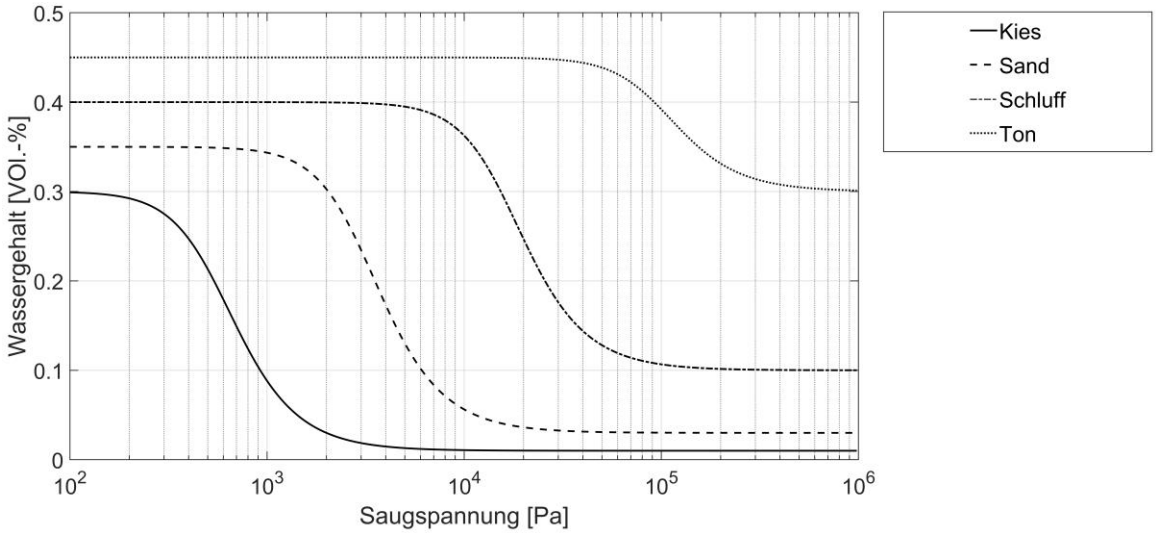


Abbildung 6-5: Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die untersuchten Versuchsböden nach dem van-Genuchten-Mualem-Modell

6.2 Eigenschaften des Injektionsmaterials

6.2.1 Rheologische Eigenschaften des Injektionsmaterials

Die wissenschaftliche Untersuchung der Verformungs- und Fließverhalten von Materialien wird als Rheologie bezeichnet [181]. Viskosität, Konsistenz und Streitbarkeit zählen zu den bedeutendsten rheologischen Parametern [170]. Die Zähigkeit eines Materials gegen Scherbeanspruchungen (Schubspannungen) wird Viskosität genannt. Die Viskosität (μ) ist die Beziehung zwischen Schubspannung (τ) und Schergeschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) und lässt sich mit Gleichung (6-12) ermitteln:

$$\mu = {}^{\tau}/_{\dot{\gamma}} \tag{6-12}$$

Die Fließfähigkeit des Injektionsmaterials im Boden wird von der Viskosität (μ) des Injektionsgutes beeinflusst. Je niedrigviskoser ein Injektionsmaterial ist, desto fließfähiger ist es. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften definieren das Fließverhalten von Flüssigkeiten. Dieses kann in zwei allgemeine Kategorien ‚newton'sch' und ‚nicht newton'sch' unterteilt werden (siehe Abbildung 6-6).

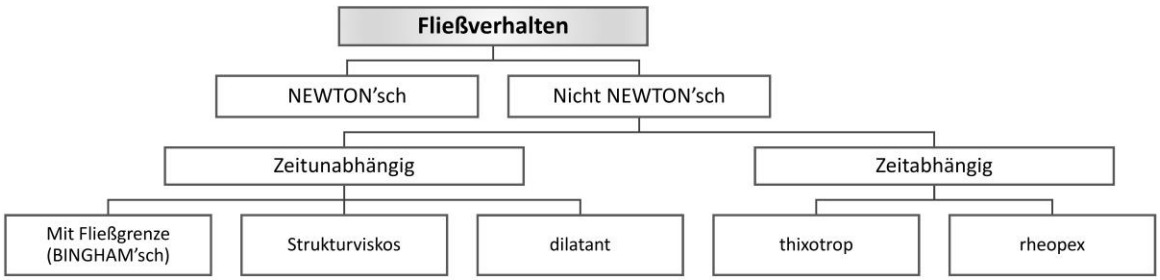


Abbildung 6-6: Klassifizierung der Fließverhalten (In Anlehnung an Figura 2004, S. 111)

Für newton'sche Materialien mit dem ideal viskosen Fließverhalten ist die Beziehung zwischen Schubspannung (τ) und Scherrate ($\dot{\gamma}$) linear (Nr. 1 in Abbildung 6-7). Die Viskosität ist zwar nicht von der Schergeschwindigkeit abhängig, kann jedoch von Temperatur und Druck abhängig sein.

Die Beziehung zwischen Schubspannung und Scherrate ist zwar ebenfalls für die bingham'schen Flüssigkeiten linear, allerdings muss die Schubspannung größer als Fließgrenze sein (Nr. 4 in Abbildung 6-7). Sind die Schubspannungen kleiner als die Fließgrenze, ist das Materialverhalten mit einem viskoelastischen Festkörper vergleichbar [98].

Das Fließverhalten von strukturviskosen und dilatanten Fluiden ist von der Schergeschwindigkeit abhängig und nicht linear. Die Viskosität nimmt mit einer zunehmenden Scherbeanspruchung in den strukturviskosen Materialien (scherverdünnend) ab und in den dilatanten Materialien (scherverdickend) zu [61].

Thixotrope und rheopexe Flüssigkeiten weisen ein zeitabhängiges Fließverhalten auf. Die Viskosität eines thixotropen Materials nimmt unter konstanter Scherbeanspruchung mit der Zeit ab. Dieser Prozess erhöht in rheopexen Materialien die Viskosität. [98, 109]

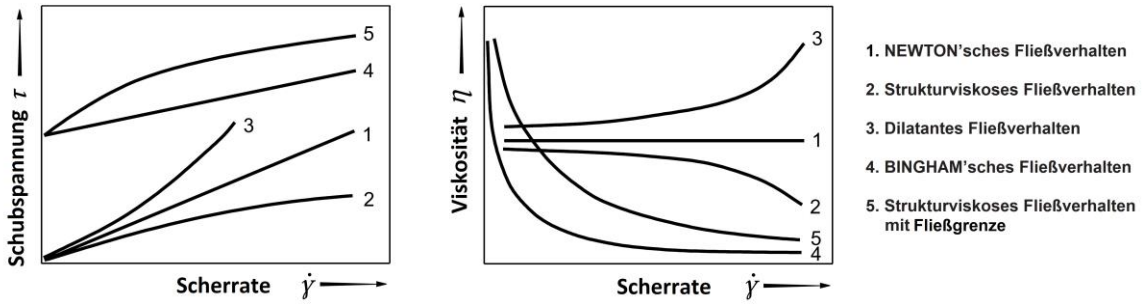


Abbildung 6-7: Fließkurven (links) und Viskositätskurven (rechts) für unterschiedliche Fließverhalten (Modifiziert nach Figura 2004, S. 116 und 117)

Das Injektionsgut befindet sich zu Beginn des Injektionsvorgangs in einem flüssigen Zustand. Durch die Zusammenmischung der Injektionsmaterialkomponenten wird eine chemische Reaktion gestartet, die eine zeitabhängige Erhöhung der Viskosität bis hin zu einer Aushärtung zur Folge hat. Die Gelierung in einem porösen Medium ist ein weitaus komplizierterer Prozess: Vernetzende Gele bilden Aggregate, wenn einzelne Polymerketten chemisch vernetzt oder physikalisch mit anderen Polymerketten verwickelt werden [62]. Die Größe dieser Aggregate nimmt während des Gelierungsprozesses zu und es wird letztendlich ein einzelnes großes Gelmolekül gebildet.

Ein Injektionsmaterial wird bis zu einer Viskosität von 100 [cPa.s] als pumpbar betrachtet (Grenze der Pumpbarkeit). Die Kippzeit bzw. Gelierungszeit (t_G) ist die Zeit von der Mischung der Injektionskomponenten bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Grenze der Pumpbarkeit erreicht wird [152].

Kutzner (1991) hat die Verarbeitbarkeit von Injektionsmaterialien in drei Bereiche unterteilt. Ein Injektionsmaterial wird als ‚ideal' bezeichnet, wenn die Viskosität des Materials in den ersten 30 Minuten unter 10 [mPa.s] bleibt. Wenn das Injektionsmaterial eine Start-Viskosität zwischen 10 und 100 [mPa.s] besitzt und mindestens 20 bis 30 Minuten pumpbar ist, befindet sich dieses im ‚praktikablen' Bereich. Liegt die Viskositätskurve des Materials außerhalb der genannten Bereiche, ist das Injektionsmaterial ‚vertretbar'. [99]

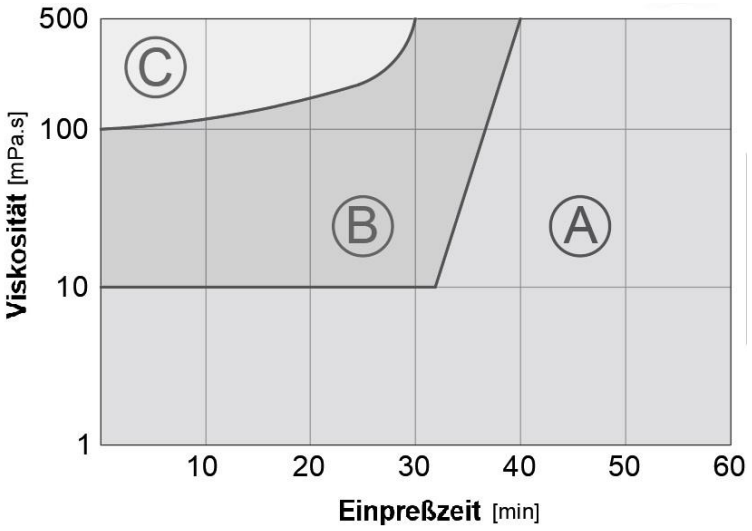


Abbildung 6-8: Bereiche der Verarbeitbarkeit von Injektionsmaterialien: A: Idealer Bereich | B: Praktikabler Bereich | C: Vertretbarer Bereich (Eigene Darstellung nach Kutzner 1991, S. 240)

Die Viskosität des Injektionsmittels ist von der Temperatur, der Zeit und möglicherweise von der Schergeschwindigkeit abhängig. Es gibt mehrere Methoden, mit denen die Viskosität einer Flüssigkeit untersucht und ermittelt werden kann, z. B. Messbecher, Kapillarviskosimeter, Kugelfallviskosimeter usw. Die zeitliche Entwicklung der Viskosität in Abhängigkeit von Temperatur und Schergeschwindigkeit wurde in dieser Arbeit mit einem Rheometer gemessen (Abbildung 6-9).

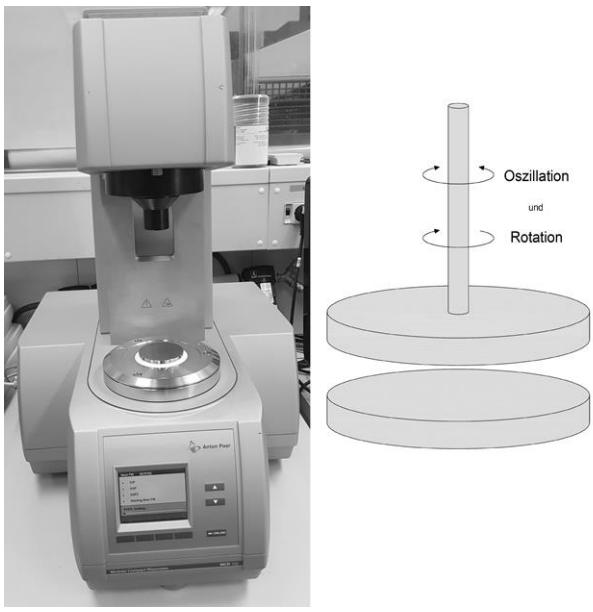


Abbildung 6-9: Rheometer (Anton Paar MCR102)

Mittels eines Rheometers können Rotations- und Oszillationsversuche durchgeführt werden. Durch den Rotationsversuch kann die zeitliche Entwicklung der Viskosität ermittelt werden. Die Temperatur, die Schergeschwindigkeit und der Plattenabstand lassen sich bei diesem Versuch variieren.

Der Fließquerschnitt im Boden ist von der Korngröße und der Kornform abhängig. Bei einer gleichbleibenden Kornform gilt: Je grober die Bodenpartikel sind, desto größer ist auch der Fließquerschnitt. In einem Boden mit splittrigen Partikeln ist normalerweise der Fließweg enger als in einem Boden mit runden Partikeln. Die Spaltweite im Rheometer simuliert den Fließquerschnitt bzw. den Fließweg im Boden. Der Fließquerschnitt ändert sich entlang des Fließwegs und in der Folge ändert sich die Fließgeschwindigkeit. Für Strömungen inkompressibler Flüssigkeiten gilt bei sich änderndem Fließquerschnitt das Kontinuitätsgesetz ($Q = v.A$); daher kann bei einer Injektion mit dem konstanten Injektionsrat (Q) daraus geschlossen werden, dass die Fließgeschwindigkeit (v) durch eine Vergrößerung des Fließquerschnitts (A) verringert wird. Die Schergeschwindigkeiten im Rheometer simulieren die Fließgeschwindigkeit der Injektionsmaterialien im Boden.

Die Peltier-Temperierkammer ist in der Lage, das Test-Material in kurzer Zeit zwischen -40 °C und 200 °C mit einer sehr guten Genauigkeit zu temperieren. Je nach geografischer Lage der Baustelle und der Jahreszeit liegt die Bodentemperatur in der Regel zwischen -5 und 40 °C.

Je nach den Eigenschaften des Test-Materials können verschiedene Messsysteme beim Rheometer eingesetzt werden. Die üblichen Messsysteme sind in Abbildung 6-10 dargestellt.

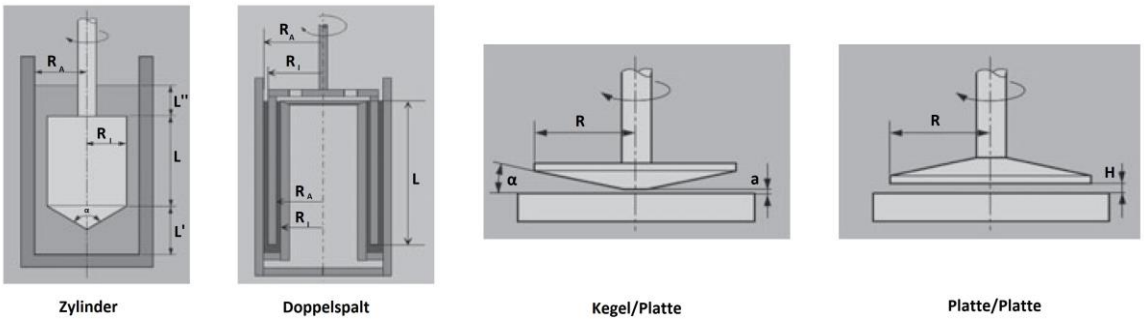


Abbildung 6-10: Geometrien der Messsysteme von Rotationsviskosimetern (Kumpugdee-Vollrath 2011, S. 243)

Zylinder-Messsystem (CC):

Ein koaxiales Zylinder-Messsystem besteht aus Messkörper und -becher (innerer und äußerer Zylinder). In der Regel dreht sich der innere Zylinder bei der Messung, während der Messbecher unbeweglich bleibt (Searle-Methode). Ein geringer Abstand zwischen den Zylindern im unteren Bereich sowie die kurzen Zylinder können zu Messfehlern führen und müssen vermieden werden. Für eine homogene Verteilung der Schubspannungen im Prüfmaterial ist der untere Teil des Messkörpers üblicherweise konisch ausgelegt. Das Zylinder-Messsystem (CC) wird als Messsystem für niedrigviskose Flüssigkeiten eingesetzt. [98, 121]

Doppelspalt-Messsystem (DG):

Das Doppelspalt-Messsystem ist ein modifiziertes Zylinder-Messsystem. Aufgrund seines Aufbaus wird die Scherfläche deutlich vergrößert. Dieses Messsystem wird zur Untersuchung von Materialien mit sehr niedriger Viskosität empfohlen. [98, 115]

Kegel/Platte-Messsystem (CP):

Beim CP-Messsystem sind die Scherbedingungen aufgrund des kegelförmigen Aufbaus des Messsystems in der gesamten Messspalte gleich. Nach DIN EN ISO 3219 sollte der Kegelwinkel 4° nicht überschreiten. Der Empfehlenswert wert wäre jedoch 1°. Aufgrund des geringen Abstands zwischen den Platten in der Mitte dieses Systems ist es für die Untersuchung von partikelhaltigen Flüssigkeiten nur bis zu einer bestimmten Partikelgröße geeignet. Der zweite Nachteil dieses Messsystems liegt darin, dass die Spaltweite bzw. der

Plattenabstand sich nicht einstellen lässt. Das Kegel/Platte-Messsystem (CP) wird als Messsystem für niedrig- bis hochviskose Flüssigkeiten eingesetzt. [55, 115]

Platte/Platte-Messsystem (PP):

Da die Spaltweite bei dem PP-Messsystem überall gleich groß ist und es kreisförmig aufgebaut ist, verteilt sich die Schergeschwindigkeit über den Radius der Platte nicht gleichmäßig. Der Vorteil gegenüber dem Kegel/Platte-Messsystem besteht darin, dass die Spaltweite hier beliebig eingestellt werden kann. [115, 121]

Ein Oszillationsversuch mit dem Rheometer ermöglicht eine viskoelastische Materialuntersuchung im flüssigen und festen Zustand. Durch diesen Versuch kann die zeitliche Entwicklung der Speicher- und Verlustmodule ermittelt werden. Die gespeicherte Deformationsenergie im Prüfmaterial wird Speichermodul G' (elastischer Anteil) und die verlorene Deformationsenergie infolge der inneren Reibungen wird Verlustmodul G'' (viskoser Anteil) genannt. [61]

Die Zeit, in der das Speichermodul (G') zu steigen beginnt, wird als Beginn der chemischen Reaktion bzw. als die kritische Zeit (t_{CR}) bezeichnet. Die Zeit, in der die Speicher- und Verlustmodule gleich groß sind ($G'=G''$), wird dagegen Sol/Gel-Übergangszeit (t_{SG}) genannt [115]. Die Sol/Gel-Übergangszeit definiert eine Grenze zwischen flüssigen und festen Phasen (siehe Abbildung 6-11).

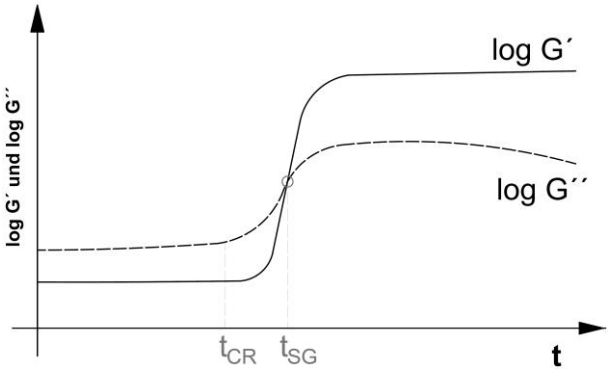


Abbildung 6-11: Zeitliche Entwicklung der Speicher- und Verlustmodule eines aushärtenden bzw. gelbildenden Materials (Eigene Darstellung nach Mezger 2014, S. 132)

6.2.2 Verdünnungseffekt des Injektionsmaterials (Diffusion)

Das Mischen als weiterentwickelte Disziplin wurde in den 1950er-Jahren begründet und erreichte seinen Höhepunkt mit der Veröffentlichung von Uhl und Gray im Jahr 1966 sowie Nagata im Jahr 1975. Das Mischen kann als jede Operation betrachtet werden, bei der

versucht wird, ein inhomogenes System in ein homogenes System umzuwandeln. Die Inhomogenität kann eine Konzentration, Phase oder Temperatur sein. [125, 133]

Das Mischen kann zwischen Gas-, Flüssig- und Festphasen erfolgen. Das Flüssig/Flüssig-Gemisch ist eines der schwierigsten Mischprobleme und ist durch Mischen von mischbaren (hydrophilen) oder nicht mischbaren (hydrophoben) Flüssigkeiten trennbar. Die Löslichkeit hängt von den Eigenschaften der Materialien ab, die es ihnen ermöglichen, sich zu einer homogenen Phase zu vermischen. Beim Mischen von mischbaren Flüssigkeiten hilft die molekulare Diffusion, das Mischsystem zu homogenisieren. [70, 94]

Das Grundwasser wird beim Injektionsvorgang im vollgesättigten Boden durch Injektionsmaterialien nach vorne verschoben. Zum Großteil findet die Verdünnung des Injektionsmaterials an der Kontaktfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten statt (Diffusion). Die Verdünnung des Injektionsmaterials mit dem Haftwasser im Injektionskörper ist gering und kann vernachlässigt werden. Durch die Diffusion nimmt dabei das Volumen der Injektionsflüssigkeit zu und die Gelkonzentration sinkt [150].

Treten Mischgeschwindigkeiten und chemische Reaktionsgeschwindigkeiten auf gleichen Zeitskalen auf, können Mischeffekte eine entscheidende Rolle spielen. Das Mischen und die chemische Reaktion sind eng miteinander verbunden. Falls die Reaktion nur zu einem Produkt führen kann, beeinflussen das Mischen und der Stoffübergang nur die Reaktionsgeschwindigkeit. Ist mehr als ein Produkt möglich, kann die Kontaktaufnahme ebenfalls die Produktverteilung beeinflussen. Als Beispiel wird angenommen, dass die Flüssigkeiten **A** und **B** gemischt werden. **R** wird als das gewünschte Produkt betrachtet. Die Reaktion von **A** mit **B** unter Bildung des gewünschten Produkts **R** erfolgt zusammen mit der unerwünschten Reaktion von **R** mit **B** unter Bildung von **S**. Im Fall **(a)** findet, wie in Abbildung 6-12 dargestellt wird, das Mischen statt, bevor die Reaktion erfolgt. **A** und **B** sind gut gemischt und es bildet sich sehr wenig unerwünschtes Material **S**. Im Fall **(b)** gibt es eine Grenze zwischen **A** und **B**. Obwohl viel erwünschtes Produkt **R** gebildet wird, reagiert dieses schnell mit hohen Konzentrationen von **B**, um unerwünschtes Produkt **S** zu bilden. Dieser Effekt kann die Reaktionsgeschwindigkeit, die Produktverteilung oder beides beeinflussen. [133]

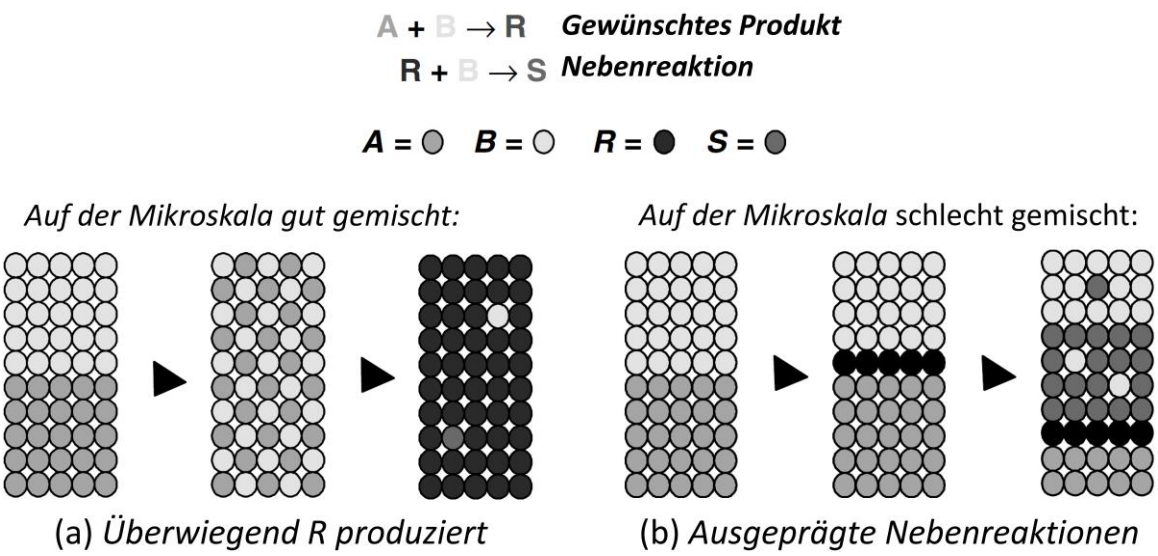


Abbildung 6-12: Diffusion und chemische Reaktion an der Kontaktfläche der Flüssigkeiten A und B (Paul et al. 2004, S. 759)

Um den Verdünnungseffekt bei numerischen Simulationen berücksichtigen zu können, müssen die thermophysikalischen Eigenschaften von Fluidgemischen bei den Massen- und Energiebilanzgleichungen berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch den Einsatz der Diffusionskoeffizienten. Der Diffusionskoeffizient (D) in Flüssigkeiten kann mit der Stokes-Einstein-Gleichung (Gl. (6-13)) ermittelt werden:

$$D = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot R_0} \tag{6-13}$$

Der hydrodynamische Radius der diffundierenden Teilchen (R_0) ist von chemischen und physikalischen Eigenschaften des Injektionsmittels abhängig.

Die zeitliche Änderung der Gelkonzentration (c) an jedem beliebigen Punkt im Boden lässt sich mit dem 2. Fickschen Gesetz ermitteln (Gl. (6-14)):

$$\frac{\partial c}{dt} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \tag{6-14}$$

Die Bodengeometrie wird bei den Berechnungen berücksichtigt, indem der effektive Diffusionskoeffizient (D^*) anstelle des Diffusionskoeffizienten (D) eingesetzt wird:

$$D^* = D \cdot \tau \tag{6-15}$$

Der Tortuositätsfaktor (τ) beschreibt den Grad des Labyrinths in einem porösen Medium und kann experimentell oder mittels der theoretischen Abschätzungsgleichungen ermittelt werden.

Je nach eingesetztem Injektionsmaterial ist eine minimale Gelkonzentration von 30 bis 70 % erforderlich, damit dieses ausreagieren kann. Der nicht ausreagierte Teil des Injektionsmittels wird mit dem Grundwasser langsam weggespült.

6.3 Betriebsparameter der eingesetzten Injektionstechnik

Die eingesetzte Injektionstechnik ist von den Eigenschaften der Injektionsmaterialien abhängig. Um die Injektionsreichweite im Boden ermitteln zu können, müssen alle Injektionsbestandteile und -elemente als ein geschlossenes System betrachten werden. Die Injektionspumpen werden oft mit Luft- bzw. Öldruck betrieben. Der Injektionsdruck ist abhängig von der Pumpe, dem Kompressor und den Anschlüssen, die im System vorhanden sind, und schwankt während des Injektionsvorgangs. Das Übersetzungsverhältnis der Pumpe, die hydraulischen und mechanischen Druckverluste im eingesetzten Injektionssystem sowie die Fließgeschwindigkeit bestimmen die Höhe des Injektionsdrucks. Aus diesem Grund müssen die Pumpe und die Anschlüsse für die Ermittlung der Injektionsreichweite kalibriert werden. Die genaue Beschreibung des Kalibrierungsvorgangs erfolgt in Abschnitt 7.3.

7 Experimentelle Untersuchungen zur Injizierbarkeit des Bodens

7.1 Untersuchte Injektionsmaterialien

Die Art des eingesetzten Injektionsgutes ist von der Bodenart bzw. der Bodendurchlässigkeit abhängig. In der vorliegenden Arbeit wurden das Ausbreitungsverhalten (Penetrationsinjektion) und die Festigkeitsentwicklung mit zwei Acrylatgelen und einem Polyurethanharz untersucht (siehe Abbildung 7-1).

Abbildung 7-1: Komponenten der untersuchten Injektionsmaterialien

Die untersuchten Acrylatgele bestehen aus drei bzw. vier Komponenten, die vor der Injektion in zwei Behältern (A und B) gemischt werden mussten. Die A-Komponenten bestehen aus Stammkomponenten und einem Katalysator bzw. Beschleuniger und die B-Komponenten bestehen aus Wasser und einem Initiator bzw. Härter (Abbildung 7-2). Sie wurden mit einer Zwei-Komponenten-Injektionspumpe in den Baugrund injiziert. Durch die Zusammenmischung der Injektionsmaterialkomponenten im Boden wurde eine chemische Reaktion gestartet, die eine zeitabhängige Erhöhung der Viskosität bis hin zur Aushärtung zur Folge hatte. Acrylatgele weisen allgemein eine extrem niedrige Viskosität auf und können bei vielen Bodenarten eingesetzt werden.

Abbildung 7-2: Chemische Zusammensetzung von Acrylatgelen (Lufsky 2009, S. 471)

Acrylatgel I ist ein wasserquellfähiges Hydrogel, das zu einem gummiartigen, flexiblen Material aushärtet (links in Abbildung 7-3). Die Injektionskomponenten wurden standardmäßig mit folgendem Gewichtsanteil der Komponente zusammengemischt:

- Komponente A = A I (48,43 %) + A II (2,42 %)
- Komponente B = B (0,73 %) + Wasser (48,43 %)

Acrylatgel II ist dagegen im ausreagierten Zustand hart und hat eine relativ große Druckfestigkeit (Abbildung 7-3 Mitte). Die Injektionskomponenten wurden standardmäßig mit folgendem Gewichtsanteil zusammengemischt:

- Komponente A = A I (44,84 %) + A II (5,61 %)
- Komponente B = B I (44,84 %) + B II (0,90 %) + Wasser (3,81 %)

Das untersuchte Polyurethanharz besteht aus zwei Komponenten (Polyol und Diisocyanate bzw. Polyisocyanate). Das Volumenverhältnis der Komponenten beträgt 1:1. Nach Bedarf kann die Reaktionszeit durch Zugabe des Katalysators in der Mischung verkürzt werden. Polyurethanharz kann sowohl mit einer 1K-Pumpe als auch mit einer 2K-Pumpe injiziert werden. Das in Abwesenheit von Wasser ausreagierte Produkt ist ein Harz mit einer sehr hohen Druckfestigkeit. In Kombination mit Wasser entsteht jedoch Schaum (rechts in Abbildung 7-3).

Abbildung 7-3: Untersuchte Injektionsmaterialien im ausreagierten Zustand

7.2 Rheologische Untersuchung der Injektionsmaterialien

7.2.1 Versuchsbeschreibung

Um die Messung zu starten, wurde das Injektionsmaterial zunächst mittels einer Doppelspritze (Abbildung 7-4) auf die Peltier-Temperierkammer verteilt. Danach wurde das ausgewählte Messsystem in die Messposition gefahren. Die Spaltweite zwischen der Temperierkammer und dem Messsystem sollte vollständig mit Prüfmaterial gefüllt werden. Das überschüssige Material konnte mittels des Trimmwerkzeugs entfernt werden. Die Startphase kann je nach Messsystem und je nach Erfahrung des Prüfers zwischen 30 bis 70 Sekunden dauern. Diese Zeit, die Startzeit oder Einbauzeit genannt werden kann, wurde genau gemessen und bei den Auswertungen berücksichtigt. Je kürzer die Startzeit ist, desto

genauer ist die Messung. Die Messfehler, die infolge der Startzeit verursacht werden, wurden vernachlässigt. Die zeitliche Entwicklung der Viskosität wurde bei -5, 0, 5, 10, 20, 30 und 40 °C gemessen. Das Kegel/Platte-Messsystem liefert zuverlässige Ergebnisse für Injektionsmaterialien, daher wurden die Messungen zum Großenteil mit diesem Messsystem (Durchmesser = 5 cm) durchgeführt. Um die Einwirkung von Schergeschwindigkeit und Materialmenge zu untersuchen, wurde die Viskosität zusätzlich mit einem Platte/Platte-Messsystem (PP-Durchmesser = 2,5 cm) mit den drei verschiedenen Schergeschwindigkeiten (100, 150 und 200 s^{-1}) und Spaltweiten (0,5, 0,7 und 0,9 mm) gemessen. Eine genauere Betrachtung des Versuches sowie der eingesetzten Messsysteme erfolgt in Abschnitt 6.2.1.

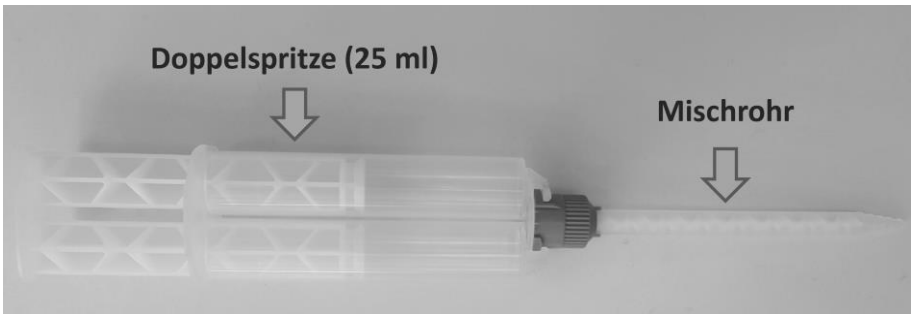


Abbildung 7-4: Leere Doppelspritze (25 ml) inkl. Mischrohr

Es gibt unterschiedliche Näherungsmethoden, die für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Viskosität verwendet werden. Die folgende Gleichung von Finsterle et al. [62] gibt eine gute Annäherung an die gemessenen Fließkurven:

$$\mu_{t,I} = \mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t} \tag{7-1}$$

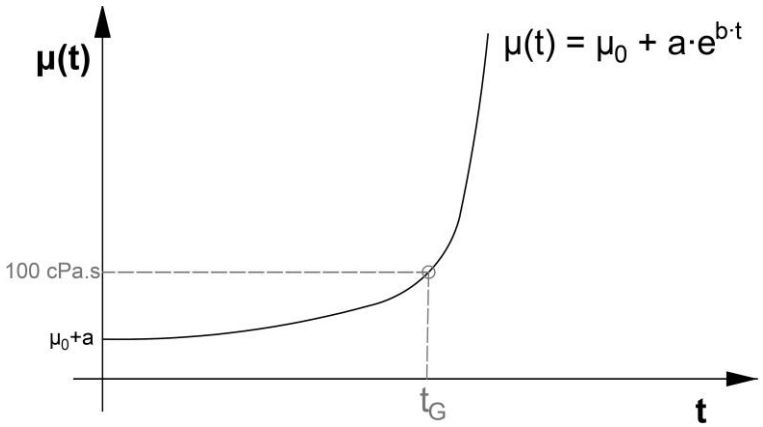


Abbildung 7-5: Zeitabhängige Viskositätsentwicklung eines aushärtenden bzw. gelbildenden Injektionsmateriales

Die Einheit der durch die vorgestellte Näherungsgleichung ermittelten Viskosität lautet mPa.s. Wie bereits erwähnt wurde, ist die Gelierungszeit die Zeit von der Mischung der

Injektionskomponenten bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Grenze der Pumpbarkeit (100 [cPa.s]) erreicht wird. Nach dieser Definition kann die Gelierungszeit (t_G) mittels folgender Gleichung ermittelt werden:

$$t_G = \frac{\ln\left(\frac{1000 - \mu_0}{a}\right)}{b} \tag{7-2}$$

Die Injektionsreichweite wird zum großen Teil durch die Viskosität beeinflusst. Das Injektionsmaterial fließt im Boden, so lange es pumpbar ist ($t<t_G$). Um eine gute Näherungsgleichung zur Viskositätsberechnung zu erzielen, wurden die Messwerte außerhalb des pumpbaren Bereichs bei den Auswertungen nicht berücksichtigt.

7.2.2 Ergebnisse und Auswertungen

Die gemessenen Viskositätsverläufe bei den verschiedenen Temperaturen für Acrylatgel I sind in Abbildung 7-6 dargestellt. Die Entwicklung der Viskosität von Acrylatgel I ist bei niedrigen Temperaturen langsamer als bei höheren Temperaturen. Acrylatgel I ist das einzige der untersuchten Injektionsmaterialien, das bei -5 °C gefroren ist. Daher ist Acrylatgel I bei Bodentemperaturen unter 0 °C ohne zusätzliche Maßnahmen wie Vorwärmen nicht einzusetzen.

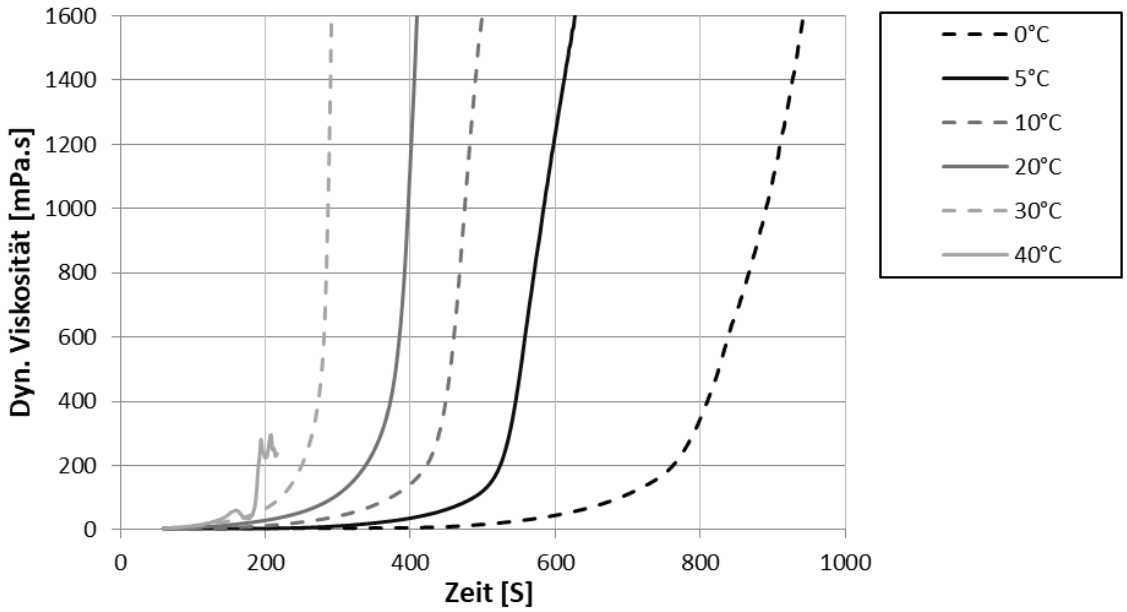


Abbildung 7-6: Zeitliche Entwicklung der Viskosität für verschiedene Temperaturen – Acrylatgel I

Durch Anpassen der Gleichung (7-1) für die gemessenen Viskositätsdaten wurden die Viskositätskonstanten [μ_0, a, b] ermittelt (Tabelle 7-1). Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen (R-square bzw. R^2) ist größer als 90 %, teilweise sogar größer als 99 %, was

eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der ermittelten Näherungsgleichung beweist. Eine exponentielle Abnahme der Gelierungszeit aufgrund der Temperaturerhöhung ist in Abbildung 7-7 zu erkennen.

Tabelle 7-1: Viskositätskonstanten und Gelierungszeit – Acrylatgel I

		μ_0	a	b	R-square	t_G [s]
Temperatur	**-05°C**	Gefroren				
	0°C	1,87	7,40E-02	1,05E-02	99,99%	907
	05°C	1,78	7,81E-02	1,50E-02	90,11%	631
	10°C	2,36	1,41E-01	1,78E-02	99,94%	498
	20°C	1,95	5,46E-01	1,77E-02	99,94%	424
	30°C	1,94	5,58E-01	2,37E-02	99,97%	317
	40°C	1,99	5,09E-01	2,99E-02	90,27%	253

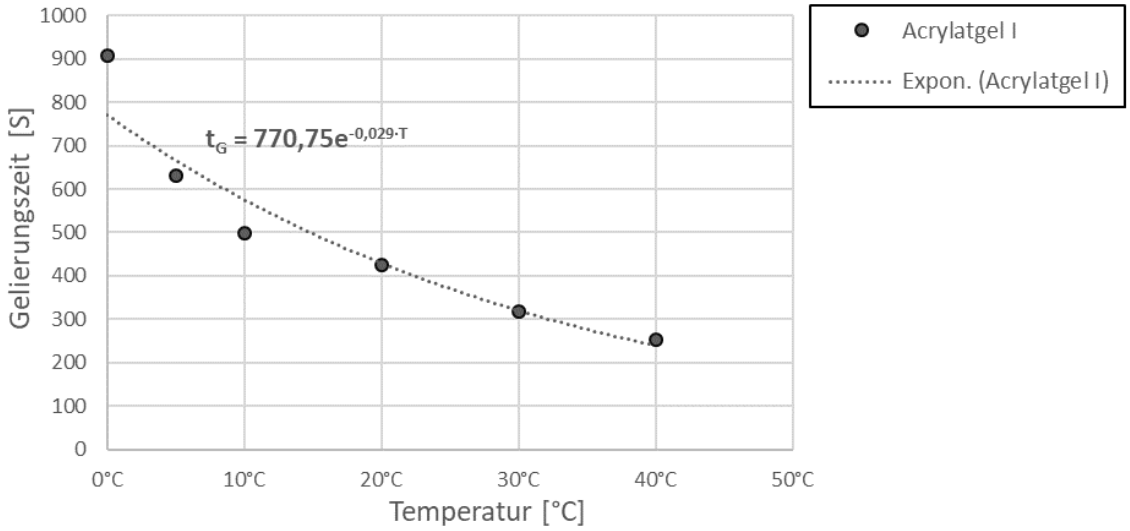


Abbildung 7-7: Beziehung zwischen Gelierungszeit und Temperatur – Acrylatgel I

Wie bereits erwähnt, wurden die Messungen mit drei verschiedenen Schergeschwindigkeiten und drei Plattenabständen durchgeführt, um die Einflüsse der Materialmenge und Fließgeschwindigkeit auf den Viskositätsverlauf zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) zeigen bei diesen Messungen, dass die erwähnten Parameter den Viskositätsverlauf deutlich beeinflussen. Die Messergebnisse mit verschiedenen Plattenabständen zeigen eine Zunahme der Gelierungszeit durch die Erhöhung des Plattenabstandes bzw. der Materialmenge. Ein rechnerisches Modell für die Ermittlung des Viskositätsverlaufs unter Berücksichtigung der Spaltweite und Fließgeschwindigkeit kann allerdings erst nach einem größeren Versuchsnetz erstellt werden.

Tabelle 7-2: Einwirkung der Schergeschwindigkeit und des Plattenabstandes auf die Gelierungszeit – Acrylatgel I

Schergeschwindigkeit						
	μ_0	a	b	R-square	t_G [s]	A.v.M.
γ'_1= 100 s^{-1}	1,95	1,03E+00	1,14E-02	99,24%	601	2,0 %
γ'_2= 150 s^{-1}	1,95	7,45E-01	1,34E-02	99,56%	539	-8,6 %
γ'_3= 200 s^{-1}	1,95	9,87E-01	1,10E-02	99,42%	628	6,5 %
Plattenabstand						
d_2 = 0,5 mm	1,95	3,30E-01	1,41E-02	99,62%	570	-6,5 %
d_1 = 0,7 mm	1,95	1,03E+00	1,14E-02	99,24%	601	-1,4 %
d_3 = 0,9 mm	1,95	1,68E+00	9,70E-03	99,86%	658	7,9 %

Um ein zeitabhängiges viskoelastisches Verhalten von Acrylatgel I unter Berücksichtigung der Temperatur zu beurteilen, wurden Oszillationsversuche mit einer konstanten Scherbelastung durchgeführt. Der Deformationsamplitude (γ) wurde 1 % bei der Kreisfrequenz (ω) von 10 [rad/s] vorgegeben. Die gemessenen Verläufe der Speicher- und Verlustmodule sowie die ermittelten Sol/Gel-Übergangszeiten (t_{SG}) sind für verschiedene Temperaturen in Abbildung 7-8 dargestellt.

Es ist zu erwarten, dass die Werte von Speicher- und Verlustmodulen nach der chemischen Reaktion abflachen. Acrylatgel I schrumpft nach der Aushärtung, sofern es sich nicht in Kontakt mit Wasser befindet. In der Folge wird der Kontakt zwischen der Messplatte und dem Testmaterial bei der Messung unterbrochen. Daher war eine längere Durchführung der Messung zur Ermittlung der endgültigen Speicher- und Verlustmodule wegen der großen Messfehler nicht möglich. Anhand des Ablaufs der Diagramme ist jedoch erkennbar, dass die Steigerung dieser Module bei den höheren Temperaturen stärker war als bei den niedrigen Temperaturen, d. h. bei höheren Temperaturen kann ein höheres Speichermodul (G') nach der Aushärtung erwartet werden als bei niedrigen Temperaturen. Je höher die Umgebungstemperatur ist, desto steifer ist der Injektionskörper.

Die Reaktionszeit von Acrylatgel I kann durch die Reduzierung der Salzmenge (B-Komponente) verlängert werden. Allerdings ist die Einstellmöglichkeit auf ein Minimum der Salzmenge von 40 [g] je 20 [kg] AI-Komponente begrenzt. Die Reaktionszeit mit dem genannten Verfahren kann bis zu ca. 42 Minuten bei einer Temperatur von 5 °C verlängert werden. Die Messwerte mit den nächsten beiden Injektionsmitteln finden sich in Anhang A.

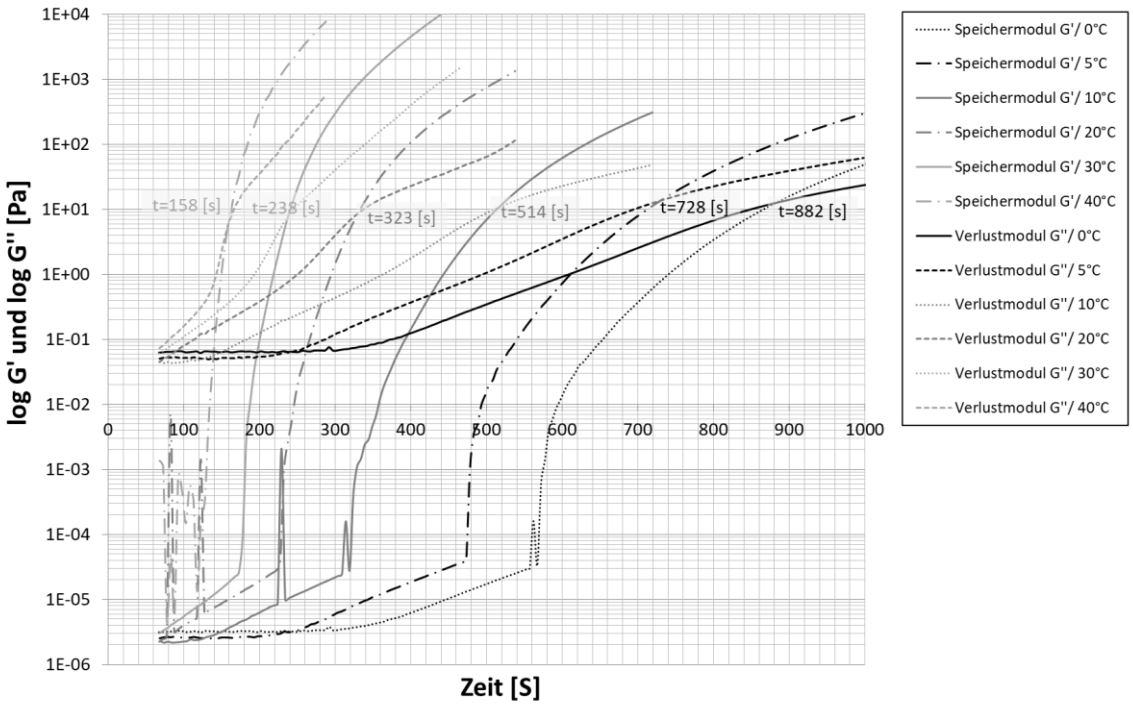


Abbildung 7-8: Zeitliche Entwicklung der Speicher- und Verlustmodule für verschiedene Temperaturen – Acrylatgel I

7.3 Ermittlung der Betriebsparameter der Injektionspumpe

Die Injektionsmaterialien wurden im Labor mit Hilfe eines Kartuschengerätes in den Boden eingepresst. Diese Injektionstechnik wird wegen des geringen Volumens der Kartuschen (ca. 1,5 [Liter]) auf den Baustellen nur selten für die Bodeninjektion eingesetzt. Üblicherweise werden Zwei-Komponenten-Injektionspumpen für den Injektionsprozess von Acrylatgelen verwendet (Abbildung 7-9). Nachfolgend wird beschrieben, wie das eingesetzte Kartuschengerät kalibriert wurde. Die Betriebsparameter der 2K-Injektionspumpen sind in Anhang B aufgeführt.

Abbildung 7-9: Kartuschengerät (links), 2K-Pumpen (rechts)

7.3.1 Übersetzungsverhältnis der Pumpe

Das Flächenverhältnis der Kolben, die sich in der Luftkammer und in den Flüssigkeitskammern befinden, bestimmt das Übersetzungsverhältnis der Pumpe. Falls auf Druckverlust im System verzichtet wird, liegt das Übersetzungsverhältnis zwischen dem Luftdruck und Injektionsdruck für das eingesetzte Kartuschengerät bei 1:0,86 (siehe Abbildung 7-10 und Gleichung (7-3)).

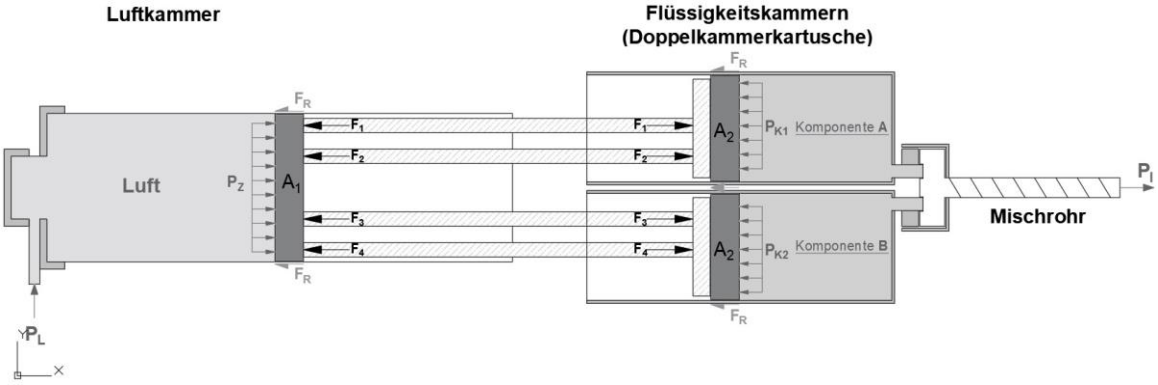


Abbildung 7-10: Auf das Kartuschengerät wirkende Kräfte und Druckspannungen

$$P_L \cdot A_1 = 4 \cdot F_{1-4} + \Sigma F_R = 2 \cdot P_I \cdot A_2 + \Sigma F_R$$
$$A_1 \approx 76{,}20\ cm^2\ ;\ A_2 = 44{,}18\ cm^2 \tag{7-3}$$

$$P_I = 0{,}86 \cdot P_L - 0{,}01 \cdot \Sigma F_R$$

7.3.2 Druckverluste in Pumpe, Leitungen und Anschlüssen

Nach dem Energieerhaltungssatz ist die Summe aus kinetischer Energie, potentieller Energie und innerer Energie in einem abgeschlossenen System konstant. Diese Beziehung ist die Grundlage der Bernoulli-Gleichung. Die erweiterte Bernoulli-Gleichung unter Berücksichtigung der Verluste lautet somit:

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_v \tag{7-4}$$

Die Druckverluste sind bedingt durch die hydraulische und mechanische Reibung in den Leitungen und durch Bestandteile der Pumpe. Beispielsweise die Reibung zwischen Kolben und Zylinder ist mechanisch. Die hydraulische Reibungsverlusthöhe kann für inkompressible, stationäre und isotherme Strömungen mit der DARCY-WEISBACH-Gleichung ermittelt werden [73]:

$$h_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \tag{7-5}$$

Bei der Berechnung des Widerstandsbeiwerts muss zwischen laminaren und turbulenten Strömungen unterschieden werden. Die Flüssigkeitsteilchen bewegen sich bei einer laminaren Strömung in geordneten Schichten, die sich nicht miteinander vermischen. Im Gegensatz dazu bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen bei einer turbulenten Strömung nicht mehr in geordneten Schichten, was zu Verwirbelungen der Teilchen führt. Julius Rotta (1956) hat $R_{e,\,krit.} = 2320$ als eine Grenze zwischen laminaren und turbulenten Strömungen bei der Rohrströmung definiert [141]. Der dimensionslose Widerstandsbeiwert lässt sich für laminare Strömungen mit Gleichung (7-6) ermitteln.

$$\lambda = 64/R_e \tag{7-6}$$

Für turbulente Strömungen gilt:

$$\lambda = f(R_e \;\; u. \;\; Rohrrauigkeit) \tag{7-7}$$

Die Injektionspumpe besteht aus mehreren Bauteilen und Anschlüssen, die parallel oder hintereinander montiert sind. Jedes Bauteil ist mit einem gewissen Druckverlust im System verbunden. Bei der Hintereinanderschaltung ist der Gesamtwiderstand wegen des gleich bleibenden Volumenstroms (Q) in den Bauteilen gleich der Summe der Einzelwiderstände (siehe Abbildung 7-11 und Gleichung (7-8)).

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{7-8}$$

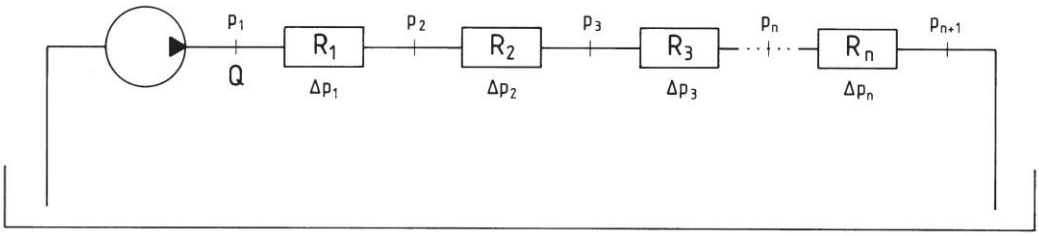


Abbildung 7-11: Resultierender Druckverlust bei einer Hintereinanderschaltung der Bauteile (Grollius 2014, S. 40)

Bei der Parallelschaltung (Abbildung 7-12) lässt sich der Gesamtwiderstand mit der nachfolgenden Gleichung errechnen [73]:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \tag{7-9}$$

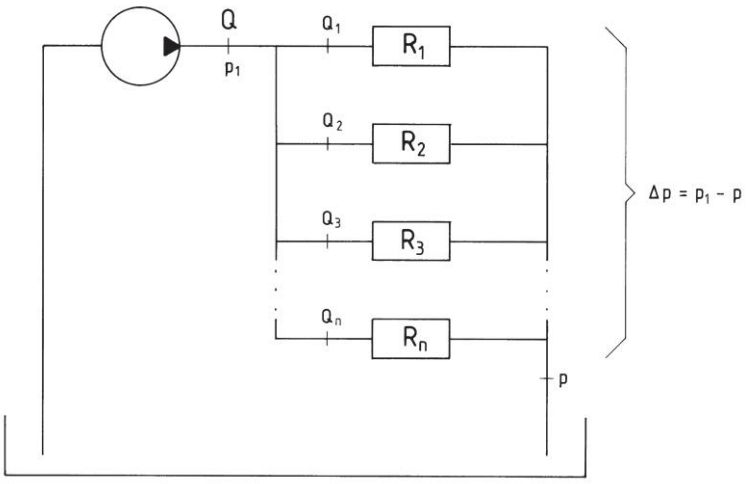


Abbildung 7-12: Resultierender Druckverlust bei einer Parallelschaltung der Bauteile (Grollius 2014, S. 40)

Um den Druckverlust im vorhandenen System zu bestimmen, wurde das Kartuschengerät mit den in Abbildung 7-13 dargestellten Sensoren und Anschlussmodulen aufgerüstet. Die Kartuschen wurden mit Wasser gefüllt und die Druckabläufe wurden mit den zwei Druckaufnehmern digital erfasst.

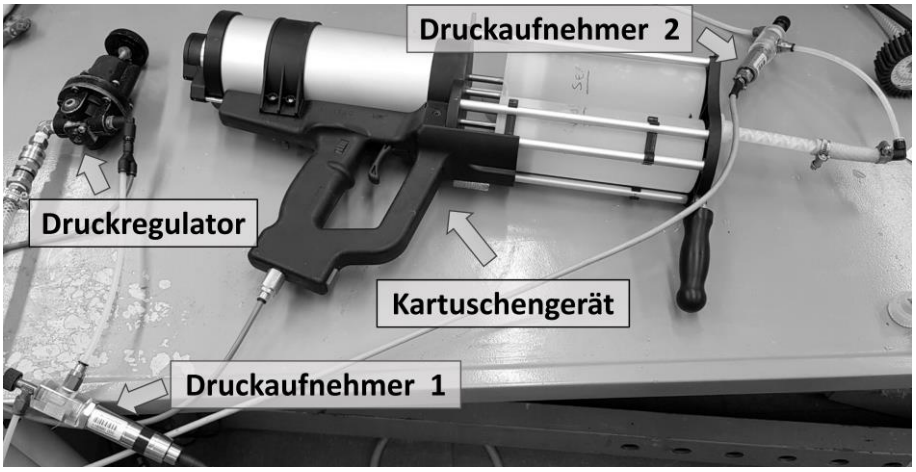


Abbildung 7-13: Versuchsaufbau – Druckübersetzungsverhältnis

Zunächst wurde der Hahn beim Druckaufnehmer 2 zugedreht. So kann die Flüssigkeit (Wasser) nicht fließen und die Fließgeschwindigkeit liegt bei 0 [m/s]. Nach der DARCY-WEISBACH-Gleichung (7-5) findet daher kein hydraulischer Druckverlust im System statt und der ermittelte Druckverlust ist nur mechanisch. Die Koeffizienten einer linearen Regression zeigen, wie groß das Druckübersetzungsverhältnis und die Summe der mechanischen Druckverluste sind (Abbildung 7-14).

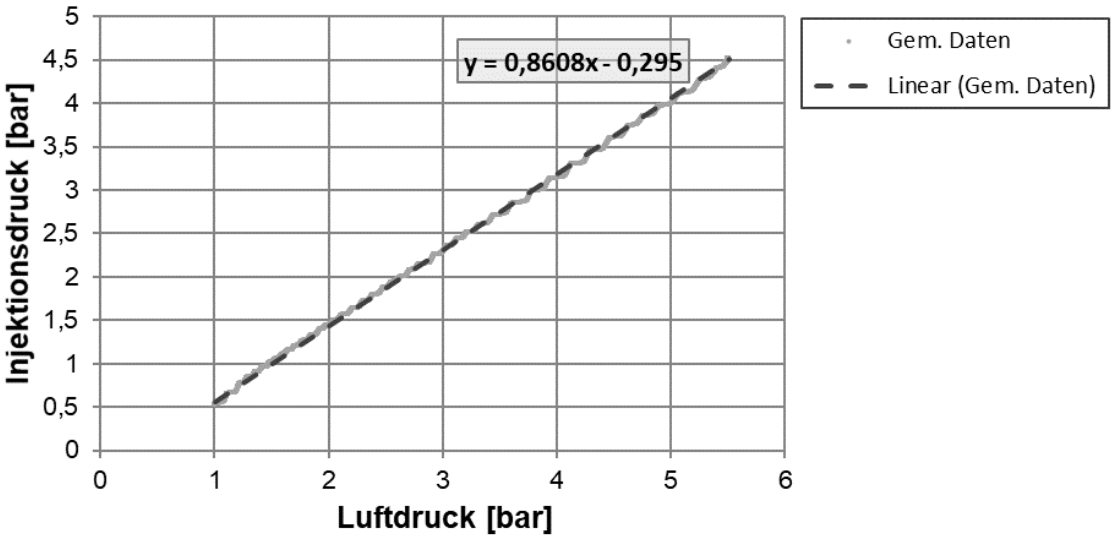


Abbildung 7-14: Druckübersetzungsverhältnis und Summe der mechanischen Druckverluste – Kartuschengerät

Die mit der mathematisch-physikalischen Gleichung (7-3) ermittelten und gemessenen Übersetzungsverhältnisse stimmen miteinander überein und liegen beide bei 0,86. Mittels der in Abbildung 7-14 ermittelten Regressionsgleichung konnte ein mechanischer Druckverlust von 0,295 [bar] festgestellt werden.

Die hydraulischen Druckverluste finden in Zylinder, Leitungen und Anschlüssen der Pumpe, in den Zulaufschläuchen usw. statt und sind von der Flüssigkeitsgeschwindigkeit abhängig. Beim Kartuschengerät fallen die hydraulischen Druckverluste im Stabmischer und an den Kartuschenwänden ab. Um den gesamten hydraulischen Druckverlust zu ermitteln, wurde der Hahn beim Druckaufnehmer 2 voll aufgedreht. Die Druckverluste in den Messgeräten wurden vernachlässigt. Der Injektionsvorgang wurde dreimal mit verschiedenen Luftdrucken durchgeführt. Die gemessenen Injektions- und Luftdrücke für die drei Messungen sind in Abbildung 7-15 dargestellt.

Anhand der gemessenen Werte konnten die hydraulischen Druckverluste (ΔP_v) ermittelt werden (siehe Tabelle 7-3). Wie bereits erwähnt wurde, muss bei der Berechnung des Widerstandsbeiwerts zwischen laminaren und turbulenten Strömungen unterschieden werden. Nach der von Julius Rotta (1956) definierten Grenze (Re=2320) war bei der Messung 1 eine laminare Strömung und bei den Messungen 2 und 3 eine turbulente Strömung vorhanden. Die kritische Reynolds-Zahl variiert je nach der verwendeten Quelle und bezeichnet nicht exakt den Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung. Da sich die Reynolds-Zahl bei der Messung 1 knapp unter der genannten Grenze befand, wurde (wie bei den Messungen 2 und 3) der Einfluss der Rauigkeit auf den Widerstandsbeiwert ebenfalls berücksichtigt.

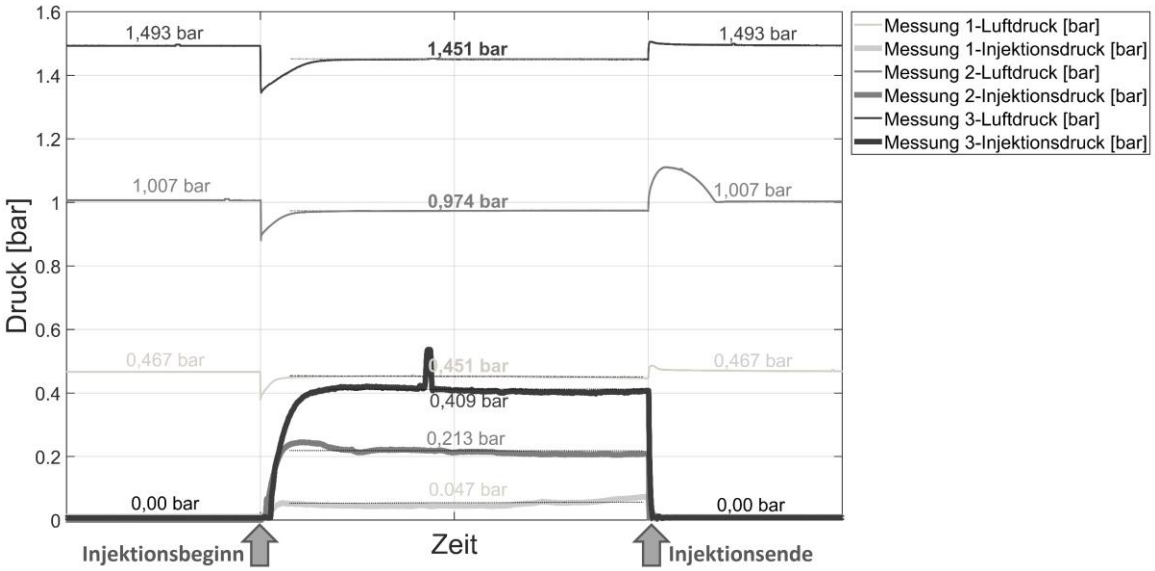


Abbildung 7-15: Injektions- und Luftdruckverlauf in den drei Messungen für die Kalibrierung des Kartuschengerätes

Tabelle 7-3: Ermittlung des Rauigkeitswerts des Kartuschengerätes

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
P_L	[Pa]	4,51E+04	9,74E+04	1,45E+05
$P_I + \Delta P_v$	[Pa]	9,32E+03	5,43E+04	9,54E+04
P_I (Messung)	[Pa]	4,70E+03	2,13E+04	4,09E+04
ΔP_v	[Pa]	4,62E+03	3,30E+04	5,45E+04
Q (Messung)	[m³/s]	1,43E-05	3,81E-05	5,00E-05
D_{Rohr}	[m]	8,0E-03	8,0E-03	8,0E-03
v	[m/s]	2,84E-01	7,58E-01	9,95E-01
R_e	[-]	2265	6039	7926
		Laminare Strömung	Turbulente Strömung	Turbulente Strömung
$\xi=2\cdot\Delta P/(\rho\cdot v^2)$	[-]	114,79	115,40	110,50
$\overline{\xi}$	[-]	**113,56**		

Die Injektionstechnik besteht aus mehreren Teilen und Anschlüssen mit unterschiedlichen Durchmessern. Die Durchflussmenge ist das Produkt aus der mittleren Fließgeschwindigkeit und dem Fließquerschnitt ($Q=v.A$). Da das nicht ausreagierte Injektionsmaterial inkompressibel ist, bleibt die Durchflussmenge in den Leitungen zu jedem Zeitpunkt unverändert. Dies deutet auf unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten in verschiedenen Injektionsteilen hin. Es wurde angenommen, dass der durchschnittliche

Durchmesser der Injektionskomponenten 0,8 [cm] beträgt. Unter Berücksichtigung der Betriebsparameter des Kartuschengerätes und der Saugspannung konnte der Injektionsdruck mittels Gleichung (7-10) ermittelt werden.

Hyd. Druckverlust

$$P_I = \boxed{0{,}8608 \cdot P_L} - \boxed{113{,}56 \cdot \rho \cdot v^2/2} - \boxed{2{,}95 * 10^4} + P_\psi - h_w \cdot \rho_w \cdot g \tag{7-10}$$

Übersetzungsverhältnis (UVP) Mech. Druckverlust (MDV)

7.3.3 Fördermenge der Pumpe (Pumpenförderrate)

Gemäß Gleichung (7-10) besteht für alle Pumpen, die mit Luft- bzw. Öldruck betrieben werden, die folgende Beziehung zwischen Betriebsdruck, Injektionsdruck und Pumpenförderrate:

$$P_I = UVP \cdot P_L - \xi \cdot \rho \cdot \left(\frac{q}{\pi . D_{Rohr}^2}\right)^2 - MDV + P_\psi - P_w \tag{7-11}$$

Durch Umformung der Gleichung (7-11) kann die Gleichung (7-12) für die Ermittlung der Pumpenförderrate erhalten werden:

$$q = \pi . D_{Rohr}^2 \cdot \sqrt{\frac{UVP \cdot P_L - MDV + P_\psi - P_I - P_w}{\xi \cdot \rho}} \tag{7-12}$$

Die höchste Pumpenförderrate liegt vor, wenn am Auslass kein Strömungswiderstand besteht oder vereinfacht gesagt der Injektionsdruck gleich null wäre ($P_I = 0$ [Pa]). Werden die Saugspannung und der Wasserdruck vernachlässigt, lässt sich die maximale Fördermenge (q_{max}) des eingesetzten Kartuschengerätes mit einer guten Annäherung mittels der folgenden Gleichung ermitteln:

$$q_{max} = \sqrt{\frac{3{,}83 \cdot 10^{-11} \cdot P_L - 1{,}31 * 10^{-6}}{\rho}} \tag{7-13}$$

7.4 Eindimensionaler Injektionsversuch

Die Injektionsreichweite mit drei Injektionsmaterialien (zwei Acrylatgelen und einem Polyurethanharz) wurde durch eindimensionale Injektionsversuche unter Berücksichtigung der Bodenart (von Kies über Sand zu Schluff), der Bodensättigung und des Injektionsdruckes untersucht.

7.4.1 Aufbau des Versuchsstands

Für den Injektionsversuch im Labormaßstab wurde der in Abbildung 7-16 dargestellte Versuchszylinder eingesetzt. Dieser besteht aus einem ca. 1 [m] langen PVC-C-Rohr mit einem Außendurchmesser von 63 [mm] und einer Wandstärke von 4,7 [mm], das sowohl oben als auch unten durch eine PVC-U-Blindflansche eingefasst ist. Während der chemischen Reaktion im Injektionsmittel kann der Versuchszylinder auf bis zu 70 °C erhitzt werden, deswegen wurde hier ein PVC-C-Rohr verwendet (PVC-C ist bis zu 80 °C konstant und kurzzeitig bis zu 100 °C temperaturbeständig).

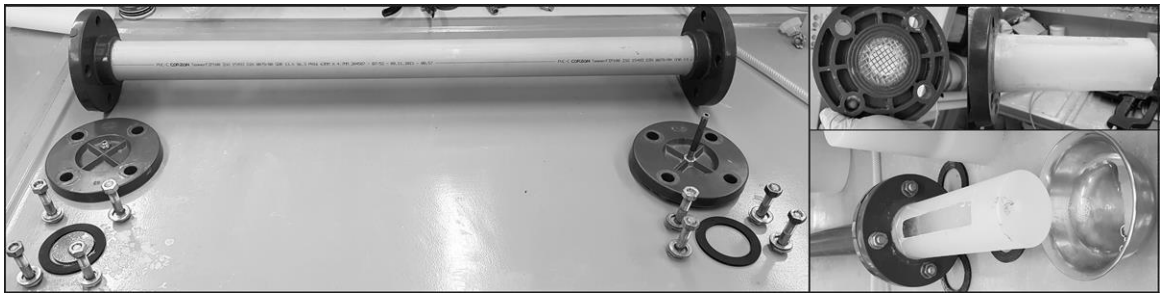


Abbildung 7-16: Versuchsaufbau 1D-Injektionsversuch (links); Versuchsaufbauänderung für die Versuche mit den teil- und vollgesättigten Böden (rechts)

In der Vorbereitungsphase wurden die Versuchszylinder für die Versuche vorbereitet und Untersuchungen zur ausreichenden Festigkeit der Versuchszylinder vorgeschaltet (bis 20 [bar]). Um ein Herauspressen bzw. Ausschalen des Injektionskörpers nach der Erhärtung zu erleichtern, wurde die Innenseite des Zylinders mit Schmier- bzw. Trennmittel besprüht. Wegen der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung des Materials wurden verschiedene Trennmittel eingesetzt. Für die Acrylatgele wurden ein handelsübliches Schmieröl (WD-40) sowie Silikonspray und für das Polyurethanharz wurde ein silikonfreies Trennmittel (F12) verwendet. Es wurde keine chemische Reaktion zwischen den Injektionsmaterialien und den verwendeten Trennmitteln beobachtet.

Jede Bodenart wurde mit bis zu sieben unterschiedlichen Injektions- bzw. Luftdrücken mit dem Kartuschengerät injiziert. Dabei wurde das Ausbreitungsverhalten beobachtet. Bei den Zylindern, die komplett mit Injektionsmittel injiziert wurden, wurde die Injektionsdauer gemessen.

Der ursprüngliche Versuchsaufbau (links in Abbildung 7-16) führte wegen seines engen Ablaufanschlusses zu einem systematischen Fehler in den Messungen bei den teil- und vollgesättigten Böden. Wegen des engen Ablaufanschlusses wurde der Wasserdruck im Zylinder erhöht und das Injektionsmaterial in der Folge mehr mit Wasser verdünnt. Daher wurde dieser Anschluss bei diesen Messungen durch einen großen Anschluss und einen

Wasserbehälter ersetzt (siehe Abbildung 7-16 rechts). Der festmontierte Wasserbehälter wurde bei den Versuchen mit dem vollgesättigten Boden mit Wasser gefüllt. Dadurch wurde ebenfalls die Messung der Abflussmenge des Wassers ermöglicht.

7.4.2 Bodenparameter

Vier in situ entnommene Versuchsböden mit der in Abbildung 7-17 dargestellten Korngrößenverteilung wurden für die Injektionsversuche ausgewählt. Die Versuchsböden bestehen aus drei nichtbindigen Böden und einem bindigen Boden. Diese sind naturmäßig und bestehen aus gestuftem Boden. Zur Vereinfachung der Bezeichnungen werden diese Böden nachfolgend als Kies, Sand A, Sand B und Schluff bezeichnet.

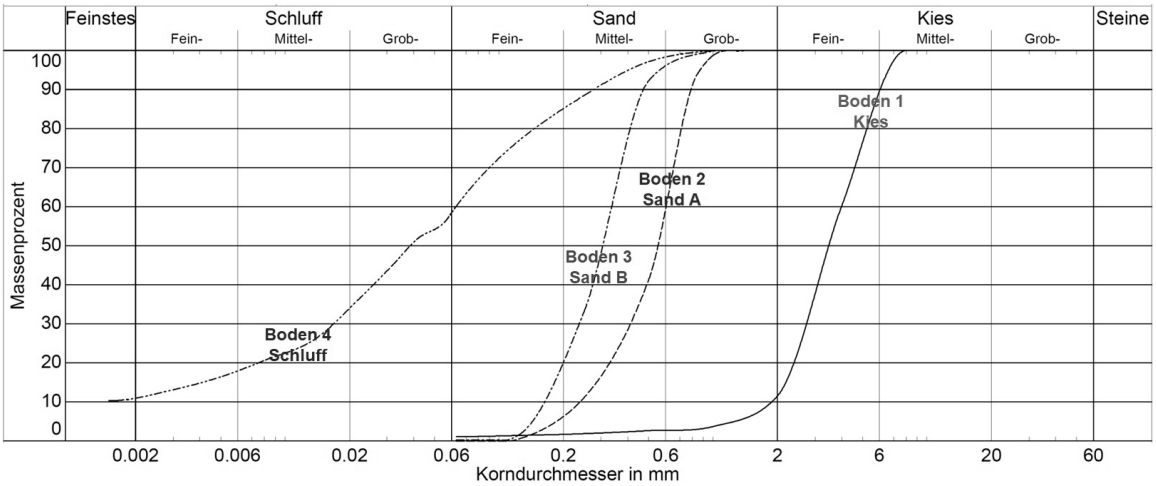


Abbildung 7-17: Korngrößenverteilung der Versuchsböden

Jede Bodeneigenschaft könnte die Injizierbarkeit des Baugrundes beeinflussen. Vor dem Einsatz der Versuchsböden wurden die einzelnen Bodenparameter im Labor ermittelt. Zu den durchgeführten Laborversuchen gehören:

1. Kornverteilung nach DIN 18123 (Siebung + Sedimentation)
2. Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpyknometer nach DIN 18124
3. Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach DIN 18122
4. Bestimmung der Lagerungsdichte nach DIN 18126
5. Proctorversuch nach DIN 18127
6. Glühverlust nach DIN 18128
7. Kalkgehalt nach DIN 18129
8. Durchlässigkeitsversuch nach DIN 18130
9. Bestimmung des Wassergehalts im Labor nach DIN 18121

Die ermittelten Bodeneigenschaften sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der Bodenparameter

Kornverteilung				Wasserge.	Dichte		Lagerungsdichte				Proctorversuch			Glühver.	Kalkge.	Durchlässigk.
Bodenart DIN 4022-1		Bodengruppe DIN 18196	d_{50} [mm]	W_{Labor} [%]	ρ_s [g/cm³]	ρ [g/cm³]	n_{max} [1]	n_{min} [1]	n [1]	D [1]	ρ_{Pr} [g/cm³]	W_{Pr} [%]	D_{Pr} [%]	V_{gl} [%]	V_{Ca} [%]	k [m/s]
Kies	fG,gs',mg'	GE	3,47	0,64	2,68	1,60	0,49	0,40	0,40	0,94	1,86	3,68	86,16	0,4	21,6	2,98E-03
Sand A	mS,gs*,fs'	SE	0,55	0,06	2,64	1,70	0,47	0,36	0,36	0,99	1,61	13,23	105,33	0,2	0,3	1,51E-04
Sand B	mS,fs	SE	0,31	0,10	2,70	1,62	0,49	0,37	0,40	0,77	1,52	15,03	106,37	0,5	30,7	2,51E-04
Schluff	U,fs,ms'	UM	0,04	0,75	2,75	1,63	0,53	0,43	0,41	1,27	1,96	10,73	82,99	3,2	33,4	9,93E-07

fG,gs´,mg´= Feinkies, schwach grobsandig und mittelkiesig
mS,gs*,fs´= Mittelsand, stark grobsandig und schwach feinsandig
mS,fs= Mittelsand, feinsandig
U,fs,ms= Schluff, fein- und mittelsandig

Im natürlichen Umfeld ist Boden selten locker gelagert. Um eine gleichmäßig dichte Lagerung des Bodens im Zylinder zu ermöglichen, wurde der Boden schichtweise in den Versuchszylinder gefüllt. Jede Bodenschicht (1000 [g]) wurde mit zehn Schlägen durch ein Fallgewicht (Ø 50 [mm], 2,5 [kg], Fallhöhe 300 [mm] nach DIN 18127) verdichtet.

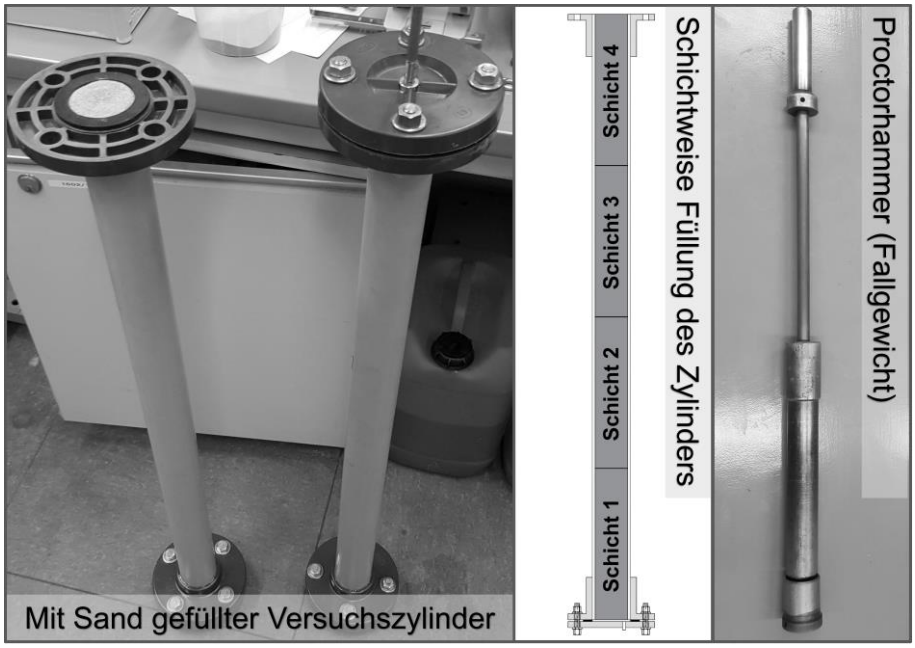


Abbildung 7-18: Schichtweise Füllung und Verdichtung des Bodens im Versuchszylinder

Auch der Sättigungsgrad kann die Injizierbarkeit des Baugrundes beeinflussen. Die praktischen Anwendungen von Acrylatgelen und Polyurethanharz zeigen, dass der Einfluss des Sättigungsgrades auf die Injizierbarkeit bei diesen Injektionsmaterialien nicht vernachlässigt werden darf, weswegen die Injizierbarkeit des Sands A mit drei verschiedenen Sättigungsgraden ($S_r = 0$, $S_r = 0{,}5$ und $S_r = 1{,}0$) untersucht wurde.

7.4.3 Ergebnisse und Auswertungen

Die gemessenen Reichweiten des Injektionsmittels mit Acrylatgel I in Abhängigkeit von dem Luftdruck sind in Abbildung 7-19 dargestellt. Acrylatgel I ließ sich mit dem niedrigsten Luftdruck von 0,5 [bar] vollständig in Kies injizieren. Die mit Sand A und Sand B gefüllten Zylinder konnten erst mit einem Luftdruck von ca. 4 bzw. 2 [bar] vollständig injiziert werden. Der mit Schluff gefüllte Zylinder ließ eine Injektion unter dem niedrigen Luftdruck von 2 [bar] bis zu maximal 5 [cm] zu. Bei den höheren Injektionsdrücken war eine Verdrängung der Bodenpartikel festzustellen. Die mit dem Injektionsgut geöffneten Fließwege sind in Abbildung 7-19 rechts unten zu sehen.

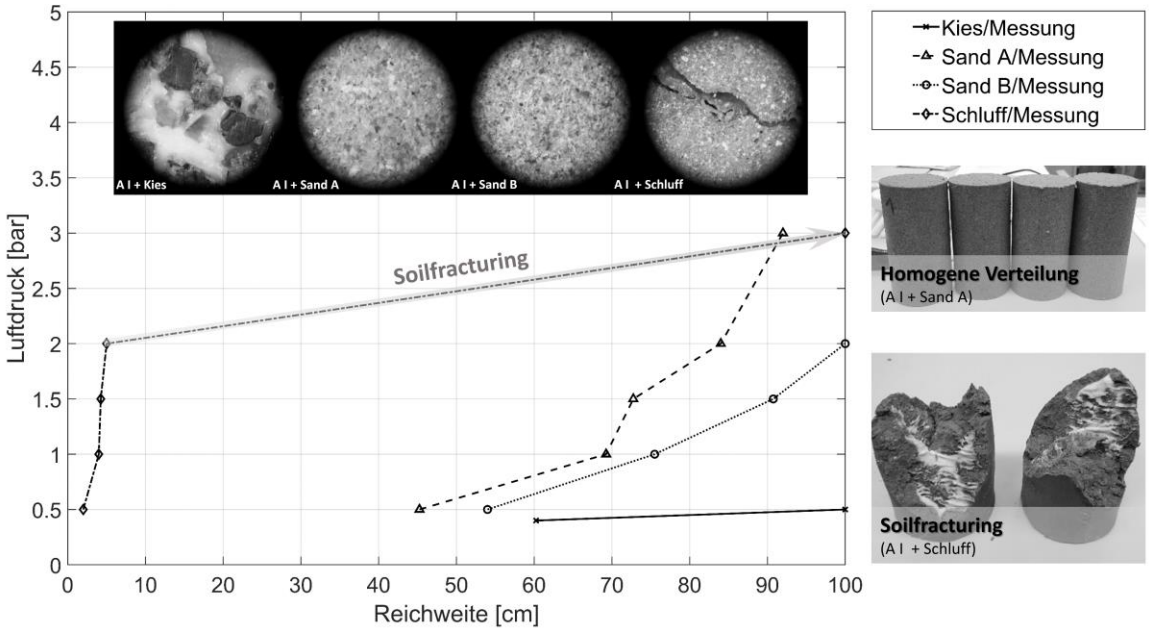


Abbildung 7-19: Luftdruck-Reichweite-Diagramm – Acrylatgel I

Ein großer Injektionsdruck kann bei gemischtkörnigen Böden zu Suffusion führen. Eine Suffusion im Boden verringert die Injizierbarkeit und der hergestellte Injektionskörper wird inhomogener. Der bei den Versuchen verwendete Kies war ungewaschen. Daher wurden die feinkörnigen Bodenpartikel durch Injektionsmaterialströmung transportiert und am hinteren Ende des Zylinders umgelagert. In der Folge wurde die Durchlässigkeit des Bodens extrem verringert und der Versuchszylinder war nicht mehr injizierbar. Je höher der Injektionsdruck ist, desto größer ist die zu erwartende Umlagerung. In Abbildung 7-20 ist die hohe Konzentration der Feinpartikel am hinteren Ende des Zylinders deutlich erkennbar.

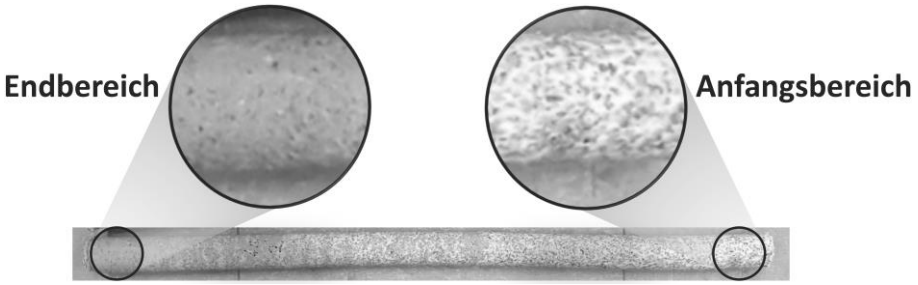


Abbildung 7-20: Strukturelle Inhomogenität im Injektionskörper aus Acrylatgel I und Kies

Je größer der Sättigungsgrad des Bodens ist, desto kleiner ist die Saugspannung. Abbildung 7-21 zeigt, dass die Reichweite der Injektionsmaterialien bei einem niedrigen Luftdruck bzw. Injektionsdruck durch die Saugspannung positiv beeinflusst wird. Der Einfluss der Saugspannung bleibt bei den hohen Injektionsdrücken bestehen; nur wegen der Verdünnung des Injektionsmaterials mit dem Grundwasser wird die Viskosität des Fließmaterials verringert und in der Folge ist eine große Reichweite zu injizieren.

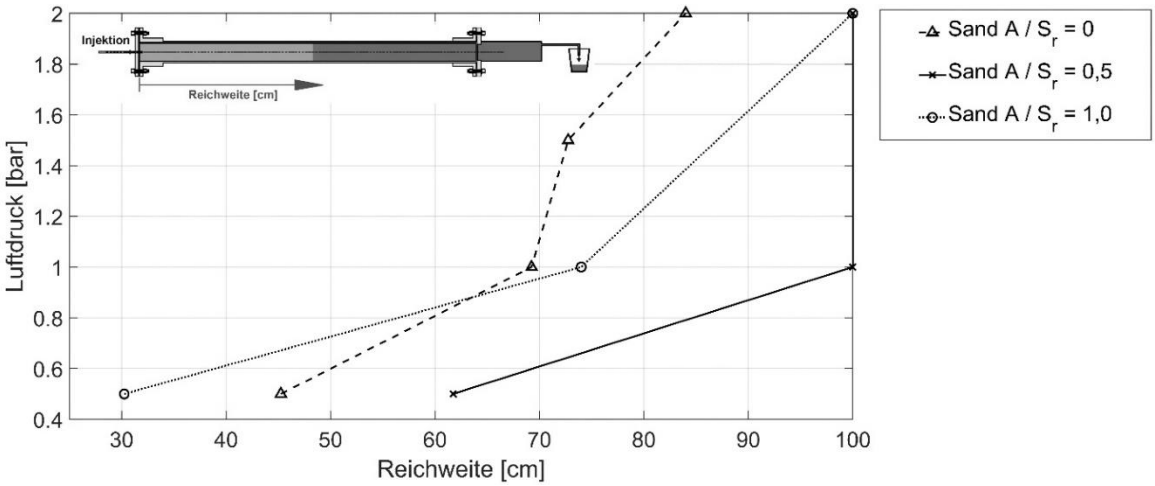


Abbildung 7-21: Injektionsdruck-Reichweite-Diagramm – Acrylatgel I | Drei Sättigungsgrade

Bei einer Injektion von wässrigen Lösungen in Böden wird das ursprünglich vorhandene Porenwasser verdrängt, wobei es zu einer Vermischung von Porenwasser und Injektionsmittel kommt. Ursache für die Vermischung sind die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in den Porenkanälen, die von physikalischen Eigenschaften wie der Dichte und der Viskosität der beteiligten Flüssigkeiten und des Bodens abhängen. Je geringer die Viskositätsunterschiede zwischen Porenwasser und Injektionsgut sind, desto stärker ist die Vermischung. Im vollgesättigten Boden wird das Grundwasser durch Injektionsmaterialien nach vorne verschoben und die Verdünnung findet zum großen Teil in der Kontaktfläche statt. Im teilgesättigten Boden wird dieses durch das Injektionsmaterial umgehüllt, daher ist die Verdünnung des Injektionsmaterials mit dem Grundwasser im teilgesättigten Boden stärker als im vollgesättigten Boden.

7.5 Großmaßstäblicher Injektionsversuch

7.5.1 Versuchsbeschreibung

Der großmaßstäbliche Injektionsversuch wurde auf einer Baustelle in Karlsruhe durchgeführt. Als Injektionsmaterial wurde Acrylatgel I an vier zusammenhängenden Stellen im Dreiecksraster injiziert. Die verwendete Injektionsreihenfolge ist in Abbildung 7-22 dargestellt. Vier Injektionspunkte bilden ein Parallelogramm bzw. eine Raute. Die Seitenlänge des Parallelogramms beträgt 1,70 x 1,90 [m] (Injektionsrater). Somit beträgt der Einflussbereich der Injektion 3,23 [m²]. Die Positionierung und Einbringung der Injektionslanze im Boden ist mit unvermeidbaren Abweichungen verbunden. Die vorhandenen Abweichungen sind allerdings messbar. Die Berechnungen in den nächsten Schritten wurden unter Berücksichtigung der gemessenen Lanzenabstände durchgeführt.

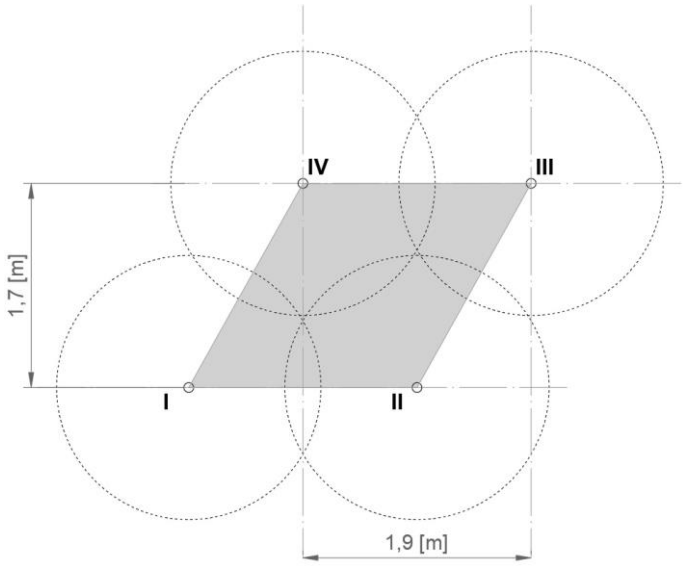


Abbildung 7-22: Exemplarische Anordnung – Probefeld

Acrylatgel I wurde mittels der 2K-Injektionspumpe II in den Boden injiziert. Die Injektion wurde mit einem konstanten Luftdruck von 1,7 [Bar] durchgeführt. So lag die maximale Fördermenge der Pumpe bei ca. 8 [l/min]. Pro Lanze wurden 550 [Liter] Injektionsmaterial in den Boden eingepresst. Wie in Abschnitt 7.2.2 erwähnt wurde, kann die Reaktionszeit von Acrylatgel I durch die Reduzierung der Salzmenge (B-Komponente) verlängert werden. Allerdings war die Einstellmöglichkeit auf ein Minimum der Salzmenge von 40 [g] je 20 [kg] AI-Komponente begrenzt. Somit konnte die Reaktionszeit bei einer Bodentemperatur von 15 °C auf 15 Minuten verlängert werden. Dies reichte jedoch nicht, um 550 [Liter] Injektionsmaterial in den Boden zu injizieren (15 [min] · 8 [l/min] = 120 [Liter]). Um die Reaktionszeit noch weiter zu verlängern, wurde Salz-BL anstelle des Standard-Salzes (B-Komponente) eingesetzt. So blieb das Injektionsmaterial ca. 2 Stunden pumpbar.

7.5.2 Bodenparameter

7.5.2.1 Durchlässigkeit des Bodens

Der gemessene Durchlässigkeitsbeiwert lag im Bereich des Versuchsfeldes bei ca. $1{,}1 \cdot 10^{-4}$ [m/s]. Aufgrund der üblichen Schichtung bei Kiesen und Sanden in Karlsruhe war eine niedrigere Durchlässigkeit in Vertikalrichtung als in Horizontalrichtung zu erwarten. Die vertikale Permeabilität wurde insbesondere durch die am wenigsten durchlässigen Schichten beeinflusst, auch wenn diese sehr dünn waren [101]. Der Grad der Anisotropie (n_v) lag im Testboden bei ca. 2 ($k_h/k_v \approx 4$).

7.5.2.2 Porosität des Bodens

Im geotechnischen Bericht finden sich keine konkreten Angaben zur Porosität des Bodens im Bereich des Testfeldes. Es wurde nur darauf hingewiesen, dass aus der Erfahrung bei benachbarten Baumaßnahmen die effektive Porosität bei 0,25 liegen kann. Ebenfalls wurde bei der Ermittlung der Reichweite empfohlen, eine effektive Porosität von 0,3 zu berücksichtigen. Diese Empfehlung ist nachvollziehbar und die Berechnungen mit dieser Porosität liegen auf der sicheren Seite. Allerdings sollte in dieser Arbeit ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden. Daher mussten die für die Berechnung eingesetzten Parameter realistischer gewählt werden. Mit den Erfahrungsgleichungen wurde unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeitszahl und des Durchlässigkeitsbeiwerts versucht, die tatsächliche injizierbare Porosität mit besserer Genauigkeit abzuschätzen. Theoretisch gilt: Je größer die Ungleichförmigkeitszahl, desto kleiner ist die Porosität des Bodens. Die aus den Kornverteilungskurven ermittelte Ungleichförmigkeitszahl lag zwischen 14,6 und 44,6. Es wurde für die weiteren Berechnungen angenommen, dass die Ungleichförmigkeitszahl gleich 20 ist. Wie bereits erwähnt, hat der Boden einen Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $1{,}1 \cdot 10^{-4}$ [m/s]. Somit liegt die mit Erfahrungsgleichungen ermittelte Gesamtporosität zwischen 0,24 und 0,38 (siehe Tabelle 7-5). Wegen der Haftlüfte und des Haftwassers konnten die Bodenporen nicht vollständig injiziert werden. Die effektive bzw. durchflusswirksame Porosität ist der Porenanteil, der mit anderen Flüssigkeiten gefüllt werden kann (siehe Abschnitt 6.1.2). Wird angenommen, dass die Gesamtporosität gleich 0,3 ist, dann lassen sich die in Tabelle 7-6 zusammengefassten effektiven Porositäten berechnen. Auf der sicheren Seite liegend konnte jedoch die entwässerbare Porosität anstelle der durchflusswirksamen Porosität für die Ermittlung der Injektionsreichweite eingesetzt werden (siehe

Tabelle 7-7). Da der luftgefüllte Hohlraumanteil bei der entwässerbaren Porosität nicht berücksichtigt wird, ist diese Porosität größer als die durchflusswirksame Porosität. Bei der Planung wurde der größte Wert aus

Tabelle 7-7 für die weiteren Berechnungen verwendet. Für einen Soll-Ist-Vergleich müssen die Berechnungsergebnisse jedoch nicht auf der sicheren Seite liegen. Daher wurde der Mittelwert aus Tabelle 7-6 für die Simulation des großmaßstäblichen Injektionsversuchs verwendet (n_{eff}=0,2).

Tabelle 7-5: Gesamtporosität basierend auf Erfahrungswerten (C_u=20; k_f = 1,1·10^{-4})

Herausgeber bzw. Forscher	**Jahr**	**Gleichung**	**n**
W.S. Istomina	1957	$n = 0{,}255 \cdot (1 + 0{,}83^{C_u})$	**0,26**
W. Beyer	1964	$n = 0{,}23 \cdot \left(\frac{1 + {C_u}^{2/3}}{{C_u}^{2/3}}\right)$	**0,26**
U. Beims / L. Luckner	1999	$n = 0{,}18 - 0{,}03 \cdot \log(k_f) \cdot (1 + \frac{1}{C_u^{\frac{2}{3}}})$	**0,31**
U. Beims	2000	$n = 0{,}21 \cdot \left(1 + \frac{1}{{C_u}^{2/3}}\right)$	**0,24**
F. Helmbold	2002	$n = 0{,}29 \cdot k_f^{-0{,}03}$	**0,38**

++ Gleichungen sind zusammengefasst von Fuchs et al. (2017)

Tabelle 7-6: Effektive bzw. durchflusswirksame Porosität (n = 0,3; C_u = 20; k_f = 1,1·10^{-4})

Herausgeber bzw. Forscher	**Jahr**	**Gleichung**	**n_f**
L.S. Lejbenson	1947	$n_f = n \cdot \left(1 - 0{,}114 * \frac{1-n}{n}\right)$	**0,22**
U. Beims / L. Luckner	1999	$n_f = n \cdot (0{,}00665 \cdot log(k_f)^{\ 3} + 0{,}04273 \cdot log(k_f)^{\ 2} + 0{,}17349 \cdot log(k_f) + 1{,}07918)$	**0,19**
U. Beims	2000	$n_f = n \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{C_u}}{12}\right)$	**0,19**

++ Gleichungen sind zusammengefasst von Fuchs et al. (2017)

Tabelle 7-7: Entwässerbare Porosität basierend auf Erfahrungswerten (k_f = 1,1·10^{-4})

Herausgeber bzw. Forscher	**Jahr**	**Gleichung**	**n_e**
W. Golf	1966	$n_e = 2{,}5815 \cdot e^{0{,}6102 \cdot \log(k_f)}$	**0,23**
G. Hennig	1966	$n_e = 0{,}4 + 0{,}05 \cdot \log(k_f)$	**0,20**
Bureau of Reclamation	1984	$n_e = 0{,}0498 \cdot \mathrm{L}N(k_f) + 0{,}693$	**0,24**
F. Helmbold	1988	$n_e = 1{,}33 \cdot {k_f}^{0{,}22}$	**0,18**

++ Gleichungen sind zusammengefasst von Fuchs et al. (2017)

7.5.2.3 Bodentemperatur

Je wärmer der Baugrund ist, desto kürzer ist die Reaktionszeit des Injektionsmaterials (für Acrylatgele gültig). Laut geotechnischem Bericht lag die Grundwassertemperatur im August 2013 zwischen 13,6 und 13,8 °C. Die Injektionen wurden im Juli 2019 durchgeführt, daher wurde bei der Simulation sicherheitshalber angenommen, dass die Boden- bzw. Wassertemperatur bei ca. 15 °C liegt.

7.5.2.4 Zusammenfassung der Bodenparameter

Der Boden war an der Injektionsstelle vollständig gesättigt und es herrschte ein Wasserdruck von 5,4 [mWS] (0,54 [Bar]) in der Injektionsstelle. Da der Boden vollgesättigt war, war keine Saugspannung im Boden vorhanden. Der Wasserdruck wurde als Strömungswiderstand bei der Simulation berücksichtigt. Das erwartete Bodenprofil auf dem Versuchsfeld und die für die Simulation verwendeten Bodenparameter sind in Abbildung 7-23 dargestellt.

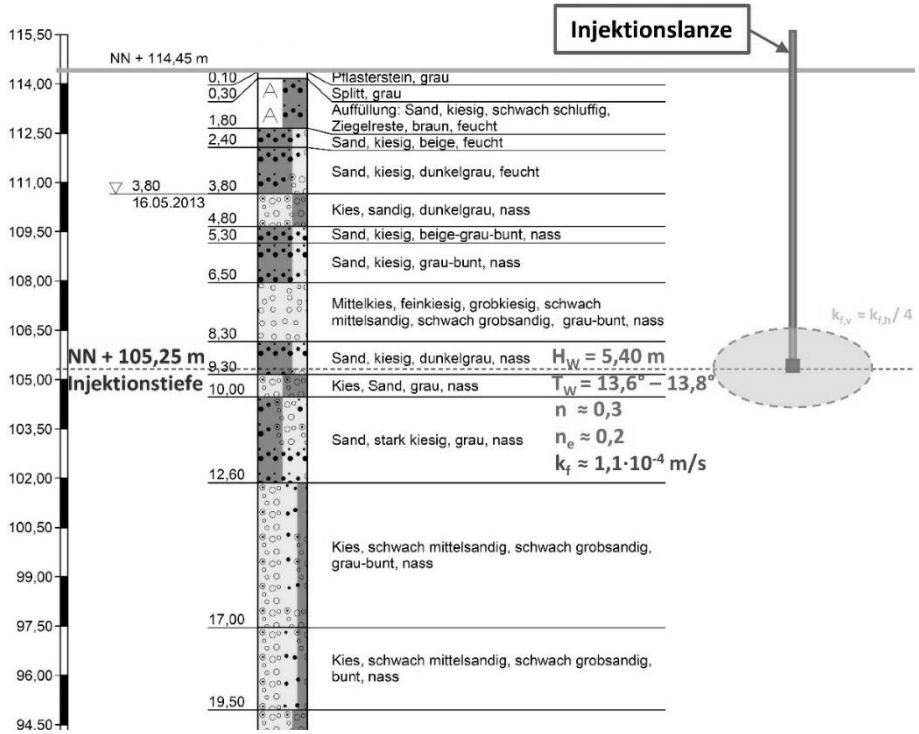


Abbildung 7-23: Bodenprofil auf dem Versuchsfeld

7.5.3 Ergebnisse und Auswertungen

Eine 3D-Time-of-Flight(ToF)-Kamera wurde eingesetzt, um die Abmessung der Injektionskörper genau aufzunehmen. Eine ToF-Kamera misst für jeden Aufnahmepixel die benötigte Zeit, die ein Lichtpuls für den Hin- und Rücklauf zwischen der Kamera und

dem Hindernis braucht. Jeder Aufnahmeframe beinhaltet eine 3D-Punktwolke (x-, y- und z-Werte). Um eine vollständige 3D-Aufnahme erzeugen zu können, müssen die Punktwolken aus den verschiedenen Aufnahmepunkten und -winkeln miteinander kombiniert werden. Dies erfolgte mit den Programmen „CloudCompare“ und „Matlab“.

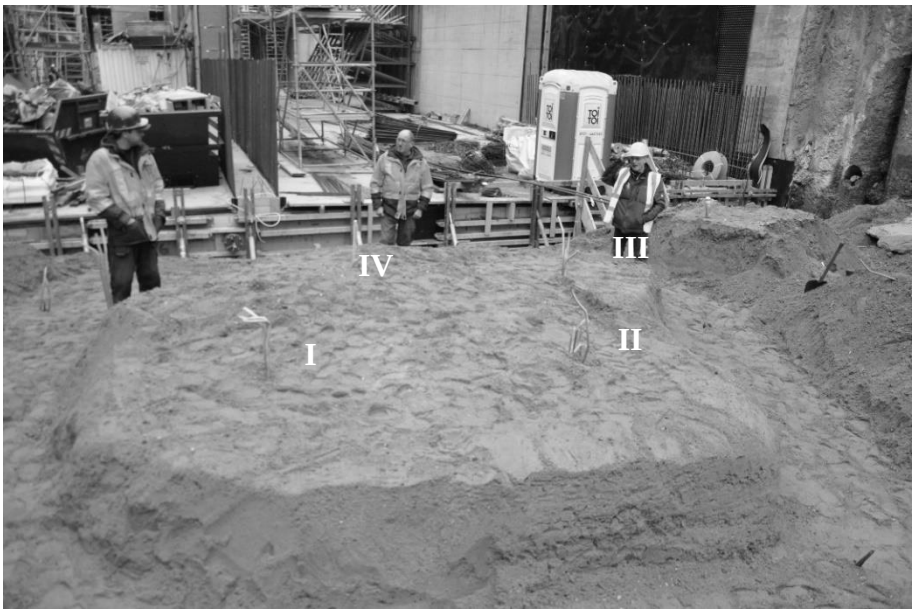


Abbildung 7-24: Freigelegter Injektionskörper einer Versuchsreihe

Die Injektionskörperoberkante begann ca. 8,6 [m] unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Der Graben um die Injektionsstellen wurde in einem Abstand von 1,6 [m] gezogen und die Tiefe betrug ca. 0,6 [m] (siehe Abbildung 7-24). Die Abmessungen der Injektionskörper finden sich in Abbildung 7-25. Diese Abbildung entstand aus den Aufnahmen mit der 3D-Kamera und der anschließenden Darstellung mit dem Programm „CloudCompare“. Das freigelegte Volumen betrug 9,52 m³ und die Oberflächengröße 18,91 m².

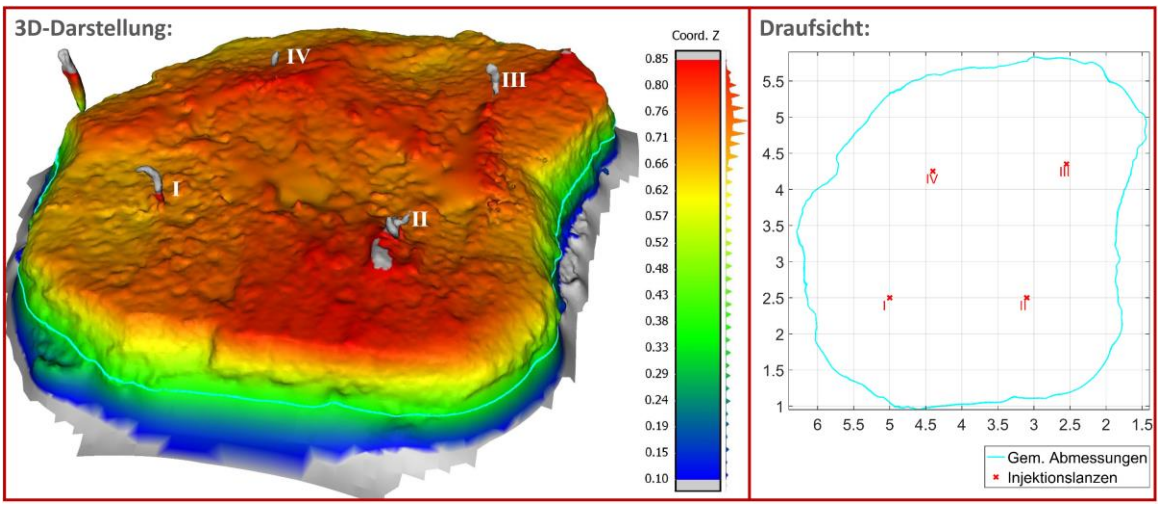


Abbildung 7-25: Mit ToF-Kamera erfasste Abmessung des freigelegten Injektionskörpers (Höhe in den Farben von blau nach rot)

8 Numerische Untersuchungen

Die numerische Modellierung des Injektionsvorgangs ist eine Methode, die für Untersuchungen des Ausbreitungsverhaltenes des Injektionsmaterials verwendet werden kann. Um die Strömungen im Boden zu modellieren, müssen die thermophysikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit angegeben werden. Die experimentellen Daten dienen wiederum als Referenzwert für die numerische Modellierung und zur Verbesserung der Parameter der verwendeten Stoffgesetze.

Die numerische Strömungsberechnung (engl. Computational Fluid Dynamics, kurz CFD) wird zur Simulation von Strömungen aller Art herangezogen. Das Lösungsgebiet wird mit dreieckigen, quadratischen oder rechteckigen Elementen diskretisiert. Die Massen-, Momenten- und/oder Energiebilanzgleichungen werden in jedem Zeitschritt für die diskretisierten Elemente numerisch gelöst. Für die Diskretisierung des mathematischen Modells können die folgenden numerischen Methoden eingesetzt werden:

- Finite-Differenzen-Methode
- Finite-Volumen-Methode
- Finite-Elemente-Methode

Die Massenbilanzgleichung bzw. Kontinuitätsgleichung sagt aus, dass keine zeitliche Änderung der Gesamtmasse in einem geschlossenen System zu erwarten ist (siehe Abbildung 8-1). Diese Betrachtung kann auf offene Systeme erweitert werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{8-1}$$

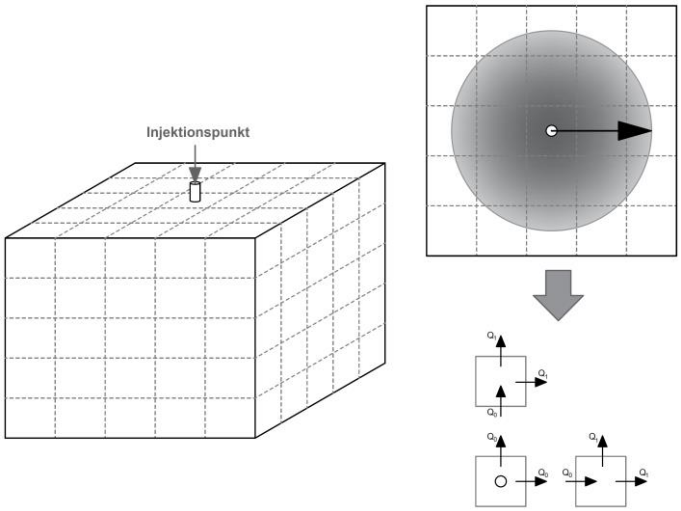


Abbildung 8-1: Prinzipskizze des Injektionsvorgangs – Injektionsmaterialmassenbilanz am Kontrollvolumen

Die Momentenbilanzgleichung wird auch Impulserhaltungsgleichung genannt. Die Summen der zeitlichen Änderungen des Impulses innerhalb eines Volumens, des konvektiven Transportes infolge der Schwerpunktbewegung mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit $\vec{u}$ und der Druckgradienten ∇p sind gleich groß wie die Summen der Divergenz des viskosen Spannungstensors σ und der Wichte des Materials. [166]

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma + \rho g \tag{8-2}$$

Die Energiebilanzgleichung sagt aus, dass die Summe der einer Zone zufließenden und abfließenden Energieströme gleich null ist:

$$\frac{\partial \rho i_{th}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} i_{th}) = -\nabla p \cdot \vec{u} + \nabla \cdot J + \dot{Q}^s + \dot{Q}^c + \dot{Q}^r \tag{8-3}$$

Ein poröses Medium ist ein Körper, der aus festem Teil und Porenräumen besteht. Typische Beispiele für ein poröses Medium sind Boden, Sandstein, Schwamm, Brot usw. Die Porenräume können mit Flüssigkeiten gefüllt werden. Bei einem Einphasensystem wird der Hohlraum des porösen Mediums durch eine einzelne Flüssigkeit (z. B. Wasser) oder durch mehrere vollständig miteinander mischbare Flüssigkeiten (z. B. Süßwasser und Salzwasser) gefüllt. In einem Mehrphasensystem wird der Hohlraum von zwei oder mehr miteinander nicht oder wenig mischbaren Flüssigkeiten gefüllt. [6]

Wasser, Luft und Injektionsgut sind Flüssigkeiten, die sich während eines Injektionsvorgangs im Hohlraum des Bodens bewegen können (Mehrphasensystem). Wird nur das Injektionsgut bei der Strömungsberechnung berücksichtigt, wird dieses Berechnungsverfahren einphasig betrachtet. Um die Strömungssimulationen durchführen zu können, wurde ein einphasiges Strömungsberechnungsverfahren für die Ermittlung der Injektionsreichweite entwickelt. Eine nicht isotherme Mehrphasenströmungsberechnung wurde in Abschnitt 8.3.2 mit dem Programm „iTOUGH2“ durchgeführt.

8.1 Entwicklung und Validierung eines einphasigen Berechnungsverfahrens (Bemessungstool)

Die Durchlässigkeit von Injektionsmittel (k_I) ist von der dynamischen Viskosität (μ_I) und der Dichte (ρ_I) der Flüssigkeit abhängig:

$$\frac{k_0 \cdot \mu_w}{\rho_w} = \frac{k_I \cdot \mu_I}{\rho_I} \rightarrow k_I = \frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot \rho_I}{\mu_I \cdot \rho_w} \tag{8-4}$$

Die folgende Gleichung ermöglicht eine gute Annäherung an die zeitliche Entwicklung der gemessenen Dichten:

$$\rho_{t,I} = \rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t} \tag{8-5}$$

Die Gleichungen (7-1) und (8-5) können in Gleichung (8-4) eingesetzt werden, um die zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit ($k_{t,I}$) im Boden zu ermitteln:

$$k_{t,I} = \frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot (\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t})}{(\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t}) \cdot \rho_w} \tag{8-6}$$

8.1.1 Ermittlung der Ausbreitung von Injektionsmaterialien im Zylinder

Es wurden viele Untersuchungen zur Injizierbarkeit von Boden durchgeführt. Oft werden bei der Auswertung der Ergebnisse die Saugspannung, der Druckverlauf im System und die Fördermenge der Pumpe nicht berücksichtigt, wodurch es zu einem Fehler bei der Auswertung kommen kann [30]. Der Druckverlauf im eingesetzten System ist in Abbildung 8-2 dargestellt.

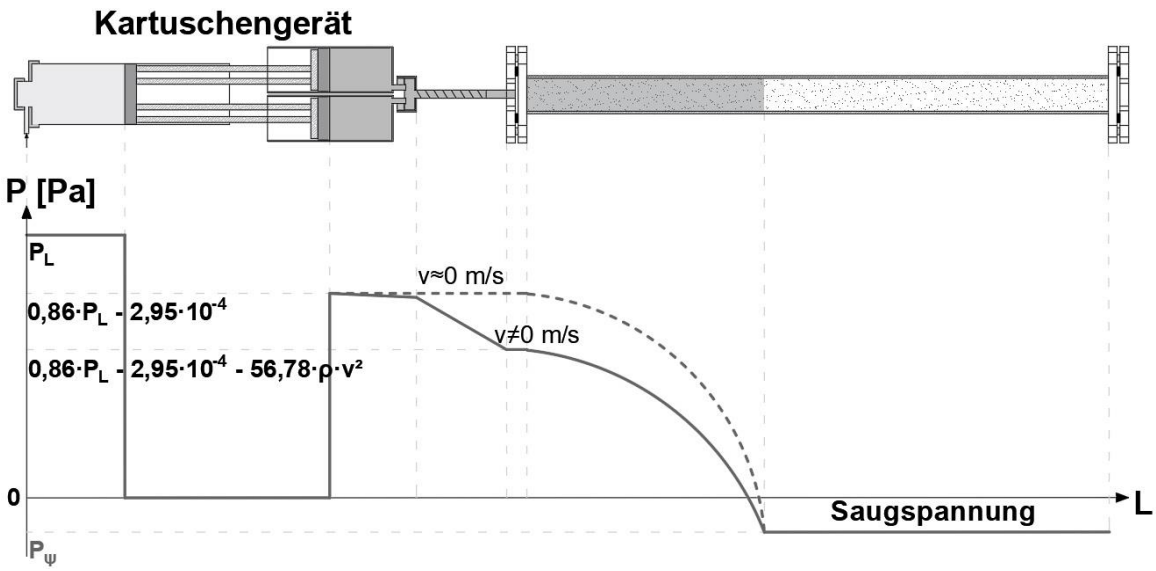


Abbildung 8-2: Druckverlauf im System

Die Filtergeschwindigkeit (v) des Injektionsmittels im Zylinder kann mit Gleichung (8-7) berechnet werden (Darcy-Gesetz):

$$v = {}^{q}/_{F} \rightarrow -{}^{dh}/_{dl} \cdot k_{t,I} = {}^{4 \cdot q}/_{\pi \cdot d_{cyl.}{}^{2}} \tag{8-7}$$

Das Darcy-Gesetz in seiner ursprünglichen Form gilt für laminares Fließen ($R_e \leq 10$). Die Reynoldszahl (R_e) kann mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$R_e = v \cdot d \Big/ \frac{\mu_{t,I}}{\rho_{t,I}} \tag{8-8}$$

Ein Fließen mit $R_e > 10$ wird als turbulente Strömung bezeichnet. Für eine turbulente Strömung kann die erweiterte Darcy-Gleichung (Gleichung (8-9)) verwendet werden:

$$\frac{dh}{dl} = W \cdot q + b \cdot q^m \tag{8-9}$$

W und b sind empirische Faktoren, die von der Korngröße und der Porosität abhängig sind. Der Exponent m liegt zwischen 1,6 und 2.

In Abbildung 8-3 ist die Gültigkeitsgrenze der Darcy-Gleichung in Abhängigkeit vom hydraulischen Gefälle i dargestellt. Da in dieser Arbeit die Konzentration auf den niedrigdurchlässigen Böden liegt, wurde angenommen, dass eine laminare Strömung im Boden stattfindet.

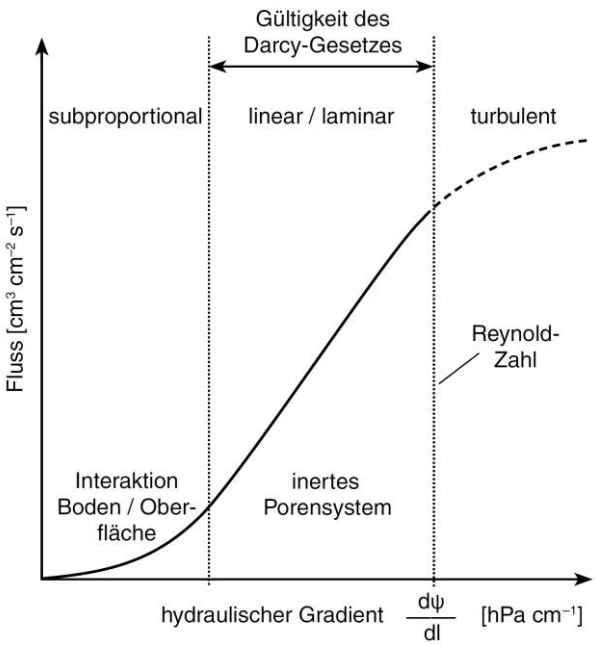


Abbildung 8-3: Gültigkeitsgrenzen der Darcy-Gleichung in Abhängigkeit vom hydraulischen Gefälle i (Amelung et al. 2018)

Um die Funktion des Volumenstromes (q) zu erhalten, wird die Gleichung (8-7) integriert. Daraus ergibt sich:

$$\int_h^0 -dh = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot {d_{cyl.}}^2 \cdot k_{t,I}} \cdot \int_0^l dl \quad \rightarrow \quad q = \frac{h \cdot \pi \cdot {d_{cyl.}}^2 \cdot k_{t,I}}{4 \cdot l} \tag{8-10}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit (v_a) kann anhand folgender Gleichung ermittelt werden:

$$v_a = \frac{dl}{dt} = \frac{v}{n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{q}{F} \quad \rightarrow \frac{dl}{dt} = \frac{h \cdot k_{t,I}}{n \cdot l} \tag{8-11}$$

Durch Umformung der Gleichung (8-11) ergibt sich daraus:

$$\frac{dt}{dl} = \frac{n \cdot l}{h \cdot k_{t,I}} \quad \rightarrow \quad k_{t,I} \cdot dt = \frac{n \cdot l}{h} \cdot dl \tag{8-12}$$

Die Integration beider Seiten der Gleichung (8-12) liefert:

$$\int_0^t \left[\frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot (\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t})}{\rho_w \cdot (\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t})} \right] dt = \frac{n}{h} \int_0^l dl = \frac{n \cdot l^2}{2 \cdot h} \tag{8-13}$$

Die Integration liefert die folgende Gleichung:

$$l = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot k_0 \cdot \mu_w}{n \cdot \rho_w} \cdot \int_0^t \left[\frac{\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t}}{\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t}} \right] dt} \tag{8-14}$$

Da die maximale Fördermenge (q_{max}) des Kartuschengerätes bzw. der Pumpe bei Entwicklung der Gleichung (8-14) nicht berücksichtigt wird, kann die Injektionsreichweite überschätzt werden. Um das genannte Problem zu überwinden, muss die Berechnung in mehreren Zeitschritten diskretisiert werden (Gleichung (8-15)):

$$\frac{k_0 \cdot \mu_w}{\rho_w} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\rho_t}{\mu_t} dt = \frac{n}{h} \int_{l_{i-1}}^{l_{i,cal.}} dl \tag{8-15}$$

Durch die Integration beider Seiten der Gleichung (8-15) wird die zeitliche Entwicklung der Injektionsreichweite ermittelt. Für die Integration der linken Gleichungsseite wird die Trapezregel verwendet. Eine genaue Beschreibung der eingesetzten numerischen Integrationsmethoden findet sich in Anhang D.

$$l_{i,cal.} = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot k_0 \cdot \mu_w}{n \cdot \rho_w} \cdot \frac{\rho_{t,i-1}/\mu_{t,i-1} + \rho_{t,i}/\mu_{t,i}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) + {l_{i-1}}^2} \tag{8-16}$$

In Abb. 47 ist der Programmablaufplan des entwickelten einphasigen Strömungsberechnungsverfahrens dargestellt.

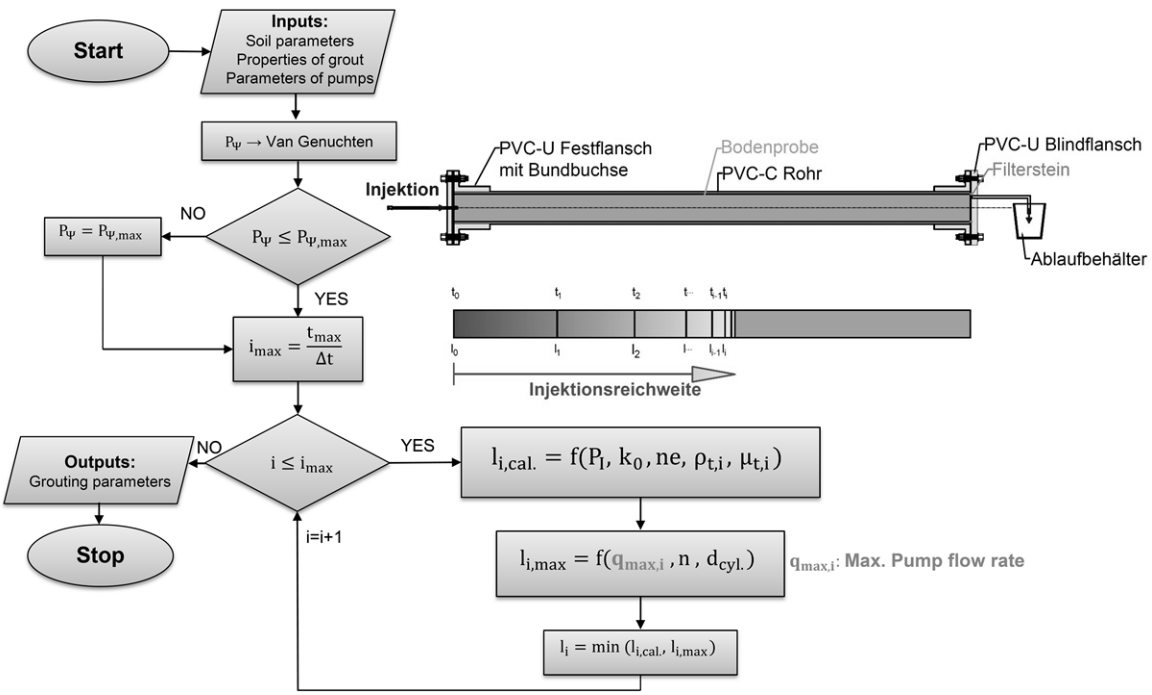


Abbildung 8-4: Programmablaufplan des entwickelten einphasigen Strömungsberechnungsverfahrens

Wird die Saugspannung nicht direkt auf der Baustelle gemessen, kann sie mittels der von van Genuchten [175] entwickelten Theorie ermittelt werden (siehe Abschnitt 6.1.3). Für Böden mit ganz geringer Feuchtigkeit kann die mit der genannten Theorie ermittelte Saugspannung überschätzt werden. Da die Saugspannung eine positive Auswirkung auf die Injizierbarkeit des Bodens hat und um eine Überschätzung der Injektionsreichweite zu vermeiden, wurde eine maximal zulässige Saugspannung definiert. Ist die mit der Van-Genuchten-Methode ermittelte Saugspannung größer als die definierte maximale Saugspannung, berücksichtigt das Programm die maximale vordefinierte Saugspannung für die weiteren Berechnungsphasen. Je nachdem, wie lang die Reaktionszeit des Injektionsmaterials ist, wird die Berechnung in *i*-Zeitschritten wiederholt. Je kleiner ΔT eingesetzt wird, desto genauer sind die Ergebnisse. Für *i*-Zeitschritte wird die entwickelte analytische Gleichung verwendet (Gleichung (8-16)). Es wird geprüft, ob die ermittelte Injektionsreichweite ($l_{i,cal.}$) kleiner als die maximale mögliche Injektionsreichweite ($l_{i,max}$) ist (Gleichung (8-17)):

$$l_{i,max} = l_{i-1} + \frac{4 \cdot q_{max,i}}{n \cdot \pi \cdot {d_{cyl.}}^2} \cdot \Delta t \ \geq \ l_{i,cal.} \tag{8-17}$$

Der erforderliche Volumenstrom ($q_{erf.}$) wird für jeden Zeitschritt der Simulation mit Gleichung (8-18) ermittelt:

$$q_{erf.} = \frac{n \cdot \pi \cdot {d_{cyl.}}^2 \cdot \Delta l}{4 \cdot \Delta t} \tag{8-18}$$

Wie Gleichung (7-12) erkennen lässt, hängen die maximale Fördermenge und der Injektionsdruck voneinander ab. Eine numerisch exakte Modellierung ist nur mit einer weiteren Berechnungsschleife möglich, allerdings kann sich die Simulationszeit mit diesem Verfahren rasant erhöhen. Um die Simulationszeit kurz zu halten, wird der Injektionsdruck im letzten Zeitschritt für die Ermittlung der maximalen Injektionsreichweite verwendet. Da die Berechnungszeitschritte relativ kurz sind, wird die überschätzte bzw. unterschätzte Reichweite im nächsten Simulationsschritt abgeglichen.

In MATLAB wurde ein Skript für die Durchführung der Simulationen mit dem genannten Programmablauf geschrieben. Dabei wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Hohlräume des porösen Mediums sind miteinander verbunden.
- Im Boden ist eine laminare Strömung vorhanden.
- Injektionsmaterial und Wasser sind nicht mischbar.

Beim entwickelten einphasigen Strömungsberechnungsverfahren können zwar der Einfluss des Sättigungsgrades auf die Saugspannung und der Wasserdruck berücksichtigt werden; die Interaktion zwischen Injektionsmaterialien, Wasser und Luft kann jedoch nicht berücksichtigt werden. Je dünnflüssiger das Injektionsmaterial ist, desto mehr verdünnt es sich im Wasser. Um die Interaktion zwischen den flüssigen Phasen bei Simulationen berücksichtigen zu können, muss das mehrphasige Strömungsberechnungsverfahren eingesetzt werden (siehe Abschnitt 8.3.2).

8.1.2 Validierung des entwickelten Verfahrens zur Simulation der einphasigen Strömung

Unter der Berücksichtigung der oben genannten Bedingungen werden die in Abbildung 8-5 mit den dunkelgrauen Kurven dargestellten Reichweiten ermittelt. Wie in dieser Abbildung erkennbar ist, lässt sich die Reichweite des Injektionsmittels im Versuchszylinder mit einer guten Annäherung durch das vorgestellte Verfahren ermitteln. Die Validierung des entwickelten Verfahrens für die zwei weiteren untersuchten Injektionsmaterialien findet sich in Anhang E.

Das vorgestellte Verfahren kann für die verschiedenen Ausbreitungsformen der Injektionsmaterialien erweitert werden. In den nächsten Abschnitten wird dieses für kugel- bzw. ellipsoidförmige sowie kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmige Ausbreitungen erweitert.

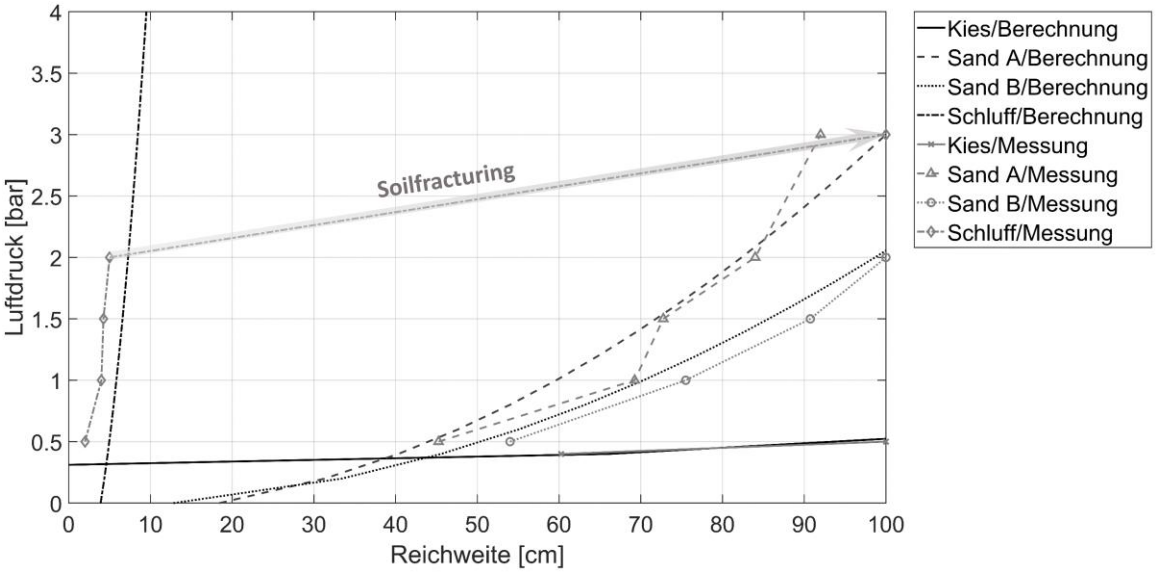


Abbildung 8-5: Validierung des entwickelten Verfahrens (Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Reichweiten von Acrylatgel I)

8.1.3 Erweiterung des vorgestellten Strömungsberechnungsverfahrens für eine kugel- bzw. ellipsoidförmige Ausbreitung

Bei einer punktuellen Injektion tritt das Injektionsmaterial aus einer einzelnen Öffnung aus und der Injektionskörper breitet sich kugel- oder ellipsoidförmig aus (siehe Abbildung 8-6). Der Grad der Anisotropie (n_v) ist gleich der Quadratwurzel des Permeabilitätsverhältnisses (eine genaue Beschreibung findet sich in Abschnitt 6.1.2).

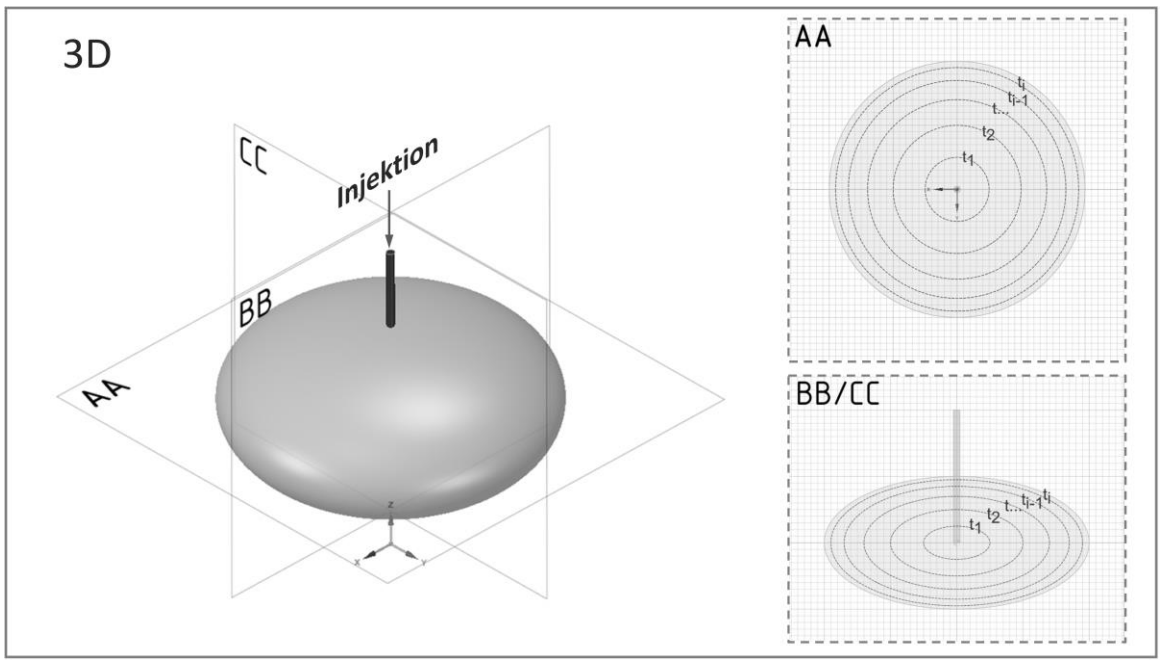


Abbildung 8-6: Ellipsoidförmige Ausbreitung des Injektionsmittels im Boden

Zur Entwicklung der Gleichungen wurde die x-Richtung als Referenzachse gewählt. Die Filtergeschwindigkeit des Injektionsmittels in x-Richtung (v_x) lässt sich aus folgender Gleichung erhalten:

$$v_x = {q_x}/{A_x} \rightarrow -{dh}/{dR_x} \cdot k_{t,x} = {n_v \cdot q_x}/{2 \cdot \pi \cdot {R_x}^2} \tag{8-19}$$

Um die Funktion des Volumenstromes in x-Richtung (q_x) zu erhalten, wird die Gleichung (8-19) integriert. So ergibt sich daraus:

$$\begin{aligned} \int_h^0 -dh &= {n_v \cdot q_x}/{2 \cdot \pi \cdot k_{t,x}} \cdot \int_{r_{Rohr}}^{R_x} {1}/{{R_x}^2}\, dR_x \\ \rightarrow \quad q_x &= \frac{h}{{n_v}/{r_{Rohr}} - {n_v}/{R_x}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot k_{t,x} \end{aligned} \tag{8-20}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in x-Richtung ($v_{a,x}$) kann aus der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\begin{aligned} v_{a,x} &= {1}/{n} \cdot v_x = {q_x}/{n \cdot A_x} \\ \rightarrow \quad {dR_x}/{dt} &= \frac{h \cdot k_{t,x}}{n \cdot \left({{R_x}^2}/{r_{Rohr}} - R_x\right)} \end{aligned} \tag{8-21}$$

Um die zeitliche Entwicklung der Injektionsreichweite zu ermitteln, muss die Gleichung (8-21) in Bezug auf R_x und t integriert werden:

$$\frac{k_{0,x} \cdot \mu_w}{\rho_w} \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\rho_t}{\mu_t} dt = \frac{n}{h} \cdot \int_{R_{x,i-1}}^{R_{x,i,cal.}} \left[{{R_x}^2}/{r_{Rohr}} - R_x\right] dR_x \tag{8-22}$$

Für die Integration der linken Gleichungsseite wurde die Trapezregel verwendet. Die Integrationen ergeben die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} &\frac{h \cdot k_{0,x} \cdot \mu_w}{n \cdot \rho_w} \cdot \frac{\rho_{t,i-1}/\mu_{t,i-1} + \rho_{t,i}/\mu_{t,i}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \\ &\qquad = \frac{R_{x,i,cal.}^3 - R_{x,i-1}^3}{3 \cdot r_{Rohr}} + \frac{R_{x,i-1}^2 - R_{x,i,cal.}^2}{2} \end{aligned} \tag{8-23}$$

Mit Hilfe des Iterationsverfahrens kann die Injektionsreichweite in x-Richtung ($R_{x,i,cal}$) ermittelt werden. Es wird geprüft, ob der erforderliche Volumenstrom ($q_{erf.}$) kleiner als die maximale Fördermenge (q_{max}) des Kartuschengerätes bzw. der Pumpe ist.

$$q_{erf.} = \frac{4 \cdot \pi \cdot n}{3 \cdot n_v \cdot \Delta t} \cdot \left(3 \cdot {R_x}^2 . \Delta R_x + 3 \cdot R_x \cdot \Delta R_x^2 + \Delta R_x^3\right) \leq q_{max} \tag{8-24}$$

Kann der genannte Nachweis nicht erfüllt werden, wird die Injektionsreichweite unter Berücksichtigung der maximalen Fördermenge der Pumpe ermittelt. Die Injektionsreichweite ist in x- und y-Richtung gleich groß. Durch Teilen der Injektionsreichweite in x-Richtung durch den Anisotropiegrad (n_v) wird die Injektionsreichweite in z-Richtung erhalten.

8.1.4 Erweiterung des vorgestellten Strömungsberechnungsverfahrens für eine kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmige Ausbreitung

Bei einer linearen Injektion tritt das Injektionsmaterial gleichzeitig aus mehreren Öffnungen aus und der Injektionskörper wird im mittleren Bereich der Injektionslinie kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmig. Die Ausbreitung des Injektionsmaterials bei den ersten und letzten Öffnungen auf der Injektionslanze ist vergleichbar mit der punktuellen Injektion. So bilden sich zwei halbkugel- bzw. halbellipsoidförmige Injektionskörper (siehe Abbildung 8-7). Die Injektionsrichtung spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von Gleichungen für anisotrope Böden. In diesem Abschnitt werden die Gleichungen für vertikale und horizontale Injektionen entwickelt. Dabei muss zwischen vertikaler und horizontaler Anisotropie ($n_{v,yz}$ und $n_{v,yx}$) unterschieden werden.

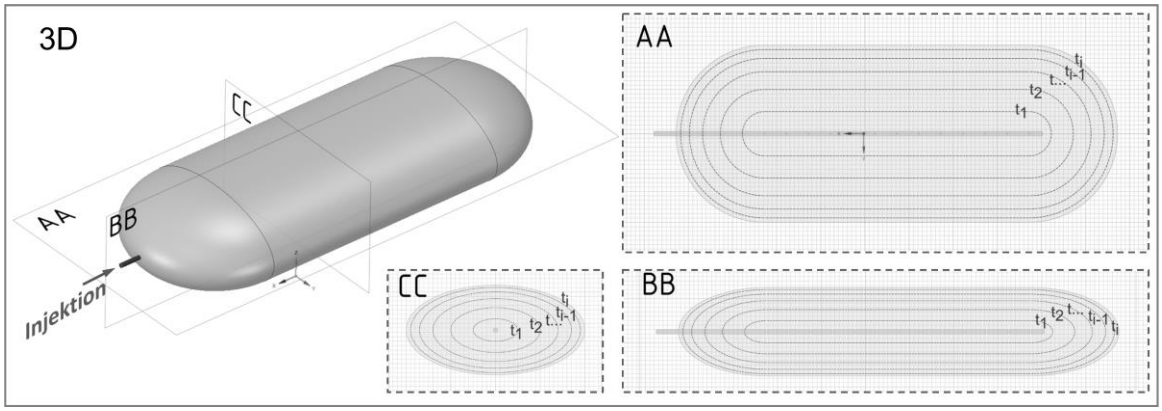


Abbildung 8-7: Elliptisch-zylinderförmige Ausbreitung des Injektionsmittels im Boden

Zur Entwicklung der Gleichungen wurde die y-Richtung als Referenzachse gewählt. Die Filtergeschwindigkeit des Injektionsmittels in y-Richtung (v_y) lässt sich aus folgender Gleichung erhalten:

$$v_y = {q_y}/{A_y} \rightarrow -{dh}/{dR_y} \cdot k_{t,y} = {n_{v,yz} \cdot q_y}/{2 \cdot \pi \cdot R_y \cdot h_i} \tag{8-25}$$

Durch die Integration der Gleichung (8-25) wird die Funktion des Volumenstromes in y-Richtung (q_y) erhalten (siehe Gleichung (8-26)):

$$\int_h^0 -dh = {n_{v,yz} \cdot q_y}/{2 \cdot \pi \cdot h_i \cdot k_{t,y}} \cdot \int_{r_{Rohr}}^{R_y} {1}/{R_y}\, dR_y$$

$$\rightarrow \quad q_y = \frac{h}{n_{v,yz} \cdot ln({R_y}/{r_{Rohr}})} \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_i \cdot k_{t,y} \tag{8-26}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ($v_{a,y}$) kann anhand folgender Gleichung ermittelt werden:

$$v_{a,y} = {1}/{n} \cdot v_y = {q_y}/{n \cdot A_y}$$

$$\rightarrow \quad {dR_y}/{dt} = \frac{h \cdot k_{t,y}}{n \cdot R_y \cdot ln\left({R_y}/{r_{Rohr}}\right)} \tag{8-27}$$

Um die zeitliche Entwicklung der Injektionsreichweite zu ermitteln, muss die Gleichung (8-27) in Bezug auf R_y und t integriert werden:

$$\frac{k_{0,y} \cdot \mu_w}{\rho_w} \cdot \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\rho_t}{\mu_t}\, dt = \frac{n}{h} \cdot \int_{R_{y,i-1}}^{R_{y,i,cal.}} R_y \cdot ln\left({R_y}/{r_{Rohr}}\right)\, dR_y \tag{8-28}$$

Die Integrationen liefern die folgende Gleichung:

$$\frac{h \cdot k_{0,y} \cdot \mu_w}{n \cdot \rho_w} \cdot \left(\rho_{t,i-1}/\mu_{t,i-1} + \rho_{t,i}/\mu_{t,i}\right) \cdot (t_i - t_{i-1}) = R_{y,i,cal.}^2 \cdot \left(\ln\left({R_{y,i,,cal}}/{r_{Rohr}}\right) - {1}/{2}\right) - R_{y,i-1}^2 \cdot \left(\ln\left({R_{y,i-1}}/{r_{Rohr}}\right) - {1}/{2}\right) \tag{8-29}$$

Die Injektionsreichweite in y-Richtung ($R_{y,i,cal}$) wird dann durch Iteration ermittelt. Der erforderliche Volumenstrom ($q_{erf.}$) darf nicht größer als die maximale Fördermenge der Pumpe (q_{max}) sein.

$$q_{erf.} = \frac{h_i \cdot \pi \cdot n}{n_{v,yz} \cdot \Delta t} \cdot \left(2 \cdot R_y \cdot \Delta R_y + \Delta R_y^2\right) + \frac{4 \cdot \pi \cdot n}{3 \cdot n_{v,yx} \cdot n_{v,yz} \cdot \Delta t} \cdot \left(3 \cdot {R_y}^2 . \Delta R_y + 3 \cdot R_y \cdot \Delta R_y^2 + \Delta R_y^3\right) \tag{8-30}$$

Wird der genannte Nachweis nicht erfüllt, muss die Injektionsreichweite unter Berücksichtigung der maximalen Fördermenge der Pumpe ermittelt werden. Durch Teilen der Injektionsreichweite in y-Richtung durch den Anisotropiegrad ($n_{v,yz}$) wird die Injektionsreichweite in z-Richtung erhalten. Die Länge des Injektionskörpers umfasst die doppelte Injektionsreichweite in y-Richtung geteilt durch den Anisotropiegrad ($n_{v,yx}$) und die Injektionslänge (h_i).

8.1.5 Absenkung des Injektionskörpers durch die Gravitationskraft

Durch die Einwirkung der Gravitationskraft sinkt das Injektionsmaterial aufgrund des Eigengewichts langsam ab. In der wassergesättigten Bodenzone neigt das Injektionsmaterial aufgrund des Wasserdruck-Unterschiedes zwischen Ober- und Unterseite des Injektionskörpers jedoch dazu, mehr nach oben zu fließen (siehe Abbildung 8-8 rechts). Dieser Effekt ist mit der hydrostatischen Auftriebskraft vergleichbar. Der Unterschied besteht darin, dass sich die Auftriebskraft anstelle eines starren Körpers auf jedes Molekül des Injektionsmaterials auswirkt.

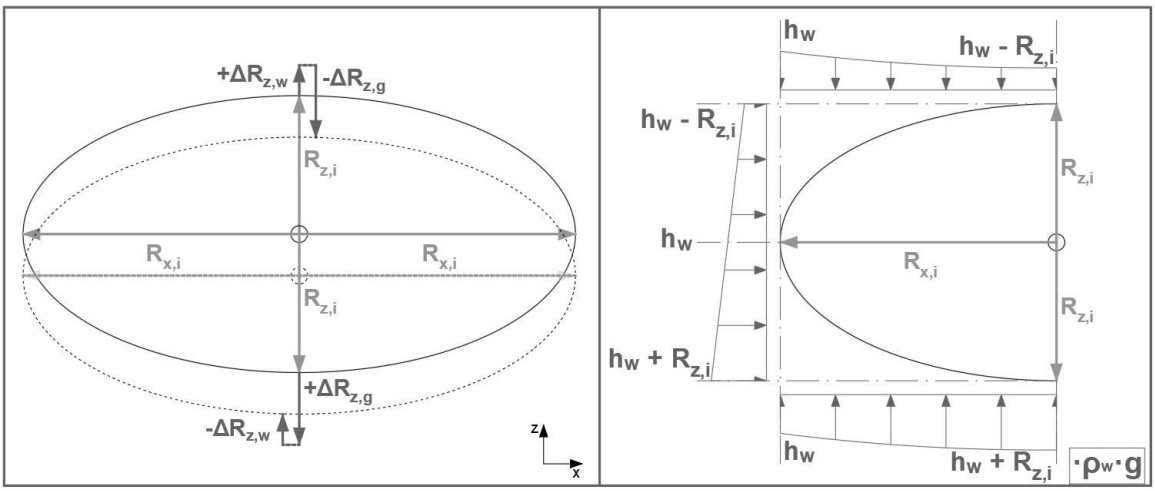


Abbildung 8-8: Absenkung des Injektionskörpers (links), Wasserdruck auf Injektionskörper (rechts)

Nach dem Darcy-Gesetz kann die Filtergeschwindigkeit (v_{grav}) einer Flüssigkeit durch die Gravitationskraft mit Gleichung (8-31) berechnet werden:

$$v_{grav} = k_f \cdot \rho \cdot g \tag{8-31}$$

Die Gleichungen (8-5) und (8-6) können in Gleichung (8-31) eingesetzt werden, so kann die Filtergeschwindigkeit (v_{grav}) im nicht wassergesättigten Boden ermittelt werden:

$$\begin{aligned} v_{grav} = \frac{\Delta R_{z,g}}{\Delta t} &= k_{t,I} \cdot \rho_{t,I} \cdot g \\ &= \frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot (\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t})}{\rho_w \cdot (\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t})} \cdot (\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t}) \cdot g \end{aligned} \tag{8-32}$$

Um die Größe der Absenkung ($\Delta R_{z,g}$) zu erhalten, wird die Gleichung (8-32) in Bezug auf Zeit (t) integriert. So ergibt sich daraus:

$$\Delta R_{z,g} = \frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot g}{\rho_w} \cdot \int_0^t \frac{(\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t})^2}{\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t}} dt \tag{8-33}$$

Durch die Auftriebskraft im wassergesättigten Boden sinkt das Injektionsmaterial weniger ab (siehe Abbildung 8-8 links). Das Ausmaß der Absenkung (ΔR_z) ergibt sich unter Berücksichtigung des Wasserdruck-Unterschiedes zwischen Ober- und Unterseite des Injektionskörpers aus der folgenden Gleichung :

$$\begin{aligned} \Delta R_z = \Delta R_{z,g} - \Delta R_{z,w} \\ &= \frac{k_0 \cdot \mu_w \cdot g}{\rho_w} \\ &\cdot \int_0^t \frac{\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t}}{\mu_0 + a \cdot e^{b \cdot t}} \cdot (\rho_{Ende} - c \cdot e^{-d \cdot t} - \rho_w) dt \end{aligned} \tag{8-34}$$

Ein Anstieg des Injektionskörpers aufgrund des Wasserdruck-Unterschiedes ist auszuschließen, da die Dichte des Injektionsmateriales zumeist größer als Wasser ist.

8.1.6 Vergleich der Ausbreitung der vorgestellten Injektionsmaterialien

Bei einer Bodentemperatur von 20 °C wird die Beziehung zwischen Injektionsradius und Durchlässigkeitsbeiwert für die vorgestellten Injektionsmaterialien bei einem Luftdruck von 6 [Bar] ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8-9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für stark durchlässige Böden die Reaktionszeit der Injektionsmaterialen der entscheidende Parameter für die Injizierbarkeit ist und bei gering durchlässigen Böden eine niedrige Viskosität die entscheidende Einflussgröße darstellt.

Bei den Kurven ist jeweils ein Wendepunkt zu erkennen. Der Injektionsmittelbedarf in der Injektionsstartphase ist bei einer Bodendurchlässigkeit, die größer als die zu dem Wendepunkt gegebene Durchlässigkeit ist, größer als die Fördermenge der Pumpe. Die

Wendepunkte verschieben sich nach links, falls die Fördermenge der Pumpe erhöht wird, bzw. bei einer größeren Fördermenge kann eine größere Reichweite erwartet werden.

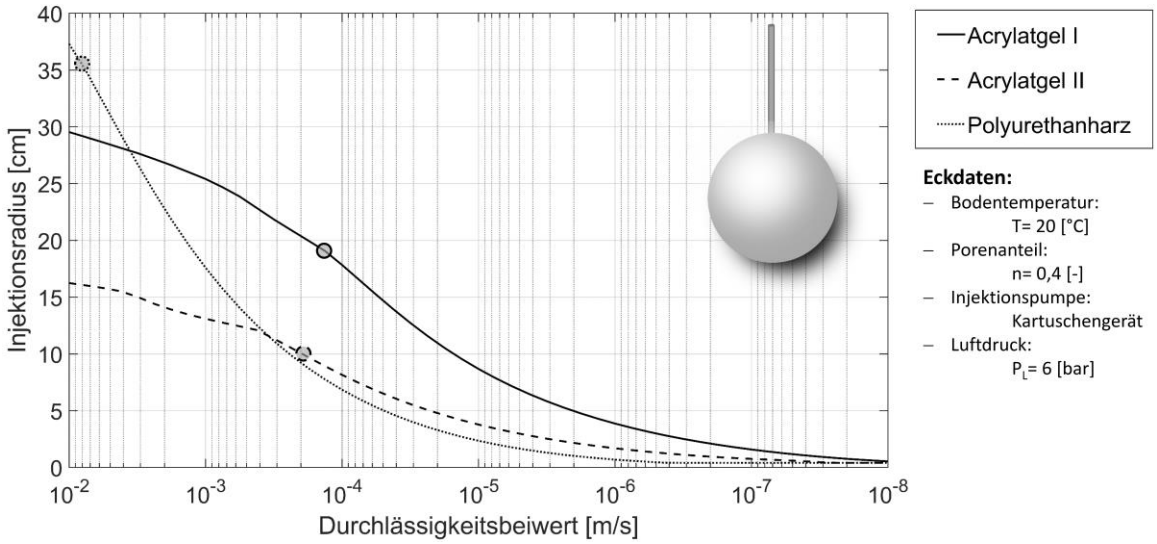


Abbildung 8-9: Beziehung zwischen Injektionsradius und Durchlässigkeitsbeiwert für die vorgestellten Injektionsmaterialien

8.1.7 Einfluss der Fördermenge der Pumpe auf die Injektionsreichweite

Um den Einfluss der Fördermenge der Pumpe besser zu erkennen, wurden zwei Pumpen miteinander verglichen (Kartuschengerät und 2K-Pumpe I). Das Übersetzungsverhältnis des Kartuschengerätes liegt bei rund 0,8 und das Übersetzungsverhältnis der 2K-Pumpe beträgt rund 10. Allerdings ist die maximale Fördermenge des Kartuschengerätes größer als jene der Injektionspumpe.

Wenn der Luftdruck auf 6 [Bar] eingestellt ist, beträgt der maximale aktivierbare Injektionsdruck nach der Berücksichtigung der Übersetzungsverhältnisse der Pumpen und nach dem Abzug der mechanischen Druckverluste für das Kartuschengerät rund 5 [Bar] und für die 2K-Pumpe ca. 53 [Bar]. Dies bedeutet, dass der maximale aktivierbare Injektionsdruck bei der 2K-Pumpe fast zehnmal größer ist als beim Kartuschengerät. Bei den Berechnungen wurde angenommen, dass die Kartuschen unendlich groß sind und nicht während des Injektionsvorgangs getauscht werden müssen.

Wie Abbildung 8-10 erkennen lässt, hat bei einem niedrig durchlässigen Boden ein großes Übersetzungsverhältnis der Pumpe eine positive Wirkung auf die Injizierbarkeit, bei einem stark durchlässigen Boden ist wegen des großen Materialbedarfs dagegen die maximale Fördermenge für die Injizierbarkeit entscheidend.

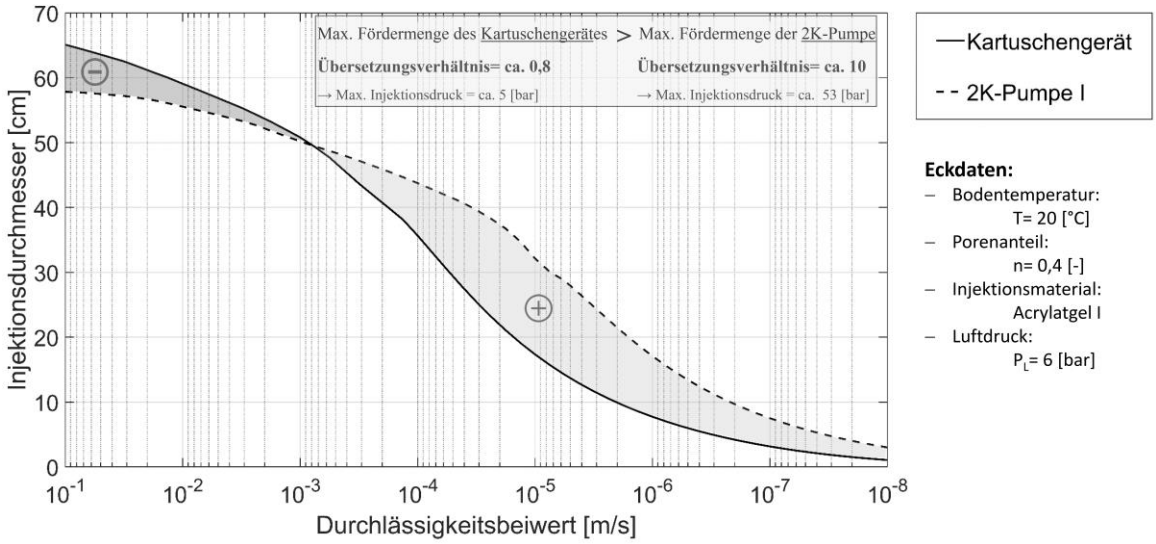


Abbildung 8-10: Einfluss der Fördermenge der Pumpe auf die Injektionsreichweite (Vergleich zwischen Kartuschengerät und 2K-Pumpe)

8.1.8 Entwicklung der Smartphone-Version des Bemessungstools

Auf unvorhersehbare Probleme kann auf der Baustelle jederzeit gestoßen werden, z. B. kann ein Tunnel durch Lockergesteine verlaufen oder Wasser in den Tunnel fließen. Bodeninjektionen sind in solchen Havariefällen wirksame und schnell realisierbare Lösungen. Für die Erhöhung der Erfolgswahrscheinlichkeit des Injektionsprozesses müssen die Planenden in der Lage sein, das Ausbreitungsverhalten des Injektionsgutes zu ermitteln. Die Smartphone-Version kann u. a. als eine Unterstützung bei schnellen Entscheidungen auf Baustellen dienen.

Prognosen zufolge wird der Marktanteil von Android im Jahr 2022 rund 87 % erreichen [116]. Android kann nicht nur auf dem Handy, Tablet oder Laptop genutzt werden, sondern auch viele Maschinen laufen derzeit mit diesem Betriebssystem. Aufgrund der genannten Vorteile von Android wurde das Bemessungstool für dieses Betriebssystem entwickelt. Dies ermöglicht eine Weiterentwicklung des Bemessungstools für die Injektionspumpen in Zukunft. Dabei kann ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden, die Injektionsparameter können während des Injektionsvorgangs anhand der ermittelten Bodenparameter korrigiert und die Berechnungs- sowie Messergebnisse können automatisch protokolliert werden.

Die Programmierung erfolgte mit Android Studio und in der Programmiersprache Java. Das Programm wurde „RoG“ genannt. RoG ist eine Abkürzung für „Range of Grout“ (Injektionsreichweite auf Englisch). Derzeit ist die zweite Version dieser Software mit Verbesserungen in den Bereichen Eigenschaften der Injektionsmaterialien und Datenausgabe im Vergleich zur ersten Version verfügbar. Die zweite Version des

Programms kann auf allen Android-Geräten (Smartphone, Tablet, Laptop usw.) mit Betriebssystemversion 9 oder höher installiert werden.

Die entwickelten Benutzeroberflächen für den Dateneingabebereich (RoG V 2.0) sind in Abbildung 8-11 zu sehen. Für jedes Feld können die erforderlichen Informationen in einem Pop-up-Fenster abgerufen werden, indem die Infotaste (i) gedrückt wird.

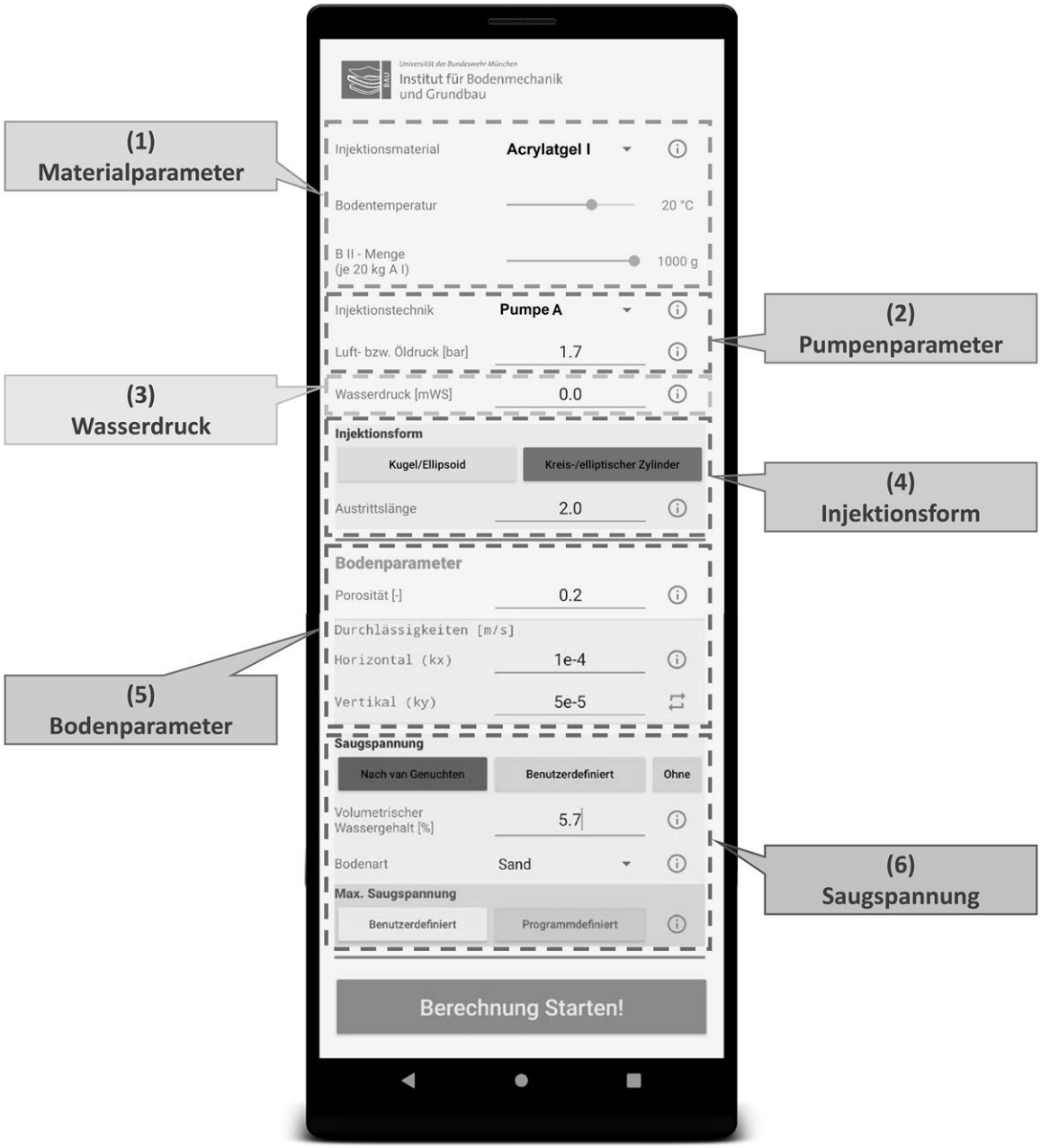


Abbildung 8-11: Benutzeroberfläche des Bemessungstools für den Dateneingabebereich

Der Eingabebereich kann in sechs Unterbereiche unterteilt werden. Im Unterbereich 1 werden die Materialparameter einschließlich des Injektionsmaterials und der Bodentemperatur sowie ggf. die Menge der variablen Komponente eingegeben. Die

zeitliche Entwicklung der Viskosität wird anhand dieser Eingaben ermittelt. Im Unterbereich 2 wird nach den Pumpenparametern gefragt. Wie bereits erwähnt, muss die eingesetzte Injektionstechnik vor der Berechnung kalibriert werden. Bei Injektionsprojekten werden verschiedene Kompressoren, Anschlüsse und Pumpen eingesetzt, weshalb empfohlen wird, dass die Kalibrierung der Injektionstechnik direkt vor Ort durchzuführen ist. Durch die Ausrüstung der Pumpe mit einem digitalen Datenanalysator kann die Kalibrierung in Zukunft automatisch und direkt auf der Baustelle erfolgen. Zurzeit stehen drei Pumpen zur Auswahl. Der Luftdruck (ggf. Öldruck) darf nicht größer eingegeben werden als die zulässigen Betriebsdrücke. Um eine falsche Eingabe zu verhindern, wird der eingegebene Wert automatisch durch das Programm kontrolliert. Im Unterbereich 3 wird der in der Injektionstiefe herrschende Wasserdruck eingegeben. Für einen besseren Bedienkomfort soll der Wasserdruck in mWS (Meter Wassersäule) eingegeben werden. Wenn Wasserdruck herrscht, bedeutet dies, dass der Boden gesättigt ist und in der Folge keine Saugspannung vorhanden sein kann. Daher wird der sechste Unterbereich „Saugspannung“ automatisch deaktiviert. Im Unterbereich 4 wird nach der Injektionsform gefragt. Bei einer punktuellen Injektion ist der Injektionskörper je nach der Anisotropiezahl des Bodens kugel- bzw. ellipsoidförmig. Wird eine Injektionslanze mit Längsöffnungen eingesetzt, ist der Injektionskörper kreis- bzw. elliptisch-zylinderförmig. Im Unterbereich 5 werden die Bodenparameter einschließlich der effektiven Porosität und der Durchlässigkeitsbeiwerte eingegeben. Die Erfahrungswerte für die Bodenparameter lassen sich in einem Pop-up-Fenster abrufen, indem die Infotaste (i) gedrückt wird. Ist der Boden isotrop, sind die horizontalen und vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerte gleich groß. In diesem Fall reicht es aus, den Durchlässigkeitswert im Feld „Horizontal“ einzugeben und die Kopiertaste (⟲) zu drücken. Wie bereits erwähnt, bleibt der Unterbereich 6 aktiv, falls der Wasserdruck gleich null ist. Die Saugspannung hat eine positive Auswirkung auf die Injizierbarkeit des Bodens. Auf der sicheren Seite liegend kann die Berechnung ohne Berücksichtigung der Saugspannung durchgeführt werden. Sollte diese jedoch bei der Berechnung berücksichtigt werden, kann zwischen zwei verschiedenen Möglichkeiten ausgewählt werden: Ist die Saugspannung im Boden bekannt bzw. wurde sie gemessen, kann die benutzerdefinierte Saugspannung eingegeben werden; andernfalls ist es möglich, diesen Wert nach der Van-Genuchten-Methode [175] zu berechnen. Bei Böden mit ganz geringer Feuchtigkeit kann die mit der genannten Methode ermittelte Saugspannung deutlich größer sein als die tatsächliche Spannung. Um eine Überschätzung der Injektionsreichweite zu vermeiden, wurde eine maximale Saugspannung in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert definiert. Ist die mit der Van-Genuchten-Methode ermittelte Saugspannung größer als die definierte maximale Saugspannung, berücksichtigt das Programm die maximale vordefinierte Saugspannung für die weiteren Berechnungsphasen. Der Benutzer ist ebenfalls in der Lage, die maximale Saugspannung selber einzugeben.

Nach Ausfüllen aller Eingabefelder kann die Berechnung durch Drücken der Taste „Berechnung Starten!“ gestartet werden. Das Programm kontrolliert die Vollständigkeit der Eingaben. Die Simulation wird bei vollständiger Eingabe durchgeführt. Der Simulationsvorgang kann je nach eingesetztem Injektionsmaterial und Leistung des Gerätes einige Sekunden bis Minuten dauern.

Die Ergebnisse werden nach der Simulation in vier Fenstern – Reichweite, Druckverläufe, Durchfluss und Viskosität – angezeigt (siehe Abbildung 8-12).

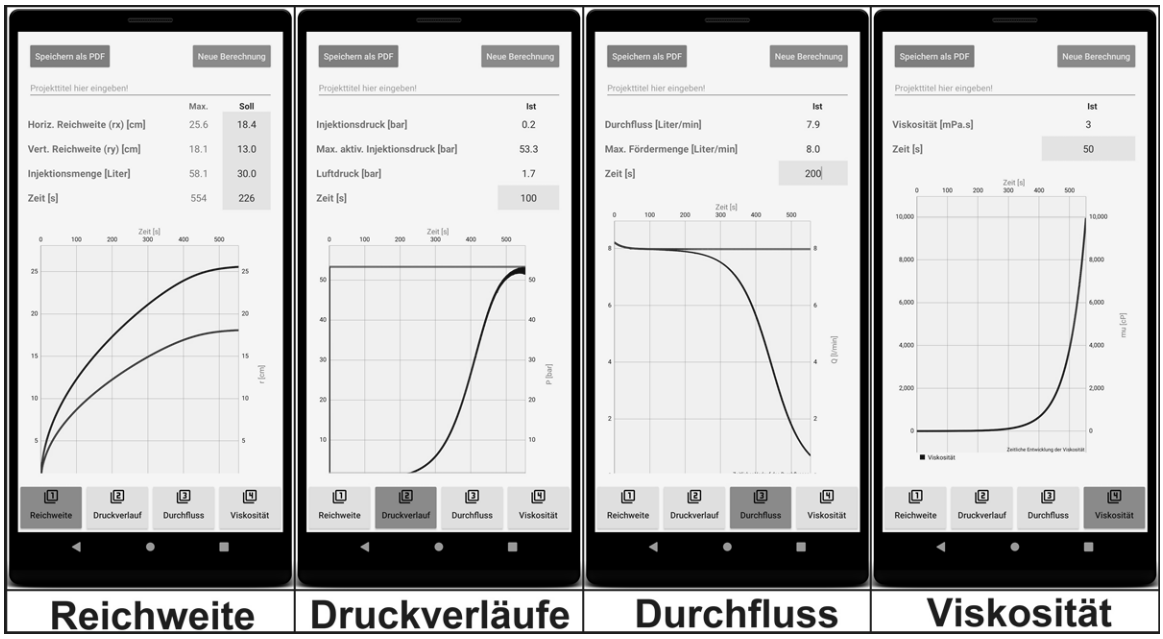


Abbildung 8-12: Benutzeroberfläche im Bereich der Ergebnisse (Datenausgabe)

Im Fenster „Reichweite“ sind die maximalen Reichweiten in vertikale und horizontale Richtungen sowie die maximale injizierbare Materialmenge vor der Erstarrung zusammengefasst. Die zeitliche Entwicklung der Reichweiten wird ebenfalls in Kurven dargestellt. Die Zahlen in den hellgrau markierten Feldern können auf Wunsch geändert werden (Soll-Werte). Beispielsweise können bei den in Abbildung 8-12 dargestellten Simulationen insgesamt 58,1 Liter Injektionsmaterial in den Boden eingepresst werden. Wird als Injektionsmenge im hellgrau markierten Feld (Soll-Wert) 30 Liter eingegeben, wird automatisch berechnet, wie lange der Injektionsvorgang mit 30 Litern Material dauern kann und welche Abmessungen der Injektionskörper hat.

Der zeitliche Verlauf des Injektionsdruckes wird im Fenster „Druckverläufe“ dargestellt. Es wird angenommen, dass die Injektion mit einem konstanten Luftdruck durchgeführt wird. Wird die Injektion mit einer konstanten Förderrate durchgeführt, wird die Änderung des Luft- bzw. des maximal aktivierbaren Injektionsdrucks in diesem Fenster dargestellt.

Die kalibrierten Pumpen waren im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht in der Lage, eine Injektion mit konstanter Fließrate durchzuführen.

Im Fenster „Durchfluss“ wird gezeigt, wie viel Injektionsmaterial pro Minute in den Boden eingepresst wird. Die maximale Fördermenge der Pumpe wird vollständig benutzt, wenn kein Strömungswiederstand gegen das eingepresste Injektionsmaterial im Boden vorhanden ist.

Im Fenster „Viskosität“ wird die zeitliche Entwicklung der Viskosität dargestellt. Die Viskosität kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt ermittelt werden.

Die Berechnungsergebnisse können als PDF-Datei im Ordner „ROG_Saved_Files“ auf dem Hauptspeicher des Gerätes gespeichert und auf Wunsch weitergeschickt werden.

8.2 Einwirkung der Injektionsreihenfolge

Die Injektionsreichweite wird durch die Injektionsmenge, Durchlässigkeit und Porosität des Bodens, Verdünnungseffekte des Injektionsmaterials, Injektionsraster und die Injektionsreihenfolge beeinflusst. Bei einer genauen Einschätzung des Ausbreitungsverhaltens von Injektionsgut kann die Injektionsmenge optimiert werden, womit erhebliche finanzielle und ökologische Vorteile verbunden sind.

Um einen Injektionsschirm herzustellen, wird in regelmäßigen Abständen rasterförmig (Dreieck, Viereck) injiziert. In Abschnitt 8.2.1 wird versucht, folgende Fragen zu beantworten:

- Wie groß dürfen die Rasterpunktabstände sein?
- Welche Rasterform ist für die Herstellung des Injektionsschirmes optimal?

8.2.1 Vergleich zwischen dreieckigen und quadratischen Injektionsrastern

Die bei Bauprojekten am häufigsten benutzten Rasterformen sind dreieckig. Der Rasterpunktabstand a ist der kürzeste Abstand zwischen den Injektionslanzen. Die Hälfte des längsten Abstandes ist b.

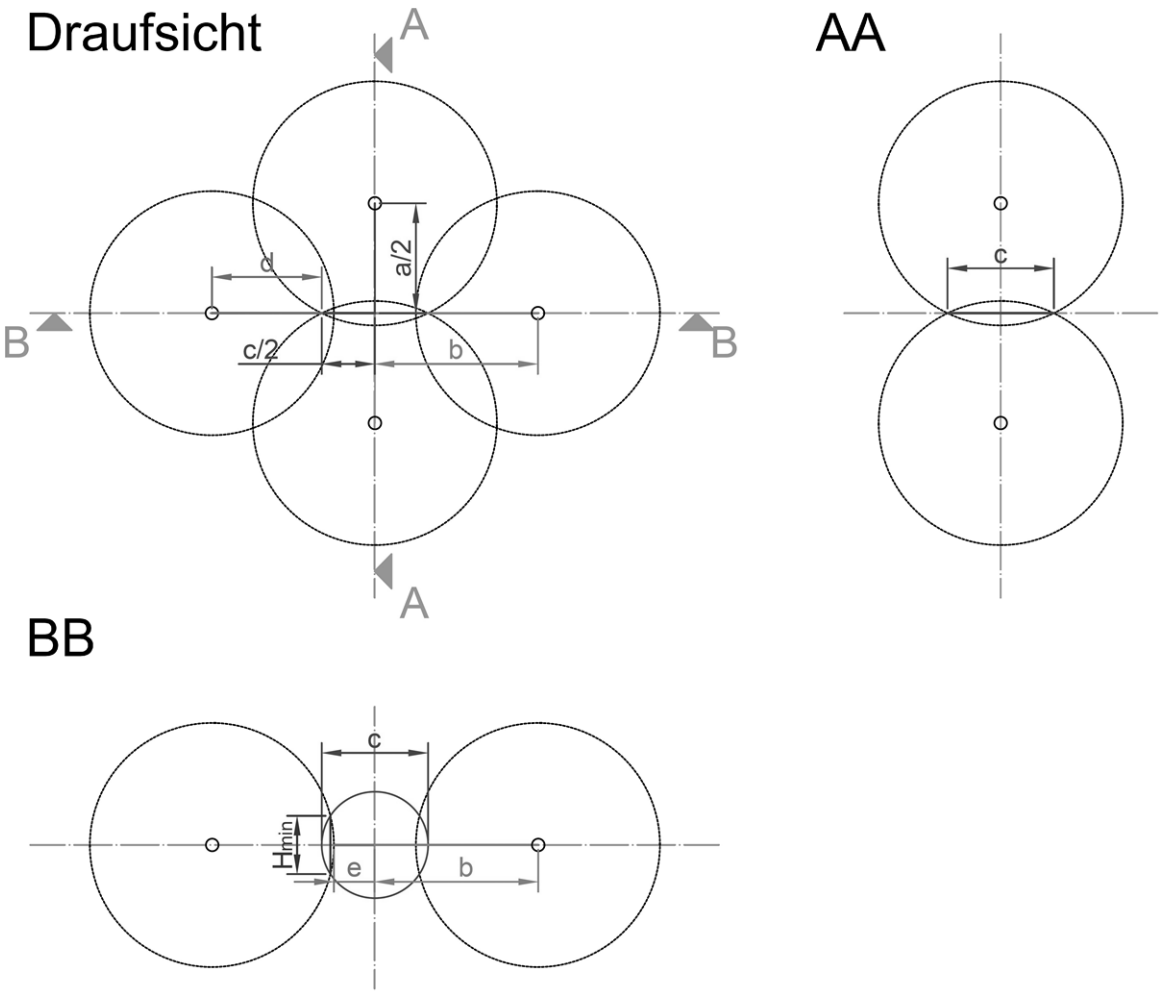


Abbildung 8-13: Schnittdarstellungen des dreieckigen Injektionsrasters

Abbildung 8-13 zeigt die Querschnittsansichten der mit dreieckigen Injektionsrastern hergestellten Injektionskörper. Die Rasterpunktabstände *a* und *b* können ebenfalls dieser Abbildung entnommen werden.

Der Rasterpunktabstand *a* kann durch die folgende Gleichung unter Berücksichtigung des Überlappungskoeffizienten (*Ue*) ermittelt werden, wobei *R* der Injektionsradius ist:

$$a = 2 \cdot R \cdot (1 - Ue) \tag{8-35}$$

Die Schnittfläche der Injektionskörper in der Mitte der horizontalen Achse ist ein Kreis mit dem Radius *c* (siehe Vertikalschnitt AA und Horizontalschnitt BB in Abbildung 8-13). Der Radius *c* lässt sich mit Gleichung (8-36) ermitteln:

$$c/2 = \sqrt{R^2 - \left(a/2\right)^2} \rightarrow c = \sqrt{4 \cdot R^2 - a^2} \tag{8-36}$$

Die folgende Gleichung kann erhalten werden, indem Gleichung (8-35) in Gleichung (8-36) eingesetzt wird:

$$c = 2 \cdot \sqrt{R^2 - R^2 \cdot (1 - Ue)^2} = 2 \cdot R \cdot \sqrt{2 \cdot Ue - Ue^2} \tag{8-37}$$

Unter Berücksichtigung der in Abbildung 8-13 dargestellten Geometrie kann der Rasterpunktabstand *b* mit Gleichung (8-39) berechnet werden:

$$e = \sqrt{\left({}^{c}/_{2}\right)^2 - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2}$$

$$b - e = \sqrt{R^2 - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2} \tag{8-38}$$

$$b = \sqrt{\left({}^{c}/_{2}\right)^2 - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2} \tag{8-39}$$

Wird Gleichung (8-37) in Gleichung (8-39) eingesetzt, lässt sich der Rasterpunktabstand *b* direkt mit folgender Gleichung ermitteln:

$$b = \sqrt{R^2 \cdot (2 \cdot Ue - Ue^2) - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left({}^{H_{min}}/_{2}\right)^2} \tag{8-40}$$

Durch Umformung der Gleichung (8-40) kann die niedrigste Injektionsmächtigkeit (H_{min}) daraus erhalten werden:

$$H_{min} = \frac{\sqrt{-(b^2 - 2 \cdot b \cdot R + R^2 \cdot Ue^2 - 2 \cdot R^2 \cdot Ue + R^2) \cdot (b^2 + 2 \cdot b \cdot R + R^2 \cdot Ue^2 - 2 \cdot R^2 \cdot Ue + R^2)}}{b} \tag{8-41}$$

Der Rasterpunktabstand *b* wird bei der Planung oft unwissentlich gleich *0,87·a* betrachtet. Diese Annahme bedeutet, dass die niedrigste Injektionsmächtigkeit (H_{min}) gleich null ist. Das genannte Problem tritt an zwei Punkten des Injektionseinflussbereiches auf. Durch diese Schwachstellen kann Wasser in die Baugrube eintreten. Die Fließkanäle im Injektionskörper können durch die Wasserströmung mit der Zeit breiter werden. Um einen besseren Abdichtungseffekt zu erzielen, ist zu empfehlen, dass die niedrigste Injektionsmächtigkeit nicht kleiner als die Hälfte des Injektionsradius (*0,5·R*) ist. Unter Berücksichtigung des Überlappungskoeffizienten (*Ue*) von 10 % und der genannten Mindestmächtigkeit kann der genannte praxisübliche Beiwert von 0,87 auf **0,74** reduziert werden, d. h.:

$$\xRightarrow{H_{min}=0{,}5\cdot R\ und\ Ue=10\%} b \approx 0{,}74 \cdot a \tag{8-42}$$

Um die optimale Rasterform bei der Herstellung des Injektionsschirmes herauszufinden, wurden die Materialanforderungen für dreieckige und quadratische Injektionsraster gegenübergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Injektionseinflussfläche bei beiden Rasterformen konstant bleibt. Die Beziehung zwischen den Rasterpunktabständen für die quadratischen und dreieckigen Injektionsraster wurde ermittelt (Gleichung (8-43)).

$$F_1 = F_2 \ \rightarrow a_1^2 = 0{,}74 \cdot a_2^2 \rightarrow \ a_1 = 0{,}86 \cdot a_2 \tag{8-43}$$

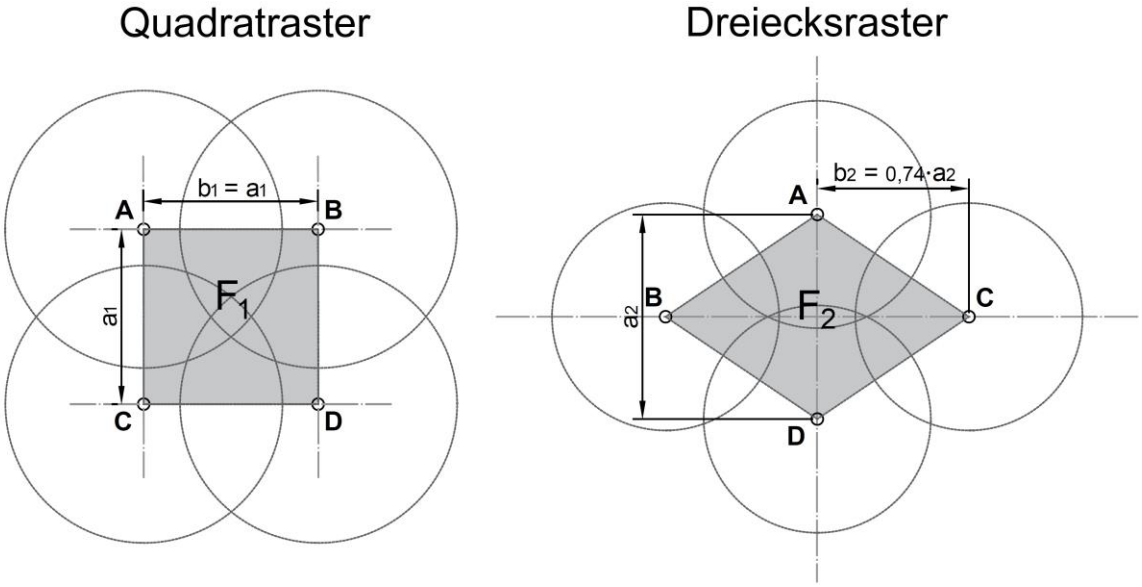


Abbildung 8-14: Gegenüberstellung der dreieckigen und quadratischen Injektionsraster

Die diagonalen Abstände für die Vergleichsrasterformen können durch die folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$c_1 = \overline{AD} = \overline{BC} = \sqrt{{a_1}^2 + {b_1}^2} = \sqrt{2} \cdot a_1$$

$$c_2 = \overline{AB} = \overline{AC} = \overline{CD} = \overline{BD} = \sqrt{({}^{a_2}/_{2})^2 + {b_2}^2} \approx 0{,}89 \cdot a_2 \tag{8-44}$$

Für die diagonalen Abstände muss eine ausreichende Überlappung zwischen benachbarten Injektionskörpern gegeben sein (siehe Abbildung 8-14). Unter Berücksichtigung der diagonalen Abstände und des Überlappungskoeffizienten lassen sich die erforderlichen Injektionsradien mit den folgenden Gleichungen (8-45) ermitteln:

$$R_{Inj,1} \geq {}^{c_1}/_{2 \cdot (1 - Ue)} = {}^{a_1}/_{\sqrt{2} \cdot (1 - Ue)}$$
$$R_{Inj,2} \geq {}^{c_2}/_{2 \cdot (1 - Ue)} \approx {}^{0{,}45 \cdot a_2}/_{(1 - Ue)} \tag{8-45}$$

Das Verhältnis der erforderlichen Injektionsradien für die Vergleichsrasterformen liegt bei ca. 1,35 (siehe Gleichung (8-46)):

$$R_{Inj,1}/R_{Inj,2} = \frac{0{,}86 \cdot a_2 / \sqrt{2} \cdot (1 - Ue)}{0{,}45 \cdot a_2 / (1 - Ue)} \approx 1{,}35 \tag{8-46}$$

Das bedeutet, dass der Materialbedarf für ein quadratisches Injektionsraster 2,5-fach größer ist als für ein dreieckiges Injektionsraster (Gl. (8-47)). Auf diesem Grund ist ein quadratisches Injektionsraster nicht wirtschaftlich.

$$V_{Inj,1}/V_{Inj,2} = \left(R_{Inj,1}/R_{Inj,2} \right)^3 = 1{,}35^3 \approx 2{,}5 \tag{8-47}$$

8.2.2 Interaktion benachbarter Injektionspunkte

Bei einer punktuellen Injektion wird je nach Grad der Anisotropie (n_v) ein kugel- bzw. ellipsoidförmiger Injektionskörper erzeugt. Sollte der zweite Injektionskörper in der Nähe eines bereits hergestellten und ausreagierten Injektionskörpers erzeugt werden und ist eine Überlappung gegeben, ist für den zweiten Körper weniger Injektionsmaterial als im ersten Körper bei gleichbleibender Injektionsreichweite erforderlich.

Die Kugel ist ein Ellipsoid mit einem Grad der Anisotropie (n_v) von 1. Daher wurden die Gleichungen für die Überlappung mehrerer Ellipsoide entwickelt. Um das Volumen des Überlappungsbereiches zu ermitteln, wurde angenommen, dass zwei Ellipsoide mit den Zentren *(0,0,0)* und *(d,0,0)* vorhanden wären (siehe Abbildung 8-15).

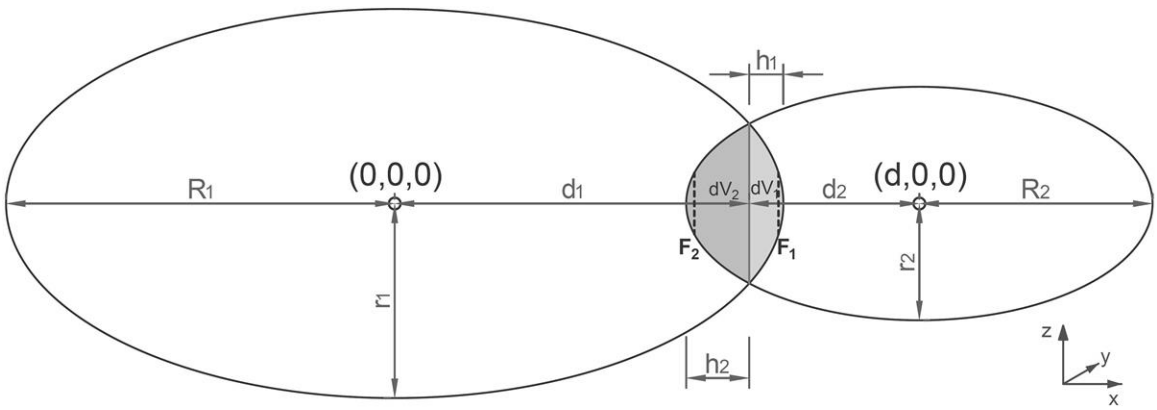


Abbildung 8-15: Überlappung zweier Ellipsoide

Die Gleichungen der beiden Ellipsoide sind:

$$\frac{x^2}{R_1^2}+\frac{y^2}{R_1^2}+\frac{z^2}{r_1^2}=1 \xrightarrow{R_1=n_v\cdot r_1} x^2+y^2+n_v^2\cdot z^2=R_1^2 \tag{8-48}$$

$$\frac{(x-d)^2}{R_2^2}+\frac{y^2}{R_2^2}+\frac{z^2}{r_2^2}=1 \xrightarrow{R_2=n_v\cdot r_2} (x-d)^2+y^2+n_v^2\cdot z^2=R_2^2 \tag{8-49}$$

Die Schnittkurve zweier Oberflächen der Ellipsoide hat den gleichen x-Wert. Durch Zusammenführen der zwei obigen Gleichungen wird der x-Wert der Schnittkurve (x_s) aus folgender Gleichung erhalten:

$$x_s=\frac{d^2+R_1^2-R_2^2}{2\cdot d} \tag{8-50}$$

An jeder x-Koordinate kann eine Schnittfläche parallel zur yz-Ebene dargestellt werden. Bei jeder dieser Schnittflächen können ein oder zwei ellipsenförmige Schnittkurven gebildet werden. Die Höhe der Ellipsen (z) kann in Abhängigkeit von der x-Koordinate durch die folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$x^2+n_v^2\cdot z^2=R_1^2 \;\rightarrow\; z=\frac{\sqrt{R_1^2-x^2}}{n_v} \tag{8-51}$$

$$(x-d)^2+n_v^2\cdot z^2=R_2^2 \;\rightarrow\; z=\frac{\sqrt{R_2^2-(x-d)^2}}{n_v} \tag{8-52}$$

Unter Berücksichtigung der Höhe der Ellipse (z) und des Grades der Anisotropie (n_v) können die durch die Ellipse erzeugten Schnittflächen aus den folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$F_1=\pi\cdot\frac{R_1^2-x^2}{n_v} \tag{8-53}$$

$$F_2 = \pi \cdot \frac{R_2^2 - (x-d)^2}{n_v} \tag{8-54}$$

Das Überlappungsvolumen besteht aus den zwei Teilvolumen dV_1 und dV_2 (siehe Abbildung 8-15). Um diese Teilvolumen zu erhalten, müssen die Gleichungen (8-53) und (8-54) in Bezug auf *x* integriert werden:

$$dV_1 = \int_{x_s}^{R_1} F_1 \, dx = \left[\frac{\pi . x \cdot (3 \cdot {R_1}^2 - x^2)}{3 \cdot n_v}\right]_{x_s}^{R_1} \tag{8-55}$$

$$dV_2 = \int_{x_s}^{d-R_2} F_2 \, dx = \left[\frac{\pi . (x-d) \cdot (3 \cdot {R_2}^2 - (x-d)^2)}{3 \cdot n_v}\right]_{x_s}^{d-R_2} \tag{8-56}$$

Wie bereits erwähnt, entspricht das Überlappungsvolumen der Summe zweier Teilvolumen. Wird der gesamte ausreagierte Injektionskörper mit dem neuen Körper überlappt, besteht keine Notwendigkeit für die Integration. So ist das Überlappungsvolumen gleich groß wie das Volumen des ausreagierten Injektionskörpers (Gleichungen (8-57)):

$$\begin{aligned} &Wenn\ R_2 \geq d + R_1 \rightarrow\ dV = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot R_1^2 \\ &Sonst \qquad dV = |dV_1| + |dV_2| \end{aligned} \tag{8-57}$$

Mit demselben Verfahren können Gleichungen zur Berechnung des Überlappungsvolumens der vertikalen Überlappungen erhalten werden.

8.2.3 Auswirkung der Injektionsstrategie auf den erzeugten Injektionskörper

Bei gleichbleibender Injektionsmenge ist eine Zunahme der Injektionsreichweite zu erwarten. Mit der richtigen Injektionsstrategie kann der Effekt der Überlappung zum Vorteil genutzt und ein optimaler Injektionsschirm erzeugt werden. In dieser Arbeit werden die sechs verschiedenen Injektionsstrategien mit unterschiedlichen Injektionsreihenfolgen einander gegenübergestellt. Die genaue Beschreibung der untersuchten Injektionsstrategien ist der Abbildung 8-16 zu entnehmen.

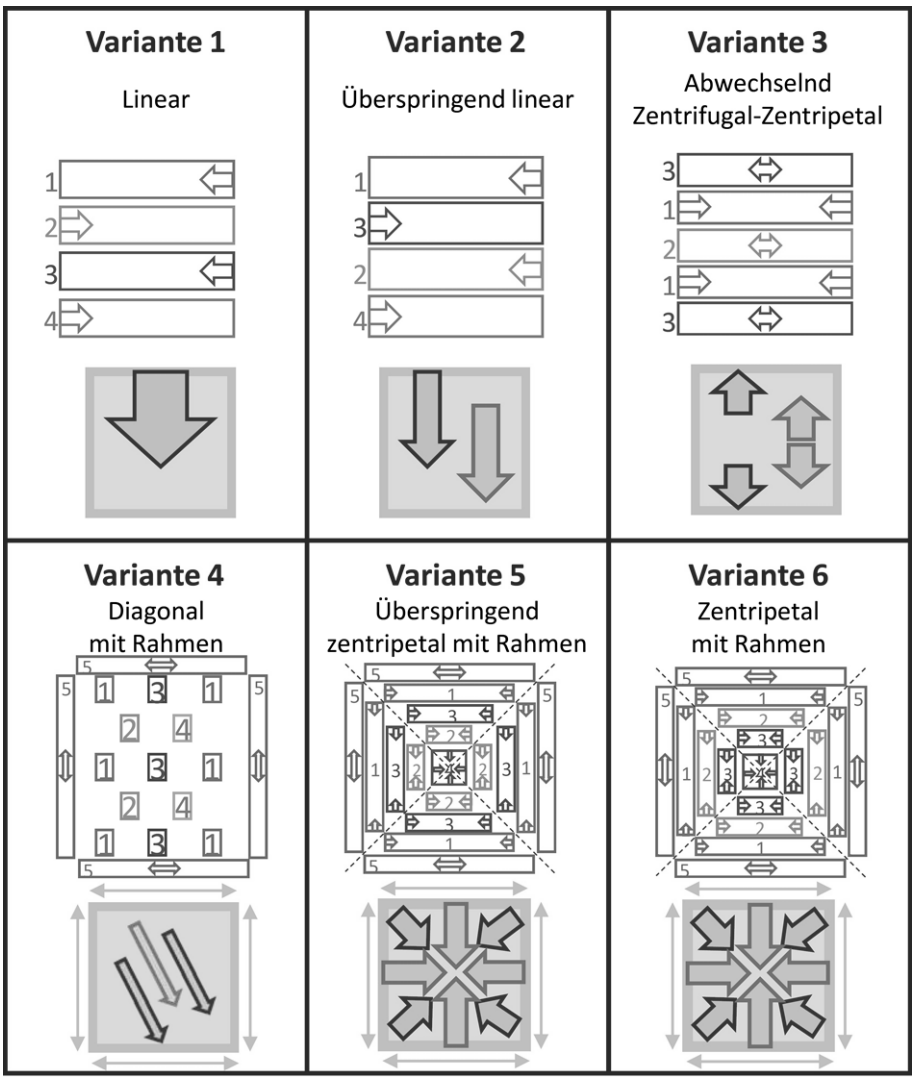


Abbildung 8-16: Untersuchte Injektionsstrategien mit den verschiedenen Injektionsreihenfolgen

Bei den Simulationen wurde angenommen, dass die Injektionspunkte in einem Dreiecksraster sowie in einem 10 x 10 [m] großen Injektionsfeld angeordnet sind und 500 [Liter] Injektionsmaterial pro Injektionspunkt in den Boden eingepresst werden (siehe Abbildung 8-17). Es wurde ebenfalls angenommen, dass der Boden isotrop ist ($n_v = 1$) und die effektive Bodenporosität bei 0,25 liegt. Unter Berücksichtigung des Überlappungskoeffizienten (*Ue*) von 10 % konnten die Rasterpunktabstände (*a* und *b*) mit den Gleichungen (8-35) und (8-42) ermittelt werdn. Ein dreieckiges Injektionsraster von 1,40 x 1,00 [m] sollte in dem genannten Injektionsfeld eingesetzt werden.

Das Injektionsfeld ist durch vier Spundwände umschlossen. Bei den Simulationen wurden die Überlappungen mit bereits hergestellten Injektionskörpern sowie den Spundwänden berücksichtigt. In MATLAB wurde ein Skript für die Durchführung der Simulationen erstellt. Dieses Skript ist in der Lage, bei komplexen Baufeldern sowie unterschiedlichen Injektionsratern und -strategien eingesetzt zu werden.

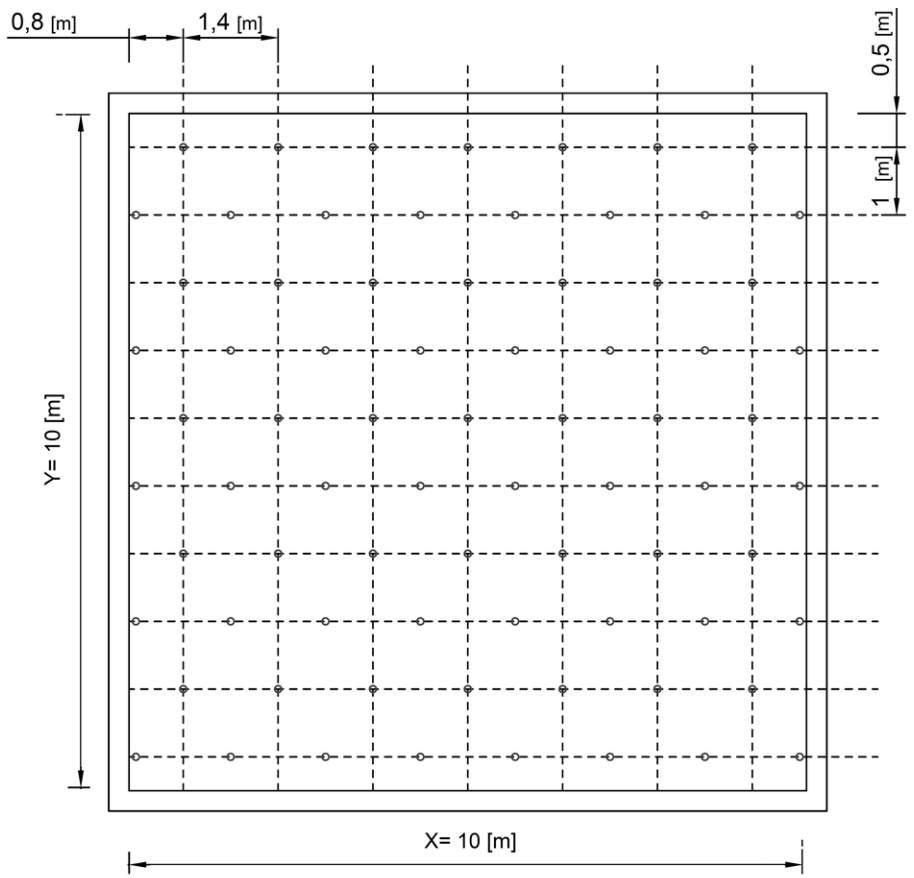


Abbildung 8-17: Geometrie des untersuchten Injektionsfeldes

Die Simulationsergebnisse mit den genannten Injektionsstrategien sind in Anhang F dargestellt und die ermittelten Abmessungen sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Abmessungen des Injektionsschirms bei den verschiedenen Injektionsstrategien

	Variante		1	2	3	4	5	6
Injektionsradius **R**	**Max.**	[m]	1,18	1,17	1,17	1,17	1,16	1,14
	min.	[m]	0,81	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
	Mittelwert	[m]	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
	A.v.M.	[%]	7%	11%	12%	9%	11%	10%
Mächtigkeit des Injektionsschirms **H**	**Max.**	[m]	2,36	2,34	2,34	2,33	2,32	2,28
	min.	[m]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,37
	Mittelwert	[m]	1,48	1,50	1,50	1,48	1,49	1,49
	A.v.M.	[%]	25%	29%	30%	26%	28%	28%

Werden die Überlappungen berücksichtigt, kann eine schrittweise Erhöhung der Injektionsreichweite festgestellt werden. Die in Anhang F dargestellten Konturdiagramme

zeigen die Mächtigkeit für jede beliebige Stelle auf dem Injektionsschirm. Die Simulationsergebnisse für die Injektionsstrategie 1 sind beispielhaft in Abbildung 8-18 dargestellt.

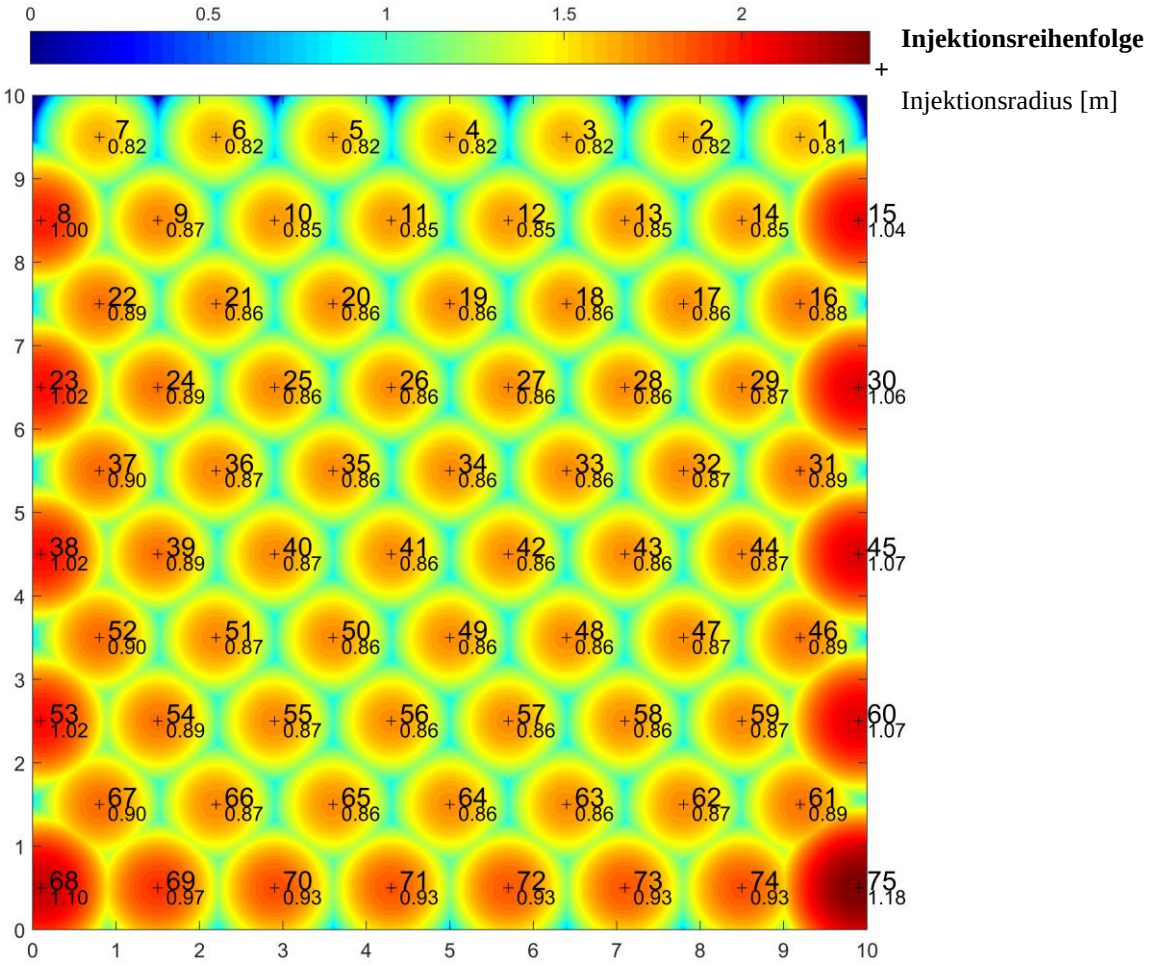


Abbildung 8-18: Konturdiagramm – Mächtigkeit des Injektionsschirms in den Farben in Metern

Bei der Injektionsstrategie 1 wird der Injektionsvorgang linear und spiralweise durchgeführt. Die Mächtigkeit des Injektionsschirms bei dieser Injektionsstrategie ist dem in Abbildung 8-18 dargestellten Konturdiagramm zu entnehmen. Die Injektionspunkte sind mit schwarzen Pluszeichen markiert. An jedem Injektionspunkt sind zwei Zahlen angezeigt. Die oben beschriebenen Zahlen zeigen die Injektionsreihenfolge und die ermittelten Injektionsradien sind unten dargestellt.

Die mit den Injektionsstrategien 1 bis 4 erzeugten Injektionsschirme können nicht die komplette Injektionsfläche überdecken ($H_{min} = 0\ [m]$). Die undichten Stellen befinden sich in der Nähe der Spundwände. Um bei diesen Injektionsstrategien einen dichten Injektionsschirm zu erzielen, sollten in die Randlanze mehr Materialien injiziert oder es sollte eine zusätzliche Injektionslanze eingesetzt werden.

Abgesehen von der Undichtigkeit des Injektionsschirmes am Randbereich bei der Injektionsstrategie 1 (linear) zeigen die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) eine homogene Verteilung der Injektionsmaterialien bei dieser Strategie. Die Schnittdarstellung XZ in Abbildung 8-19 bestätigt die Homogenität des Injektionsschirms. Allerdings zeigt die Schnittdarstellung YZ eine tendenzielle Erhöhung der Mächtigkeit. Dies bedeutet: Je größer das Injektionsfeld ist, desto größer sind die Abweichungen vom Mittelwert.

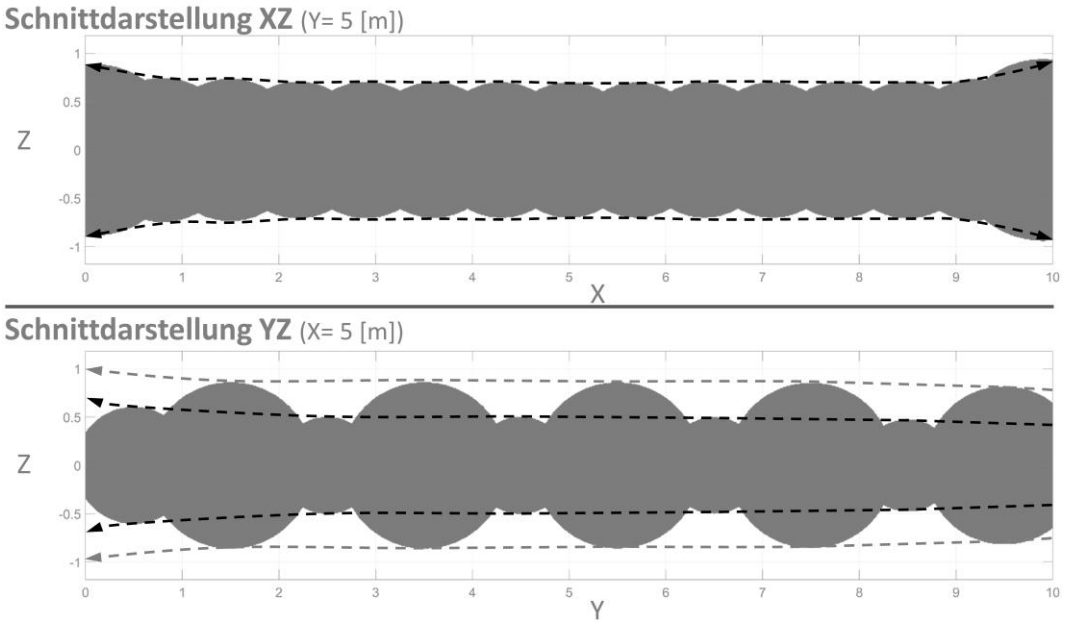


Abbildung 8-19: Schnittdarstellungen des Injektionsschirms bei der Injektionsstrategie 1

Bei der Injektionsstrategie 4 (diagonal mit Rahmen) hat die Größe des Injektionsfeldes nicht die genannte negative Auswirkung auf die Homogenität des Injektionsschirmes. Die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) sind ebenfalls gering. Dies deutet auf eine homogene Verteilung der Injektionsmaterialien hin. Obwohl die Randlanzen bei dieser Injektionsstrategie zum Schluss injiziert werden, ist bei diesen ein großer Injektionsmaterialbedarf festzustellen.

Das Erzeugen eines homogenen Injektionsschirmes ist keine optimale Lösung. In Abbildung 8-20 sind die Biegemoment- und Querkraftverläufe dargestellt, die in einem Injektionsschirm normalerweise erwartet werden. An den Verbindungsstellen zwischen Wand und Injektionsschirm sind die Scherspannungen am größten, daher muss der Injektionsschirm an diesen Stellen mächtiger sein als an anderen Stellen. Dies ist ebenfalls der Grund dafür, dass die Randlanzen zum Schluss und mit großer Injektionsmenge injiziert werden sollen. Die Biegemomente sind jedoch im Zentralbereich des Schirms am höchsten. Durch Biegemomente werden Zug- und Druckspannungen im Injektionskörper erzeugt. Je mächtiger der Injektionskörper ist, desto länger ist der Hebelarm und desto besser verteilt

sich in der Folge die Spannung im Material. Die sinnvollste Verteilung des Injektionsmaterials im Boden in Bezug auf die Kraftübertragung ist mit der Injektionsstrategie 6 zu erhalten (siehe Anhang F.5).

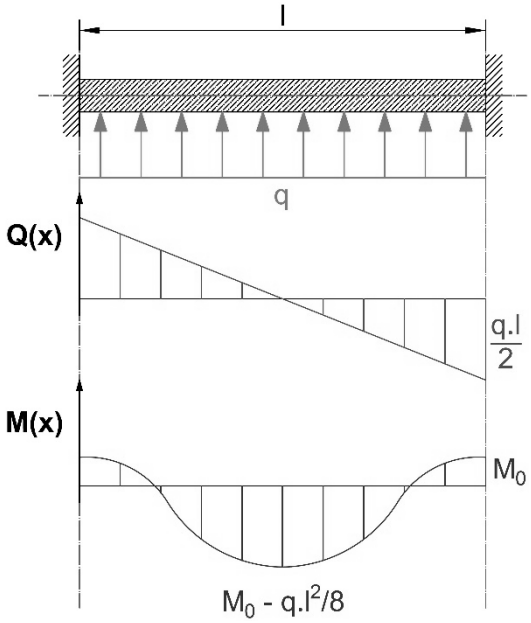


Abbildung 8-20: Biegemoment- und Querkraftverläufe im Injektionsschirm

8.3 Ermittlung der Injektionsreichweite (großmaßstäblicher Injektionsversuch)

Der auf der Baustelle eingesetzte Injektionsvorgang wurde mit den folgenden zwei Verfahren simuliert, um die Injektionsreichweiten zu ermitteln:

(1) Strömungssimulation mit dem entwickelten Bemessungstool (einphasige Strömungssimulation unter Berücksichtigung des Wasserdruckes)
(2) Numerische Strömungssimulation mit iTOUGH (CFD-Simulation von Mehrphasenströmungen)

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Verfahren genauer erläutert und die Ergebnisse präsentiert.

8.3.1 Einphasiges Strömungsberechnungsverfahren mit Bemessungstool unter Berücksichtigung des Wasserdruckes

Um die Injektionsreichweite einschätzen zu können, wurde in Abschnitt 8.1 ein Bemessungstool entwickelt. Allerdings wird bei Berechnungen mit diesem Tool der

Verdünnungseffekt nicht berücksichtigt. Die mit dem Bemessungstool ermittelten zeitlichen Verläufe der Injektionsparameter sind in Abbildung 8-21 dargestellt.

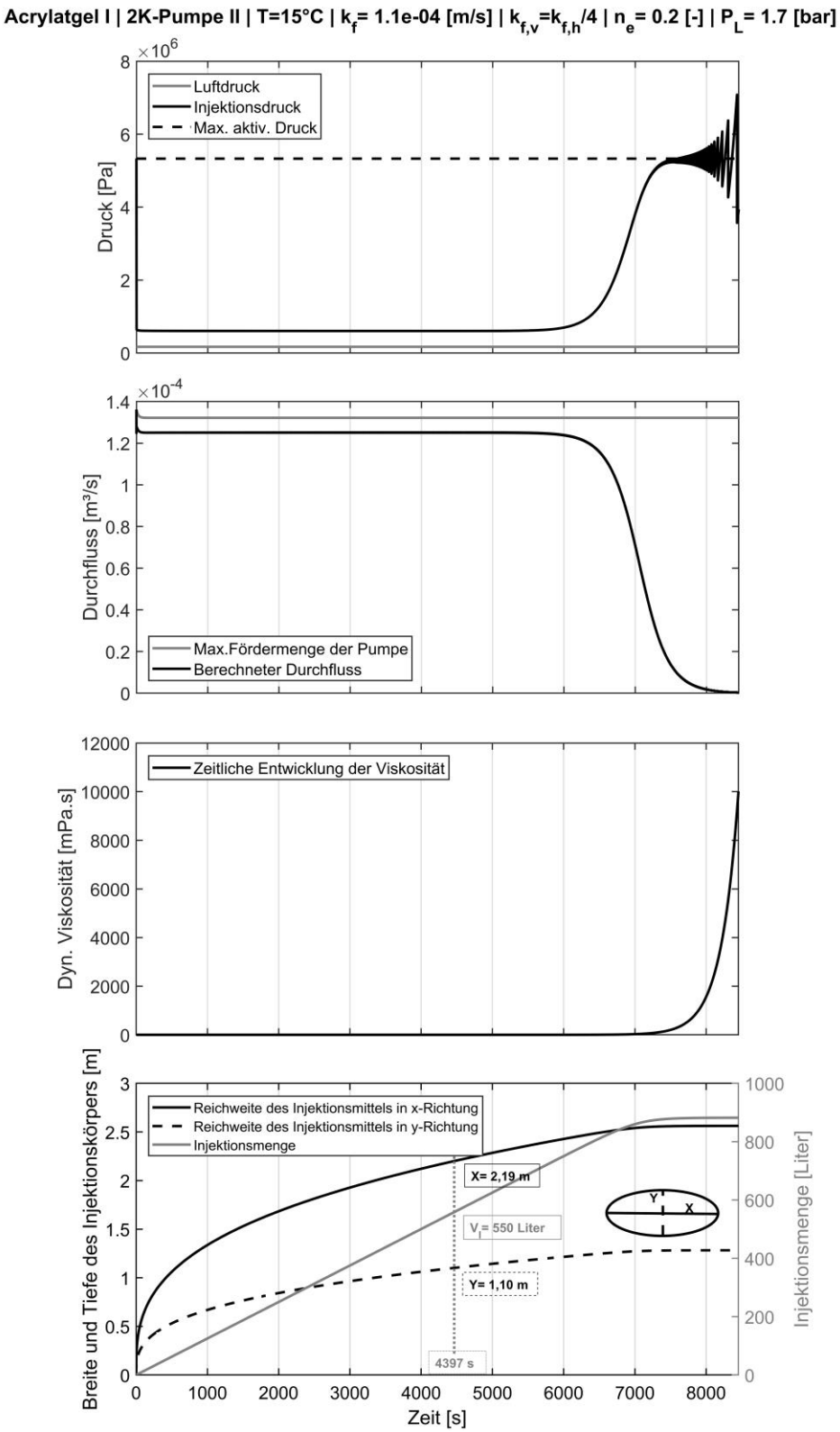


Abbildung 8-21: Zeitlicher Verlauf der Injektionsparameter – ermittelt mit Bemessungstool

Um die Überlappungen zwischen benachbarten Injektionskörpern berücksichtigen zu können, wurde das Tool erweitert. Die mit dem Bemessungstool ermittelten Reichweiten unter Berücksichtigung der Überlappungen sind in Tabelle 8-2 zusammengefasst und in Abbildung 8-22 dargestellt.

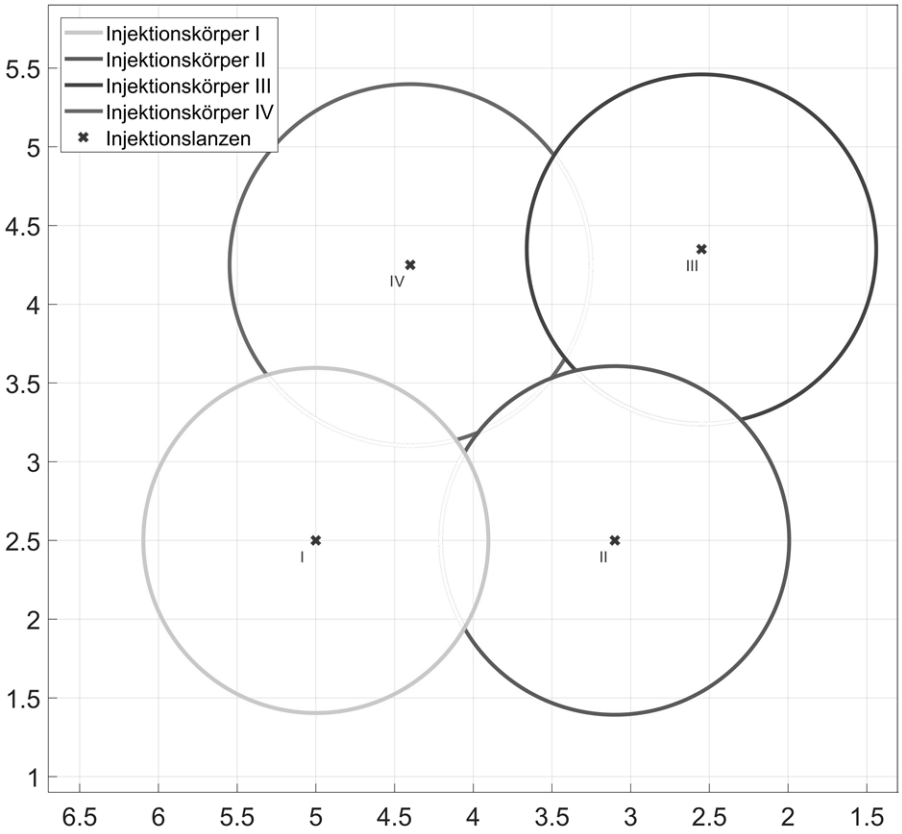


Abbildung 8-22: Mit dem Bemessungstool ermittelte Injektionsreichweiten unter Berücksichtigung der Überlappungen

8.3.2 Mehrphasiges Strömungsberechnungsverfahren mit iTough2 (CFD)

Die Reichweite der Injektionsmaterialien kann mittels des Programms iTOUGH2 (inverse Transport of Unsaturated Groundwater and Heat, Version 2) ermittelt werden. iTOUGH2 basiert auf dem TOUGH2-Simulator für nicht isotherme Mehrphasenströmung in porösen und gebrochenen Medien wie Böden und Fels und ermöglicht durch eine inverse Berechnung eine Kalibrierung des Maßsystems. Das Unterprogramm EOS-GEL (Equation-of-State-Gel) wurde für die Strömungssimulation von Gelen mit einer zeitabhängigen Viskosität entwickelt. Die Viskosität der flüssigen Phase (Wasser und Injektionsgut) wird als Funktion der Materialkonzentration und der Zeit berechnet. Die Viskosität der Mischung variiert mit der Konzentration des Injektionsmaterials in der flüssigen Phase und wird durch eine Mischregel beschrieben. Das Injektionsmaterial wird als mischbare wässrige Lösung behandelt und es wird keine separate Phase gebildet. Es

wird angenommen, dass sich das Injektionsmaterial nach Abschluss des Geliervorgangs bzw. der Polymerisation sofort verfestigt. Dadurch wird die Porosität verringert. Das neue poröse Medium hat somit eine geringere Permeabilität und neue Eigenschaften in dem vom Injektionsmaterial betroffenen Bereich. Der Übergang des Materials von einer hochviskosen Flüssigkeit zu einem festen Körper wird durch das Erstarrungsmodell beschrieben. [62]

iTOUGH ermöglicht die Ermittlung der Eigenschaften des neuen porösen Mediums nach dem vollständigen Erstarren des Injektionsmaterials, indem einige Annahmen über die neue Porenstruktur getroffen werden. Die Parameter, die nach der Erstarrung des Injektionsmittels berechnet werden, sind Porosität, Permeabilität, relative Permeabilität und Kapillardruckfunktionen sowie die Sättigung des nicht reagierten Injektionsmaterials. Das Erstarrungsmodell wird nur berücksichtigt, falls das Fluidgemisch eine bestimmte Mindestgelkonzentration (c_{min}) überschreitet. Bei Berechnungen wird eine Mindestgelkonzentration von 50 % berücksichtigt. Parameter *A* wird wie folgt definiert:

$$\begin{cases} A = 1 & wenn \quad c_1^{gel} \geq c_{min} \\ A = \dfrac{c_1^{gel}}{c_{min}} & wenn \quad c_1^{gel} < c_{min} \end{cases} \tag{8-58}$$

Die Porosität des Bodens wird durch die Erstarrung des Injektionsmaterials verringert und lässt sich mit der folgenden Gleichung ermitteln:

$$n^* = n \cdot (1 - A \cdot S_1) \tag{8-59}$$

Die Bodenporen werden zum größten Teil durch Injektionsmaterial abgedichtet. Durch die Geladsorption an den Bodenpartikeln wird der Durchmesser der verbleibenden größeren Poren verringert [62]. Nach dem Blake-Kozeny-Carman-Modell kann die Bodendurchlässigkeit nach der Erstarrung des Injektionsmaterials (k^*) anhand der Gleichung (8-60) ermittelt werden [131]:

$$k^* = k \cdot \frac{(1 - A \cdot S_1)^3}{(A \cdot S_1)^2} \tag{8-60}$$

Für die Simulation wurde ein 3D-Netz mit den Maßen 5,9 m x 4,8 m x 2,3 m (B x H x T) eingesetzt. Eine 5,4 [m] Wassersäule wurde auf der Oberseite des vollgesättigten Netzes definiert. Es wurde angenommen, dass der hydrodynamische Radius ungefähr bei 0,564 [nm] liegt (vergleichbar mit Natriumchlorid). Für die Ermittlung der Mischviskosität wurde die lineare Mischungsregel verwendet. Die ermittelten Injektionsreichweiten sind der Abbildung 8-23 zu entnehmen.

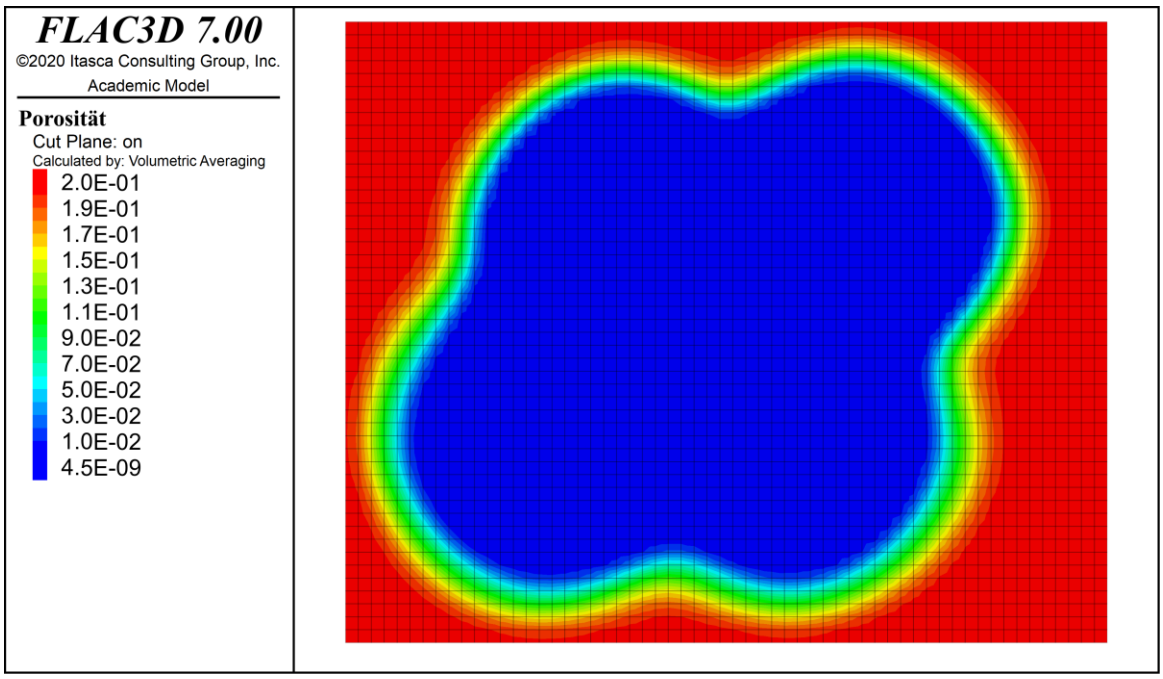


Abbildung 8-23: Ermittelte Injektionsreichweite bzw. Porosität mit iTough2 (Postprocessing mit FLAC3D)

8.3.3 Validierung der Simulationsergebnisse

In Abbildung 8-24 sind die gemessenen und mit zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten gegenübergestellt (siehe Abschnitte 7.5.3, 8.3.1 und 8.3.2). Zwischen den mit den zwei genannten numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten und den auf der Baustelle gemessenen Reichweiten sind nur geringe Abweichungen festzustellen.

Wird der Verdünnungseffekt bei den Berechnungen berücksichtigt, verbessert sich die ermittelte Reichweite. Der Grad der Verbesserungen ist vom erforderlichen Abdichtungseffekt abhängig. Bei der Ermittlung der in Tabelle 8-2 zusammengefassten Reichweiten wurden die Bereiche berücksichtigt, die nach der Erstarrung des Injektionsgutes eine Porosität kleiner als 0,05 [-] bzw. eine Permeabilität kleiner als $1 \cdot 10^{-10}$ [m/s] erreichen. Sollte die Ziel-Permeabilität $1 \cdot 10^{-7}$ [m/s] sein, wären die Injektionsreichweiten ca. 5 % größer.

Eine feine Netzaufteilung erhöht die Simulationsgenauigkeit bei Modellierungen mit iTough. Für die Simulation in dieser Arbeit wurde eine Gittergröße von 10 [cm] eigesetzt. Aus diesem Grund konnten die Injektionspunkte bei dem Simulationsverfahren nicht mit gleicher Genauigkeit platziert werden wie beim Bemessungstool. Je feiner die Netzaufteilung ist, desto genauer sind zwar die Simulationsergebnisse; allerdings verlängert sich die Simulationszeit.

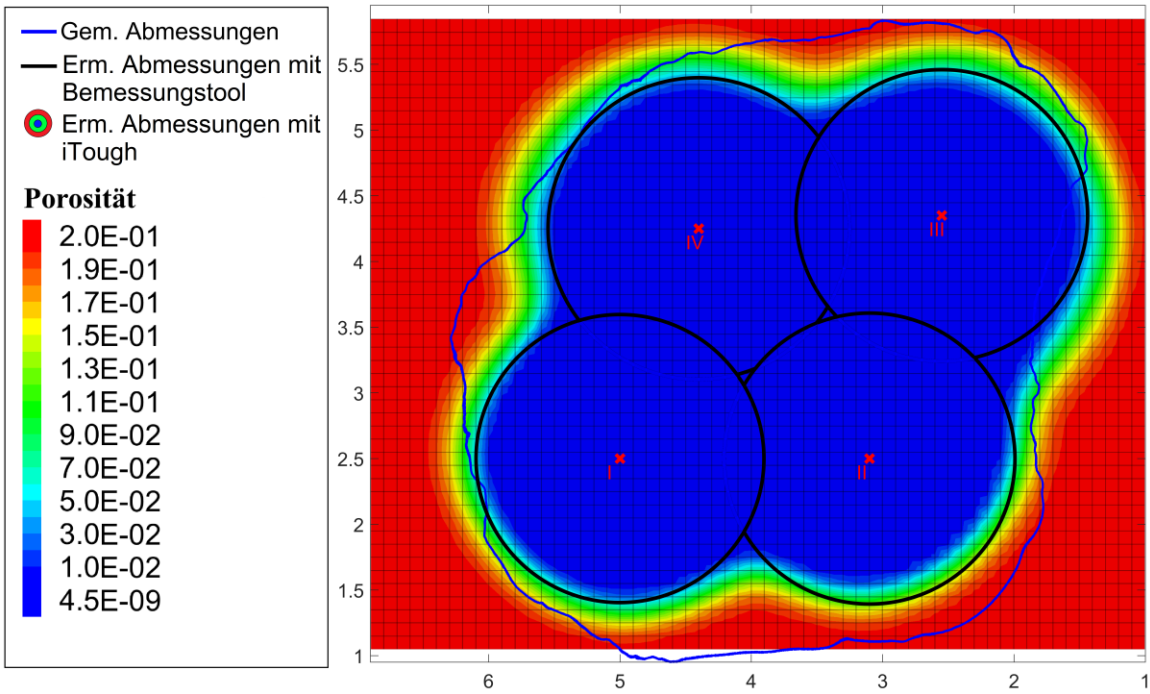


Abbildung 8-24: Gegenüberstellung der gemessenen und der mit zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten

Tabelle 8-2: Zusammenfassung der mit zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten

		I	II	III	IV
iTough (Mit Verdünnungseffekt)	R_H	112 [cm]	114 [cm]	114 [cm]	116 [cm]
	R_V	56 [cm]	57 [cm]	57 [cm]	58 [cm]
Bemessungtool (Ohne Verdünnungseffekt)	R_H	109,6 [cm]	110,7 [cm]	111,0 [cm]	114,8 [cm]
	R_V	54,8 [cm]	55,4 [cm]	55,5 [cm]	57,4 [cm]

Die Simulationen mit dem Bemessungstool erfolgen mit dynamischer Netzbildung. Daher ist die Berechnungszeit relativ kurz und mehrere Simulationen können in kurzer Zeit durchgeführt werden. Die Simulation mit iTOUGH für das vorgestellte Modell dauert mit dem verwendeten Rechner ca. zwei Tage, während dieselbe Simulation mit dem Bemessungstool nur ein paar Minuten dauert. Eine Gegenüberstellung der mit den zwei numerischen Verfahren ermittelten Injektionsreichweiten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Es ist empfehlenswert, die Auswirkung der Injektions- und Bodenparameter auf den erzeugten Injektionskörper durch mehrere Simulationen mit dem Bemessungstool zu untersuchen. Falls die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers zu hoch ist, kann mit den endgültigen Injektionsparametern eine

mehrphasige Strömungssimulation mit iTough2 durchgeführt werden, um sicherzugehen, dass der Verdünnungseffekt die Injektionsreichweite nicht stark beeinflusst.

Die Überlappungen zwischen den Injektionskörpern können bei den beiden vorgestellten Simulationsmethoden berücksichtigt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie sich die Injektionsmaterialien verbreiten, falls sich der Injektionspunkt innerhalb eines bereits hergestellten und ausreagierten Injektionskörpers befindet. Um diese Frage zu beantworten, müssen zuvor das Materialverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften der Injektionskörper bestimmt werden. In den nächsten zwei Kapiteln werden unterschiedliche Materialverhalten vorgestellt und die Eigenschaften der hergestellten Injektionskörper experimentell untersucht.

9 Materialverhalten von Festkörpern

Das Verständnis des mechanischen Materialverhaltens ist ein wesentlicher Bestandteil der täglichen Ingenieurarbeit, um den Verformungs- und Spannungszustand von Baugründen und -teilen, die äußeren Einflüssen einschließlich mechanischer Belastung ausgesetzt sind, genau zu bestimmen und zu prognostizieren.

Der Spannungstensor (*S*) ist ein Tensor zweiter Ordnung und besteht aus neun Spannungskomponenten, von denen nur sechs Komponenten unabhängig sind (Abbildung 9-1). Dies bedeutet, dass es zur Bestimmung des dreidimensionalen Spannungszustands im isotropen Körper ausreicht, die sechs Spannungskomponenten an einem Punkt zu kennen. [24]

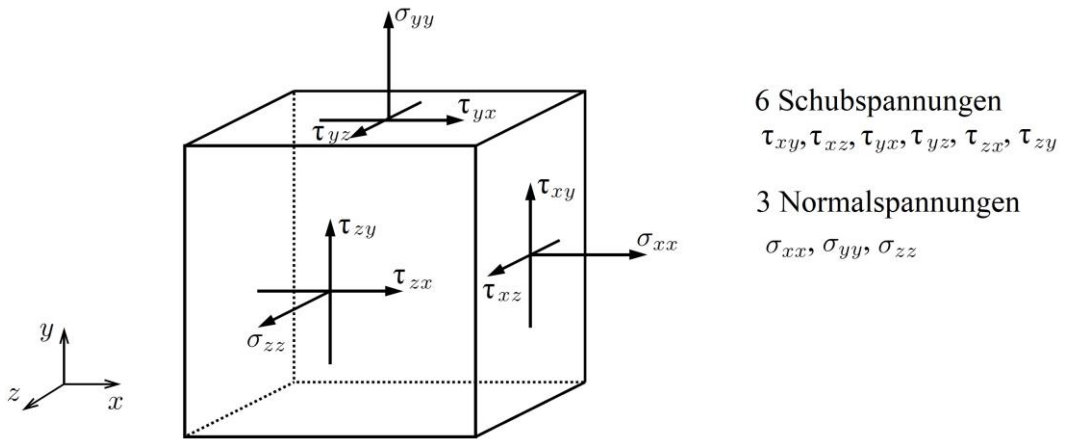


Abbildung 9-1: Normal- und Schubspannungen in einem dreidimensionalen Kontinuum (Modifiziert nach Borst 2012, S. 18)

Der Spannungstensor (*S*) kann in einer Matrix mit drei Normal- und sechs Schubspannungskomponenten beschrieben werden (Gleichung (9-1)):

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{9-1}$$

Jede der Spannungskomponenten verursacht eine Verformung des Körpers. Deformationen sind eine Funktion des Materialmodells von Körpern. Die Materialmodelle werden in Abschnitt 9.1 ausführlich beschrieben. Eine Erhöhung der Spannungen führt schließlich zum punktuellen oder vollständigen Versagen des Körpers. Die in der Boden- und Felsmechanik üblichen Bruchkriterien werden in Abschnitt 9.2 aufgeführt.

9.1 Grundlagen der Materialmodelle

9.1.1 Grundelemente

Beziehungen zwischen Dehnungen und Spannungen werden durch Materialmodelle beschrieben. Die üblichen Grundelemente rheologischer Modelle sind in Abbildung 9-2 dargestellt. [10, 142]

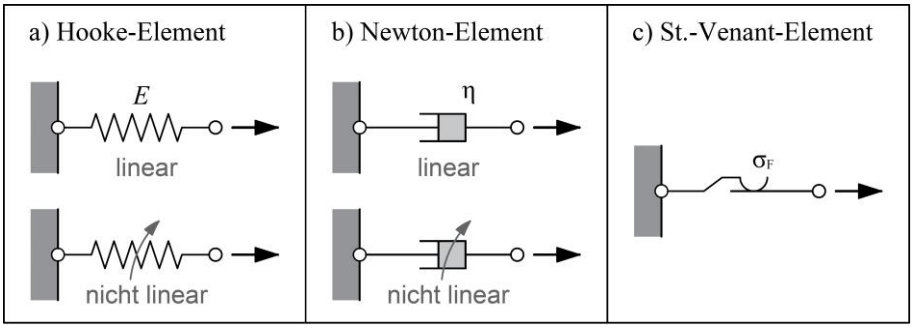


Abbildung 9-2: Grundelemente rheologischer Modelle: a) Hooke-Element, b) Newton-Element, c) St.-Venant-Element (Eigene Darstellung nach Berezvai 2020, S. 7)

9.1.1.1 Hooke-Element (Elastizität)

Nach dem Hookeschen Gesetz verhält sich ein elastisches Material wie eine Feder, die Hooke-Element genannt wird. Die Beziehung zwischen Spannungen und Dehnungen wird Elastizität genannt und kann linear oder nicht linear sein (siehe Abbildung 9-3).

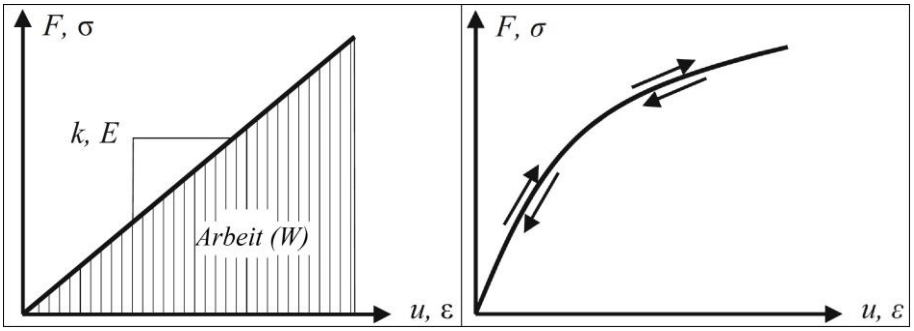


Abbildung 9-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei einem linear-elastischen Materialverhalten (links) sowie bei einem nicht linear-elastischen Materialverhalten (rechts); (Rust 2016, S. 134)

Beim ideal-elastischen Materialverhalten (linear) lässt sich die Elastizität mit folgender Gleichung ermitteln:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{9-2}$$

9.1.1.2 Newton-Element (zeitabhängiges Verhalten bzw. Viskosität)

Ein viskoses Materialverhalten kann mit dem Newton-Element modelliert werden. Die Beziehung zwischen Spannungen und Dehnungen ist in einem Newton-Element zeitabhängig, vergleichbar mit dem Verhalten eines Dämpfers. Sollte diese Beziehung linear sein, kann die Gleichung (9-3) zum Einsatz kommen:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad ; \quad \dot{\varepsilon} = {\partial\varepsilon}/{\partial t} \tag{9-3}$$

9.1.1.3 St.-Venant-Element (Plastizität)

Das Materialverhalten eines ideal-plastischen Stoffs wird mit einem St.-Venant- bzw. Reibelement beschrieben. Das Reibelement bleibt trotz Krafteinwirkung starr, solange die Fließgrenze (σ_F) nicht überschritten wird. Sollte die Kraft bzw. Spannung größer werden als die Fließgrenze, verliert dieses Element seine Funktion und das Material fließt [113, 132].

$$\varepsilon = \begin{cases} 0 & f\ddot{u}r\ \sigma < \sigma_F \\ \varepsilon(t) & f\ddot{u}r\ \sigma \geq \sigma_F \end{cases} \tag{9-4}$$

9.1.2 Zusammengesetzte Modelle

In komplexen dreidimensionalen Modellen wird häufig die Beziehung zwischen Dehnungen und Spannungen durch die Kombination grundlegender rheologischer Elemente vereinfacht. Es gibt eine breite Palette von zusammengesetzten Modellen, die in verschiedenen Disziplinen und Fachrichtungen verwendet werden. Maxwell-, Kelvin-Voigt-, Bingham-, Bergers- und Schofield-Scott-Blair-Körper sind die üblichen zusammengesetzten Modelle (Abbildung 9-4), die in der Geotechnik zum Einsatz kommen [74]. Diese werden nachfolgend im Detail behandelt.

9.1.2.1 Maxwell-Körper

Das Verhalten viskoelastischer Materialien mit zeitabhängigen und teilweise irreversiblen Verformungen kann mit dem Maxwell-Körper modelliert werden. Dieser Körper setzt sich aus einem Hooke- und einem Newton-Element mit einer Reihenschaltung zusammen. Wie in Gleichung (9-5) zu sehen ist, bilden elastische Dehnung ε^{el} (reversibel) und Kriechen ε^{cr} (irreversibel) die gesamte Dehnung ε^{tot} in Maxwell–Körper. [142]

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{cr} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \cdot t \tag{9-5}$$

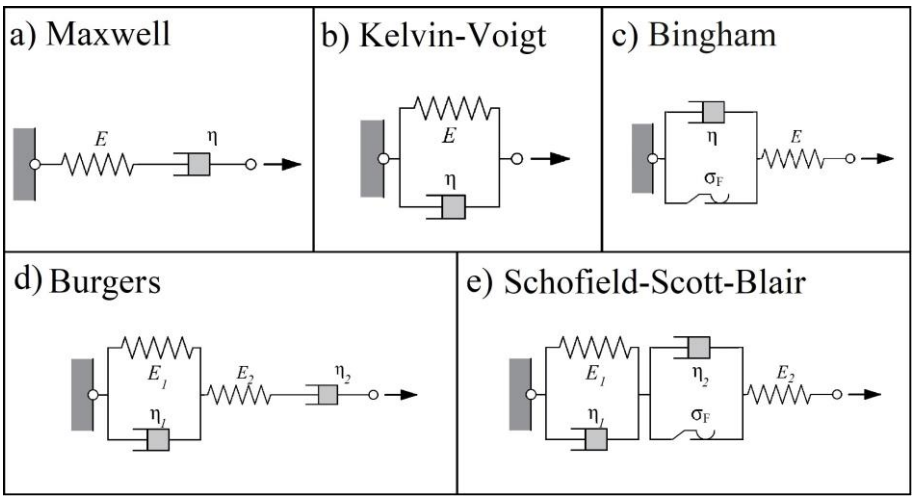


Abbildung 9-4: Übersicht der in der Geotechnik üblichen zusammengesetzten rheologischen Modelle

9.1.2.2 Kelvin-Voigt-Körper

Der Kelvin-Voigt-Körper besteht aus einem Hooke- und einem Newton-Element, die parallel miteinander verbunden sind. Im Gegensatz zum Maxwell-Körper mit einem irreversiblen viskoelastischen Verhalten sind die zeitabhängigen Dehnungen im Kelvin-Voigt-Körper reversibel [113]. Die rheologische Beziehung des Kelvin-Voigt-Körpers wird durch Kombinieren der Gleichungen (9-2) und (9-3) erhalten (Gleichung (9-6)).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \tag{9-6}$$

9.1.2.3 Bingham-Körper

Durch den Bingham-Körper kann ein visko(elasto)plastisches Materialverhalten modelliert werden. Viskoplastische Stoffe haben häufig ein zeitabhängiges plastisches Materialverhalten. Der Bingham–Körper besteht aus einem St.-Venant- und einem Newton-Element, die parallel miteinander verbunden sind, sowie einem Hooke-Element, das mit den beiden vorherigen Elementen in Reihe geschaltet ist [25]. Solange die Fließgrenze (σ_F) nicht überschritten wird, hat das Material ein elastisches Verhalten. Sollte die Spannung größer werden als die Fließgrenze, verliert das St.-Venant-Element seine Funktion und das Material zeigt ein viskoelastisches Verhalten, vergleichbar mit dem Maxwell-Körper (siehe Gleichung (9-7)).

$$\begin{cases} \varepsilon = {}^{\sigma}/_{E} & f\ddot{u}r\ \sigma < \sigma_F \\ \varepsilon^{tot} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{cr} = \dfrac{\sigma}{E} + \dfrac{\sigma}{\eta} \cdot t & f\ddot{u}r\ \sigma \geq \sigma_F \end{cases} \tag{9-7}$$

9.1.2.4 Burgers-Körper

Polymeren, Bitumen und Asphalte haben ein zeitabhängiges Materialverhalten [87, 113]. Die zeitabhängige Dehnung der genannten Materialien besteht aus reversiblen und irreversiblen Teilen. Aus diesem Grund empfiehlt Burgers (1935) für die Beschreibung des Materialverhaltens dieser Materialtypen eine Kombination von Maxwell- und Kelvin-Voigt-Körper, die in Reihe geschaltet sind [28].

$$\sigma + \left(\frac{E_1 \cdot \eta_2 + E_2 \cdot \eta_1 + E_2 \cdot \eta_2}{E_1 \cdot E_2}\right) \cdot \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_1 \cdot E_2} \cdot \ddot{\sigma} = \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_1} \cdot \ddot{\varepsilon} \tag{9-8}$$

9.1.2.5 Schofield-Scott-Blair-Körper

Der Schofield-Scott-Blair-Körper ist ein ausführliches rheologisches Modell, das sich aus einer Reihenschaltung des Kelvin-Voigt- und des Bingham-Körpers zusammensetzt. Alle in dieser Arbeit erwähnten Modelle lassen sich aus dem Schofield-Scott-Blair-Körper ableiten, indem Dämpfungskonstanten, Fließgrenze und/oder Elastizitätsmodule gleich null bzw. unendlich betrachtet werden. [113]

$$\begin{cases} \sigma + \frac{\eta_1}{E_1 + E_2} \cdot \dot{\sigma} = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cdot \varepsilon + \frac{E_2 \cdot \eta_1}{E_1 + E_2} \cdot \dot{\varepsilon} & f\text{ür } \sigma < \sigma_F \\ \sigma + \left(\frac{E_1 \cdot \eta_2 + E_2 \cdot \eta_1 + E_2 \cdot \eta_2}{E_1 \cdot E_2}\right) \cdot \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_1 \cdot E_2} \cdot \ddot{\sigma} = \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \cdot \eta_2}{E_1} \cdot \ddot{\varepsilon} + \sigma_F & f\text{ür } \sigma \geq \sigma_F \end{cases} \tag{9-9}$$

9.2 Stoffgesetze

Die Wahl des richtigen Stoffgesetzes, das die Beziehung zwischen den Dehnungen und den Spannungen in einem Material angibt, ist ein entscheidender Schritt bei der Planung sowie bei der numerischen Simulation. Die folgenden Stoffgesetze werden häufig bei den boden- bzw. felsmechanischen Simulationen eingesetzt:

- Mohr-Coulomb (MC)
- Hoek-Brown (HB)
- Hardening-Soil (HS)
- Modifiziertes Cam-Clay-Modell (MCC)
- Cam-Ton (GCC)
- Soft-Soil (SS)
- Soft-Soil-Creep (SSC)
- Drucker-Prager (DP)

Im Allgemeinen verhalten sich die meisten geotechnischen Materialien wie Boden oder Fels unter Belastung elastoplastisch. Es muss jedoch zwischen zähen und duktilen

Bruchverhalten unterschieden werden. Bei den zähen Materialien (auch sprödes Material genannt) werden durch die Probebelastung Scherverformungen hervorgerufen und in der Folge bricht die Probe unter Scherbeanspruchung. Bei den duktilen Materialien ist ein Materialversagen hingegen in Form eines plastischen Bruchs oder plastischen Fließens bei relativ großen Verformungen zu erwarten (siehe Abbildung 9-5). [138]

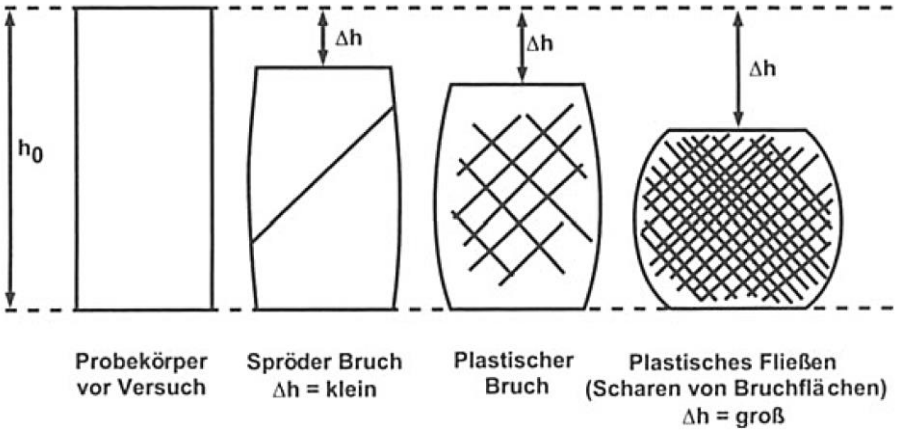


Abbildung 9-5: Bruchformen im einaxialen Druckversuch (Prinz und Strauß 2011, S. 57)

Plastisches Materialverhalten kann auf drei verschiedene Arten erfolgen (siehe Abbildung 9-6): Ideal-plastisches Material behält eine konstante Festigkeit bei und ist sehr selten. Verfestigendes Material wird durch die Erhöhung der Belastung fester, bis eine gewisse Endfestigkeit erreicht ist. Bei den entfestigenden Materialien wird eine Spitzenfestigkeit erreicht und dann wird die Festigkeit schwächer, bis eine Restfestigkeit erreicht ist. [142]

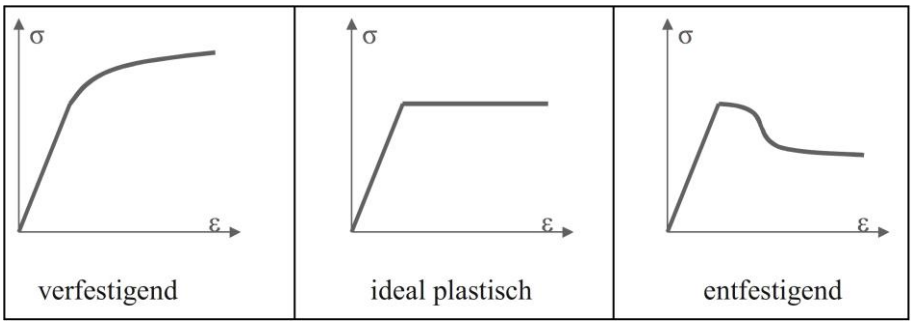


Abbildung 9-6: Plastische Materialverhalten unter Belastung (Rust 2016, S.209)

Die Bruchkriterien von Mohr-Coulomb und Hoek-Brown sind die zwei Stoffgesetze, die im nächsten Kapitel verwendet werden. Die Anwendungen sowie die Gleichungen dieser Stoffgesetze werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

9.2.1 Mohr-Coulombsches Bruchkriterium

Die Verformung eines elastoplastischen Materials kann in reversible elastische (ε^e) und irreversible plastische (ε^p) Dehnungen unterteilt werden (links in Abbildung 9-7 und Gleichung (9-10)) [137].

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \tag{9-10}$$

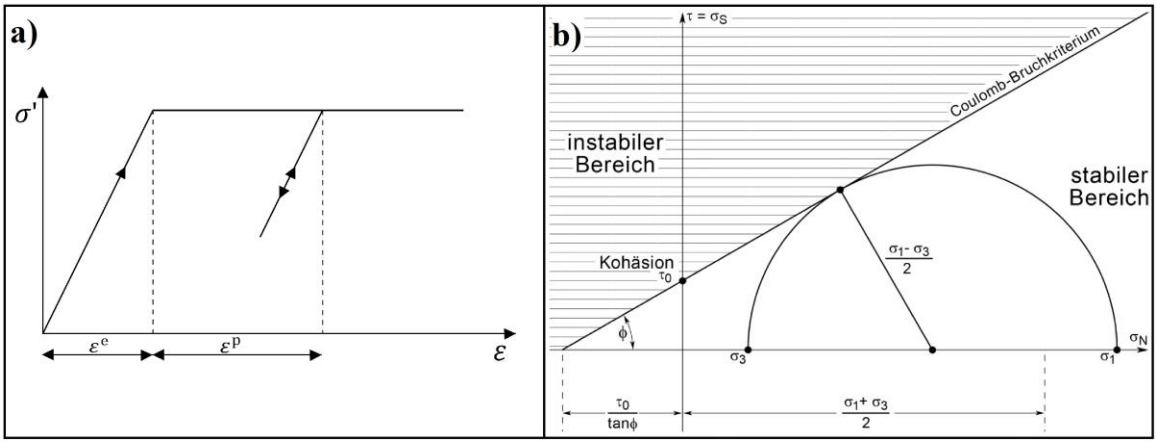


Abbildung 9-7: a) Elastisch-idealplastisches Materialverhalten (Plaxis 2020 Material Models Manual, S. 33); b) 2D-Darstellung der Bruchumhüllende nach Mohr-Coulomb (Burg 2012, S. 47)

Ein elastisch-idealplastisches Materialverhalten lässt sich mit dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium (MC) beschreiben [19]. Die Scherfestigkeit (τ'_f) nach dem MC-Bruchkriterium umfasst spannungsunabhängige Kohäsions- sowie spannungsabhängige Reibungskomponenten (rechts in Abbildung 9-7) und lässt sich mit folgender Gleichung ermitteln [27]:

$$\tau'_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan(\varphi') \tag{9-11}$$

9.2.2 Hoek-Brownsches Bruchkriterium

Das Hoek-Brownsche Bruchkriterium wurde 1980 für die Beschreibung des Materialverhaltens von Fels entwickelt und im Laufe der Zeit erweitert [82]. Eine Beschreibung des nicht linearen Materialverhaltens ermöglicht das Bruchkriterium nach Hoek-Brown (Gl. (9-12)).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left[\left(\frac{m_b \cdot \sigma'_3}{\sigma_{ci}}\right) + s\right]^a \tag{9-12}$$

Die Hoek-Brownschen Scherparameter lassen sich unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten Zugfestigkeit, der einaxialen Druckfestigkeit und der triaxialen Hauptspannungen ermitteln (siehe Abbildung 9-8).

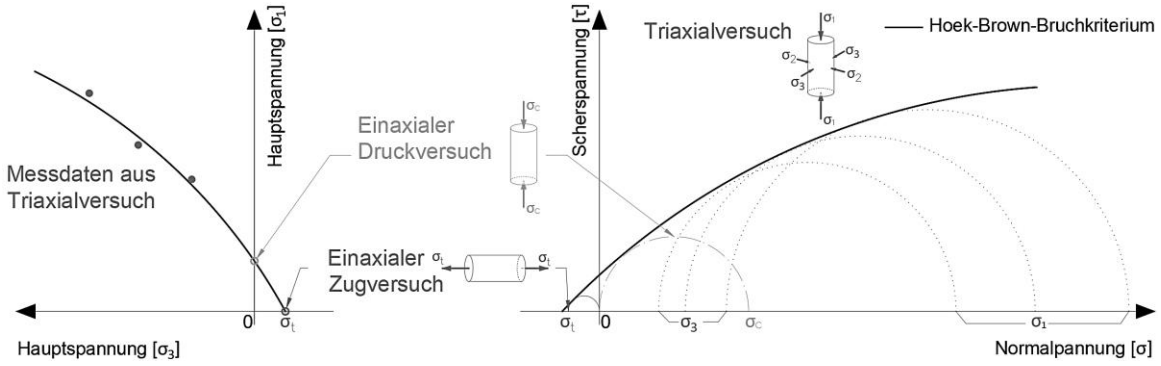


Abbildung 9-8: Bruchumhüllenden nach Hoek-Brown im σ_1-σ_3-Diagramm (links) sowie im τ-σ_n-Diagramm (rechts) und die für die Auswertung erforderlichen Messdaten

Wie in Abbildung 9-9 zu sehen ist, ist die Bruchumhüllende umso steiler, je größer die Konstante m_b ist. Für kompaktes und ungeklüftetes Gestein werden die Parameter $s = 1$ und $a = 0{,}5$ gewählt. Diese Werte werden ebenfalls für den intakten Injektionskörper angesetzt.

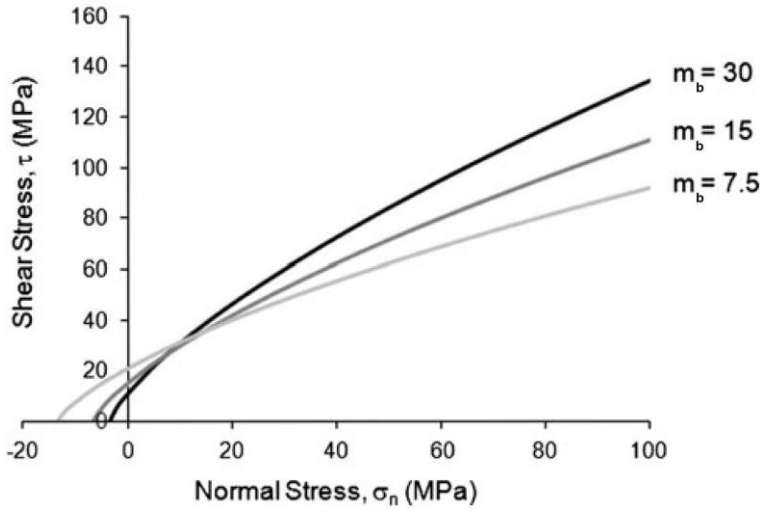


Abbildung 9-9: Änderung der Bruchumhüllende nach Hoek-Brown in Abhängigkeit von Konstante m_b (Eberhardt 2012, S. 983)

Unabhängig von dem eingesetzten Bruchkriterium können die Normal- und Scherspannungen durch die folgenden Gleichungen für einen Mohrschen Spannungskreis unter Berücksichtigung der Hauptspannungen berechnet werden.

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3' - 1}{\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3' + 1} \tag{9-13}$$

$$\tau' = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \frac{\sqrt{\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3'}}{\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3' + 1} \tag{9-14}$$

$\partial\sigma_1'/\partial\sigma_3'$ ist die erste Ableitung von Hauptspannung σ_1' nach Hauptspannung σ_3' und ist beim Mohr-Coulomb schen Bruchkriterium gleich (Gleichung (9-15)):

$$\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3' = tan^2(45 + \frac{\varphi'}{2}) \tag{9-15}$$

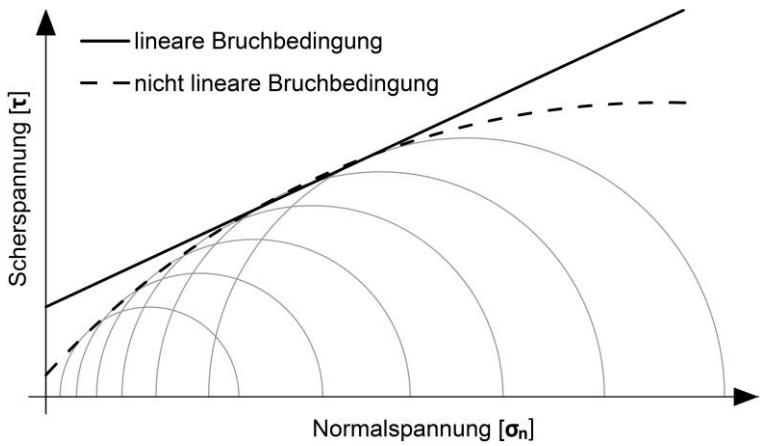


Abbildung 9-10: Gegenüberstellung der Bruchumhüllenden nach Mohr-Coulomb (linear) und Hoek-Brown (nicht linear) im τ-σ-Diagramm

Beim Bruchkriterium nach Hoek-Brown lässt sich dieser Wert mit folgender Gleichung ermitteln:

$$\partial\sigma_1' / \partial\sigma_3' = 1 + a \cdot m_b \cdot \left(m_b \cdot \sigma_3' / \sigma_{ci} + s\right)^{a-1} \tag{9-16}$$

Die MC-Parameter können für die HB-Materialien durch die von Bray entwickelten und von Hoek veröffentlichten Gleichungen ((9-17)-(9-21)) für jede beliebige Normalspannung ermittelt werden (Abbildung 9-10). Dabei wird angenommen, dass die HB-Konstante *a* gleich 0,5 ist. [81]

$$\varphi' = arctan\left(\frac{1}{\sqrt{4 \cdot h \cdot cos^2\theta - 1}}\right) \tag{9-17}$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cdot \left(90 + arctan\left(\frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}}\right)\right) \tag{9-18}$$

$$h = 1 + \frac{16 \cdot (m_b \cdot \sigma_n + s \cdot \sigma_{ci})}{3 \cdot m_b^2 \cdot \sigma_{ci}} \tag{9-19}$$

$$\boxed{c' = \tau_f - \sigma_n \cdot \tan\ \varphi'} \tag{9-20}$$

$$\tau_f = (\cot \varphi' - \cos \varphi') \cdot \frac{m_b \cdot \sigma_{ci}}{8} \tag{9-21}$$

10 Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit

Injektionsmaterialien werden zur Bodenverfestigung und zur Abdichtung eingesetzt. Durch die Injektion werden die mechanischen Eigenschaften des Bodens verändert. Es ist grundsätzlich schwierig, eine pauschale Aussage zu der Festigkeitsänderung nach einer Injektionsmaßnahme zu treffen. Diese wird von dem Spannungszustand, den Poreneigenschaften, der Beschaffenheit der Bodenpartikel sowie vom verwendeten Injektionsmaterial beeinflusst. Trotz der zahlreichen Einflussfaktoren besteht das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit darin, eine qualitative Aussage zu den Auswirkungen der Injektion auf die Entwicklung der Bodenfestigkeit und auf die Standsicherheit des Baugrundes treffen zu können. Auf dieser Grundlage wurde die Scherfestigkeit der Injektionskörper untersucht. Dabei wurden die Zugfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl des Injektionskörpers nachgeforscht. Die Untersuchungen der oben genannten Varianten bilden die wissenschaftlich fundierten Voraussetzungen zur Beschreibung des Verhaltens von Injektionsmaterialien im Boden.

10.1 Probenzusammensetzung und -herstellung

Die Proben wurden in den folgenden Schritten in einem Injektionszylinder hergestellt:

1. Die Innenseite des Zylinders wurde mit Schmier- bzw. Trennmittel besprüht, um ein Herauspressen bzw. Ausschalen des Injektionskörpers nach der Erhärtung zu erleichtern. Je nach eingesetztem Injektionsmittel wurde WD-40, Silikonspray oder silikonfreies Trennmittel (F12) als Trennmittel eingesetzt. Eine genaue Beschreibung findet sich in Abschnitt 7.4.1.
2. Hier wurden die gleichen Versuchsböden wie beim eindimensionalen Injektionsversuch eingesetzt. Die Böden wurden schichtweise in den Versuchszylinder gefüllt. Jede Schicht (1000 [g]) wurde mit zehn Schlägen durch ein Fallgewicht verdichtet. Da eine Penetrationsinjektion im Schluff fast unmöglich war, musste diese Bodenart bei den neuen Untersuchungen ausgeschlossen werden.
3. Zum vollständigen Verfüllen der Poren wurden die Injektionsmaterialien mit einem Luftdruck von 2 [Bar] mittels des Kartuschengerätes in den Boden (Bodentemperatur: 20 °C) eingepresst. Eine genaue Beschreibung der eingesetzten Injektionsmaterialien findet sich in Abschnitt 7.1.
4. Je nach eingesetztem Injektionsmaterial wurden die Injektionskörper aus den PVC-Rohren herausgepresst oder ausgeschalt. Die Injektionskörper aus Acrylatgel ließen sich mit Druckluft ohne Beschädigung des Rohres herauspressen. Um eine homogene Verteilung des Injektionsmaterials im Boden sicherzustellen, wurden die

Prüfkörper aus dem mittleren Bereich der 1 [m] langen Injektionsstrecke entnommen (siehe Abbildung 10-1).

5. Aushärtezeit und Lagerungsbedingungen der Prüfkörper beeinflussen deren bodenmechanische Eigenschaften signifikant. Um einen Vergleich der Ergebnisse der Versuche zu ermöglichen, wurden für alle Prüfkörper identische Aushärtezeiten und Lagerungsbedingungen gewählt. Die Versuche wurden nach einer Aushärtungszeit von drei Tagen durchgeführt. Um den Prüfkörper vor Austrocknung zu schützen und auf diese Weise den In-situ-Zustand einer Dichtsohle abzubilden, wurden alle Prüfkörper vakuumverpackt und in einem Klimaraum bei konstanter Raumtemperatur und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert.

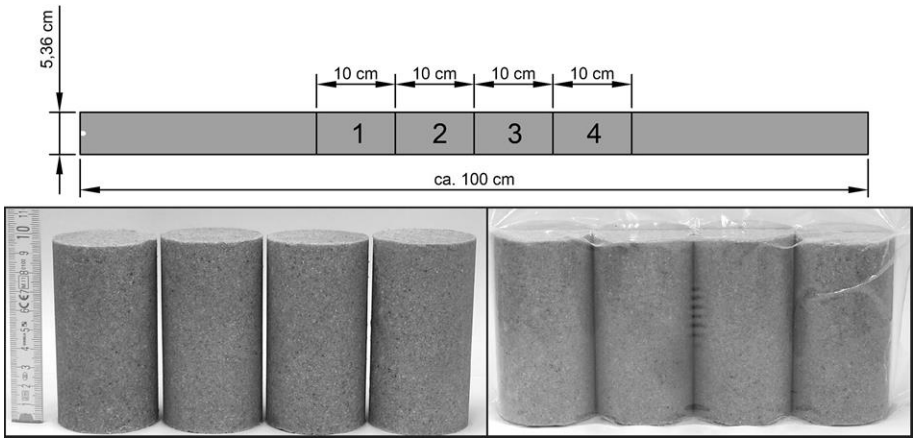


Abbildung 10-1: Entnahmestellen der Prüfkörper (oben), Prüfkörper (links), vakuumverpackte Prüfkörper (rechts)

10.2 Zugversuch

10.2.1 Versuchsbeschreibung

Der Boden hat keine bzw. eine sehr geringe Zugfestigkeit. Durch die Injektion kann die Zugfestigkeit des Bodens erhöht werden. Eine Erhöhung der Bodenzugfestigkeit hat Vorteile in mehrfacher Hinsicht. Beispielsweise kann der Aufwand für den Streckenausbau im Tunnel- und Bergbau deutlich verringert werden. Bei diesem Versuch wurde die Zugfestigkeit des Injektionskörpers unter Berücksichtigung der Verformungsgeschwindigkeit, Bodenart und des Injektionsmaterials untersucht.

Verschiedene Prüfverfahren können für die Ermittlung der Zugfestigkeit verwendet werden. Eine Liste der möglichen Versuchsmethoden findet sich in Abbildung 10-2.

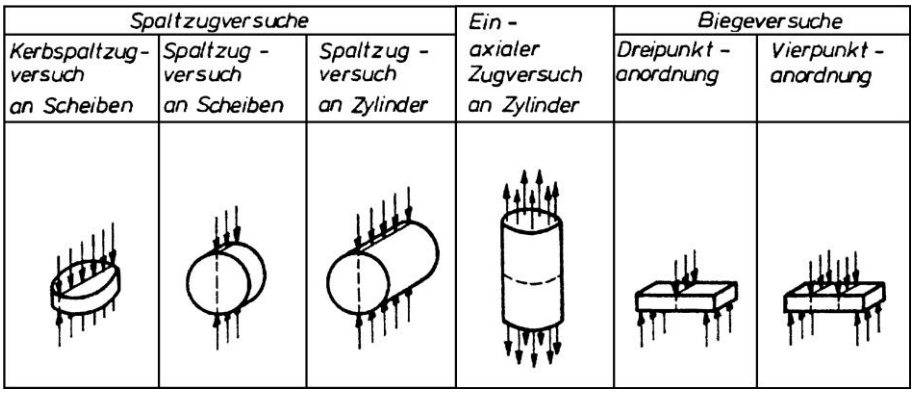


Abbildung 10-2: Prüfverfahren für die Ermittlung der Zugfestigkeit (Dachroth 2017, S. 123)

Die Zugfestigkeiten, die mit den oben gelisteten Verfahren ermittelt wurden, weisen gewisse Abweichungen auf. Die niedrigste Zugfestigkeit ist mit dem einaxialen Zugversuch und die höchste Festigkeit mit dem Biegeversuch zu messen. Der einaxiale Zugversuch ist aufwendig, daher wird er nur selten eingesetzt. [31]

Da die Zugfestigkeit der Injektionskörper mittels Biegeversuch überschätzt werden kann, wurden die Zugfestigkeiten der Injektionskörper mittels Spaltzugversuch gemäß DIN EN 12390-6 und DIN 22024 ermittelt.

Der Spaltzugversuch ist ein indirektes Zugfestigkeit-Ermittlungsverfahren, in dem der Injektionskörper senkrecht auf die Längsachse bis zum Bruch belastet wird. Der Versuch kann an den zylinder-, würfel- bzw. prismaförmigen Proben durchgeführt werden, oft wird jedoch eine zylinderförmige Probe verwendet. Der Spaltzugversuch wird auch Querzugversuch, indirekter Zugversuch und Brazilian-Test genannt. [23]

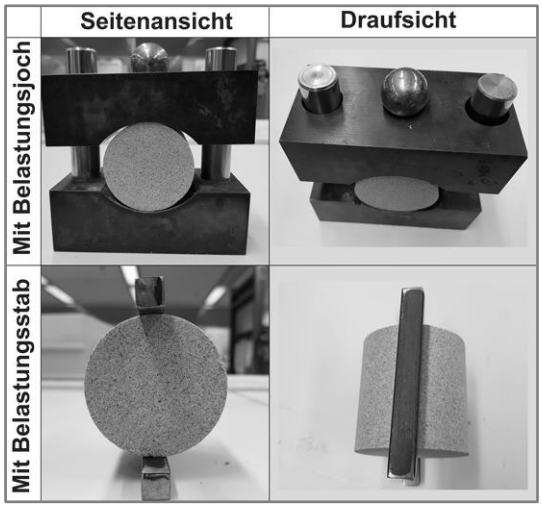


Abbildung 10-3: Varianten der Lastübertragung beim Spaltzugversuch

Für die Lastübertragung beim Spaltzugversuch werden Belastungsjoche, Stahlplatten oder Stahlstäbe eingesetzt (Abbildung 10-3). Die Druckbelastung wird über die Kontaktfläche auf den Prüfkörper übertragen. Der axiale Druck bewirkt, dass sich die beiden Halbzylinder auseinanderbewegen, wodurch eine Zugspannung in der Probemitte erzeugt wird (siehe Abbildung 10-4). Die Spaltzugfestigkeit kann durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\sigma_t = {2 \cdot F}/{\pi \cdot D \cdot L} = {0{,}64 \cdot F}/{D \cdot L} \tag{10-1}$$

Die Injektionskörper haben im Vergleich zu Fels oder Beton oft ein niedriges Elastizitätsmodul. Daher wird durch eine geringe Belastung eine große Verformung hervorgerufen. Werden Belastungsjoche für Lastübertragung bei den Spaltzugversuchen an Injektionskörpern eingesetzt, ist eine zunehmende Lastübertragungsfläche während des Versuches festzustellen. Dies führt zu einer Verfälschung der Messergebnisse. Um dieses Problem zu vermeiden, wurden Stahlstäbe für die Lastübertragung verwendet (siehe Abbildung 10-4).

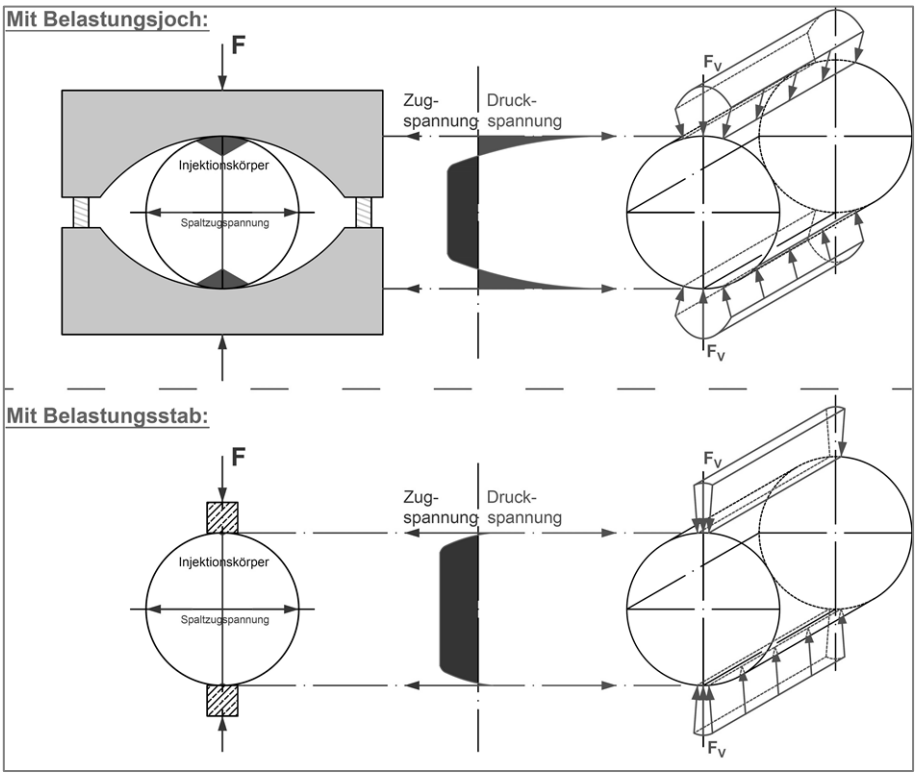


Abbildung 10-4: Spannungsverlauf bei den verschiedenen Varianten der Lastübertragung

Die Untersuchungen mit Fels und Beton zeigen, dass die Zugfestigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig ist. Bonzel (1965) empfiehlt für die Untersuchungen von Betonproben eine Spannungsrate von 0,01 bis 0,03 [MPa/s]. Nach DIN EN 12390-6 sollte dieser Wert jedoch zwischen 0,04 und 0,06 [MPa/s] liegen. Die geeignete Belastungsgeschwindigkeit ist von den Materialeigenschaften abhängig. Je länger der

erwartete Kriechprozess in einem Material ist, desto niedriger sollte die Belastungsgeschwindigkeit ausgewählt werden [99]. Um die Einwirkung der Belastungsgeschwindigkeit auf die ermittelte Zugfestigkeit zu untersuchen, wurden die Versuche mit drei verschiedenen Spannungsraten (0,005/0,01/0,05 [MPa/s]) durchgeführt. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurden die Versuche für jede Material- und Belastungskombination mindestens dreimal wiederholt. Die Messergebnisse mit großer Abweichung wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Für die Versuche wurden 55 [mm] lange Proben verwendet.

10.2.2 Ergebnisse und Auswertungen

Tabelle 10-1 vermittelt eine Übersicht über das Versuchsprogramm und die Ergebnisse der Spaltzugversuche mit den vorgestellten Injektionsmaterialien. Bei Spaltzugversuchen wird mit großer Ungenauigkeit der Messergebnisse gerechnet. Die ermittelten Messabweichungen liegen hier zwischen 0,4 und 31,7 % (6. Spalte Tabelle 10-1). Die Belastungsgeschwindigkeit hat bei den Injektionskörpern, die mit Acrylatgel II injiziert wurden, die stärkste Einwirkung auf die Zugfestigkeit. Die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) liegen zwischen 23,5 und 35,1 % (9. Spalte Tabelle 10-1).

Die beste Zugfestigkeit ist mit Polyurethanharz zu erzielen. Durch eine Injektion mit Acrylatgel I kann die Zugfestigkeit dagegen nur geringfügig erhöht werden. Der Einfluss der Bodenart auf die Zugfestigkeit war in den Injektionskörpern aus Acrylatgel I deutlich stärker ausgeprägt (A.v.M. gleich 70,2 %). Im Gegensatz dazu war dieser Einfluss in den mit Polyurethan hergestellten Proben gering (A.v.M. gleich 10,2 %). Je höher die Belastungsgeschwindigkeit, desto höher ist die Zugfestigkeit. Diese Erwartung gilt nur für die mit Acrylatgel II hergestellten Proben und für die mit Acrylatgel I und Polyurethanharz in Kombination mit Kies hergestellten Proben.

In Abbildung 10-5 sind die mittleren Zugfestigkeiten, unabhängig von der Spannungsrate, für die eingesetzten Bodenarten und Injektionsmaterialien in einem Balkendiagramm zusammengefasst. Die Versuche mit den Proben aus Acrylatgel zeigen: Je feiner der Boden ist, desto höher ist die Zugfestigkeit. Erklären lässt sich diese Tendenz durch die Beschädigung des mit Injektionsmaterial gebildeten Netzes durch die Bodenpartikel. Je größer und kantiger die Partikel sind, desto größer ist der Beschädigungsgrad.

Tabelle 10-1: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Injektionsmaterial, Bodenart und Spannungsrate

Material	Boden-art	Spannungs-rate [MPa/s]	Zugfestigkeit [MPa]	Bei Dehnung [%]	A.v.M. [%]	Mitt. Zugfestigkeit [MPa]	Bei Dehnung [%]	A.v.M. [%]	Mitt. Zugfestigkeit [MPa]	A.v.M. [%]
Acrylatgel I	Kies	0,005	0,042	2,7	11,9	**0,043**	**2,7**	**8,5**	**0,145**	**70,2**
		0,01	0,041	2,3	18,9					
		0,05	0,047	3,0	18,7					
	Sand A	0,005	0,174	6,4	14,9	**0,191**	**5,7**	**12,6**		
		0,01	0,215	5,0	5,1					
		0,05	0,184	5,8	3,4					
	Sand B	0,005	0,204	6,9	8,4	**0,202**	**6,3**	**8,3**		
		0,01	0,185	6,6	27,5					
		0,05	0,216	5,3	7,4					
Acrylatgel II	Kies	0,005	0,327	7,3	11,1	**0,406**	**6,8**	**35,1**	**0,547**	**25,7**
		0,01	0,343	6,5	13,4					
		0,05	0,549	6,7	14,1					
	Sand A	0,005	0,424	7,0	11,7	**0,570**	**6,9**	**32,3**		
		0,01	0,532	7,1	4,0					
		0,05	0,754	6,7	10,0					
	Sand B	0,005	0,545	7,3	11,6	**0,665**	**7,6**	**23,5**		
		0,01	0,629	7,7	10,1					
		0,05	0,821	7,8	7,1					
Polyurethanharz	Kies	0,005	7,798	1,5	0,4	**8,759**	**1,4**	**11,0**	**9,752**	**10,2**
		0,01	8,929	1,4	1,5					
		0,05	9,550	1,3	8,2					
	Sand A	0,005	10,669	1,8	23,7	**10,419**	**1,7**	**12,3**		
		0,01	9,136	1,5	11,2					
		0,05	11,451	1,7	18,6					
	Sand B	0,005	9,881	1,7	9,7	**10,077**	**1,7**	**15,7**		
		0,01	8,691	1,4	0,8					
		0,05	11,660	1,9	15,7					
		In Abhängigkeit von Bodenart und Spannungsrate				Unabhängig von Spannungsrate			Unabhängig von Bodenart	

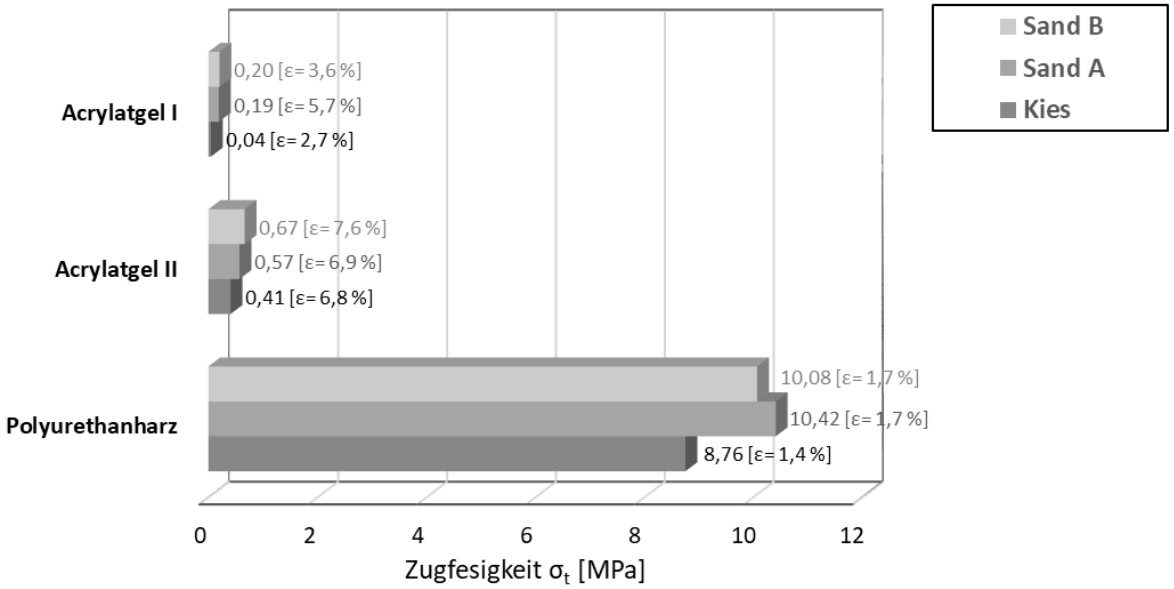


Abbildung 10-5: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart

Zur Einordnung der gemessenen Zugfestigkeiten werden diese mit der Zugfestigkeit anderer Materialien verglichen (Abbildung 10-6). Dabei zeigt sich, dass mit Polyurethanharz eine bessere Zugfestigkeit im Boden als in Sandstein und Beton erzielt werden kann. Die mit Acrylatgel erzielte Zugfestigkeit ist nur mit sehr niedrig tragfähigem Sandstein vergleichbar. Bei vielen Bauprojekten reicht jedoch eine leichte Erhöhung der Zugfestigkeit aus, um einen Zusammensturz der Bodenstruktur zu verhindern.

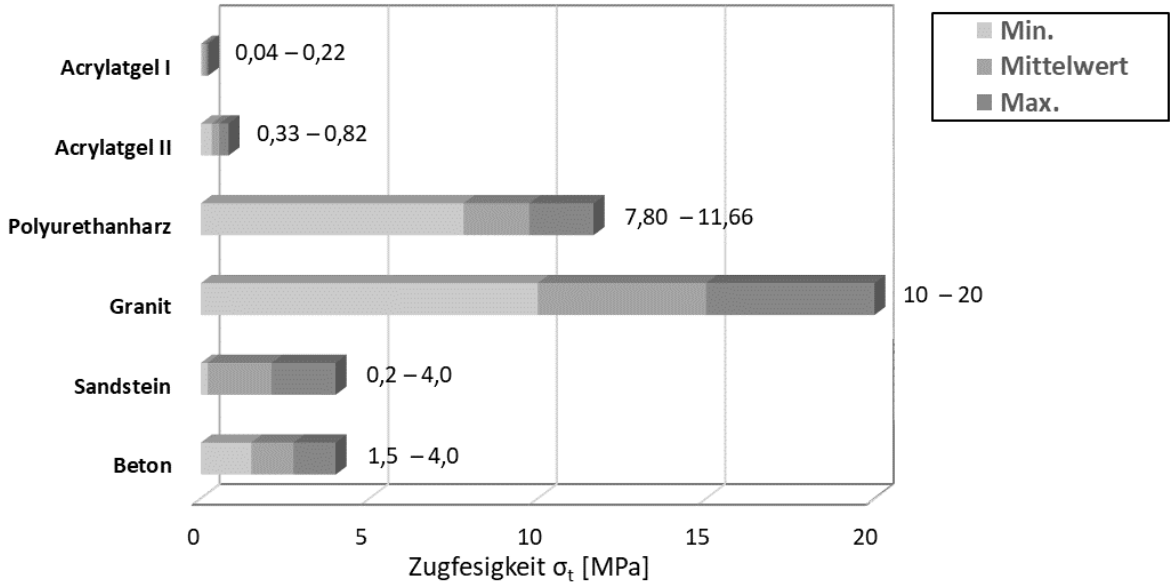


Abbildung 10-6: Zugfestigkeit der untersuchten Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien

10.3 Einaxialer Druckversuch

10.3.1 Versuchsbeschreibung

Die maximale Tragfähigkeit einer zylinder- bzw. prismenförmigen Probe unter einer vertikalen Belastung ohne Ver- bzw. Behinderung der Seitenverformungen wird einaxiale Druckfestigkeit (σ_u) genannt, sofern die vertikale Stauchung 20 % nicht überschreitet. Ist die vertikale Stauchung größer als 20 % und die maximale Druckfestigkeit noch nicht erreicht, wird die für die 20 % Vertikaldehnung erforderliche Belastung als einaxiale Druckfestigkeit betrachtet. Der einaxiale Druckversuch ist in DIN 18136 und DIN EN 1926 geregelt. Mittels dieses Versuches können nicht nur die einaxiale Druckfestigkeit, sondern auch der einaxiale Elastizitätsmodul (E_u) und die Poissonzahl (ν) ermittelt werden. Ein einaxialer Druckversuch kann kraft- oder weggesteuert durchgeführt werden. Die Versuche wurden in dieser Arbeit weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 [mm/min] durchgeführt.

DGGT empfehlt, die einaxiale Tragfähigkeit von zylindrischen Gesteinsprüfkörpern zu verringern, wenn der Schlankheitsgrad (*l/d*) weniger als 2 beträgt. Der Schlankheitsgrad darf jedoch nicht kleiner als 1 und größer als 2,5 sein. Die abgeminderte einaxiale Druckfestigkeit ($\sigma_{u(2)}$) lässt sich mit Gleichung (10-2) ermitteln. [124]

$$\sigma_{u(2)} = \frac{8 \cdot \sigma_u}{7 + 2 \cdot {}^{d}/_{l}} \tag{10-2}$$

Die maximale Tangentenneigung der Spannungs-Dehnungskurve wird als einaxiales Druckmodul betrachtet (siehe Gleichung (10-3)).

$$E_u = max \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \tag{10-3}$$

Sobald Kraft auf einen Injektionskörper einwirkt, verformt sich dieser in normale und tangentiale Richtungen. Die Poissonzahl (v) ist das Verhältnis von tangentialer Verformung zu normaler Verformung. Die tangentialen Verformungen wurden während des Versuches unter Verwendung einer seitlichen Dehnungsmessstreife gemessen. Die größte messbare Umfangsdehnung mit der eingesetzten Dehnungsmessstreife betrug 7 [mm]. Die Verformung wurde in der Mitte der Probe gemessen. Wegen des duktilen Materialverhaltens von Injektionskörpern ist die gemessene Querdehnung ($\Delta r_{max}/r$) größer als die durchschnittliche Querdehnung (Abbildung 10-7). Wird angenommen, dass die seitlichen Verformungen ellipsenförmig sind, lässt sich die Querverformung (Δr) in jeder beliebigen Tiefe (y) der Probe unter Verwendung der folgenden Gleichung bestimmen:

$$\begin{aligned} {x^2}/{\Delta r_{max}^2} + {y^2}/{(H/2)^2} = 1 \ \rightarrow \Delta r = x \\ = \frac{\Delta r_{max}}{H} \cdot \sqrt{H^2 - 4 \cdot y^2} \end{aligned} \tag{10-4}$$

Die durchschnittliche Querdehnung ($\overline{\varepsilon_v}$) kann mit Gleichung (10-5) ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta r} &= \frac{2 \cdot \int_0^{H/2} x\, dy}{H} \\ &= \frac{\Delta r_{max} \cdot \left[H^2 \cdot \arcsin\left(2 \cdot \frac{y}{H}\right) + 2 \cdot y \cdot \sqrt{H^2 - 4 \cdot y^2}\right]_0^{H/2}}{2 \cdot H^2} \end{aligned} \tag{10-5}$$

$$\overline{\varepsilon_v} = {\overline{\Delta r}}/{r} = \frac{\pi \cdot \Delta r_{max}}{4 \cdot r} \approx 0{,}79 \cdot {\Delta r_{max}}/{r}$$

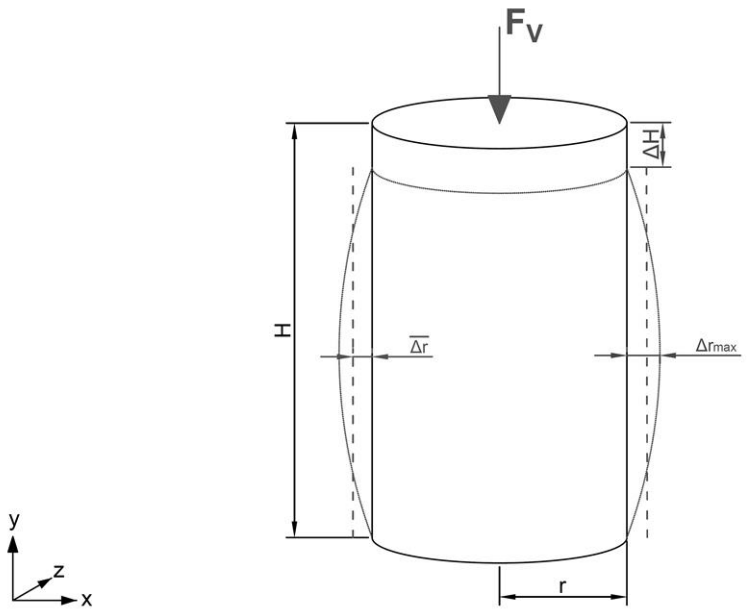


Abbildung 10-7: Verformungsschema der Probe nach der Belastung

10.3.2 Ergebnisse und Auswertungen

Die für die einaxialen Druckversuche eingesetzten Prüfkörper hatten einen Schlankheitsgrad von 1,88 bis 1,90 und somit kleiner als 2. Daher sollten die gemessenen Druckfestigkeiten abgemindert werden. Die gemessenen und abgeminderten Druckfestigkeiten sind in Tabelle 10-2 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen für die mit Acrylatgel hergestellten Körper: Je feinkörniger der Boden, desto größer sind die einaxiale Druckfestigkeit und die durch die maximale Spannung hervorgerufenen Verformungen. Mit Polyurethanharz war die beste Druckfestigkeit im Sand A zu erzielen. Dies kann daran liegen, dass Polyurethanharz an sich eine große Tragfähigkeit aufweist. Die Festigkeit des mit Polyurethanharz erzeugten Injektionskörpers wird zum größten Teil durch die Festigkeit der Bodenkörner beeinflusst. Sand A besteht aus Quarzkörnern, die sehr große Tragfähigkeiten besitzen.

Fels und Boden können sich anhand der einaxialen Druckfestigkeit voneinander unterscheiden. Die einaxiale Druckfestigkeit von Boden beträgt normalerweise weniger als 1 [MPa]. Dieser Wert kann jedoch für Festgestein bzw. Fels deutlich über 10 [MPa] liegen. Eine Probe mit einer Druckfestigkeit zwischen 1 und 10 [MPa] kann als relativ mürbes Gestein betrachtet werden. [138]

Tabelle 10-2: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Material	Boden-art	Einaxiale Druckfestigkeit σ_u [MPa]	Bei Dehnung ε_u [%]	Abgeminderte einaxiale Druckfestigkeit $\sigma_{u(2)}$ [MPa]	Gestein-klassifizierung nach DIN 1054	Poissonzahl ν_u [-]	Einaxialer Druckmodul E_u [MPa]
Acrylatgel I	Kies	0,207	2,7	0,21	sehr mürb	0,76	12,70
	Sand A	0,502	5,1	0,50	sehr mürb	0,83	18,09
	Sand B	0,661	5,6	0,66	sehr mürb	0,75	16,81
Acrylatgel II	Kies	0,886	4,6	0,88	sehr mürb	0,69	49,96
	Sand A	1,432	4,9	1,42	mürb	0,84	70,53
	Sand B	1,940	6,3	1,92	mürb	0,49	101,25
Polyurethanharz	Kies	24,952	4,0	24,78	mäßig hart	0,22	2699,32
	Sand A	52,475	1,7	52,08	hart	0,25	7267,84
	Sand B	26,961	1,2	26,76	mäßig hart	0,24	3609,26

Nach DIN 1054 wird Gestein nach seiner einachsigen Druckfestigkeit in die folgenden fünf Gruppen eingeteilt:

- $\sigma_u > 50$ [MPa] → hart
- 50 [MPa] $\geq \sigma_u > 12{,}5$ [MPa] → mäßig hart
- 12,5 [MPa] $\geq \sigma_u > 5$ [MPa] → mäßig mürb
- 5 [MPa] $\geq \sigma_u > 1{,}25$ [MPa] → mürb
- $\sigma_u \leq 1{,}25$ [MPa] → sehr mürb

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit Polyurethanharz ein Injektionskörper erzeugt werden kann, dessen Widerstand mit mäßig hartem bis hartem Gestein vergleichbar ist. Der Widerstand, der nach der Injektion mit Acrylatgelen erzeugt wird, liegt dagegen auf dem Niveau von steifplastischem bis halbfestem Boden bzw. sehr mürbem Gestein.

In Abbildung 10-8 sind die einaxialen Druckfestigkeiten für die eingesetzten Bodenarten und Injektionsmaterialien in einem Balkendiagramm zusammengefasst. Diese Abbildung bestätigt erneut: Je feinkörniger der Boden ist, desto größer ist die einaxiale Druckfestigkeit bei den mit Acrylatgel hergestellten Proben.

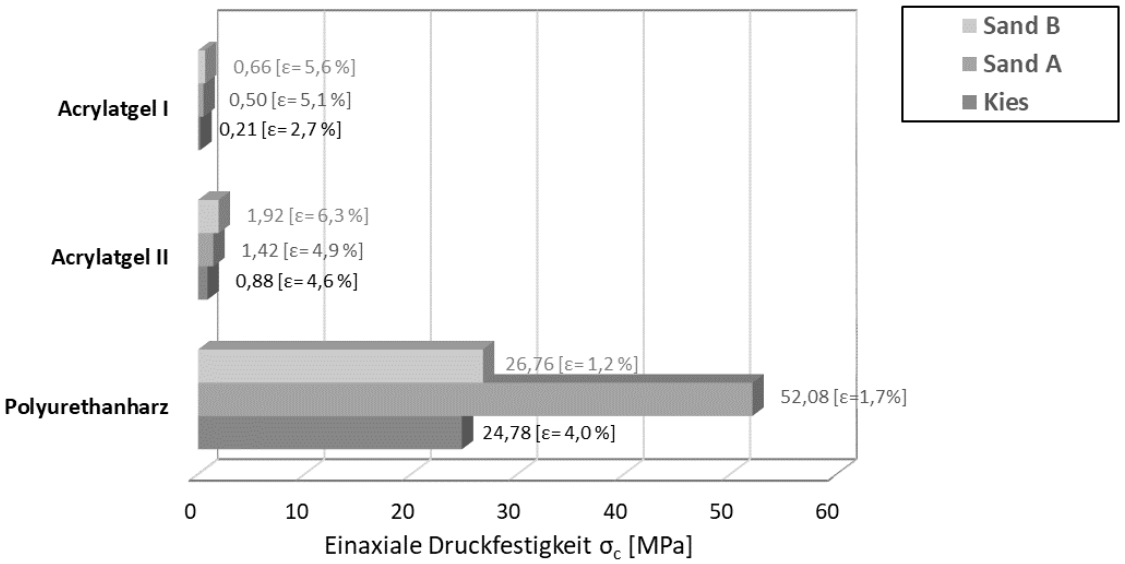


Abbildung 10-8: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart

Zur Einordnung der gemessenen einaxialen Druckfestigkeiten werden diese mit der Druckfestigkeit anderer Materialien verglichen (Abbildung 10-9). Dabei zeigt sich, dass mit Polyurethanharz eine mit Beton vergleichbare Druckfestigkeit erreicht werden kann. Die mit Acrylatgelen erzielte Druckfestigkeit ist jedoch deutlich kleiner als die Vergleichsmaterialien.

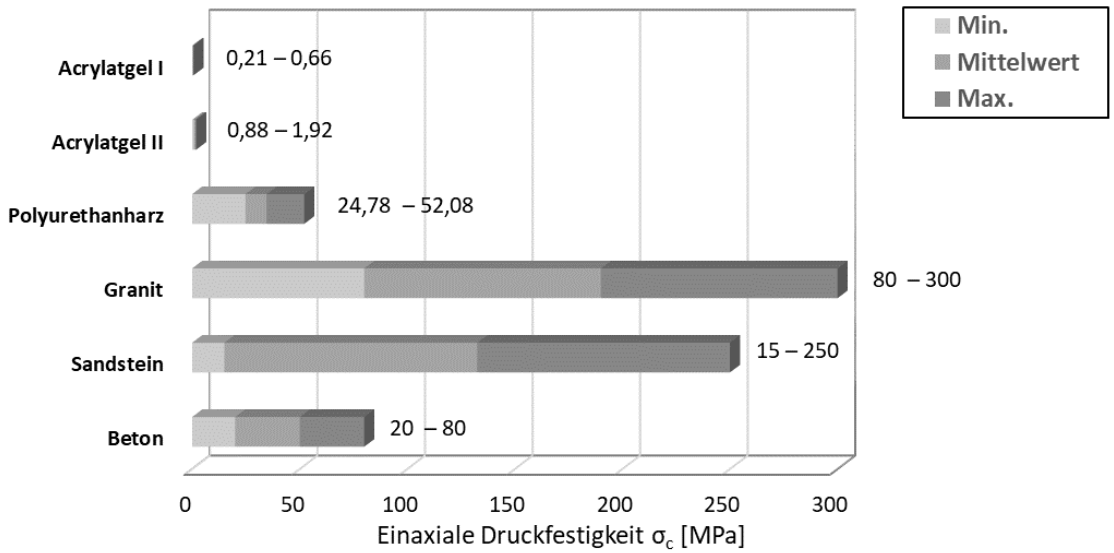


Abbildung 10-9: Einaxiale Druckfestigkeit der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien

Die Poissonzahl von Boden und Fels liegt typischerweise zwischen 0,1 und 0,4. Bei einer Poissonzahl von 0,5 bleibt das Volumen der Probe während des Versuches konstant. Ist die Poissonzahl kleiner als 0,5, nimmt das Probevolumen bei Erhöhung der Belastung ab. Bei Proben mit einer Poissonzahl größer als 0,5 ist dagegen eine Volumenerhöhung zu

erwarten. Die Poissonzahl in Proben, die mit Acrylatgelen hergestellt wurden, ist fast immer größer als 0,5 – d. h., dass eine Erhöhung des Probenvolumens durch Belastung festzustellen ist. Dies lässt sich durch das größtenteils plastische Materialverhalten von Acrylatgel erklären: Die Probe behält ihre Struktur trotz Rissbildung und Abstand zwischen den Körnern bei. Polyurethanharz ist deutlich steifer als Acrylatgele, daher wurden für die mit Polyurethanharz hergestellten Injektionskörper kleine Poissonzahlen und große einaxiale Druckmodule ermittelt.

10.3.3 Vergleich mit den Ergebnissen aus den Spaltzugversuchen

Ein Vergleich zwischen den Zug- und Druckfestigkeiten (Tabelle 10-3) zeigt, dass das Verhältnis der Zugfestigkeit zur einaxialen Druckfestigkeit für die untersuchten Injektionskörper zwischen 20 und 46 % liegt, während dieses Verhältnis bei Silikatgel ca. 15 % beträgt [99].

Tabelle 10-3: Verhältnis der Zugfestigkeit zur einaxialen Druckfestigkeit

		Acrylatgel I			Acrylatgel II			Polyurethanharz		
		Kies	Sand A	Sand B	Kies	Sand A	Sand B	Kies	Sand A	Sand B
Abgeminderte einaxiale Druckfestigkeit $\sigma_{u(2)}$	[MPa]	0,21	0,50	0,66	0,88	1,42	1,92	24,78	52,08	26,76
Mittlere Zugfestigkeit σ_t	[MPa]	0,04	0,19	0,20	0,41	0,57	0,67	8,76	10,42	10,08
Verhältnis der Zugfestigkeit zur Druckfestigkeit $\sigma_t/\sigma_{u(2)}$	[%]	21	38	31	46	40	35	35	20	38

10.4 Triaxialer Druckversuch

10.4.1 Versuchsbeschreibung

Triaxiale Druckversuche können für die Ermittlung der Scherparameter durchgeführt werden. Im ersten Versuchsschritt wird eine zylinderförmige Probe in die Druckzelle eingebaut. Durch den Zelldruck (horizontale Belastung) werden die seitlichen Verformungen der Probe behindert. Die Probe kann kraft- oder weggesteuert in vertikaler Richtung (axial) belastet werden. Der Versuch wird abgebrochen, falls die Hauptspannungsdifferenz (σ_1-σ_3) den maximalen Wert vertikalen Stauchung von 15 % erreicht. Ist die vertikale Stauchung größer als 15 % und wurde die maximale Druckfestigkeit noch nicht erreicht, wird die für die 15-%-Vertikaldehnung erforderliche Belastung als triaxiale Druckfestigkeit betrachtet. Der triaxiale Druckversuch von Bodenproben ist in DIN EN ISO 17892-8 und DIN EN ISO 17892-9 geregelt [53, 54]. Der

Triaxialversuch am Fels wird nach den Empfehlungen (Nr. 2 und 3) des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) durchgeführt [35, 36]. Injektionskörper sind in ihrem Aufbau weder mit Boden noch mit Fels vergleichbar – sie zerfallen nicht bei großen Dehnungen. Aus diesem Grund wurde die 20%ige vertikale Stauchung als Versuchsabbruchkriterium gewählt.

Je nach der Materialfestigkeit kann dieser Versuch mit einem boden- oder felsmechanischen Triaxialgerät durchgeführt werden. Beide Geräte-Varianten funktionieren prinzipiell gleich. Beim Triaxialgerät für Boden wird die Probe in der Druckzelle aus Plexiglas und beim Triaxialgerät für Fels in der Hoek-Zelle aus Stahl eingebaut. Die Zelle wird beim Triaxialgerät für Fels statt mit Wasser mit Öl gefühlt. Der Porenwasserdruck ist beim Triaxialgerät für Fels nicht einstellbar.

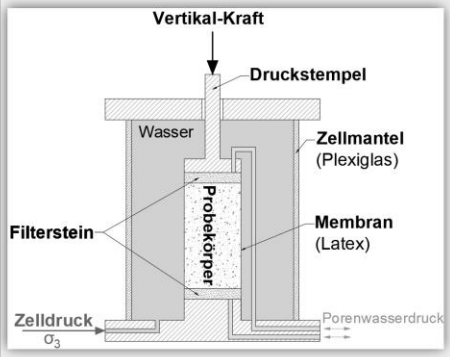
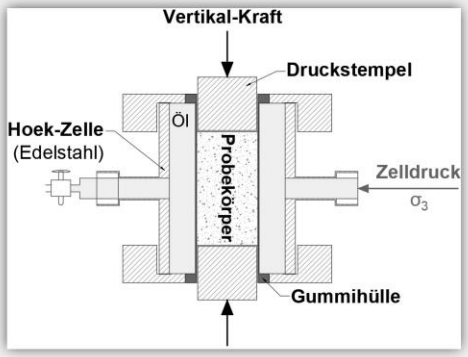
	Triaxialgerät für Boden	Triaxialgerät für Fels
		
Probendurchmesser [cm]	3,6 / 10	5,4
Max. Vertikalkraft [kN]	3 – 25	300 – 3000
Max. Zelldruck [kN/m²]	1E+03 – 2E+03	7E+04

Abbildung 10-10: Vergleich zwischen bodenmechanischen (links) und felsmechanischen (rechts) Triaxialgeräten

Die höchste messbare Vertikalkraft liegt beim Triaxialgerät für Boden bei 25 [kN], während sie beim Triaxialgerät für Fels bei 3 [MN] liegt. Da die mit dem Polyurethan hergestellte Probe eine große Tragfähigkeit aufweist, war eine Versuchsdurchführung mit dem Triaxialgerät für Boden nicht möglich. Um vergleichbare Werte erzeugen zu können, wurde das Triaxialgerät für Fels eingesetzt.

Der Steifemodul ist in der Bodenmechanik weit verbreitet, da eine direkte Ermittlung des E-Moduls für die nicht bindigen bzw. nur gering bindigen Böden sehr aufwendig bzw. unmöglich ist. Die Bestimmung des Steifemoduls für den Injektionskörper ist nicht nur mit höheren Messfehlern verbunden, sondern auch wesentlich komplexer als die Bestimmung des Elastizitätsmoduls. Der Elastizitätsmodul kann durch einen triaxialen Druckversuch ermittelt werden. Die Tangentenneigung der Hauptspannungsdifferenz-Dehnungskurve am

Anfang der Kurve wird Anfangs-Tangentenmodul (E_0) und das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung bei 50 % Festigkeit wird Sekantenmodul (E_{50}) genannt (siehe Abbildung 10-11). Der Elastizitätsmodul eines überkonsolidierten bindigen Bodens ist vergleichbar mit dem Anfangs-Tangentenmodul. Bei Sand bzw. normal konsolidiertem bindigem Boden ist der Sekantenmodul eine bessere Annäherung für den E-Modul. Daher sollte geklärt werden, ob der Anfangs-Tangentenmodul oder der Sekantenmodul eine bessere Annäherung für den E-Modul der Injektionskörper ist; diese Frage soll im Abschnitt 10.4.4 beantwortet werden. [19]

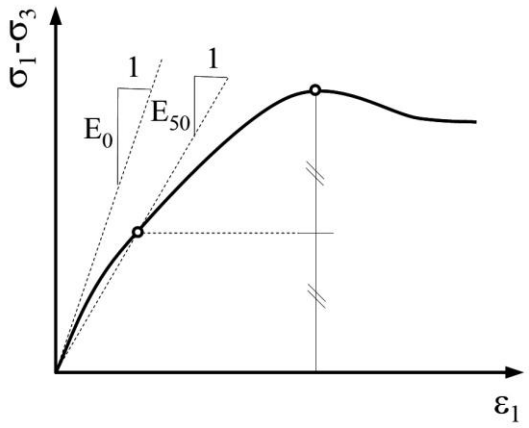


Abbildung 10-11: Hauptspannungsdifferenz-Dehnungskurve mit Anfangs-Tangentenmodul (E_0) und Sekantenmodul (E_{50}) – (Boley et al. 2019, S. 214)

10.4.2 Scherparameter nach dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium

Um die Bodentragfähigkeit vor und nach der Injektion vergleichen zu können, wurden die Scherparameter durch Rahmenscherversuche für die untersuchten Böden ermittelt (siehe Tabelle 10-4).

Tabelle 10-4: Scherparameter der Böden vor der Injektion

Kies		Sand A		Sand B		Schluff	
c´ [kN/m²]	φ´ [°]	c´ [kN/m²]	φ´ [°]	c´ [kN/m²]	φ´ [°]	c´ [kN/m²]	φ´ [°]
8,1	53,7	2,1	45,1	3,2	43,2	12,8	31,0

Die gemessenen triaxialen Festigkeiten sind in Tabelle 10-5 zusammengefasst. Ein Sprödbruch der Probe trat bei keinem der Versuche auf. Die maximale Tragfähigkeit ist bei den mit Acrylatgel I hergestellten Proben erst nach 17 % vertikaler Dehnung zu erreichen. Die vertikale Dehnung beim Bruch für die Injektionskörper aus Polyurethanharz ist kleiner als 2,5 %. Mit Polyurethanharz kann die beste Tragfähigkeit nach der Injektion im Boden erzielt werden. Die Injektionskörper, die mit Sand A hergestellt sind, erreichten zum

größten Teil die besten Tragfähigkeiten. Dies kann durch die hohe Festigkeit der Bodenkörner aus Quarz und durch eine gute Haftung zwischen dem Injektionsmaterial und den Bodenkörnern erklärt werden.

Tabelle 10-5: Ergebnisse der triaxialen Druckversuche und Auswertung nach dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium

Material	Bodenart	Zelldruck	Festigkeit	Bei Dehnung	Scherparameter			
					c'		φ'	
		σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	ε_l [%]	[kN/m²]	Vvl.	[°]	Vvl.
Acrylatgel I	Kies	0,8	3,05	19,4	**1100,0**	135-fach	**0,0**	-100%
		1,6	3,82	19,8				
		3,2	4,58	19,0				
	Sand A	0,8	4,30	16,9	**1156,7**	550-fach	**16,1**	-64%
		1,6	6,23	20,0				
		3,2	8,61	19,9				
	Sand B	0,8	4,09	17,7	**1259,3**	393-fach	**11,2**	-74%
		1,6	5,71	19,9				
		3,2	7,70	19,1				
Acrylatgel II	Kies	0,8	5,23	11,8	**840,9**	103-fach	**29,4**	-45%
		1,6	7,56	17,1				
		3,2	12,26	14,0				
	Sand A	0,8	6,59	11,0	**995,3**	473-fach	**34,2**	-24%
		1,6	9,51	12,9				
		3,2	15,17	13,6				
	Sand B	0,8	6,96	13,4	**1193,1**	372-fach	**33,3**	-23%
		1,6	10,26	13,3				
		3,2	15,28	16,6				
Polyurethanharz	Kies	0,8	25,70	2,3	**7145,9**	881-fach	**28,6**	-47%
		1,6	30,56	2,0				
		3,2	31,92	2,5				
	Sand A	0,8	50,89	1,8	**12074,8**	5749-fach	**37,1**	-18%
		1,6	57,56	1,6				
		3,2	59,72	1,7				
	Sand B	0,8	45,36	1,1	**6663,8**	2081-fach	**38,9**	-10%
		1,6	34,86	1,7				
		3,2	41,86	2,0				

Vvl.: Im Vergleich zu vor der Injektion

Die interpartikulären Wechselwirkungen in granularen Materialien wie Boden können mit vereinfachten Kontaktmodellen beschrieben werden und hängen vom Materialverhalten in Normal- und Tangentialrichtungen ab. Nach dem Soft-Sphere-Modell wird das Materialverhalten eines granularen Materials in Normalrichtung mit dem Kelvin-Voigt-Körper und in Tangentialrichtung durch eine Reihenanordnung des Kelvin-Voigt-Körpers mit dem St.-Venant-Element beschrieben [162]. Nach der Injektion waren Kohäsionserhöhungen und Reduzierungen des Reibungswinkels festzustellen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass alle Unebenheiten der Bodenkörner mit Injektionsmittelt gefüllt werden bzw. die Rauigkeit der Körper durch die Injektionsmaterialien verringert wird. Die

Bodenpartikel werden durch das Injektionsmaterial miteinander verbunden und in der Folge wird die Kohäsion erhöht (siehe Abbildung 10-12). Das Materialverhalten in den Normal- und Tangentialrichtungen nach der Injektion kann mit einem Schofield-Scott-Blair-Körper modelliert werden. Eine detaillierte Beschreibung der genannten Körper und Elemente findet sich in Abschnitt 9.1.

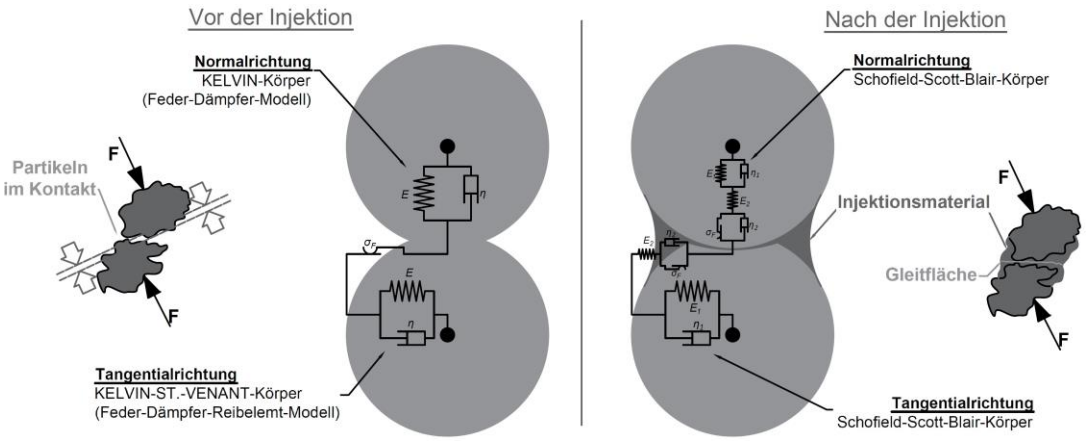


Abbildung 10-12: Schematische Darstellung der Normal- und Tangentialmaterialmodelle vor und nach dem Injektionsvorgang

10.4.3 Scherparameter nach dem Hoek-Brownschen Bruchkriterium

In Abschnitt 10.4.2 wurden die Scherparameter der Injektionskörper mittels der Mohrschen Spannungskreise unter einer linearen Bruchbedingung ermittelt. Um zu untersuchen, ob ein lineares Bruchkriterium für Injektionskörper eingesetzt werden kann, wurden die Scherparameter unter Verwendung bodenmechanischer Versuchstechnik mit kleinen Zelldrücken ermittelt (Tabelle 10-6).

Tabelle 10-6: Mit Hilfe des bodenmechanischen Triaxialgeräts festgestellte Scherparameter für den Injektionskörper aus Acrylatgel I und Sand A

Messdaten aus Triaxialversuchen mit der Versuchstechnik für Boden				
Zelldruck σ_3	[MPa]	0,09	0,39	0,80
Max. Vertikalspannung σ_1	[MPa]	1,10	1,89	2,73
Scherparameter nach dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium				
Reibungswinkel φ'	[°]	23,0		
Kohäsion c'	[kN/m²]	308,7		

Eine Gegenüberstellung der Scherparameter aus den bodenmechanischen und felsmechanischen Triaxialgeräten zeigt signifikante Reibungswinkel- und Kohäsionsunterschiede (Tabelle 10-7). Während mit der Versuchstechnik für Boden eine

49%ige Verringerung des Reibungswinkels nach der Injektion festzustellen ist, fällt der Reibungswinkel im felsmechanischen Versuch um 64 % ab. Die Kohäsion steigt im bodenmechanischen Versuch auf 308,7 [kN/m²] und im felsmechanischen Versuch auf 1156,7 [kN/m²] an.

Tabelle 10-7: Gegenüberstellung der mit boden- und felsmechanischen Triaxialgeräten ermittelten Scherparameter von Sand A und Injektionskörper (Sand A + Acrylatgel I) nach Mohr-Coulomb

		Sand A	Mohr-Coulomb_Boden	Mohr-Coulomb_Fels
Reibungswinkel φ'	[°]	45,1	23,0	16,1
im Vergleich zum Sand	[%]		-49 %	-64 %
Kohäsion c'	[kN/m²]	2,1	308,7	1156,7
im Vergleich zum Sand			146-fach	550-fach

Die Hauptspannungskreise sowie die zugehörigen Schergeraden als Ergebnis der Triaxialversuche mit der Versuchstechnik für Boden und Fels sind in Abbildung 10-13 dargestellt.

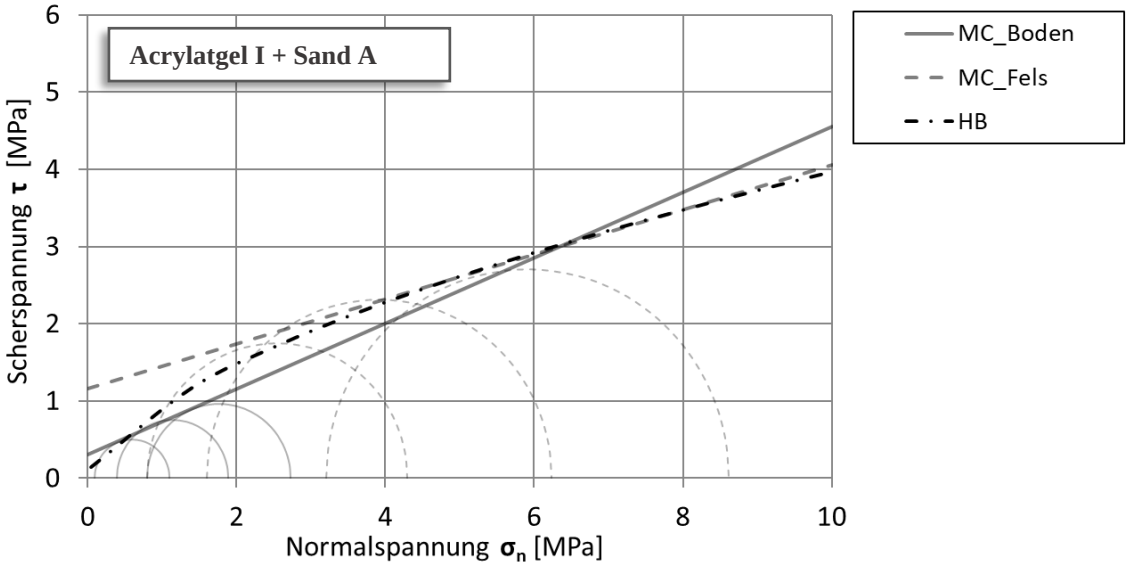


Abbildung 10-13: Hauptspannungskreise und zugehörige Schergeraden als Ergebnis der Triaxialversuche mit der Versuchstechnik für Boden (hellgraue Volllinien) und Fels (hellgraue Strichlinien) – Bruchumhüllende nach Hoek-Brown (schwarze Strich-Punkt-Linie)

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt ein Normalspannung-abhängiges Scherverhalten der Injektionskörper. Mit dem linearen Mohr-Coulombschen Bruchkriterium (MC) kann die Scherfestigkeit überschätzt werden. Daher muss das Scherverhalten der Injektionskörper mit einem nichtlinearen Bruchkriterium beschrieben werden. Das Hoek-Brownsche Versagenskriterium (HB) ist das am häufigsten eingesetzte nichtlineare Stoffgesetz und wird von mehreren kommerziellen numerischen Simulationsprogrammen

unterstützt. Aus den eben genannten Gründen wurde dieses Stoffgesetz (HB) zur Bestimmung der Scherparameter verwendet.

Der Durchmesser der Probekörper betrug 5,4 [cm] in felsmechanischen Versuchen und 3,6 [cm] in bodenmechanischen Versuchen. Die Injektionskörper wurden in Zylindern mit einem Innendurchmesser von 5,4 [cm] hergestellt. Daher wurden die in bodenmechanischen Versuchen verwendeten Prüfkörper mit einem Bohrer von den im Zylinder hergestellten Injektionskörpern entnommen. Die unterschiedlichen Probenentnahmeverfahren sowie die Konstruktionsunterschiede der Triaxialgeräte führten zu den unterschiedlichen Messwerten zwischen den boden- und felsmechanischen Triaxialversuchen (siehe Abbildung 10-14). Um die genannten Messfehler auszuschließen, wurden alle Versuche mit der Versuchstechnik für Fels und mit sechs Zelldrücken durchgeführt.

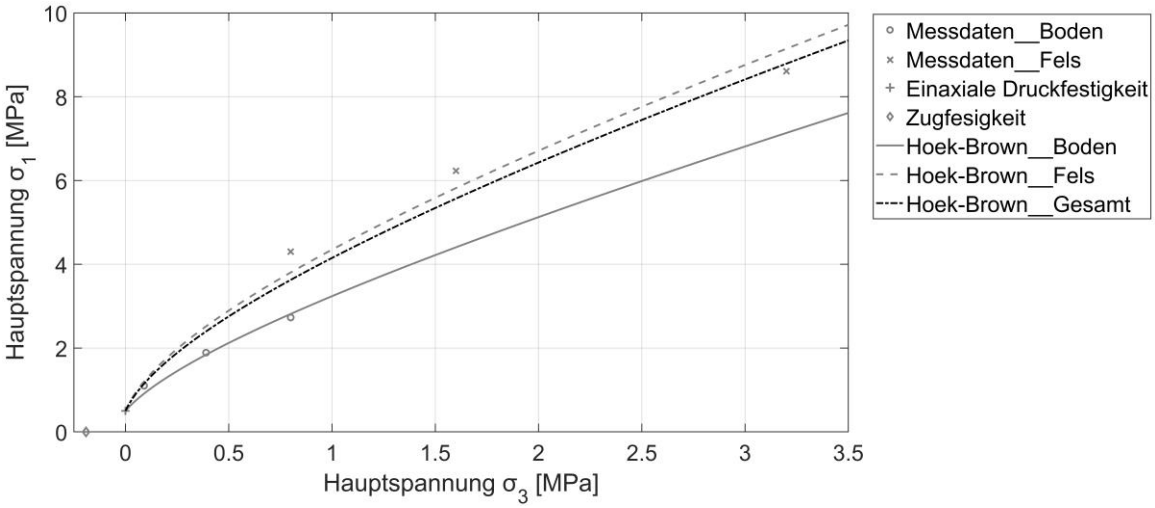


Abbildung 10-14: Ergebnis der Triaxialversuche mit der Versuchstechnik für Boden und Fels sowie der einaxialen Druck- und Zugversuche – Bruchumhüllenden nach Hoek-Brown

Die Hoek-Brown-Konstante m_b lässt sich für jede Material-Kombination unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten Zugfestigkeit, der einaxialen Druckfestigkeit und der triaxialen Hauptspannungen ermitteln. Die unbekannte Konstante m_b wird hierbei mittels Kurvenanpassung in MATLAB bestimmt. In Abbildung 10-15 sind die ermittelten HB-Konstanten (m_b) für die eingesetzten Bodenarten und Injektionsmaterialien in einem Balkendiagramm zusammengefasst. Diese Abbildung zeigt, dass die Konstante m_b bei den mit Acrylatgelen hergestellten Injektionskörpern größer ist als bei den Injektionskörpern aus Polyurethanharz. Dies bedeutet, dass die Einwirkung der Normalspannung auf die Schertragfähigkeit bei der Probe aus Acrylatgelen stärker ausgeprägt ist als bei der Probe aus Polyurethanharz. Diese Einwirkung ist bei den mit Acrylatgel II hergestellten Injektionskörpern am stärksten.

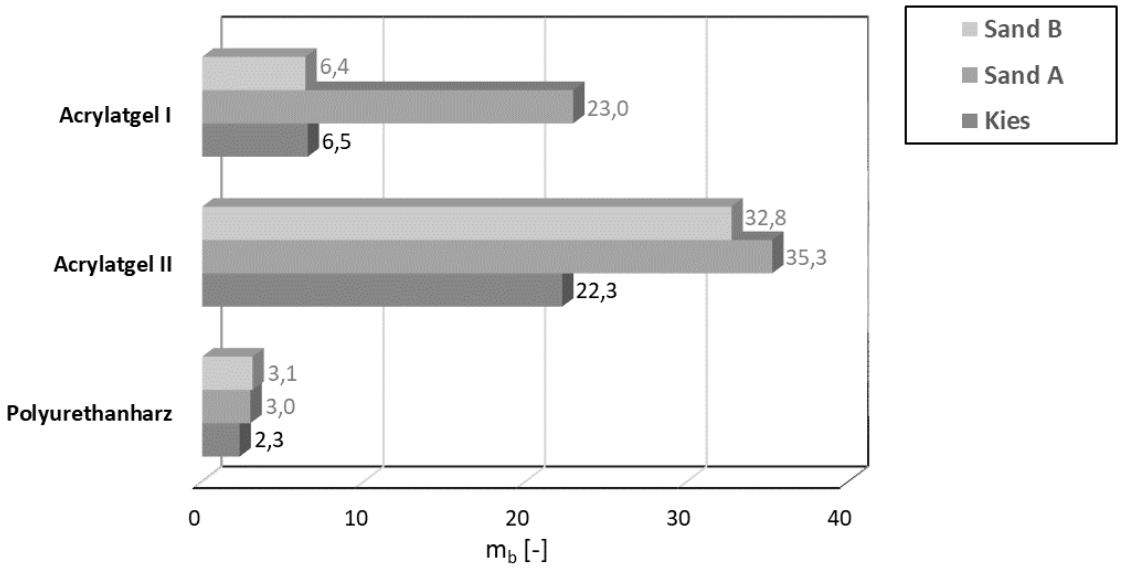


Abbildung 10-15: Hoek-Brown-Konstante (m_b) in Abhängigkeit von Bodenart

Zur Einordnung der ermittelten HB-Konstanten werden diese mit HB-Konstanten anderer Materialien verglichen (Abbildung 10-16). Je tragfähiger ein Gestein ist, desto größer ist normalerweise die m_b-Konstante. Diese Aussage lässt sich für die Injektionskörper jedoch nicht bestätigen. Obwohl die Tragfähigkeit der Injektionskörper aus Acrylatgelen sehr gering ist, ist die m_b-Konstante dieser Körper mit Granit und Sandstein vergleichbar, während dieser Wert für die mit Polyurethanharz hergestellten Proben sehr gering ist. Dabei zeigt diese Abbildung, dass mit Polyurethanharz eine mit Tonstein vergleichbare Tragfähigkeit erreicht werden kann.

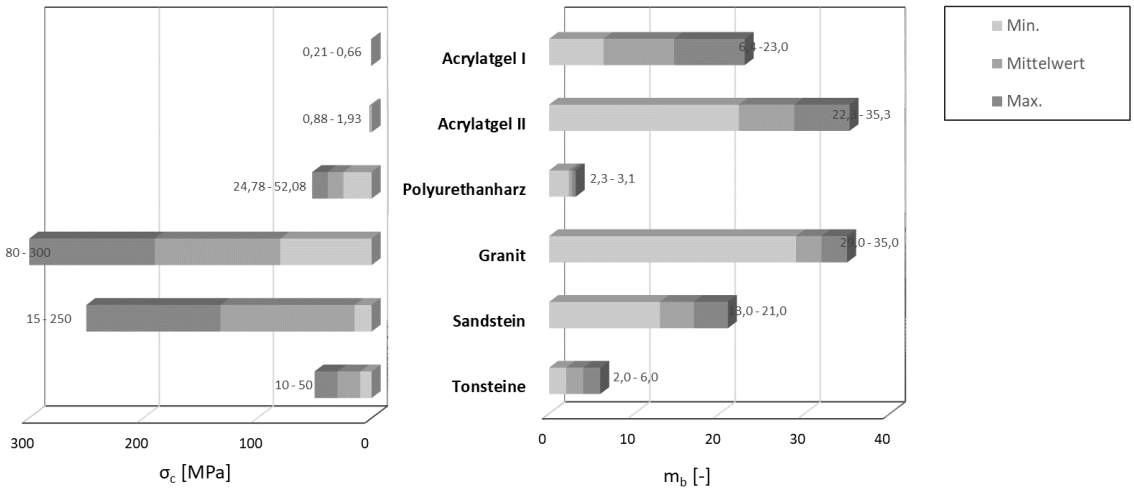


Abbildung 10-16: Scherparameter der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien

Die Scherfestigkeit von Injektionskörpern lässt sich mit dem nichtlinearen Bruchkriterium nach Hoek-Brown mit einer guten Annäherung beschreiben. Es gibt keine erzwungene Verbesserung der Bodeneigenschaften durch die Injektion. Die Bodeninjektion führt sogar

bei großen Normalspannungen zur Reduzierung der Scherfestigkeiten. Anhand dieser Aussage kann der Begriff ‚Kritische Normalspannung ($\sigma_{n,krit.}$)' definiert werden. Sollte die Bodeninjektion als Abdichtungsmaßnahme eingesetzt werden und sollten die Normalspannungen, die im Einsatzbereich herrschen, größer als die Kritische Normalspannungen sein, muss die Tragfähigkeit des Baugrunds mit Bodeneigenschaften nach der Injektion nachgewiesen werden. Die Kritische Normalspannung lässt sich ermitteln, indem die Scherfestigkeiten des Bodens und des Injektionskörpers gleichgesetzt werden.

$$\tau'_{MC-Boden} = \tau'_{HB-Injektionskörper} \tag{10-6}$$

In Abbildung 10-17 sind die Mohr-Coulombsche Bruchbedingung für Sand A und die Hoek-Brownsche Bruchumhüllende für die aus Sand A und Acrylatgel I erzeugten Injektionskörper gegenübergestellt. Die Normalspannung im Schnittpunkt ist die Kritische Normalspannung ($\sigma_{n,krit.}$). In Abbildung 10-17 ist die Kritische Normalspannung hellgrau markiert.

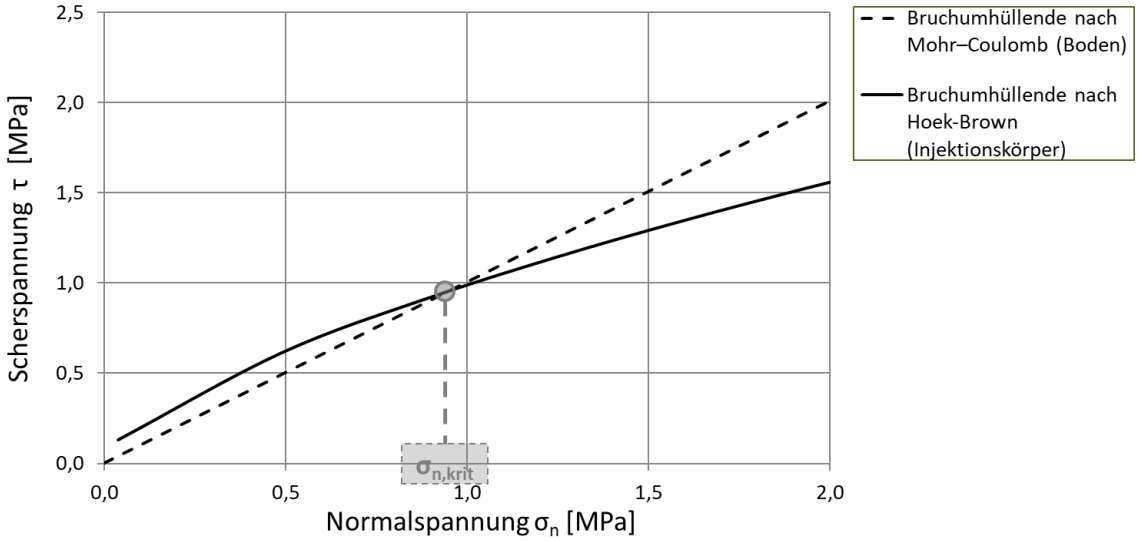


Abbildung 10-17: Kritische Normalspannung – Schnittpunkt zwischen den Bruchumhüllenden nach Mohr-Coulomb für Boden und nach Hoek-Brown für Injektionskörper (Acrylatgel I + Sand A)

Der primäre Spannungszustand ist die ursprüngliche Spannungsverteilung im Boden vor Beginn einer Baumaßnahme. Die vertikalen und horizontalen Spannungen können beim primären Spannungszustand mit folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$\sigma'_V = \sigma'_1 = H \cdot \gamma^{(\prime)} \tag{10-7}$$

$$\sigma'_H = \sigma'_{2,3} = K \cdot \sigma'_V \tag{10-8}$$

Der Seitendruckbeiwert (K) ist von der Poissonzahl (ν) abhängig und lässt sich mit Gleichung (10-9) ermitteln:

$$K = \frac{\nu}{1-\nu} \xrightarrow{\nu=0{,}25} K = \frac{1}{3} \tag{10-9}$$

Durch die Zusammenführung der Gleichung (9-13) mit der Gleichung (9-15) und unter Berücksichtigung der Gleichungen (10-7) und (10-9) wird die folgende Gleichung erhalten:

$$\sigma'_n = \frac{1+K}{2} \cdot H \cdot \gamma^{(\prime)} + \frac{K-1}{2} \cdot H \cdot \gamma^{(\prime)} \cdot \frac{tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right) - 1}{tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right) + 1} \tag{10-10}$$

Die kritische Einsatztiefe bestimmt die Tiefe, ab der durch die Injektion die Scherfestigkeit reduziert wird. Beim primären Spannungszustand lässt sich die kritische Einsatztiefe ($H_{krit.}$) durch Umformung der Gleichung (10-10) ermitteln:

$$H_{krit.} = \frac{\sigma'_{n,krit.} \cdot \left(1 + tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right)\right)}{\gamma^{(\prime)} \cdot \left(1 + K \cdot tan^2\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right)\right)} \tag{10-11}$$

Die Scherparameter der untersuchten Böden vor und nach der Injektion sowie die kritischen Einsatztiefen und Normalspannungen sind in Tabelle 10-8 zusammengefasst. Die ermittelten kritischen Einsatztiefen sind nur bei dem primären Spannungszustand einsetzbar. Sollte die Spannung wegen der Baumaßnahme oder des Injektionsvorgangs geändert werden (sekundärer Spannungszustand in Abbildung 10-18), ist die Gleichung (10-11) nicht weiter gültig.

Die kritische Normalspannung ist im Gegensatz zu der kritischen Einsatztiefe vom Spannungszustand unabhängig. Daher ist die kritische Normalspannung ein besseres Kriterium für die Definition der Anwendungsgrenze von Injektionsmaterialien. Die sekundären Spannungen lassen sich durch die Belastungsänderungen und durch die Steifigkeit der Umgebungsmaterialien, beispielsweise Boden und Injektionskörper, beeinflussen. Eine numerische Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) bietet die Möglichkeit, die Umformprozesse zu simulieren und die neuen Spannungen zu ermitteln.

Tabelle 10-8: Ermittelte kritische Normalspannungen sowie Einsatztiefen für die untersuchten Injektionskörper

Material	Parameter		Kies	Sand A	Sand B
Acrylatgel I	σ_c	[MPa]	0,21	0,50	0,66
	m_b	[-]	6,5	23,0	6,4
	$\boldsymbol{\sigma_{n,krit.}}$	[MPa]	**0,07**	**0,95**	**0,57**
	$\mathbf{H_{krit.}}$	[m]	**18**	**222**	**138**
Acrylatgel II	σ_c	[MPa]	0,88	1,42	1,93
	m_b	[-]	22,3	35,3	32,8
	$\boldsymbol{\sigma_{n,krit.}}$	[MPa]	**0,65**	**4,07**	**6,30**
	$\mathbf{H_{krit.}}$	[m]	**161**	**948**	**1533**
PU-Harz	σ_c	[MPa]	24,78	52,08	26,76
	m_b	[-]	2,3	3,0	3,1
	$\boldsymbol{\sigma_{n,krit.}}$	[MPa]	**8,71**	**30,04**	**17,42**
	$\mathbf{H_{krit.}}$	[m]	**2177**	**5262**	**4240**

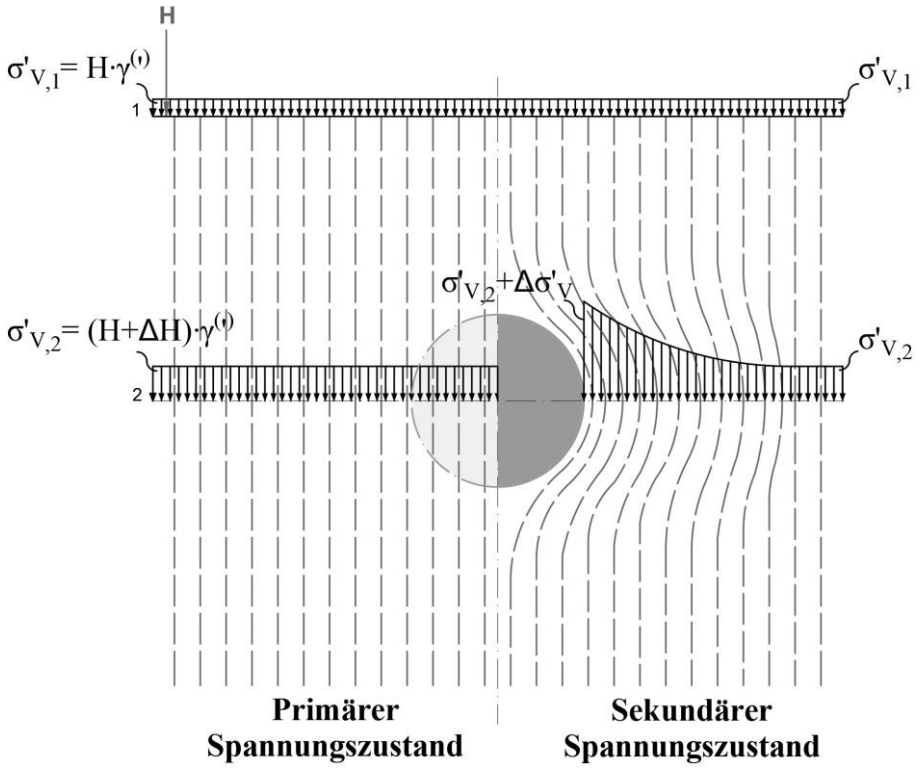


Abbildung 10-18: Primärer und sekundärer Spannungszustand (Eigene Darstellung nach Széchy 1969, S. 117)

Die mit Acrylatgel hergestellten Injektionskörper haben eine relativ geringe kritische Normalspannung. Es wird daher – unabhängig vom Injektionsziel – dringend empfohlen,

die Tragfähigkeit des Baugrundes nach dem Injektionsvorgang mit Acrylatgelen zu untersuchen.

10.4.4 Steifigkeit der Injektionskörper

Die ermittelten Sekanten- und Anfangs-Tangentenmodule sind in Tabelle 10-9 zusammengefasst. Die Injektionskörper aus Polyurethanharz sind deutlich steifer als die mit Acrylatgel hergestellten Injektionskörper. Bei allen untersuchten Injektionsmaterialien war der beste E-Modul im Sand A zu erzielen.

Tabelle 10-9: Mit triaxialen Druckversuchen ermittelte Sekanten- und Anfangs-Tangentenmodule

Material	Boden-art	Zelldruck σ_3 [MPa]	Anfangs-Tangentenmodul E_0 [kPa]			Sekantenmodul E_{50} [kPa]		
Acrylatgel I	Kies	0,8	5,40E+04	1,72E+05	2,63E+05	2,45E+04	2,58E+04	4,71E+04
		1,6	5,59E+04			2,75E+04		
		3,2	4,07E+05			2,55E+04		
	Sand A	0,8	9,11E+04	2,19E+05		6,27E+04	6,20E+04	
		1,6	1,72E+05			6,26E+04		
		3,2	3,95E+05			6,06E+04		
	Sand B	0,8	2,58E+05	3,98E+05		4,83E+04	5,36E+04	
		1,6	4,56E+05			5,58E+04		
		3,2	4,80E+05			5,67E+04		
Acrylatgel II	Kies	0,8	1,56E+05	6,91E+05	4,78E+05	8,51E+04	1,09E+05	1,45E+05
		1,6	1,27E+06			9,28E+04		
		3,2	6,44E+05			1,49E+05		
	Sand A	0,8	2,21E+05	4,06E+05		1,10E+05	1,73E+05	
		1,6	4,34E+05			1,68E+05		
		3,2	5,63E+05			2,42E+05		
	Sand B	0,8	1,36E+05	3,38E+05		1,29E+05	1,53E+05	
		1,6	4,21E+05			1,59E+05		
		3,2	4,57E+05			1,70E+05		
Polyurethanharz	Kies	0,8	4,09E+05	1,02E+06	2,96E+06	2,19E+06	2,62E+06	4,20E+06
		1,6	1,00E+06			2,82E+06		
		3,2	1,64E+06			2,86E+06		
	Sand A	0,8	3,09E+06	4,67E+06		4,40E+06	5,16E+06	
		1,6	4,06E+06			5,11E+06		
		3,2	6,85E+06			5,96E+06		
	Sand B	0,8	2,50E+06	3,18E+06		5,11E+06	4,83E+06	
		1,6	3,05E+06			4,36E+06		
		3,2	3,99E+06			5,01E+06		

Bei den Injektionskörpern aus Polyurethanharz sind Wendepunkte in den Hauptspannungsdifferenz-Dehnungskurven festzustellen (siehe Abbildung 10-19). Aus diesem Grund ist der Sekantenmodul bei den mit Polyurethanharz hergestellten Proben größer als der Anfangs-Tangentenmodul. In Tabelle 10-10 sind die mit ein- und triaxialen Druckversuchen ermittelten Elastizitätsmodule einander gegenübergestellt.

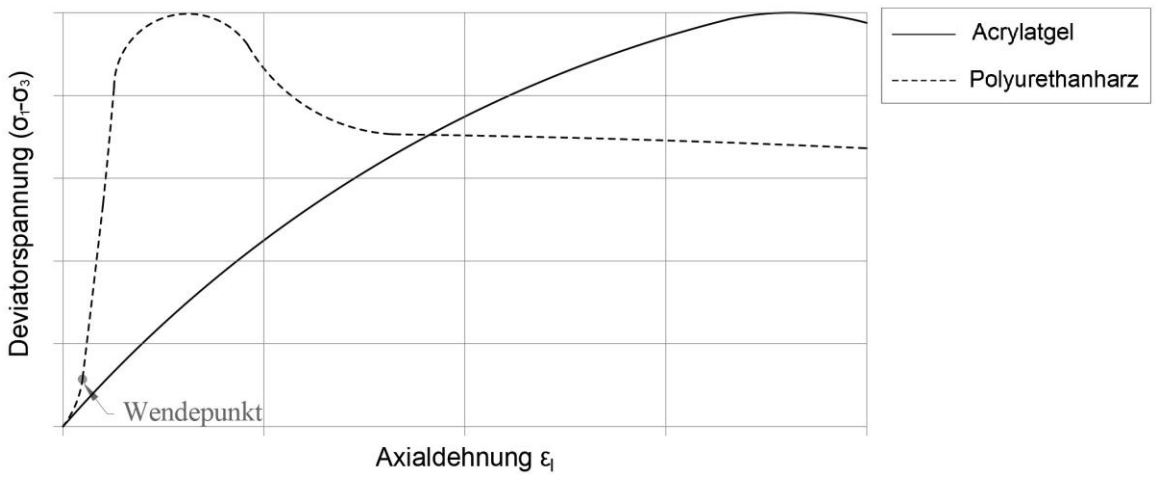


Abbildung 10-19: Typischer Verlauf der Deviatorspannung-Dehnungskurve für den mit Acylatgel bzw. Polyurethanharz erzeugten Injektionskörper

Tabelle 10-10: Gegenüberstellung der mit ein- und triaxialen Druckversuchen ermittelten Elastizitätsmodule

Material	Boden-art	Einaxialer Druckversuch	Triaxialer Druckversuch			
		Einaxialer Druckmodul **Eu** [MN/m²]	Anfangs-Tangentenmodul E_0 [MN/m²]	Anfangs-Tangentenmodul im Vergleich zum Einaxialen Druckmodul [-]	Sekantenmodul E_{50} [MN/m²]	Sekantenmodul im Vergleich zum Einaxialen Druckmodul [-]
Acrylatgel I	**Kies**	1,27E+01	1,72E+02	13,6-fach	2,58E+01	2,0-fach
	Sand A	1,81E+01	2,19E+02	12,1-fach	6,20E+01	3,4-fach
	Sand B	1,68E+01	3,98E+02	23,7-fach	5,36E+01	3,2-fach
Acrylatgel II	**Kies**	5,00E+01	6,91E+02	13,8-fach	1,09E+02	2,2-fach
	Sand A	7,05E+01	4,06E+02	5,8-fach	1,73E+02	2,5-fach
	Sand B	1,01E+02	3,38E+02	3,3-fach	1,53E+02	1,5-fach
Polyurethanharz	**Kies**	2,70E+03	1,02E+03	0,4-fach	2,62E+03	1,0-fach
	Sand A	7,27E+03	4,67E+03	0,6-fach	5,16E+03	0,7-fach
	Sand B	3,61E+03	3,18E+03	0,9-fach	4,83E+03	1,3-fach

Ein Vergleich zwischen den einaxialen Druckmodulen und den mit Triaxialversuchen ermittelten Modulen zeigt, dass der Sekantenmodul (E_{50}) eine bessere Annäherung an den E-Modul bei den untersuchten Injektionskörpern ist. Allerdings sind die Abweichungen

zwischen den Sekanten- und E-Modulen relativ groß. Je steifer die Probe wäre, desto kleiner wäre die Abweichung.

Um die Setzungen mit einem FEM-Programm oder mit analytischen Methoden berechnen zu können, muss der Elastizitätsmodul der Materialien bekannt sein. Sollte der Sekantenmodul anstelle des Elastizitätsmoduls vorhanden sein, muss dieser Wert für die auf der sicheren Seite liegenden Berechnungen abgemindert werden. Der Abminderungsfaktor (F_c) lässt sich für die untersuchten Injektionskörper mit einer der in Abbildung 10-20 dargestellten Gleichungen ermitteln (E_{50} in [MPa]).

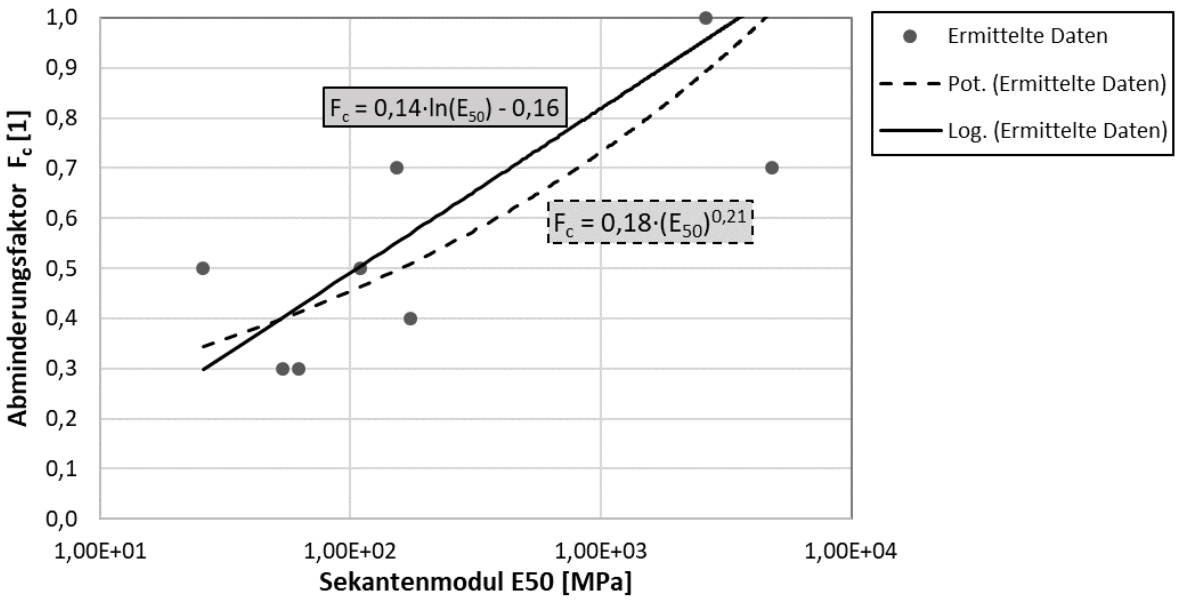


Abbildung 10-20: Abminderungsfaktor des Sekantenmoduls

Zur Einordnung der ermittelten Elastizitätsmodule werden diese mit den Elastizitätsmodulen anderer Materialien verglichen (Abbildung 10-21). Für die Ermittlung der Elastizitätsmodule der Injektionskörper wurden die Sekantenmodule (E_{50}) durch die in Abbildung 10-20 dargestellten Potenzgleichungen abgemindert. Dabei zeigt sich, dass der Elastizitätsmodul sich nach der Injektion mit Acrylatgelen nicht wesentlich ändert. Die Injektionskörper aus Polyurethanharz haben zwar ein besseres E-Modul als reiner Boden, sind jedoch weicher als Beton und Gestein.

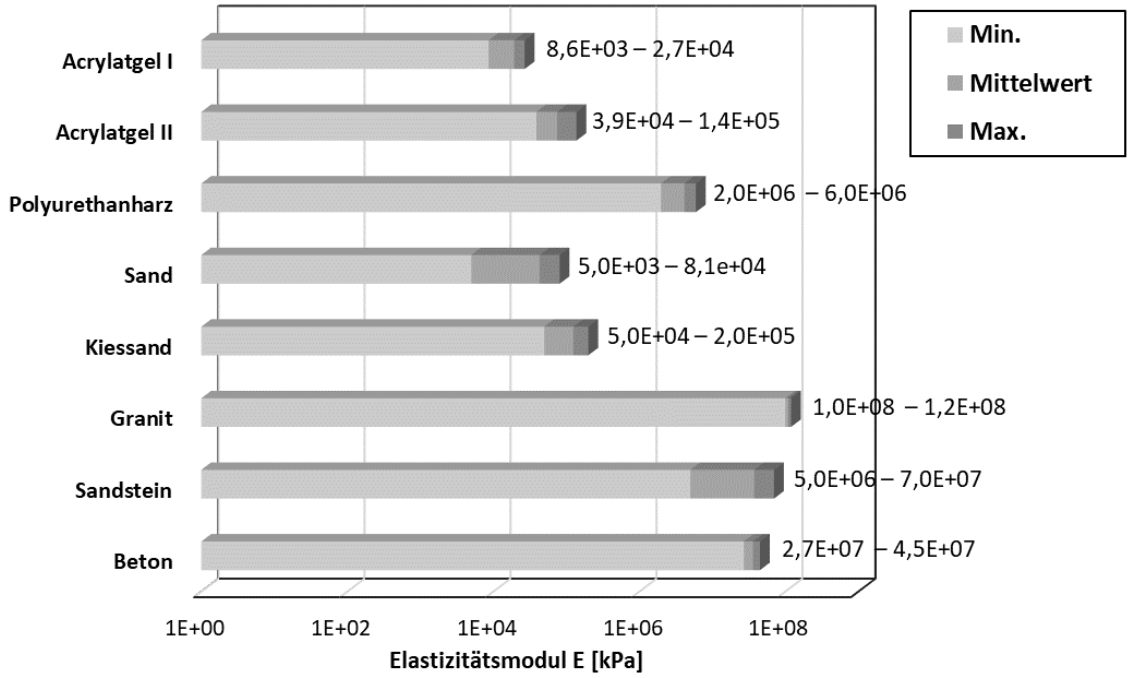


Abbildung 10-21: Elastizitätsmodul der Injektionskörper im Vergleich mit anderen Materialien

11 Gekoppelte THM-Simulationsmethode

11.1 Allgemeine Betrachtung

In Kapitel 8 wurde die Frage aufgeworfen, wie sich die Injektionsmaterialien verbreiten, falls sich der Injektionspunkt innerhalb eines bereits hergestellten und ausreagierten Injektionskörpers befindet. Das Materialverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften der Injektionskörper, die die Voraussetzung für die Beantwortung dieser Frage bilden, wurden im vorangehenden Kapitel experimentell untersucht. Nun soll die erwähnte Frage numerisch mit einem gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanischen mehrphasigen Strömungssimulationsverfahren (CFD-THM) beantwortet werden.

11.2 Einphasige thermo-hydro-mechanische Simulation

FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) wurde für boden- und felsmechanische Simulationen entwickelt und ist in der Lage, gekoppelte thermomechanische und hydromechanische Prozesse für einphasige Strömungen zu simulieren. FISH ist eine in FLAC3D integrierte Programmiersprache, mit der Benutzer das Programm erweitern können [91]. Diese Programmiersprache wurde verwendet, um den Rissbildungsprozess im ausreagierten Injektionskörper zu modellieren. Das verwendete Programmablaufdiagramm ist in Abbildung 11-1 dargestellt.

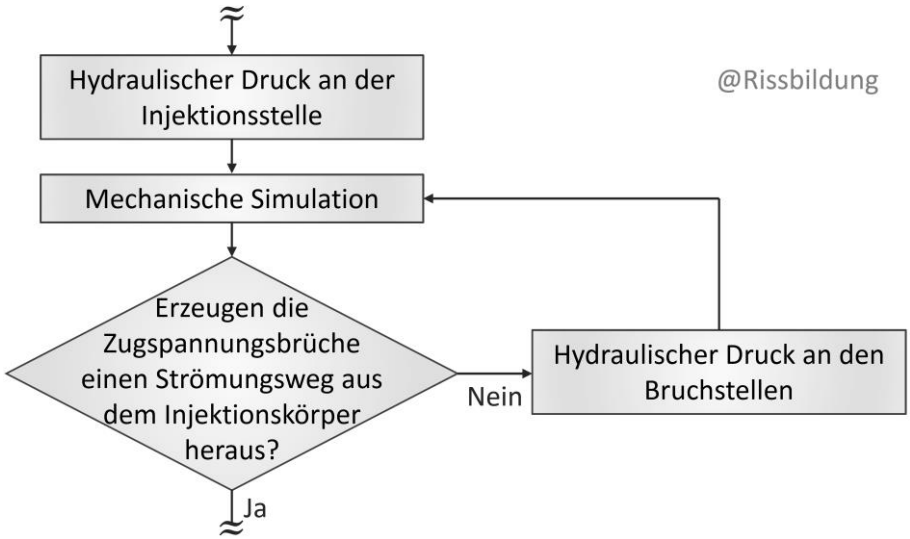


Abbildung 11-1: Programmablaufdiagramm zur Simulation des Rissbildungsprozesses

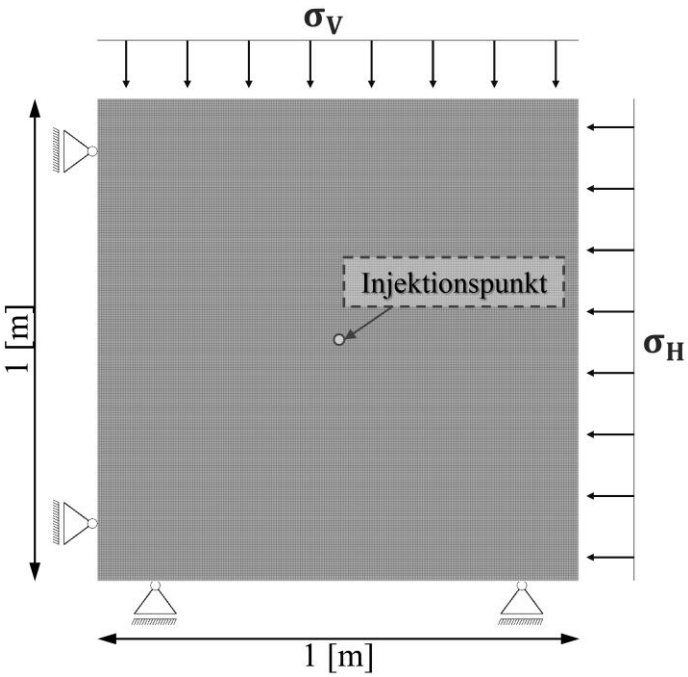
Ein hydraulischer Druck wird zuerst an der Injektionsstelle erzeugt und dann wird eine mechanische Simulation mit FLAC3D durchgeführt. Der hydraulische Druck verursacht Zugspannungsbrüche in einem Teil des Simulationsnetzes. Das Injektionsmaterial dringt in die Frakturen ein und erzeugt dort die neuen hydraulischen Drücke. Der Abstand von

der Injektionsstelle sowie die Fließgeschwindigkeit bestimmen den hydraulischen Druck an den Bruchstellen. Die hydraulischen Drücke bei den Simulationen werden vereinfacht mit folgender Gleichung ermittelt:

$$u_{f,i} = u_{f,max} \cdot (1 - \sqrt{r_i / r_{max}}) \tag{11-1}$$

Die mechanische Simulationsschleife wird wiederholt, bis die Zugspannungsbrüche einen Strömungsweg aus dem Injektionskörper heraus erzeugen.

Der Spannungszustand sowie die Fördermenge der Pumpe können den Rissbildungsprozess beeinflussen. Die Auswirkung der genannten Parameter auf die Richtung der erzeugten Risse und deren Breite wird anhand eines Beispiels erläutert. Dabei wurde angenommen, dass sich der Injektionspunkt in der Mitte eines Injektionskörpers mit einer Abmessung von 1 [m] x 0,01 [m] x 1 [m] (B x H x T) befindet. Die Spannungen sowie die mechanischen Eigenschaften, die für die Simulation verwendet wurden, sind auf der rechten Seite der Abbildung 11-2 zusammengefasst.



	σ_V [N/m²]	σ_H [N/m²]
Simulation I ($\sigma_V > \sigma_H$)	2E+4	1E+4
Simulation II ($\sigma_V = \sigma_H$)	1E+4	1E+4
Simulation III ($\sigma_V < \sigma_H$)	1E+4	2E+4

Mechanische Eigenschaften des Injektionskörpers (Sand A + Acrylatgel I)

E-Modul **E**	[MPa]	1,81E+01
Poissonzahl **ν´**	[-]	0,35
Hoek-Brown-Parameter (σ_{ci}/m_b)	[MPa]/[-]	(0,50/23,0)

Abbildung 11-2: Untersuchung des hydraulischen Rissbildungsprozesses (Simulationsnetz und -parameter)

Es wurde angenommen, dass der Injektionsdruck am Injektionsbeginn 5 [Bar] beträgt. Aufgrund der begrenzten Fördermenge der Pumpe fällt der Injektionsdruck bei Auftritt der ersten Risse auf 0,5 [Bar] und der Injektionsdruck steigt langsam hoch (Variante 1 in Abbildung 11-4).

Die durch Injektion in Abhängigkeit vom Spannungszustand erzeugten Zugspannungsbrüche sind in Abbildung 11-3 dargestellt. Sind die vertikalen Spannungen großer als die horizontalen, bilden sich die Risse in Vertikalrichtung. Wenn die horizontalen Spannungen größer sind, treten die Risse ebenfalls in dieser Richtung auf. Sollten die Spannungen in beiden Richtungen gleich groß sein, sind die sich bildenden Risse kreuzförmig.

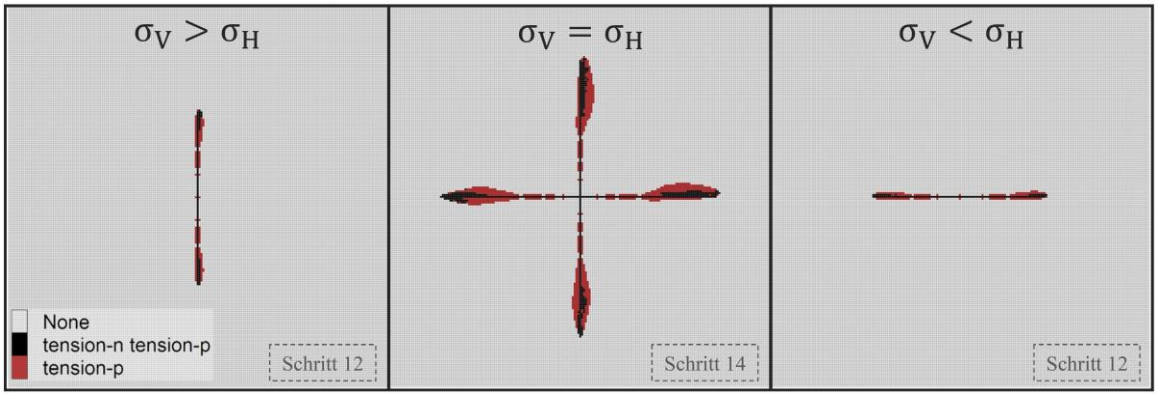


Abbildung 11-3: Zugspannungsbrüche in Abhängigkeit vom Spannungszustand einen Schritt vor dem Zusammensturz des Simulationssystems | n: Jetzt (now), p: Vergangenheit (past)

Wie bereits erwähnt wurde, bestimmt die Fördermenge der Pumpe, wie hoch der Druckabfall ist und wie schnell der Injektionsdruck ansteigt. Drei Varianten für die Druckerhöhung wurden hierzu untersucht (Abbildung 11-4). Dabei wurde angenommen, dass die vertikalen und horizontalen Spannungen gleich groß sind (isotroper Spannungszustand).

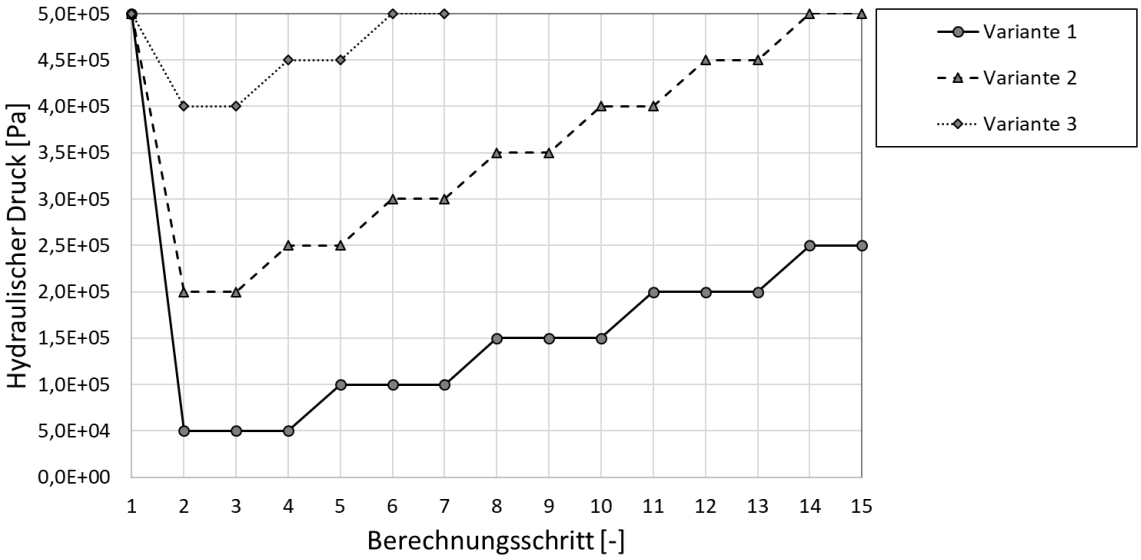


Abbildung 11-4: Varianten für die Druckerhöhung (Hyd. Druck-Berechnungsschritt-Kurven)

In Abbildung 11-5 sind die erzeugten Zugspannungsbrüche durch Injektionsprozess bei den unterschiedlichen Varianten für die Druckerhöhung einen Schritt vor dem Zusammensturz des Simulationssystems zu sehen. Wie zuvor erwartet, sind die Risse bei allen drei Varianten kreuzförmig. Je höher die Fördermenge der Pumpe ist, desto schneller treten Risse auf und desto größer ist der Störungsgrad.

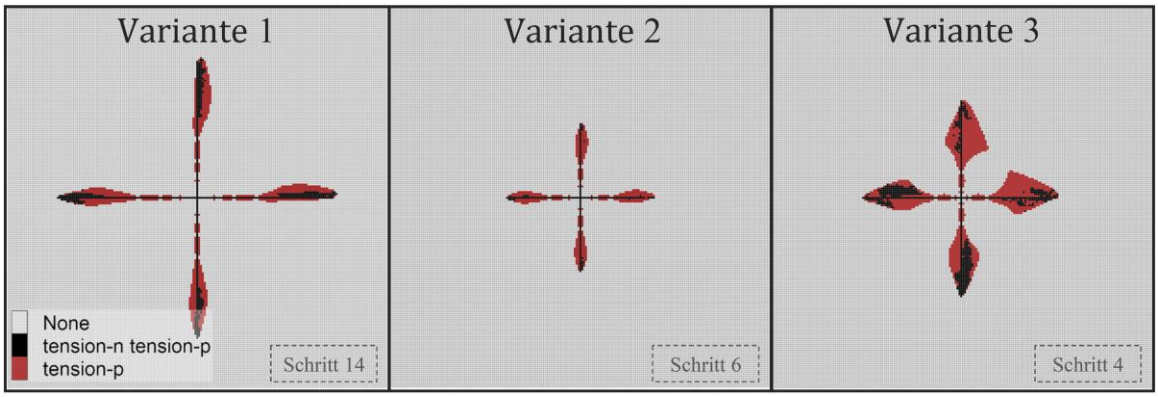


Abbildung 11-5: Zugspannungsbrüche bei den unterschiedlichen Varianten für die Druckerhöhung einen Schritt vor dem Zusammensturz des Simulationssystems | n: Jetzt (now), p: Vergangenheit (past)

Das vorgestellte Verfahren kann für die Simulation von Soilfracturing (hydraulische Rissbildung) und Hebungsinjektionen verwendet werden. Um realistische Ergebnisse zu erzielen, muss diese Methode jedoch zunächst mit Daten aus experimentellen Untersuchungen kalibriert werden.

11.3 Mehrphasige thermo-hydro-mechanische Simulation

Eine Vielzahl an Injektionsmaterialien reagiert exotherm, wodurch Energie freigesetzt wird. In der Folge werden thermische Spannungen in der Injektionsumgebung erzeugt. Darüber hinaus erhöhen sich durch den Injektionsvorgang die Porendrücke. Dies führt zur Änderung der mechanischen Eigenschaften des Bodens. Je höher die Viskosität der Flüssigkeit und die Fließrate sind, desto größer sind die mechanischen Auswirkungen. Aus den dargelegten Gründen kann der Schluss gezogen werden, dass der Injektionsvorgang im Boden ein thermo-hydro-mechanischer Prozess (THM) ist.

„iTough2“ ermöglicht eine hydrothermische Simulation unter Berücksichtigung des Gelierungsprozesses und des Verdünnungseffektes. Es ist jedoch nicht möglich, die mechanischen Einwirkungen abzubilden. Daher wurde das Programm mit FLAC3D gekoppelt. Die Simulationen in FLAC3D werden standardmäßig ohne Berücksichtigung des Gelierungsprozesses und für einphasige Strömungen durchgeführt. Eine Injektion in die voll- bzw. teilgesättigten Böden ist jedoch ein mehrphasiger Strömungsprozess. Dies

ist der Hauptgrund dafür, dass die zwei Programme iTough2 und FLAC3D verknüpft werden müssen. An dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) wurden diese zwei Programme zum ersten Mal miteinander gekoppelt, um die Injektion- und Speicherungsprozesse von Kohlendioxid (CO2) im Untergrund und die Lagerung von Nuklearabfällen zu simulieren [143]. Basierend auf diesen Forschungsarbeiten wurde ein gekoppeltes Berechnungsverfahren zur Simulation der Injektionsprozesse im Boden und Fels entwickelt. Die Datenkopplung bei diesem Verfahren erfolgte extern (External Coupling) durch ein im Rahmen dieser Arbeit geschriebenes Python-Programm. FLAC3D bietet vielseitige und flexible Netzgenerierungsfunktionen, deshalb wurde das Simulationsnetz mit FLAC3D generiert. Das Lösungsgebiet wurde mit quadratischen oder rechteckigen Elementen diskretisiert. Mit dem entwickelten Verfahren können 2D- und 2,5D- sowie 3D-Simulationen durchgeführt werden.

Vor der eigentlichen Simulation wurden die hydrothermischen und mechanischen Parameter initialisiert. Falls die Zugfestigkeit des Injektionskörpers überschritten wurde, bildeten sich neue Risse. Die Simulation wurde in kleine Zeitschritte (Δt) unterteilt. Je kleiner Δt in den Berechnungen ausgewählt worden war, desto genauer waren die Simulationsergebnisse.

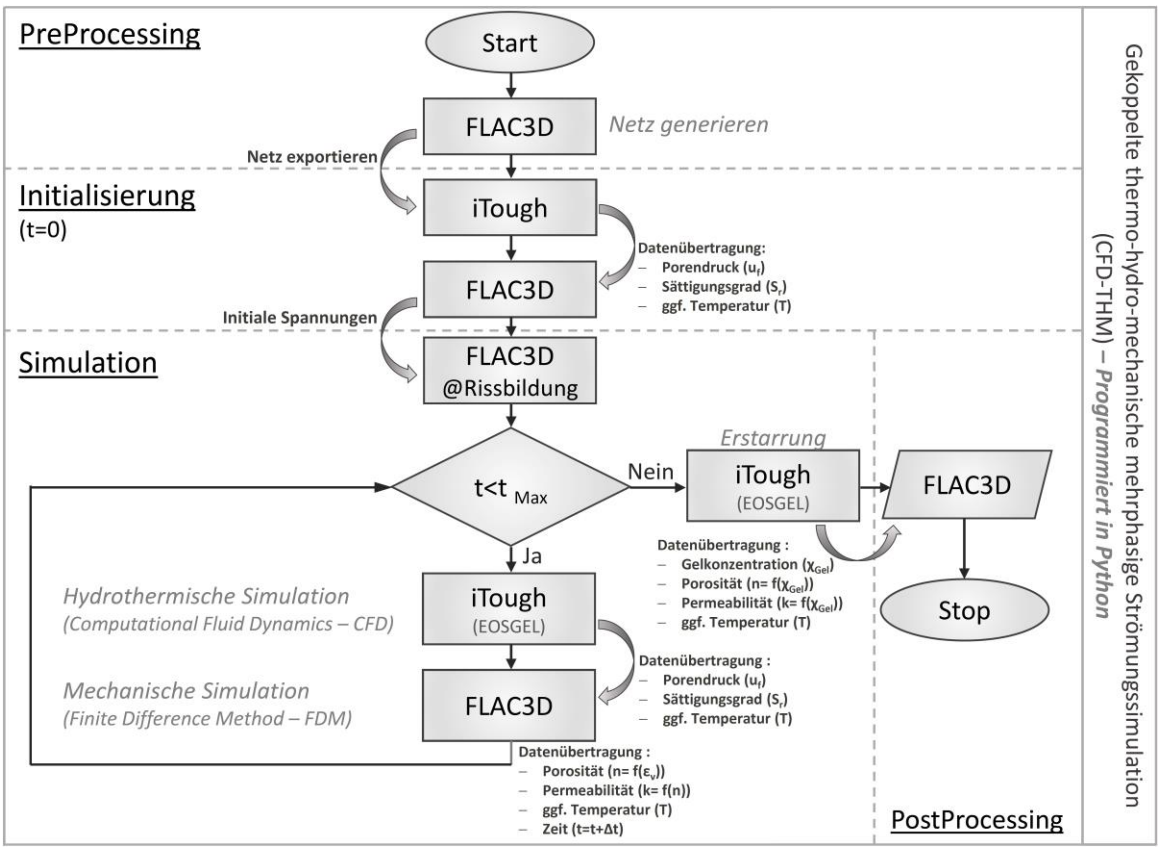


Abbildung 11-6: Verknüpfung von iTOUGH2 und FLAC3D – Programmablaufplan der gekoppelten THM-Simulation

Abbildung 11-6 zeigt eine schematische Darstellung des gekoppelten Berechnungsverfahrens. Es ist u. a. eine Berechnungsschleife abgebildet, die sich bis zum Erreichen von t_{Max} wiederholt. Die Injektionszeit (t_{Max}) ist durch die Reaktionszeit limitiert. Bei jedem Schleifendurchlauf wird zuerst die hydrothermische Simulation mit iTOUGH und dann die mechanische Simulation mit FLAC3D durchgeführt. Die Massen-, Momenten- und ggf. Energiebilanzgleichungen werden in jedem Zeitschritt für die diskretisierten Elemente numerisch gelöst. Nach Bedarf kann die thermische Berechnung aktiviert bzw. deaktiviert werden (isotherm/nicht isotherm).

Die mit iTOUGH ermittelten Parameter Porendruck (u_f), Sättigungsgrad (S_r) und ggf. Temperatur (T) werden für die weiteren Berechnungen auf FLAC3D übertragen. Eine Änderung der genannten Parameter erzeugt neue Spannungen, die mit FLAC3D ermittelt werden. Durch die Spannungsänderungen werden die Porosität (n) und Permeabilität (k) im Boden sowie in den entstandenen Rissen verändert. Die allmählichen Porositätsänderungen hängen von den Dehnungen ab. Die Dehnungen werden durch die Verformungen der Bodenpartikel, die häufig elastisch sind, sowie durch die Umlagerung der Bodenkörner hervorgerufen. Ist die Porosität bekannt, kann die Permeabilität aus einer Vielzahl verschiedener empirischer Gleichungen ermittelt werden. Rutqvist (2002) schlägt die folgende nichtlineare empirische Gleichung für die Ermittlung der Durchlässigkeit (k) vor [143]:

$$k = k_0 \cdot e^{c \cdot \left(\frac{n}{n_0} - 1\right)} \tag{11-2}$$

wobei k_0 die Permeabilität bei Nullspannung ist und c experimentell bestimmt wird.

Wie in Abschnitt 8.3.2 erwähnt wurde, ermöglicht das Programm iTOUGH die Ermittlung der Eigenschaften des neuen porösen Mediums nach dem vollständigen Erstarren des Injektionsmaterials, indem Annahmen zu der neuen Porenstruktur getroffen werden. Die Parameter, die nach der Erstarrung des Injektionsmittels berechnet werden, sind Porosität, Permeabilität, relative Permeabilität und Kapillardruckfunktionen sowie die Sättigung des nicht reagierten Injektionsmaterials.

Es wurde eine isotherme Simulation durchgeführt und für die Berechnung ein 2,5D-Netz mit einer Abmessung von 2 [m] x 0,02 [m] x 2,6 [m] (B x H x T) eingesetzt (siehe Abbildung 11-7). Das Simulationsnetz befindet sich in Primärspannungszustand. Auf der Oberseite des vollgesättigten Netzes wurde eine 1 [m] Wassersäule definiert. Zudem wurde angenommen, dass die Injektion mit einer konstanten Fließrate von 0,2 [l/min] durchgeführt und als Injektionsmaterial Acrylatgel I in Kombination mit Salz-BL eingesetzt wird. Grundsätzlich gilt, dass aus einer größeren Fließrate höhere Porendrücke

in dem Injektionskörper resultieren. Es wurde angenommen, dass der Injektionsdruck zu Beginn der Injektion sowie bis zur Bildung des Strömungswegs im Injektionskörper 8 [Bar] beträgt (hohe Fördermenge der Pumpe). Da die Injektionslanzen mit Regen- oder Spülwasser gefüllt sein können, wurde angenommen, dass der Rissbildungsprozess mit Wasser erfolgt. Für die Ermittlung der Mischviskosität wurde die lineare Mischungsregel verwendet. Es wurde angenommen, dass 5 % der Dehnungen durch die elastischen Verformungen der Bodenpartikel und der Rest durch die Umlagerung der Bodenkörner hervorgerufen wurden. Für den Parameter *c* wurde 5 angenommen.

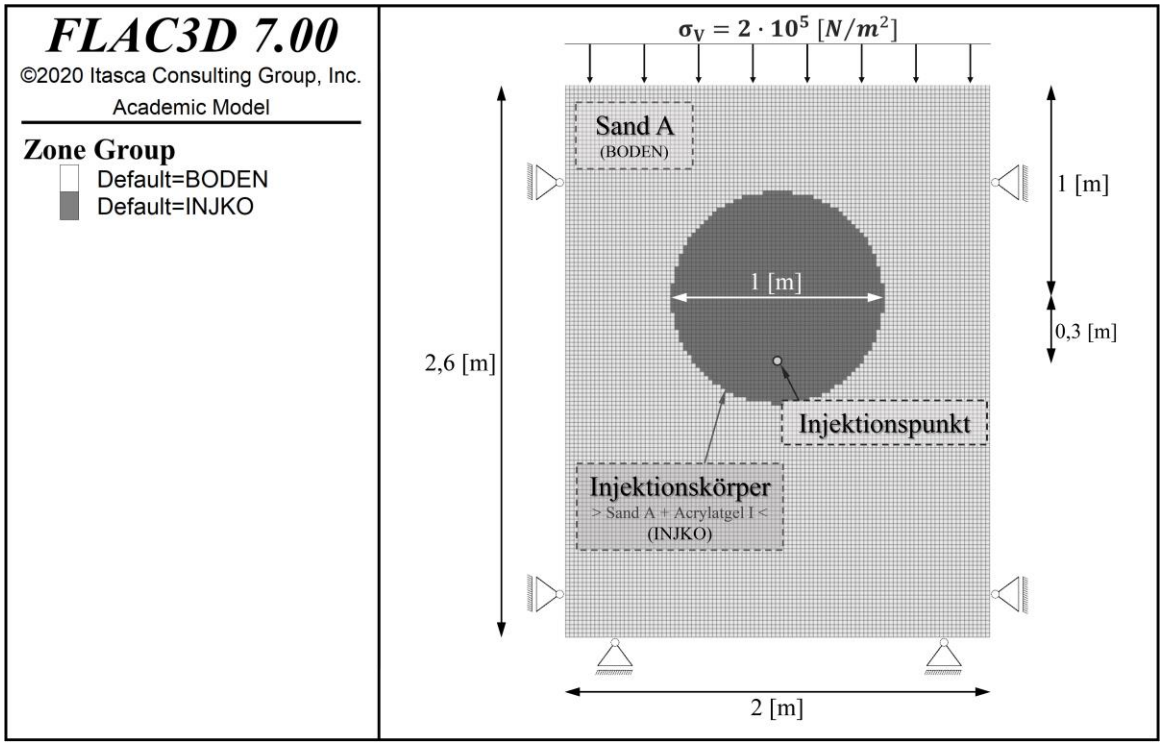


Abbildung 11-7: Randbedingungen und das mit dem gekoppelten Verfahren simulierte 2,5D-Netz

Um die Simulationsergebnisse besser darzustellen, werden diese in zwei Teile unterteilt, nämlich Rissbildung im Injektionskörper und Ausbreitung des Injektionsmaterials im Boden.

Der simulierte Rissbildungsprozess im Injektionskörper ist in Abbildung 11-8 dargestellt. Die in Abbildung 11-1 dargestellte Simulationsschleife wurde sechsmal wiederholt, bis die Zugspannungsbrüche einen Strömungsweg aus dem Injektionskörper heraus erzeugten. Da die vertikalen und horizontalen Spannungen am Simulationsbeginn nach der Initialisierung der hydrothermischen und mechanischen Parameter fast gleich groß waren, bildeten sich im Injektionskörper kreuzförmige Risse. Durch die erzeugten Risse wurde der Spannungszustand im Injektionskörper sowie im Boden verändert. Die Änderungen waren jedoch nicht groß genug, um die Form der Rissbildung zu beeinflussen.

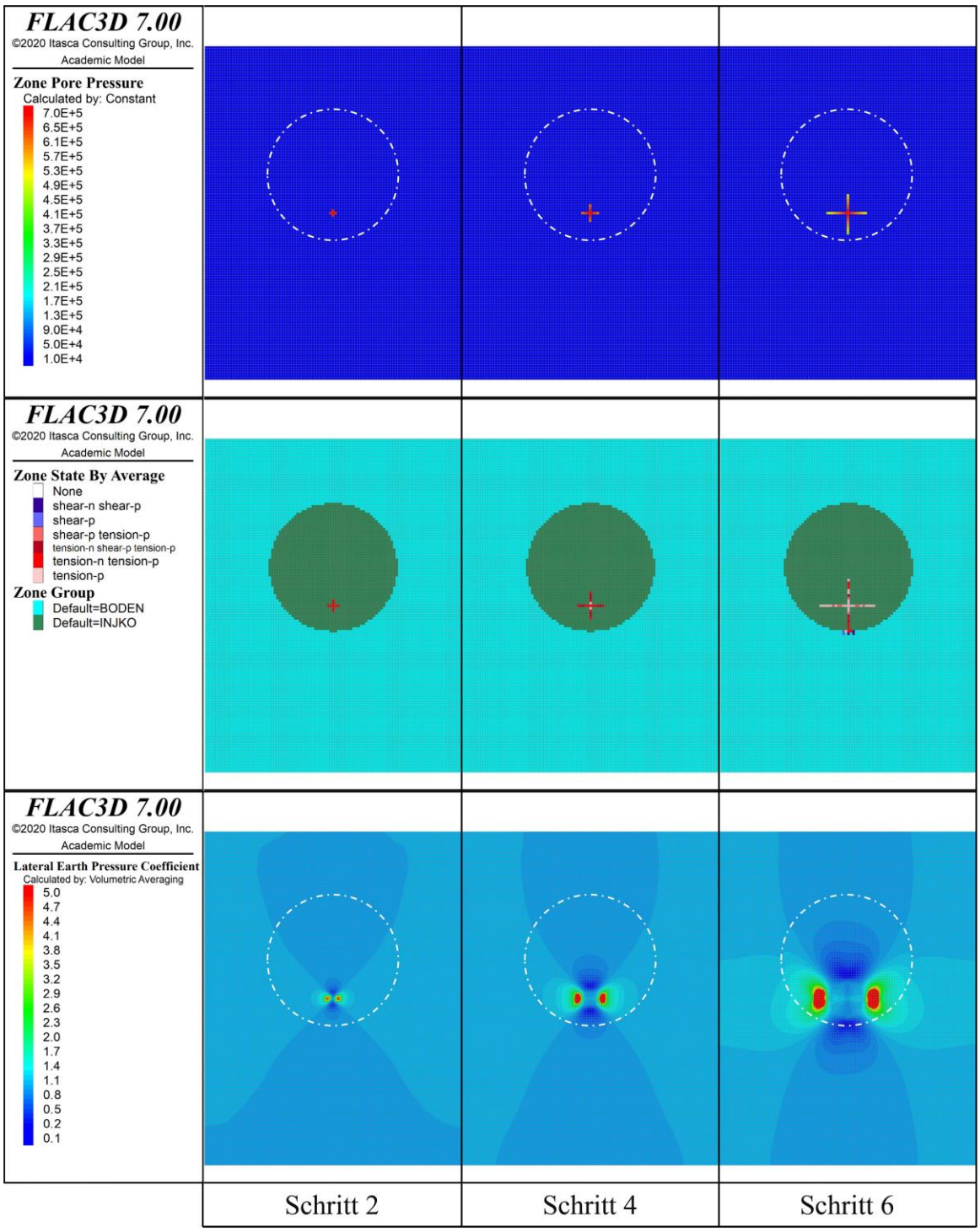


Abbildung 11-8: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse – Rissbildung im Injektionskörper – Porendruck (oben), Bruchstellen (Mitte) und Erddruckbeiwert (unten)

Das simulierte Ausbreitungsverhalten des Injektionsmaterials im Boden ist in Abbildung 11-9 dargestellt. Diese umfasst die ermittelte volumetrische Dehnung (ε_v), Porosität (n), Gelkonzentration (χ_{Gel}) und den Porendruck (u_f) zum Zeitpunkt t = 10 [s] sowie 7,5 und 15 [min] und nach der Erstarrung des Injektionsmaterials.

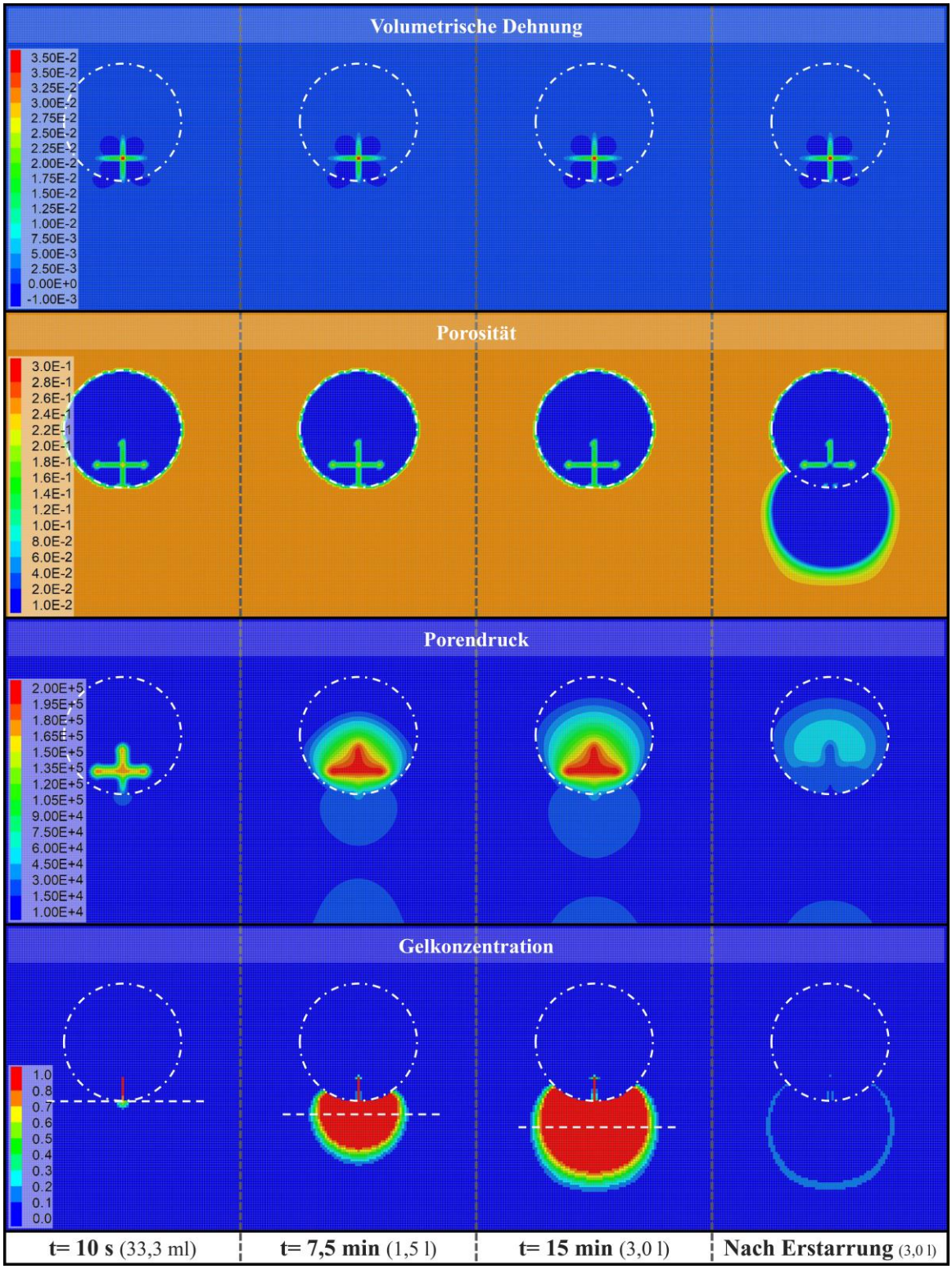


Abbildung 11-9: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse – Ausbreitung des Injektionsmaterials im Boden

Die entstandenen Risse fungieren als eine Verlängerung für die Injektionslanze. In der Folge verschiebt sich der Mittelpunkt des neuen Injektionskörpers auf der unteren Seite des ausreagierten Injektionskörpers. Eine kreisförmige Ausbreitung des Injektionsmaterials im Boden ist in Abbildung 11-9 zu beobachten. Die Dichte des eingesetzten Injektionsmittels

ist größer als Wasser, daher sinkt der erzeugte Injektionskörper langsam ab. Bei der Injektion von wässrigen Lösungen in Böden wird das ursprünglich vorhandene Porenwasser verdrängt, wodurch es an der Kontaktfläche zwischen den beiden Flüssigkeiten zu einer Verdünnung des Injektionsmittels mit dem Porenwasser kommt. Ist ein Ende des entstandenen Risses verschlossen, wird das Porenwasser in diesem Riss eingeschlossen. Da das Wasser nahezu inkompressibel ist, kann das Injektionsmittel nur geringfügig durch den Verdünnungseffekt in einen derartigen Riss eindringen. Grundsätzlich neigt das Injektionsmaterial dazu, in die Richtung zu fließen, in der der Porendruck am niedrigsten ist.

Die Bodenporosität ändert sich durch den Injektionsprozess sowie durch die Verformung des ausreagierten Injektionskörpers. Die abgedichteten und aufgelockerten Bereiche sind in Abbildung 11-10 markiert. Die maximale Porosität im Boden nach der Injektion betrug 25,23 % und die minimale Porosität 24,96 %. Die ermittelten Änderungen der Bodenporosität sind gering, da Sand häufig ein großes Elastizitätsmodul hat.

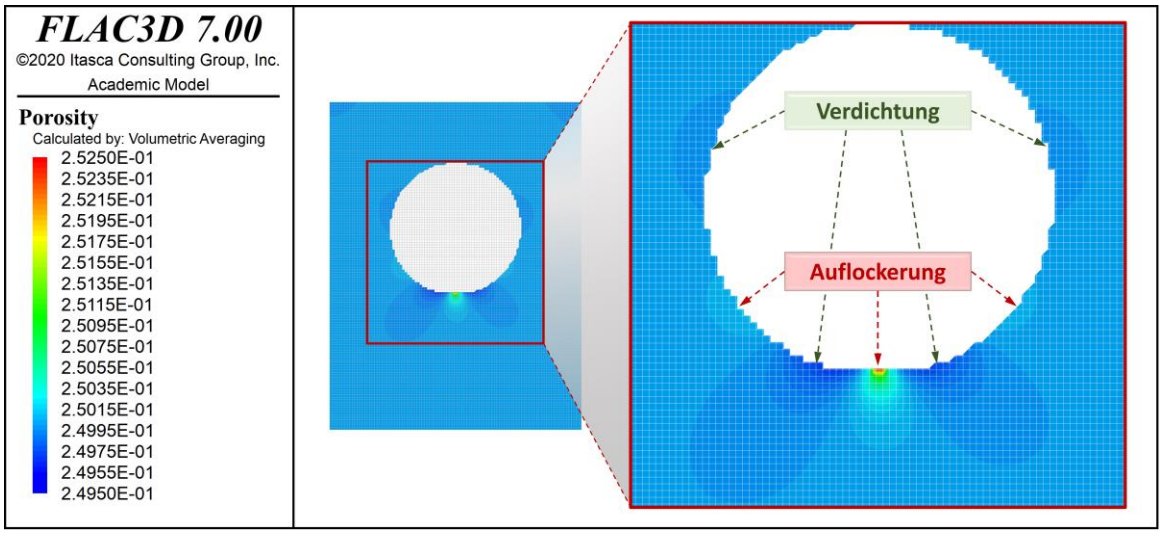


Abbildung 11-10: Änderungen der Bodenporosität infolge des Injektionsprozesses (t = 15 [min])

Ziel dieses Kapitels war es, ein gekoppeltes thermisch-hydrologisch-mechanisches mehrphasiges Strömungssimulationsverfahren (CFD-THM) zu entwickeln. Wie bei jeder Simulationsmethode muss das entwickelte Verfahren bei den zukünftigen Einsätzen zunächst kalibriert werden.

12 Planung und Ausführung

Basierend auf den entwickelten und vorgestellten Simulationsverfahren sowie den Erkenntnissen des Materialverhaltens wird in diesem Kapitel ein Bemessungsalgorithmus einschließlich eines Sicherheitskonzeptes auf der Grundlage des EC 7-1 vorgestellt. Durch eine sichere Bemessung von Injektionsmaßnahmen wird der erforderliche Materialverbrauch optimiert. Dies ist die Voraussetzung für eine Optimierung in ökonomischer und ökologischer Hinsicht.

Ein Injektionsentwurfsprozess sollte die folgenden Schritte umfassen:

1. Identifizierung der Baugrundprobleme und Bestimmung des Injektionsziels
2. Durchführung geotechnischer Untersuchungen
3. Entwurfsplanung unter Berücksichtigung der Injektionsreichweite und erreichbaren Tragfähigkeit
4. Vergleich mit anderen Bodenverbesserungsverfahren
5. Endgültige Planung unter Berücksichtigung aller Aspekte und Spezifikationen

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, wird die Penetrationsinjektion zur Stabilisierung und Abdichtung von Boden verwendet. Der Injektionszweck, der Spannungszustand sowie die Einsatztiefe bestimmen, welche Nachweise für die Planung eines Injektionsvorgangs erforderlich sind. Je nach den Umständen sind zwei bzw. drei der unten aufgeführten Aspekte bei der Planung und Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen:

- Untersuchung zur Injizierbarkeit
- Untersuchung zur Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit
- Untersuchung zum Abdichtungseffekt

Ein Nachweiskonzept, das im Planungsprozess zum Einsatz kommen kann, ist in Abbildung 12-1 dargestellt.

12.1 Untersuchung zur Injizierbarkeit

Die Injektionsfähigkeit des Bodens muss bei jeder Injektionsmaßnahme, unabhängig vom Injektionszweck, untersucht werden. Die Faktoren, die die Injizierbarkeit des Bodens beeinflussen, wurden in Kapitel 6 genannt. Um die Planung durchführen zu können, müssen zunächst die mechanischen Eigenschaften des Bodens wie Durchlässigkeit, eff. Porosität und Wassergehalt sowie die rheologischen Eigenschaften des Injektionsmaterials wie zeitliche Entwicklung der Viskosität und Dichte experimentell untersucht werden.

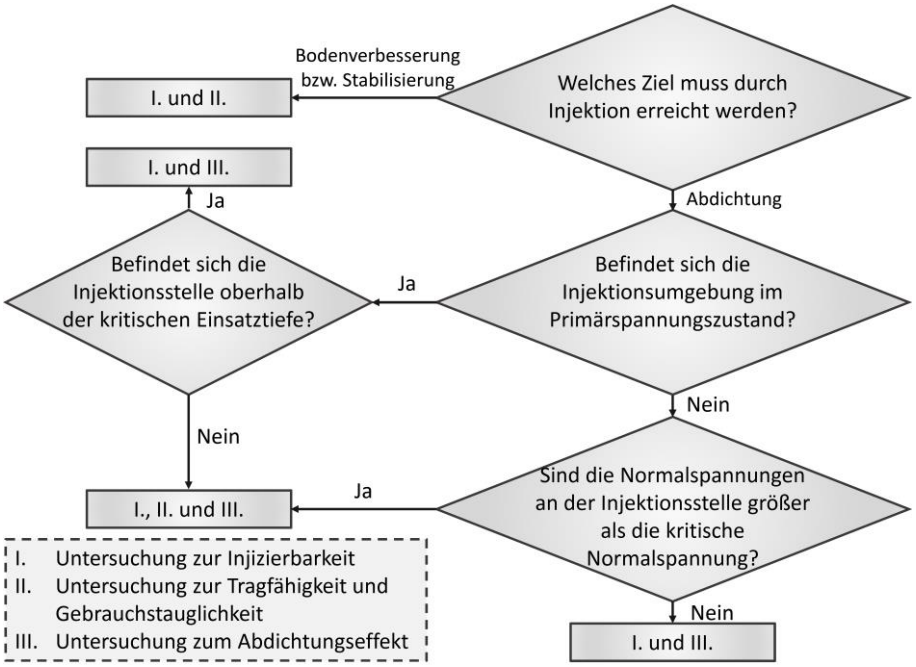


Abbildung 12-1: Nachweiskonzept für die Penetrationsinjektion

Die Art des verwendeten Injektionsmaterials hängt von der Bodenpermeabilität, der erforderlichen Injektionsreichweite und der erforderlichen Endfestigkeit ab. Beispielsweise eignen sich Acrylgele und Wassergläser zur Injektion in Böden mit geringer Permeabilität. Im Gegensatz dazu sind Epoxid- und Polyurethanharze hochviskos und können nur in stark durchlässigen Böden zum Einsatz kommen.

Die Berechnungen in Abschnitt 8.2 haben gezeigt, dass ein dreieckiges Injektionsraster wirtschaftlicher ist als ein quadratisches Raster. Angesichts des kubischen Wachstums (Potenz drei) des Materialbedarfs mit linear zunehmenden Durchmessern sollten die Rasterpunktabstände nicht zu groß gewählt werden. Die ökonomische und ökologische Kombination sollte durch Variation der Injektionsmenge und der Rasterpunktabstände untersucht werden.

Für die Ermittlung der Injektionsreichweite können die folgenden numerischen Simulationsverfahren zum Einsatz kommen:

- Einphasige Strömungssimulation unter Berücksichtigung des Wasserdruckes und der Überlappungen mit dem entwickelten Bemessungstool
- CFD-Simulation von Mehrphasenströmungen mit kommerziellen Softwares wie „iTOUGH“ oder „Ansys Fluent“
- Gekoppelte thermisch-hydrologisch-mechanische mehrphasige Strömungssimulationen (CFD-THM)

Der Simulationsaufwand ist bei den genannten Verfahren nicht identisch. Die Abmessungen des Injektionsfeldes, die Reaktionszeit und viele andere Parameter beeinflussen die Simulationszeit. Die schnellste Simulation kann mit dem Bemessungstool durchgeführt werden Daher eignet sich dieses Tool zur Untersuchung der Risiken und Chancen durch Variierung der Boden- und Injektionsparameter. Zusätzliche Simulationen sind nur in bestimmten Fällen erforderlich. Anhand des in Abbildung 12-2 dargestellten Flussdiagramms kann das zur numerischen Strömungssimulation geeignete Verfahren ausgewählt werden.

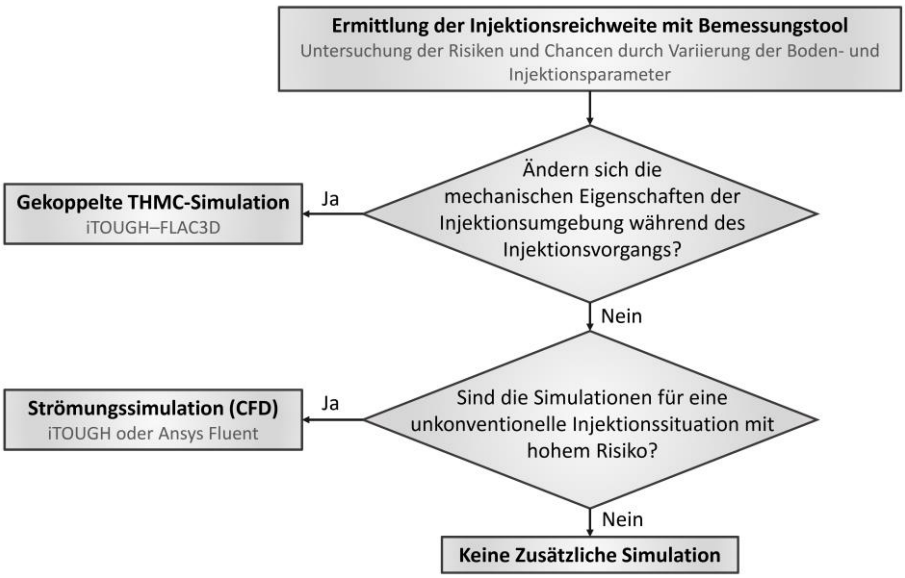


Abbildung 12-2: Auswahl des zur numerischen Strömungssimulation geeigneten Verfahrens

12.2 Untersuchung zur Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit

Unabhängig vom eingesetzten Injektionsmaterial sind eine Zunahme der Kohäsion und eine Verringerung des Reibungswinkels nach der Injektion zu beobachten. Der Grad der Änderungen ist von der Normalspannung und dem eingesetzten Injektionsmaterial abhängig. Es wird daher – unabhängig vom Injektionsziel – dringend empfohlen, die Tragfähigkeit des Baugrundes nach dem Injektionsvorgang zu untersuchen. Bei den Abdichtungsinjektionen ist eine Untersuchung der Tragfähigkeit für die in dieser Arbeit untersuchten Injektionskörper im Primärspannungszustand nicht erforderlich, falls die Injektionsstelle sich oberhalb der in Abschnitt 10.4.3 ermittelten kritischen Einsatztiefe befindet oder die Normalspannungen an der Injektionsstelle kleiner sind als die kritische Normalspannung (siehe Abbildung 12-1).

Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Baugrund während und nach der Injektion kann mit numerischen Simulationen (FEM und FDM) untersucht werden. Um

realistische Ergebnisse zu erzielen und Berechnungsfehler zu vermeiden, müssen die für die numerische Simulation verwendeten Stoffgesätze sorgfältig ausgewählt werden.

Nach EC 7-1 gibt es zwei Möglichkeiten zur Ermittlung der Bemessungswerte [18]:

- Faktorisierte Beanspruchungen und Widerstände

$$E_d \leq R_d \;\rightarrow\; E_k \cdot \gamma_E \leq \frac{R_k}{\gamma_R} \tag{12-1}$$

- Faktorisierte Scherparameter

$$E_d \leq R_d \;\rightarrow\; E_d(\varphi'_d, c'_d) \leq R_d(\varphi'_d, c'_d) \tag{12-2}$$

Die Scherparameter der untersuchten Injektionskörper wurden in dieser Arbeit mit einem nichtlinearen Bruchkriterium (HB) untersucht. Bei den numerischen Simulationen von Injektionskörpern können die Teilsicherheitsbeiwerte mit den faktorisierten Scherparametern berücksichtigt werden, indem die einaxiale Druckfestigkeit (σ_{ci}) durch den Teilsicherheitsbeiwert abgemindert wird. Die nach der Injektion erhaltene Tragfähigkeit hängt vom verwendeten Injektionsmaterial, der Größe und Form der Bodenpartikel, dem Prozentsatz der kleinen Partikel, der Zeit, der Temperatur und vielen anderen Parametern ab. Aus diesem Grund wird für die Berechnungen ein Teilsicherheitsbeiwert (γ_{ci}) von 1,5 vorgeschlagen.

12.3 Untersuchung zum Abdichtungseffekt

Bei Abdichtungsinjektionen darf die eintretende Wassermenge nach der Injektion den zulässigen Wert nicht überschreiten. Die eintretende Wassermenge kann mit der Darcy-Gleichung (6-1) ermittelt werden. Die Durchlässigkeit von Injektionskörpern hängt vom eingesetzten Injektionsmaterial und der Bodenart ab. Auf der sicheren Seite liegend können die Berechnungen mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $1 \cdot 10^{-8}$ [m/s] durchgeführt werden.

13 Zusammenfassung und Ausblick

13.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ausbreitungsverhalten von Injektionsmaterialien wurde zum größten Teil experimentell untersucht und es wurde ein einphasiges Strömungsberechnungsverfahren für die Ermittlung der Injektionsreichweite unter Verwendung der Massenbilanz-, Bernoulli- und Darcy-Gleichungen entwickelt. Anhand des entwickelten Verfahrens wurde ein Bemessungstool entwickelt. Das Ausbreitungsverhalten von Injektionsmaterialien im Boden kann mittels dieses Tools unter Berücksichtigung der Überlappungen und des Wasserdruckes ermittelt werden. Die Zuverlässigkeit des entwickelten Verfahrens im kleinen Maßstab wurde mit den eindimensionalen Injektionsversuchen im Labor und im großen Maßstab mit einem großmaßstäblichen Injektionsversuch auf einer Baustelle in Karlsruhe validiert. Für den Validierungszweck wurde zusätzlich der Injektionsvorgang mit dem kommerziellen Programm „iTOUGH2“ simuliert. Die Validierung des entwickelten Verfahrens zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Realität und Simulation.

Die Tragfähigkeit des mit Injektionsmaterial stabilisierten Bodens ist von mehreren Parametern abhängig. Der Spannungszustand, die Eigenschaften des Bodens vor der Injektion sowie die Eigenschaften des eingesetzten Injektionsmaterials können die Tragfähigkeit des injizierten Bodens beeinflussen. Bei der Belastung des Bodens vor der Injektion kommen die Bodenpartikel miteinander in Kontakt. Durch die Partikelbewegungen wird Reibungskraft zwischen den Körnern in tangentialen und normalen Richtungen aktiviert. Eine Kohäsion kann ebenfalls in der Kontaktfläche vorhanden sein. Nach der Injektion sind Kohäsionserhöhungen und Reduzierungen des Reibungswinkels festzustellen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Bodenpartikel durch das Injektionsmaterial miteinander verbunden werden und in der Folge die Kohäsion erhöht wird. Alle Unebenheiten der Bodenkörner werden mit Injektionsmittelt gefüllt bzw. die Rauigkeit der Körper wird durch die Injektionsmaterialien deutlich verringert. Die Bodenpartikel können sich nach der Injektion kaum bewegen, was Voraussetzung für die Aktivierung der Reibungskraft ist. Dies sind die Gründe dafür, dass die Reibungskräfte nach der Injektion reduziert werden. Der Grad der Änderungen ist jedoch von dem Spannungsniveau und dem eingesetzten Injektionsmaterial abhängig. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Böden vor und nach der Injektion haben gezeigt, dass das Scherverhalten der Injektionskörper nicht mit linearen Bruchbedingungen beschrieben werden kann. Eine vom Spannungsniveau abhängige Änderung der Steifigkeit war ebenfalls festzustellen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit wird eine neue sichere Anwendungsgrenze für die untersuchten Injektionsmittel definiert.

Während des Injektionsvorganges ändern sich die mechanischen Eigenschaften des Bodens fortlaufend. Dies kann sogar zur Ausbreitung von neuen Rissen im Boden führen (Soilfracturing). Daher muss bei der Auswahl des Injektionsmaterials, der Injektionsmenge und der Injektionsrate sehr sorgfältig vorgegangen werden und alle relevanten Aspekte müssen berücksichtigt werden. Die numerische Modellierung ist eine vielversprechende Möglichkeit, den Injektionsvorgang zu simulieren. Der Injektionsvorgang im Boden ist ein thermo-hydro-mechanischer und chemischer Prozess (THMC). Das Programm „iTough“ ermöglicht eine thermo-hydro-mechanische mehrphasige Strömungssimulation unter Berücksichtigung des Gelierungsprozesses und des Verdünnungseffektes. Es ist jedoch nicht möglich, damit die mechanischen Einwirkungen abzubilden. Daher wurden zwei Programme – „FLAC3D“ und „iTOUGH“ – für die Modellierung gekoppelter thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer (THMC-)Prozesse mit einem im Rahmen dieser Arbeit geschriebenen Python-Programm miteinander gekoppelt. Auf diese Weise können in Zukunft die Injektionsparameter unter Berücksichtigung ausreichender Sicherheit ermittelt werden.

Schließlich können auf der Grundlage der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die effektive bzw. durchflusswirksame Porosität ist der Porenanteil, der mit Injektionsmaterial gefüllt werden kann. Um sicherzugehen, kann jedoch die entwässerbare Porosität anstelle der durchflusswirksamen Porosität für die Ermittlung der Injektionsreichweite eingesetzt werden.
- Der Injektionsdruck wird durch die Rauigkeit und die Fließfläche der Anschlüsse und Leitungen stark beeinflusst, daher sollte auf den Einsatz eines engen und rauen Anschlusses wie Hochdrucknippel eher verzichtet werden.
- Der zeitliche Materialbedarf bei der Bodeninjektion ist von der Ausbreitungsform, Bodendurchlässigkeit und Porosität abhängig. Bei einer zylinderförmigen Ausbreitung des Injektionsmaterials hat die Fördermenge der Pumpe einen größeren Einfluss auf die Injektionsreichweite als bei einer kugelförmigen Ausbreitung. Bei Böden mit einer starken Durchlässigkeit und einem höheren Porenanteil ist der zeitliche Materialbedarf groß, daher muss eine Pumpe mit einer großen Fördermenge eingesetzt werden.
- Eine Strömungssimulation mit dem Bemessungstool kann zwar in kurzer Zeit erfolgen, jedoch wird der Verdünnungseffekt bei Berechnungen nicht berücksichtigt. Eine Simulation mit dem Bemessungstool ermöglicht die Platzierung der Injektionslanzen im Modell mit höherer Genauigkeit im Vergleich zu iTough.

- Bei einer hohen Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers ist der Verdünnungseffekt stärker ausgeprägt und eine mehrphasige Strömungssimulation mit iTough2 ist notwendig und vorteilhaft.
- Die experimentellen Laborversuche und die numerischen Simulationen haben gezeigt, wie entscheidend die Wahl des richtigen Injektionsmittels für die Tragfähigkeit des Bodens ist. Die Injektion kann sogar unter bestimmten Voraussetzungen die Tragfähigkeit verringern.
- Mit dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium wird die Festigkeit des Injektionskörpers oft überschätzt. Die Scherfestigkeit von Injektionskörpern lässt sich durch das Hoek-Brown-Bruchkriterium mit einer guten Annäherung darstellen.

13.2 Vorschläge für weitere Untersuchungen

Zusammenfassend werden die folgenden Punkte für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet vorgeschlagen:

- Neues Stoffgesetz für mechanisches Materialverhalten von Injektionskörpern: Mechanische und rheologische Eigenschaften der Injektionsmaterialien wurden in dieser Arbeit untersucht. Dabei wurden die Speicher- und Verlustmodule der verschiedenen Injektionsmaterialien sowie das Zug-, Druck- und Scherverhalten von Injektionskörpern experimentell ermittelt. Da viele kommerzielle Softwares standardmäßig das Hoek-Brown-Materialgesetz unterstützen, wurde dieses Materialgesetz bei der Ermittlung der Scherparameter verwendet. Diese reichen jedoch nicht aus, um eine allgemeine quantitative Aussage über das Materialverhalten von Injektionskörpern treffen zu können. Die Entwicklung eines neuen Stoffgesetzes unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren kann im Rahmen weiterer Forschungen erfolgen.
- Stoffgesetze für hydromechanisches Materialverhalten des Bodens während der Injektion: Der Simulationsverlauf wird bei dem entwickelten gekoppelten thermisch-hydrologisch-mechanischen mehrphasigen Strömungssimulations-verfahren (CFD-THM) in kleine Zeitschritte unterteilt. Die Berechnungsschleife bei jedem Zeitschritt wiederholt sich bis zur vollständigen Erstarrung des Injektionsmaterials. Bei jedem Schleifendurchlauf wird zuerst die hydrothermische Simulation mit iTOUGH und dann die mechanische Simulation mit FLAC3D durchgeführt. Änderungen des Porendrucks, Sättigungsgrad und ggf. Temperaturänderungen werden mit iTOUGH und die Spannungsänderungen werden mit Flac3D ermittelt. Die Porosität- und Permeabilitätsänderungen werden unter Berücksichtigung der Spannungsänderungen und Materialeigenschaften

ermittelt. Es gibt bislang nicht viele Stoffgesetze, die Porosität- und Permeabilitätsänderungen beschreiben. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

1. Amelung W, Blume H-P, Fleige H et al. (2018) Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 17., überarbeitete und ergänzte Auflage. Springer Spektrum, Berlin
2. Anthogalidis A (2014) Numerische Studien zum bodenmechanischen Verhalten und zur Entwurfsoptimierung von Verdichtungsinjektionen
3. August H (ed) (1998) Optimierung von Deponieabdichtungssystemen. Mit 31 Tabellen. Springer, Berlin [u.a.]
4. Axelsson M, Gustafson G, Fransson Å (2009) Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratios. Tunnelling and Underground Space Technology 24:390–397. doi: 10.1016/j.tust.2008.11.001
5. Balke K-D, Kirsch R, Mattheß G (2000) Grundwassererschließung. Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht ; mit 81 Tabellen. Lehrbuch der Hydrogeologie, / hrsg. von Georg Matthess ; Bd. 4. Borntraeger, Berlin
6. Bastian P (1999) Numerical Computation of Multiphase Flows in Porous Media. Habilitationsschrift, Technischen Fakultät der Christian–Albrechts–Universität Kiel
7. Beck M (2019) Conceptual approaches for the analysis of coupled hydraulic and geomechanical processes. Mitteilungen / Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Heft 265. Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart, Stuttgart
8. Benedix R (1999) Chemie für Bauingenieure. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
9. Benedix R (2003) Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure, 2., überarb. Aufl. Teubner-Studienbücher Bauwesen. Teubner, Stuttgart
10. Berezvai S (2020) Constitutive modelling of compressible solids including viscoelastic-viscoplastic effects. Dissertation, Budapest University of Technology and Economics
11. Berggren A, Holmberg K, Palmqvist AE (2007) Synthesis of stable colloidal suspensions of ordered mesostructured silica from sodium metasilicate using pluronic P123 and mildly acidic conditions. In: Recent Progress in Mesostructured Materials - Proceedings of the 5th International Mesostructured Materials Symposium (IMMS2006), Shanghai, P.R. China, August 5-7, 2006, vol 165. Elsevier, pp 53–56

12. Bergna HE, Roberts WO (eds) (2006) Colloidal silica. Fundamentals and applications. Surfactant science series, vol 131. Taylor & Francis, Boca Raton, Fla.

13. Berner F, Kochendörfer B, Schnell W et al. (2002) Verfahrenstechnik der Grundwasserhaltung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

14. Bernhardt W (2008) Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen. Handbuch Altlasten Untersuchung altlastenverdächtiger Flächen, Teil 7. HLUG, Wiesbaden

15. Bloshanskaya L, Ibragimov A, Siddiqui F et al. (2016) Productivity Index for Darcy and pre-/post-Darcy Flow (Analytical Approach)

16. Blume H-P, Brümmer GW, Horn R et al. (2010) Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

17. Boley C (ed) (1996) Elektrische Potentialmessung als neue Methode für die labortechnische Bestimmung der Dichtstoffmenge in injizierten Sanden

18. Boley C (2015) Geotechnische Nachweise und Bemessung nach EC 7 und DIN 1054. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden

19. Boley C, Adam D, Englert K et al. (2019) Handbuch Geotechnik. Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen, 2nd ed. Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden

20. Boley C, Forouzandeh Y, Wagner S et al. (eds) (2019) Vergleichende Gegenüberstellung von Injektionsmitteln als vorübergehende Sicherungsmaßnahme der Kalotte

21. Boley C, Forouzandeh Y, Wagner S et al. (2020) Scherverhalten von acrylatischen Injektionskörpern. geotechnik 43:31–39. doi: 10.1002/gete.201900013

22. Bolisetti T, Reitsma S, Balachandar R (2007) Analytical solution for flow of gelling solutions in porous media. Geophys Res Lett 34:51. doi: 10.1029/2007GL031713

23. Bonzel J (1965) Biegezug- und Spaltzugfestigkeit des Betons. Beton-Verl., Düsseldorf

24. Borst R de, Crisfield M, Remmers J et al. (2012) Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures, 2nd ed. Wiley Series in Computational Mechanics. Wiley, Chicester

25. Bosseler M (2009) Beschreibung des orthotrop visko-elastoplastischen Verhaltens langglasfaserverstärkten Polypropylens. Versuchskonzept und FE-Simulation. Dissertation, Technischen Universität Kaiserslautern

26. Brauns J, Kast K, Hoetzl H et al. (1996) Anwendung von Weichgelen zur horizontalen Abdichtung von Baugruben durch Injektionssohlen - Fragen zur Beeinflussung der Grundwasserqualität. Erddammbau und Deponiebau. 6, Karlsruhe

28. Burgers JM (1935) Mechanical considerations, model systems, phenomenological theories of relaxation and of viscosity. Nordemann Publishing Company, New York

29. Busch K-F, Luckner L, Tiemer K et al. (1993) Geohydraulik, 3., neubearb. Aufl. Lehrbuch der Hydrogeologie, / hrsg. von Georg Matthess ; Bd. 3. Borntraeger, Berlin

30. Cambefort H (1969) Bodeninjektionstechnik. Einpressung in Untergrund und Bauwerke. Bauverl., Wiesbaden

31. Dachroth W (2017) Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

32. Darcy H (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau… / par Henry Darcy. Paris

33. Delwyn G. Fredlund, Daichao Sheng, Jidong Zhao (2011) Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. In: Canadian Geotechnical Journal 482, pp 186–198

34. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers (1995) Engineering and Design Chemical Grouting(EM 1110-1-3500)

35. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (1979) Empfehlung Nr. 2 des Arbeitskreises “Versuchstechnik Fels” der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinproben

36. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (1979) Empfehlung Nr. 3 des Arbeitskreises “Versuchstechnik Fels” der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Dreiaxiale Druckversuche an geklüfteten Großbohrkernen im Labor

37. Dietmar A (2014) Innovationen in der Geotechnik. Straßen und Eisenbahnen. Technische Universität Wien/HTBLuVA Mödling, Wien/Mödling

38. DIN 1054:2010-12, Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1

39. DIN 18130-1:1998-05, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche

40. DIN 18136:2003-11, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch

41. DIN 19700-10:2004-07, Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen

42. DIN 19700-11:2004-07, Stauanlagen - Teil 11: Talsperren

43. DIN 19700-12:2004-07, Stauanlagen - Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken

44. DIN 19700-13:2019-06, Stauanlagen - Teil 13: Staustufen

45. DIN 19700-14:2004-07, Stauanlagen - Teil 14: Pumpspeicherbecken

46. DIN 19700-15:2004-07, Stauanlagen - Teil 15: Sedimentationsbecken

47. DIN 22024:1989-02, Rohstoffuntersuchungen im Steinkohlenbergbau; Bestimmung der Spaltzugfestigkeit von Festgesteinen

48. DIN 4049-3:1994-10, Hydrologie_- Teil_3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie

49. DIN 4093:2015-11, Bemessung von verfestigten Bodenkörpern - Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren

50. DIN EN 12390-6:2010-09, Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009

51. DIN EN 12715:2021-01, Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau_- Injektionen; Deutsche Fassung EN_12715:2020

52. DIN EN 1926:2007-03, Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 1926:2006

53. DIN EN ISO 17892-8:2018-07, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 8: Unkonsolidierter undränierter Triaxialversuch (ISO_17892-8:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_17892-8:2018

54. DIN EN ISO 17892-9:2018-07, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 9: Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden (ISO_17892-9:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_17892-9:2018

55. DIN EN ISO 3219:1994-10, Kunststoffe_- Polymere/Harze in flüssigem, emulgiertem oder dispergiertem Zustand_- Bestimmung der Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter bei definiertem Geschwindigkeitsgefälle (ISO_3219:1993); Deutsche Fassung EN_ISO_3219:1994

56. DiPonio MA, Dixon C (2013) 2013 Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings. SME, Littleton

57. Eberhardt E (2012) The Hoek–Brown Failure Criterion. Rock Mech Rock Eng 45:981–988. doi: 10.1007/s00603-012-0276-4

58. Eichler K (2018) Spezialtiefbau. Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren, 5. Aufl. UTB GmbH; UVK

59. Entenmann W (1998) Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Altlasten ; 49 Tabellen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio

60. Ferrand LA, Milly P, Pinder GF et al. (1990) A comparison of capillary pressure-saturation relations for drainage in two- and three-fluid porous media. Advances in Water Resources 13:54–63. doi: 10.1016/0309-1708(90)90013-T

61. Figura LO (2004) Lebensmittelphysik. Physikalische Kenngrößen, Messung und Anwendung ; mit 195 Tabellen. Springer, Berlin

62. Finsterle S, Moridis GJ, Pruess K (1994) A TOUGH2 equation-of-state module for the simulation of two-phase flow of air, water, and a miscible gelling liquid. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Calif.

63. Foix S, Alenya G, Torras C (2011) Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey. IEEE Sensors J 11:1917–1926. doi: 10.1109/JSEN.2010.2101060

64. Forouzandeh Y, Boley C, Tintelnot G (2018) Experimentelle Untersuchungen zur Injizierbarkeit von Acrylatgelen in verschiedenkörnigen Böden. In: STUVA, 52 Forschung + Praxis: Forum Injektionstechnik 2018, pp 24–31

65. Forouzandeh Y, Boley C, Pratter P et al. (2020) Numerische und experimentelle Untersuchung von Chancen und Risiken der Felsstabilisierung durch Injektion. Hard Soil Soft Rock (HSSR), TU Graz

66. Fredlund DG, Rahardjo H (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA

67. Fredlund DG, Xing A, Huang S (1994) Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Can Geotech J 31:533–546. doi: 10.1139/t94-062

68. Fuchs S, Ziesche M, Nillert P (2017) Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwert und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick. Grundwasser 22:83–101. doi: 10.1007/s00767-017-0355-2

69. Garling F, Dittrich J (1979) Gesteinsbemusterung, 1st edn. Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig

70. Ghanbari S, Sefid M, Shamsoddini R (2016) Numerical Analysis of two-fluid mixing with various Density and Viscosity in a microchannel with forced oscillating stirrer. Modares Mechanical Engineering 16:109–119

71. Ghosh S, Biswas M, Chattopadhyay BD et al. (2009) Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. Cement and Concrete Composites 31:93–98. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001

72. Girmscheid G (2008) Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2. Aufl. Ernst & Sohn, Berlin

73. Grollius H-W (2014) Grundlagen der Hydraulik. Mit 8 Tafeln, 4 Tabellen und 15 Übungsaufgaben, 7., aktualisierte Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München

74. Gschwandtner G (2013) Gebirgsmechanische Untersuchungen von komplexen Grubengebäuden am Beispiel eines aufgelassenen Gipsbergbaues. Dissertation, Montanuniversität

75. Habenicht G (2002) Kleben. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

76. Harrison DM (2000) The grouting handbook. A step-by-step guide to heavy equipment grouting. Gulf Pub. Co, Houston, Tex

77. Harten U (2012) Physik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

78. Hegebarth DC (2013) Grouting equipment manual. Selection, operation, maintenance, and repair. SME Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, Colo.

79. Heinemann E, Paul R (1998) Hydraulik für Bauingenieure. Hydraulik für Bauingenieure. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l.

80. Henning O, Knöfel D (1997) Baustoffchemie. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

81. Hoek E (1983) Strength of jointed rock masses. Géotechnique:187–223

82. Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B et al. (2002) Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference:267–273

83. Holland TC, United States. Federal Highway Administration (2005) Silica Fume User’s Manual. Federal Highway Administration

84. Hölting B, Coldewey WG (2009) Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie ; 90 Tabellen, 7., neu bearb. und erw. Aufl. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg

85. Hopkins RP (1955) Acrylate Salts of Divalent Metals. Ind Eng Chem 47:2258–2265. doi: 10.1021/ie50551a024

86. Houlsby AC (1990) Construction and design of cement grouting. A guide to grouting in rock foundations. Wiley series of practical construction guides. Wiley, New York

87. Hu W (2012) Polymer Physics. A Molecular Approach. Springer Verlag, London

88. Incecik M, Ceren I (1995) Cement grouting model tests. Bull Tech Univ Istanbul:305–317

89. Indraratna B, Chu J, Rujikiatkamjorn C (2015) Ground Improvement Case Histories. Compaction, Grouting and Geosynthetics. Elsevier Science, Burlington

90. Irngartinger S (2007) Strömungsverhalten thermoplastischer Schmelzen in klüftigem Festgestein. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007. Schriftenreihe / TUM, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München, vol 41., München

91. Itasca Consulting Group, Inc. (2017) FLAC3D Modeling

92. Karol RH (2003) Chemical Grouting and Soil Stabilization. Marcel Dekker Inc, Hoboken

93. Kolymbas D (2007) Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2., korr. und erg. Aufl. Springer, Berlin

94. Kostin I, Marion M, Texier-Picard R et al. (2003) Modelling of Miscible Liquids with the Korteweg Stress. ESAIM: M2AN 37:741–753. doi: 10.1051/m2an:2003042

95. Kovács G (1981) Seepage hydraulics. Developments in water science, vol 10. Elsevier Scientific Pub. Co, Amsterdam, New York

96. Krizek RJ, Liao HJ, Borden RH (1992) Mechanical properties of microfine cement/sodium silicate grouted sand. Geotechnical Special Publication:688–699

97. Kudella P (1994) Mechanismen der Bodenverdrängung beim Einpressen von Fluiden zur Baugrundverfestigung. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe. Univ, Karlsruhe

98. Kumpugdee Vollrath M (ed) (2011) Easy coating. Grundlagen und Trends beim Coating pharmazeutischer Produkte, 1. Aufl. Studium. Vieweg + Teubner, Wiesbaden

99. Kutzner C (1991) Injektionen im Baugrund. Enke, Stuttgart

100. La Rocha C de, Conley DJ (2017) Silica Stories. Springer International Publishing, Cham

101. Langguth H-R, Voigt R (1980) Hydrogeologische Methoden. Hochschultext. Springer, Berlin

102. Latscha HP, Kazmaier U, Klein H (2016) Organische Chemie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

103. Lesemann H (2010) Anwendung polymerer Stützflüssigkeiten bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden

104. Leverett MC (1941) Capillary Behavior in Porous Solids. Transactions of the AIME 142:152–169. doi: 10.2118/941152-G

105. Lins Y (2010) Hydro-mechanical properties of partially saturated sand. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, vol 42. Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Bochum

106. Lombardi G, Deere D (1993) Grouting design and control using the GIN principle. International Water Power & Dam Construction:15–22

107. Lombardi G (1996) Selecting the grouting intensity. The International Journal on Hydropower & Dams:62–66

108. Lufsky K, Bonk M (2009) Lufsky Bauwerksabdichtung, 7., vollst. aktualis. u. erw. Aufl. 2010. Praxis. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden

109. Maidl B (1994) Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, 2., überarb. u. erg. Aufl. Verl. Glückauf, Essen

110. Malárics V (2011) Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss., 2010. Karlsruher Reihe Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung / Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, vol 69. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; KIT Scientific Publishing, Hannover, Karlsruhe

111. Markou IN, Litsiou AE (eds) (2019) Efficiency of soil groutability criteria for cement suspension grouting. The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE), Reykjavik Iceland

112. Maybaum G (2011) Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau. Baugrund, Baugruben, Baugrundverbesserung, Pfahlgründungen, Grundwasserhaltung ; mit 180 Tabellen, 2., überarb. und aktualisierte Aufl. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden

113. Meinhard H (1999) Rheologische Untersuchungen zu Härteeindruckexperimenten im Nanometerbereich. Dissertation, Martin-Luther-Universität

114. Meunier VC, Williamson GJ, Hopkins RP (1955) Soil-Water Relationships in Calcium Acrylate Stabilized Soil. Ind Eng Chem 47:2265–2269. doi: 10.1021/ie50551a025

115. Mezger T (2014) Angewandte Rheologie. Mit Joe Flow auf der Rheologie-Straße, 1. Aufl. Anton Paar GmbH, Graz

116. Milijic M (2019) CRAZY Android vs iOS Market Share Discoveries in 2020. https://leftronic.com/android-vs-ios-market-share/

117. Miltiadou-Fezans A, Tassios TP (2013) Penetrability of hydraulic grouts. Mater Struct 46:1653–1671. doi: 10.1617/s11527-012-0005-1

119. Mitchell JK (1981) Soil Improvement — State-of-the Art Report. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering:509–565

120. Modoni G, Flora A, Lirer S et al. (2016) Design of Jet Grouted Excavation Bottom Plugs. J Geotech Geoenviron Eng 142:4016018. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001436

121. Mollet H, Grubenmann A, Payne HR (2001) Formulation technology. Emulsions, suspensions, solid forms. Wiley-VCH, Weinheim

122. Müller-Kirchenbauer H (1968) Zur Theorie der Injektionen. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, vol 32. Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik, Karlsruhe

123. Müller-Kirchenbauer H (1969) Untersuchungen zur Eindringung von Injektionsmassen in porigen Untergrund und zur Auswertung von Probeverpressungen. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, vol 39. Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik, Karlsruhe

124. Mutschler T (2004) Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises. "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern. Bautechnik 81:825–834. doi: 10.1002/bate.200490194

125. Nagata S (1975) Mixing. Principles and applications. A Halsted Press book. Kodansha, Tokyo

126. Neroth G, Vollenschaar D, Wendehorst R (eds) (2011) Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen, 27., vollst. überarb. Aufl. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden

127. Neumaier H, Weber HH (eds) (1996) Altlasten. Erkennen, Bewerten, Sanieren, 3., grundlegend überarbeitete und ergänzte Auflage. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

128. Nonveiller E (1989) Grouting. Theory and practice. Developments in Geotechnical Engineering, vol 57. Elsevier, Amsterdam

129. Odenwald B (2011) Numerische Berechnung der Dammdurchströmung. BAWMitteilungen 94:59–76

130. Ohlenbusch R (2000) Numerische Modellrechnungen zur Ausbreitung von Inhaltsstoffen aus Weichgelinjektionssohlen. Dissertation, Universität Karlsruhe

131. Oldenburg CM, Spera FJ (1992) HYBRID MODEL FOR SOLIDIFICATION AND CONVECTION. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals 21:217–229. doi: 10.1080/10407799208944917

132. Pahl M, Gleißle W, Laun H-M (eds) (1995) Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, 4., überarb. Aufl. Kunststofftechnik. VDI-Verl., Düsseldorf

133. Paul EL, Atiemo-Obeng VA, Kresta SM (eds) (2004) Handbook of industrial mixing. Science and practice. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ

134. Paul Guyer J (2015) An Introduction to Chemicals for Grouting of Soils. CreateSpace Independent Publishing Platform

135. Peter G, Muntwyler R, Ladner M (1995) Baustofflehre. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

136. Plato R (2006) Numerische Mathematik kompakt. Grundlagenwissen für Studium und Praxis, 3., aktualisierte und verbesserte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden

137. Plaxis (2020) Material Models Manual. CONNECT Edition V21.00

138. Prinz H, Strauß R (2011) Ingenieurgeologie, 5. Aufl. 2011. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

139. Ramanagopal S, Gali ML, Venkataraman K (2021) Sustainable Practices and Innovations in Civil Engineering, vol 79. Springer Singapore, Singapore

140. Rinaldi AP, Rutqvist J, Blanco-Martín L et al. (2018) COUPLING TOUGH3 WITH FLAC3D FOR PARALLEL COMPUTING OF FLUID FLOW AND GEOMECHANICS

141. Rotta J (1956) Experimenteller Beitrag zur Entstehung turbulenter Strömung im Rohr. Experimenteller Beitrag zur Entstehung turbulenter Strömung im Rohr, vol 24. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

142. Rust W (2016) Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Kinematik, Material, 3. Aufl. 2016. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden

143. Rutqvist J, Wu Y-S, Tsang C-F et al. (2002) A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39:429–442. doi: 10.1016/S1365-1609(02)00022-9

144. Rutqvist J, Stephansson O (2003) The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. Hydrogeology Journal 11:7–40. doi: 10.1007/s10040-002-0241-5

145. Rutqvist J, Tsang C-F (2002) A study of caprock hydromechanical changes associated with CO2-injection into a brine formation. Environ Geol 42:296–305. doi: 10.1007/s00254-001-0499-2

146. Rutqvist J, Bäckström A, Chijimatsu M et al. (2009) A multiple-code simulation study of the long-term EDZ evolution of geological nuclear waste repositories. Environ Geol 57:1313–1324. doi: 10.1007/s00254-008-1536-1

147. Rutqvist J, Zheng L, Chen F et al. (2014) Modeling of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes with Links to Geochemistry Associated with Bentonite-Backfilled Repository Tunnels in Clay Formations. Rock Mech Rock Eng 47:167–186. doi: 10.1007/s00603-013-0375-x

148. Sautter A (1995) Chemische und physikalische Eigenschaften von Dichtstoffen im Grundwasser unter besonderer Berücksichtigung ihrer Umweltverträglichkeit. Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt

149. Scheffer F, Schachtschabel P, Blume H-P (2008) Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Aufl., [Nachdr.]. Spektrum-Lehrbuch. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg

150. Schmidt C, Dietrich L (2014) Chemie für Biologen. Von Studierenden für Studierende erklärt. Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg

151. Schmidt H-H, Buchmaier RF, Vogt-Breyer C (2017) Grundlagen der Geotechnik. Geotechnik nach Eurocode, 5. Auflage. Lehrbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden

152. Schnell W (1990) Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben. Leitfaden der Bauwirtschaft und des Baubetriebs. Teubner, Stuttgart

153. Schulze B (1993) Neuere Untersuchungen über die Injizierbarkeit von Feinstbindemittel-Suspensionen, Grouting in Rock and Concrete. Balkema, Rotterdam

154. Schuppener B (2011) Kommentar zum Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessung. John Wiley & Sons, Hoboken

155. Schürmann H (2007) Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Mit 39 Tabellen, 2., bearb. und erw. Aufl. VDI-/Buch]. Springer, Berlin

156. Schwarz HR, Köckler N (2011) Numerische Mathematik, 8., aktualisierte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden

157. Shah DL (ed) (1920) Ground Improvement Technique – Grouting Technology. For Irrigation Projects and Tunnelling

158. Shen J, Priest SD, Karakus M (2012) Determination of Mohr–Coulomb Shear Strength Parameters from Generalized Hoek–Brown Criterion for Slope Stability Analysis. Rock Mech Rock Eng 45:123–129. doi: 10.1007/s00603-011-0184-z

159. Shen P, Hankins N, Jefferis S (2017) Selection of Colloidal Silica Grouts with Respect to Gelling and Erosion Behaviour. Geosciences 7:6. doi: 10.3390/geosciences7010006

160. Sigursteinsson H (ed) (2019) Geotechnical engineering - foundation of the future. Proceedings of the XVII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Reykjavik. The Icelandic Geotechnical Society, IGS, Reykjavik

161. Silveira A (1965) An analysis of the problem of washing through in protective filters, Vol. 2. University of Toronto Press, Montreal

162. Simsek E (2011) Mischung und Segregation auf Rostsystemen. Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode. Zugl.: Bochum, Ruhr-Univ., Diss., 2011. Berichte aus der Energietechnik. Shaker, Aachen

163. Stein D (1999) Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Aufl. Ernst, Berlin

164. Stein J, Grabe J, Walz B (2005) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Düsenstrahlverfahren. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb, Diss., 2004, Erstausg. Veröffentlichungen des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb / Technische Universität Hamburg-Harburg, vol 8. Techn. Univ. Hamburg-Harburg Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb, Hamburg

165. Stein D, Schößer B, Statetzni C (2007) Entwicklung und Erprobung von optimierten Injektionsmitteln und -verfahren zur kontinuierlichen Ringspaltstützung bei Rohrvortrieb im heterogenen Baugrund. Abschlussbericht, Ruhr-Universität-Bochum

166. Steiner R (2004) Modellbildung und strömungsmechanische Simulation der dieselmotorischen Verbrennung. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe

167. Széchy K (1969) Tunnelbau. Springer Vienna, Vienna

168. Tao L, Zhigang Z, Shaoyou H et al. (2020) Design and Engineering Application of Polymer Grouting Pore Layout Scheme for Expressway Pavement Diseases. E3S Web Conf 165:5020. doi: 10.1051/e3sconf/202016505020

169. TPH Bausysteme GmbH (2020) Produktübersicht. product range

170. Trommer H (2012) Prüfung halbfesterArzneizubereitungen. Grundlagen der Rheologie und ausgewählte weitere physikalische Testmethoden, PHARMAZEUTISCHE WISSENSCHAFT - Zertifizierte Fortbildun

171. Trunk U, Schmalzried R, Hebecker R et al. (2015) Baugrundverbesserung Frühjahrstagung vom 7. Mai 2015. Méthodes de confortation en géotechnique ; Journée d’étude du 7 mai 2015, Luzern. Mitteilungen der Geotechnik Schweiz, vol 170. Geotechnik Schweiz, Zürich

172. U.S. Army Corps of Engineers (1995) Chemical Grouting. Engineering Manual (EM 1110-1-3500)

173. U.S. Army Corps of Engineers (2017) Grouting Technology. Engineering Manual (EM 1110-2-3506)

174. Urpi L, Rinaldi AP, Wassing B (2015) Modelling fault reactivation and velocity dependent friction with TOUGH-FLAC

175. Van Genuchten MT (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. Soil Science Society of America Journal 44:892

176. Vanrolleghem PA (2013) Decision Support for Water Framework Directive Implementation. Volume 3. Water Framework Directive Series, v. 3. Iwa Publishing, [Place of publication not identified]

177. Verfel J (ed) (1989) Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction. Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier

178. Verwey EJW (1947) Theory of the Stability of Lyophobic Colloids

179. Wagner W (1992) Strömung und Druckverlust. Mit Beispielsammlung. Vogel-Fachbuch: Kamprath-Reihe. Vogel, Würzburg

180. Wagner R (2011) Inverser Säulenversuch zur Beurteilung der Auswirkungen von Bodeninjektionsmitteln auf Boden und Grundwasser. Laborvergleichsuntersuchung und ökotoxikologische Bewertung am Beispiel von Polyacrylaten-Acrylatgelinjektionen. Berlin, Freie Universität Berlin, Diss., 2011. Freie Universität Berlin, Berlin

181. Ward JB, Kinney JF, Saad HY (1974) Application of Rheological Studies to Product Formulation, Stability, and Processing Problem. The Official Journal of the Society of Cosmetic Chemists:437–454

182. Weber HH, Neumaier H, Fresenius W et al. (eds) (1993) Altlasten. Erkennen, Bewerten, Sanieren, 2., überarb. Aufl. Springer, Berlin

183. Witt KJ (ed) (2017) GRUNDBAU-TASCHENBUCH. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Wiley

184. Witt KJ (ed) (2018) Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren, 8. Auflage. Ernst & Sohn a Wiley brand, Berlin

185. Zilch K, Diederichs CJ, Katzenbach R et al. (eds) (2013) Geotechnik. Handbuch für Bauingenieure, Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit / K. Zilch … (Hrsg.) ; 4. Springer, Berlin

186. Zou Y (2003) Ein physikalisches Modell der pF-Kurve für teilgesättigte grobkörnige Böden. Bautechnik 80:913–921. doi: 10.1002/bate.200306190

Anhänge

Anhang A Rheologische Eigenschaften der untersuchten Injektionsmaterialien

A.1 Acrylatgel II

Durch Anpassen der Gleichung (7-1) für die gemessenen Viskositätsdaten wurden die Viskosität-Konstanten [μ_0, a, b] ermittelt (Tab. 1).

Tab. 1: Viskosität-Konstanten und Gelierungszeit – Acrylatgel II

		μ_0	a	b	R-square	t_G [s]
Temperatur	**-05°C**	18,15	8,32E-04	3,21E-02	99,9%	436
	0°C	12,54	4,84E-04	5,29E-02	90,1%	275
	05°C	11,39	8,77E-05	9,29E-02	99,9%	175
	10°C	10,35	5,99E-05	1,28E-01	90,0%	130
	20°C	10,01	4,23E-02	1,48E-01	99,5%	68
	30°C	kurze Reaktionszeit-> Nicht messbar				
	40°C	kurze Reaktionszeit-> Nicht messbar				

Die zeitliche Entwicklung der Viskosität ist für Acrylatgel II bei niedrigen Temperaturen langsamer als bei höheren Temperaturen. Acrylatgel II ist im Gegensatz zu Acrylatgel I bei -5 °C einsetzbar. Bei Temperaturen über 30 °C war eine Viskositätsmessung wegen der kurzen Reaktionszeit nicht möglich. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionen (R-square bzw. R^2) sind alle größer als 90 %, teilweise sogar größer als 99 %, was eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der ermittelten Näherungsgleichung belegt.

Die ermittelten Gelierungszeiten für verschiedene Temperaturen sind in der letzten Spalte der Tab. 1 zusammengefasst. Eine exponentielle Abnahme der Gelierungszeit aufgrund der Temperaturerhöhung ist in Abb. 1 deutlich zu erkennen.

Um die Einflüsse der Materialmenge und Fließgeschwindigkeit auf den Viskositätsverlauf zu untersuchen, wurden die Messungen mit drei verschiedenen Schergeschwindigkeiten und drei Plattenabständen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst.

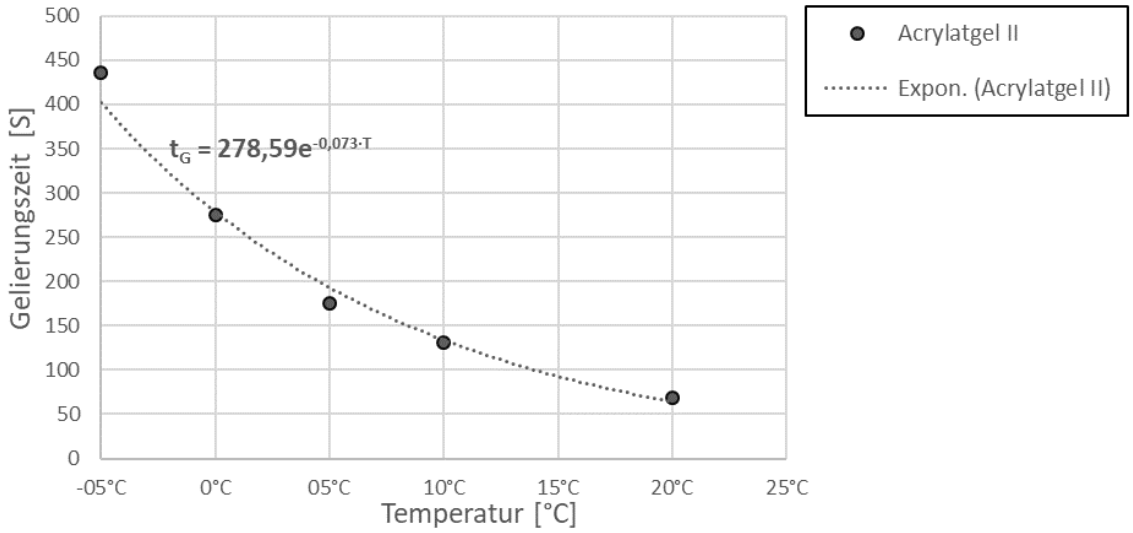


Abb. 1: Beziehung zwischen Gelierungszeit und Temperatur – Acrylatgel II

Die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) zeigen bei diesen Messungen, dass die Materialmenge und Fließgeschwindigkeit den Viskositätsverlauf beeinflussen; diese Einflüsse sind bei Acrylatgel II (Max A.v.M. = 3,3 %) jedoch geringer als bei Acrylatgel I (Max A.v.M. = 8,6 %). Die Messergebnisse mit verschiedenen Schergeschwindigkeiten zeigen eine Zunahme der Gelierungszeit durch die Erhöhung der Schergeschwindigkeit. Die Messungen mit drei Plattenabständen reichen nicht für eine präzise Quantifizierung des Viskositätsverlaufs aus, daher sollten mehrere Plattenabstände untersucht werden.

Tab. 2: Einwirkung der Schergeschwindigkeit und des Plattenabstandes auf die Gelierungszeit – Acrylatgel II

Schergeschwindigkeit						
	μ_0	**a**	**b**	**R-square**	**t_G [s]**	**A.v.M.**
γ'_1= 100 s^{-1}	10,01	3,86E-05	1,18E-01	97,27%	144	-3,3 %
γ'_2= 150 s^{-1}	10,01	4,89E-05	1,14E-01	97,26%	148	-1,1 %
γ'_3= 200 s^{-1}	10,01	9,78E-06	1,18E-01	97,19%	156	4,5 %
Plattenabstand						
d_2 = 0,5 mm	10,01	6,65E-06	1,37E-01	96,78%	137	-2,5 %
d_1 = 0,7 mm	10,01	3,86E-05	1,18E-01	97,27%	144	2,4 %
d_3 = 0,9 mm	10,01	2,97E-04	1,07E-01	93,23%	141	0,1 %

A.2 Polyurethanharz

Die Einweg-Messsysteme wurden für die Ermittlung des Viskositätsverlaufs von Polyurethanharz eingesetzt. Das Einweg-Messsystem besteht aus dem Platte/Platte-Messsystem (PP) mit einem Durchmesser von 25 [mm] und hat eine relativ niedrige Genauigkeit im Vergleich zum Kegel/Platte-Messsystem. Diese niedrige Genauigkeit der Messungen sollte in Kauf genommen werden, da Polyurethanharz am Messsystem klebt. Durch Anpassen der Gleichung (7-1) für die gemessenen Viskositätsdaten wurden die Viskosität-Konstanten [μ_0, a, b] ermittelt (Tab. 3).

Tab. 3: Viskosität-Konstanten und Gelierungszeit – Polyurethan

		μ_0	a	b	R-square	t_G [s]
Temperatur	**-05°C**	0,00	1,95E+03	6,27E-04	99,60%	-
	0°C	796,80	3,57E+02	9,27E-04	99,21%	-
	05°C	0,00	7,28E+02	1,01E-03	99,94%	314
	10°C	162,90	3,47E+02	8,29E-04	99,77%	1063
	20°C	0,00	1,55E+02	1,01E-03	99,95%	1840
	30°C	0,00	1,08E+02	1,28E-03	99,63%	1748
	40°C	0,00	3,53E+01	1,62E-03	99,75%	2062

Wie in Tab. 3 zu erkennen ist, sind die Bestimmtheitsmaße der Regressionen (R-square bzw. R^2) größer als 99 %, was eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der ermittelten Näherungsgleichung beweist. Die Start-Viskosität von Polyurethanharz ist bei einer Temperatur niedriger als 0 °C größer als 100 [cPa.s], d. h. Polyurethanharz ist bei tiefen Temperaturen nur unter Einhaltung besonderer Maßnahmen wie Vorwärmen pumpbar.

Die ermittelten Gelierungszeiten für verschiedene Temperaturen sind in der letzten Spalte der Tab. 3 zusammengefasst. Im Gegensatz zu den Acrylatgelen ist eine Zunahme der Gelierungszeit aufgrund der Temperaturerhöhung mit nur einer Ausnahme bei einer Temperatur von 30 °C festzustellen (siehe Abb. 2).

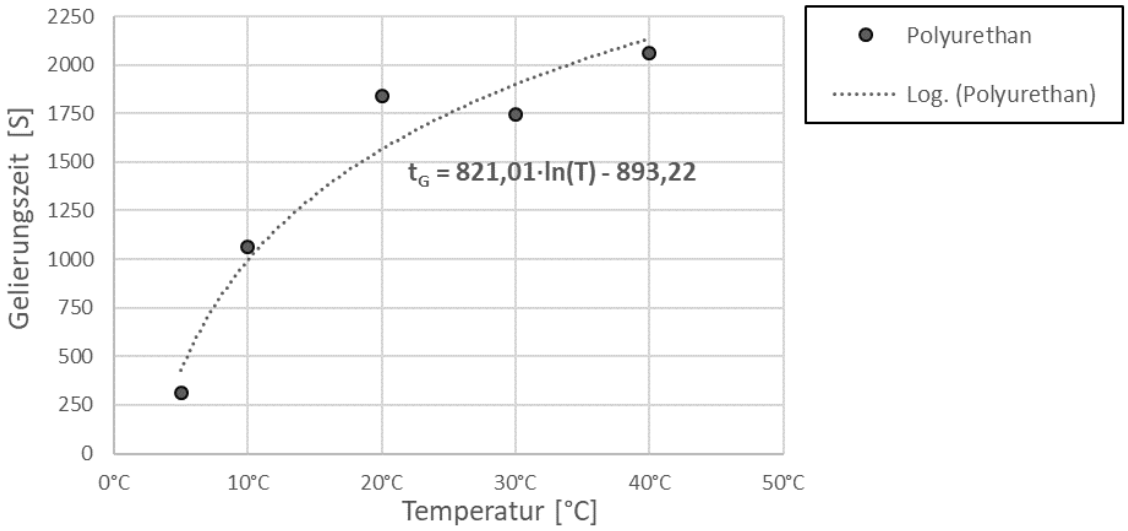


Abb. 2: Beziehung zwischen Gelierungszeit und Temperatur – Polyurethan

Die Ergebnisse der Messungen mit drei verschiedenen Schergeschwindigkeiten und drei Plattenabständen sind in Abb. 4 zusammengefügt. Die ermittelten Abweichungen vom Mittelwert (A.v.M.) zeigen bei diesen Messungen, dass die genannten Parameter den Viskositätsverlauf stark beeinflussen. Diese Einflüsse bei Polyurethanharz (Max. A.v.M. = 13,7 %) sind sogar stärker als bei Acrylatgel I (Max. A.v.M. = 8,6 %). Die Messergebnisse zeigen eine Zunahme der Gelierungszeit durch die Erhöhung der Schergeschwindigkeit bzw. des Plattenabstandes.

Tab. 4: Einwirkung der Schergeschwindigkeit und des Plattenabstandes auf die Gelierungszeit – Polyurethan

Schergeschwindigkeit						
	μ_0	a	b	R-square	t_G [s]	A.v.M.
γ'_1= 100 s^{-1}	0,00	1,55E+02	1,60E-03	99,82%	1165	-5,3 %
γ'_2= 150 s^{-1}	0,00	1,55E+02	1,57E-03	99,50%	1185	-3,6 %
γ'_3= 200 s^{-1}	0,00	1,55E+02	1,39E-03	98,24%	1339	8,9 %
Plattenabstand						
d_2 = 0,5 mm	0,00	1,55E+02	1,74E-03	98,54%	1073	-10,7 %
d_1 = 0,7 mm	0,00	1,55E+02	1,60E-03	99,65%	1165	-3,0 %
d_3 = 0,9 mm	0,00	1,55E+02	1,36E-03	97,42%	1366	13,7 %

Anhang B Betriebsparameter der Injektionspumpe

B.1 2K–Injektionspumpe I

Die 2K-Pumpe I wird mit ca. 250 Liter pro Minute Druckluft betrieben. Der Luftdruck ist mit Hilfe eines vormontierten Druckreglers einstellbar. Durch die Auf- und Abwärtsbewegung der Kolben werden die Injektionskomponenten in den Zulaufschlauch gedrückt. Bei einer Aufwärtsbewegung des Kolbens wird das Saugventil aufgrund der Saugspannung geöffnet und das Injektionsmittel wird in den Pumpenraum gesaugt. Bei der Abwärtsbewegung wird das Saugventil geschlossen und das Injektionsmittel wird durch das Druckventil in den Zulaufschlauch gedrückt.

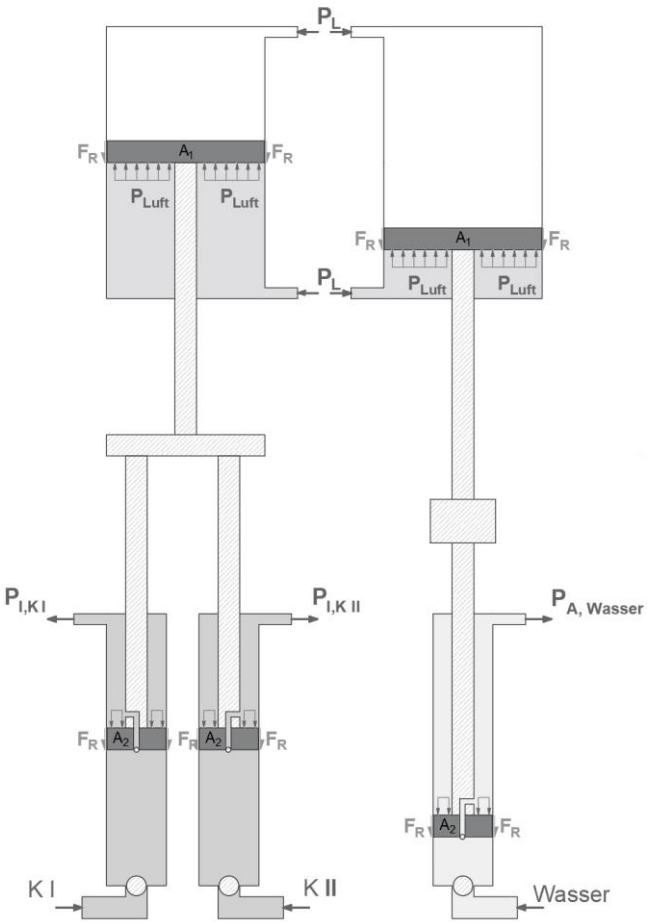


Abb. 3: Wirkende Druckspannungen auf die 2K-Pumpe

Auf die 2-Komponenten-Pumpe wirkende Druckspannungen sind in Abb. 3 dargestellt. Bei der 2K-Pumpe-I können die mechanischen und hydraulischen Druckverluste sowie das Übersetzungsverhältnis mit einem ähnlichen Verfahren wie beim Kartuschengerät ermittelt werden. Die Messergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. 2K-Pumpe-I hat ein Übersetzungsverhältnis von 1:10,2 und die gesamten mechanischen Druckverluste liegen bei 8,53 [Bar].

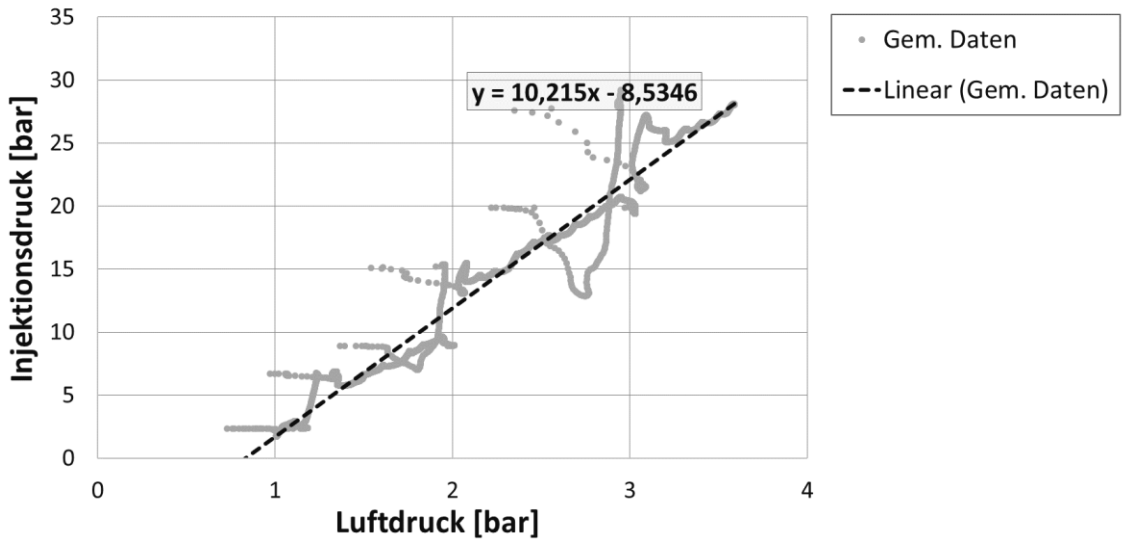


Abb. 4: Drückübersetzungsverhältnis – 2K-Pumpe-I

Die hydraulischen Druckverluste finden im Zylinder und in den Anschlüssen der Pumpe, in den Zulaufschläuchen (hier waren diese 7,5 [m] lang) und im Hochdrucknippel statt. Der Injektionsvorgang wurde sechsmal mit den sechs unterschiedlichen Luftdrücken wiederholt. Die gemessenen Injektions- und Luftdrücke sind in Abb. 5 dargestellt. Anhand der gemessenen Werte wurden die hydraulischen Druckverluste (ΔP_v) ermittelt (siehe Tab. 5).

Tab. 5: Ermittlung des Rauhigkeitswerts der 2K-Pumpe-I

		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6
P_L	[Pa]	93100	112600	150700	199000	237400	279900
$P_I + \Delta P_v$	[Pa]	97557	296749	685941	1179325	1571581	2005719
P_I (Messung)	[Pa]	0	1700	8000	24900	47600	69400
ΔP_v	[Pa]	97557	295049	677941	1154425	1523981	1936319
Q (Messung)	[m³/s]	6,43E-06	1,59E-05	3,05E-05	4,44E-05	5,32E-05	6,15E-05
D_{Rohr}	[m]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
v	[m/s]	0,082	0,203	0,388	0,566	0,678	0,783
R_e	[-]	815,15	2022,02	3868,61	5633,48	6750,88	7796,41
		Laminare Strömung	Laminare Strömung	Turbulente Strömung	Turbulente Strömung	Turbulente Strömung	Turbulente Strömung
$\xi=2\cdot\Delta P/(\rho\cdot v^2)$	[-]	29218,06	14361,17	9014,64	7239,02	6654,67	6339,50
$\bar{\xi}$	[-]		*Hill Equation*: $\bar{\xi} = 1{,}783 \cdot 10^6 - \frac{1{,}777 \cdot 10^6}{1+\left(P_L/_{2{,}423 \cdot 10^4}\right)^{-3{,}488}}$				

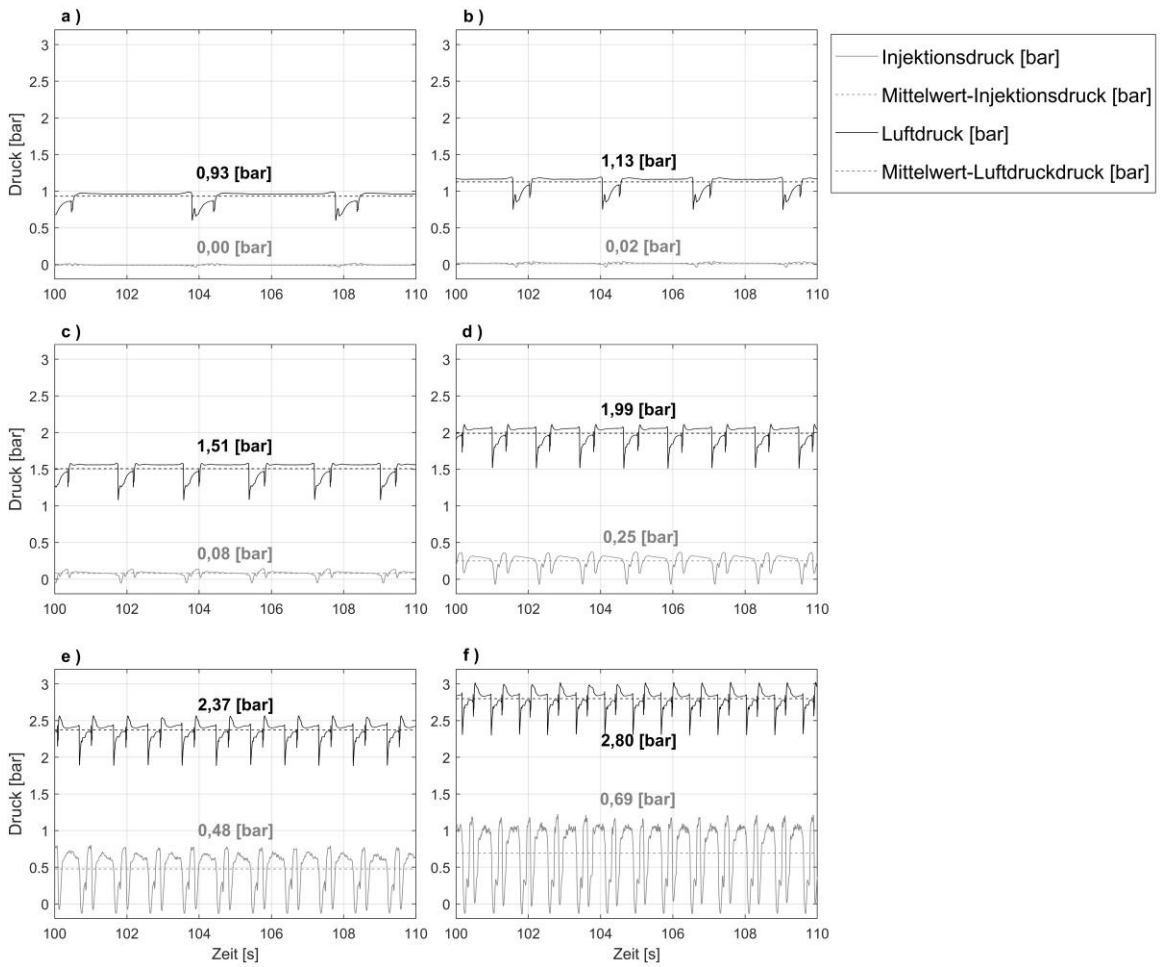


Abb. 5: Injektions- und Luftdruckverlauf in den sechs Messungen für die Kalibrierung der 2K-Pumpe-I

Eine laminare Strömung ist für die Messungen 1 und 2 und eine turbulente Strömung ist für die weiteren Messungen festzustellen. Da die Reynolds-Zahl bei der Messung 2 knapp unter der Grenze liegt, wurde der Einfluss der Rauigkeit auf den Widerstandsbeiwert bei dieser Messung ebenfalls berücksichtigt. Der Widerstandsbeiwert im Hochdrucknippel ist vom Injektions- bzw. Luftdruck abhängig. Je größer der Injektionsdruck ist, desto größer ist die Fließfläche und in der Folge ist der Widerstandsbeiwert kleiner. Mittels der Hill-Gleichung kann der Rauhigkeitswert (ξ) mit einer guten Annäherung ermittelt werden. Der Rauhigkeitswert des Hochdrucknippels ist groß, daher sollte auf den Einsatz eines derartigen Anschlusses möglicherweise verzichtet werden.

Abb. 6: Federbasierter Mechanismus des Hochdrucknippels

Unter Berücksichtigung der genannten Parameter kann der Injektionsdruck für die 2K-Pumpe-I mittels Gleichung (I) ermittelt werden:

$$P_I = 10{,}215 \cdot P_L - \left(1{,}783 \cdot 10^6 - \frac{1{,}777 \cdot 10^6}{1 + \left({P_L}/{2{,}423 \cdot 10^4}\right)^{-3{,}488}}\right) \cdot \rho \cdot {v^2}/{2} - 8{,}5346 * 10^5 + P_\psi - h_w \cdot \rho_w \cdot g \qquad \text{(I)}$$

B.2 2K–Injektionspumpe II

Diese Pumpe ist eine leistungsstärkere Version der 2K-Pumpe-I und beide Varianten funktionieren prinzipiell gleich. Die 2K-Pumpe-II wird mit ca. 450 Liter pro Minute Druckluft betrieben. Der Injektionsdruck für die 2K-Pumpe-II lässt sich aus der folgenden Gleichung erhalten:

$$P_I = 36{,}471 \cdot P_L - 3{,}443 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot {v^2}/{2} - 8{,}6997 \cdot 10^5 + P_\psi - h_w \cdot \rho_w \cdot g \qquad \text{(II)}$$

Anhang C Time-of-Flight-Kamera (ToF)

Die ToF-Kamera ist ein relativ neuer Sensor, der dreidimensionale Bilder sowie Videos mit einer hohen Bildrate macht. In dieser Kamera werden die Entfernungen für jeden Pixel des Bildes durch Laser- oder Lichtimpulse berechnet (Abb. 7). Die ToF-Kamera bringt in zahlreichen wissenschaftlichen Bereichen großes Potenzial für Messung und Automatisierung. [63]

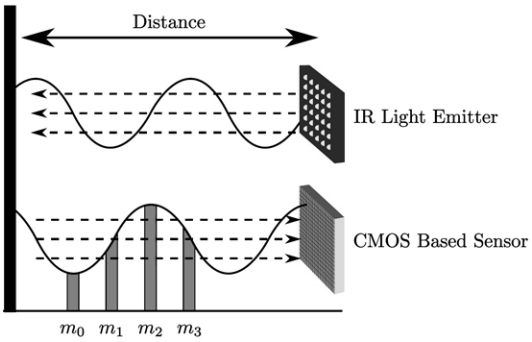


Abb. 7: Entfernungsmessung mit der Phasenverschiebung (Foix 2011, S. 1917)

Für die Messungen auf der Baustelle wurde das Entwicklungs-Kit „PMD CamBoard pico flexx“ verwendet. Diese ToF-Kamera kann Entfernungen zwischen 0,1 und 4 [m] messen. Bei den Entfernungen größer als 1 [m] beträgt der Messfehler weniger als 1 %.

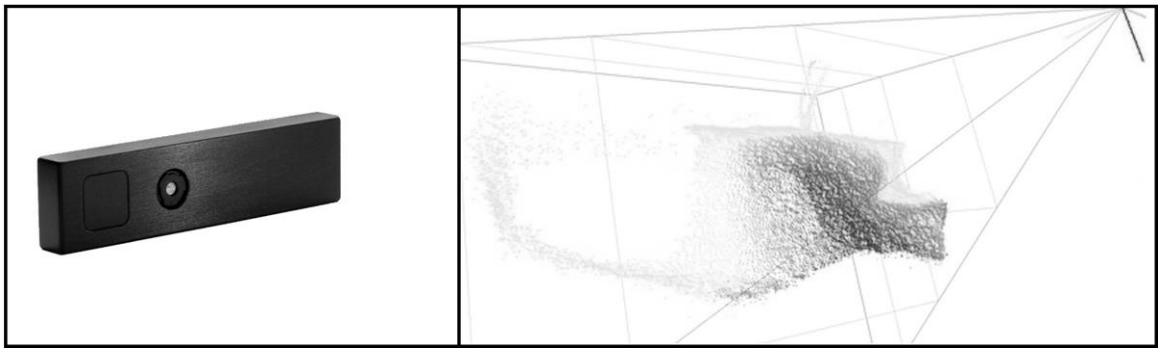


Abb. 8: Entwicklungs-Kit pmd CamBoard pico flexx (links); Aufnahme mit einer ToF-Kamera (rechts)

Rechts in Abb. 8 ist eine Aufnahme mit der ToF-Kamera zu sehen. Jeder Aufnahmeframe beinhaltet eine 3D-Punktwolke mit x-, y- und z-Werten. Mehrere Frames bzw. Aufnahmen aus den verschiedenen Aufnahmepunkten und -winkeln müssen miteinander kombiniert werden, um einen vollständigen 3D-Körper zu erhalten.

Anhang D Numerische Integrationsmethode

Bei der numerischen Integration werden numerische Methoden verwendet, um die Berechnungszeit zu reduzieren bzw. um komplexe Funktionen zu integrieren. Die Integrationsfläche wird in mehrere kleine dreieckige, rechteckige und/oder trapezförmige Teilflächen zerlegt. Bei der Herleitung der Integralrechnung wird die Größe der Teilflächen summiert.

D.1 Trapezregel

Die Trapezregel zählt zu den am häufigsten benutzten numerischen Annäherungsmethoden. Wie in Abb. 9 gezeigt, kann die Fläche unter der f(t)-Kurve über die Zeit t_0 und t_i mit Gleichung (III) berechnet werden. Je kleiner der Zeitschritt eingesetzt wird, desto genauer sind die Ergebnisse.

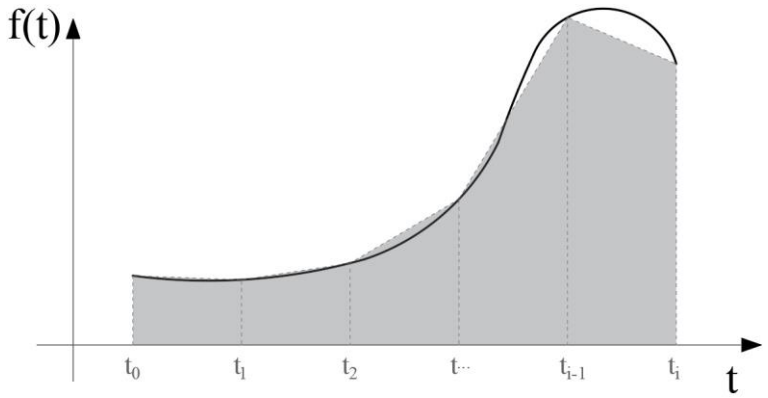


Abb. 9: Trapezfläche als Näherung für das Integral – Trapezregel

$$\int_{t_0}^{t_i} f(t)\,dt = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(f(t_0) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{i-1} f(t_n) + f(t_i) \right) \qquad \text{(III)}$$

D.2 Mittelpunktregel (Verfeinerung der Trapezregel)

Bei diesem Verfahren wird ebenfalls die Zeitachse in kleine Zeitschritte unterteilt. Je kürzer die ausgewählten Zeitintervalle sind, desto höher ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Im Gegensatz zur Trapezregel wird bei dieser Methode die Fläche unter dem Diagramm in rechteckige Abschnitte unterteilt (Abb. 10). Die Mittelpunktwerte werden zur Berechnung der Fläche unter dem Diagramm verwendet (Gleichung (IV)).

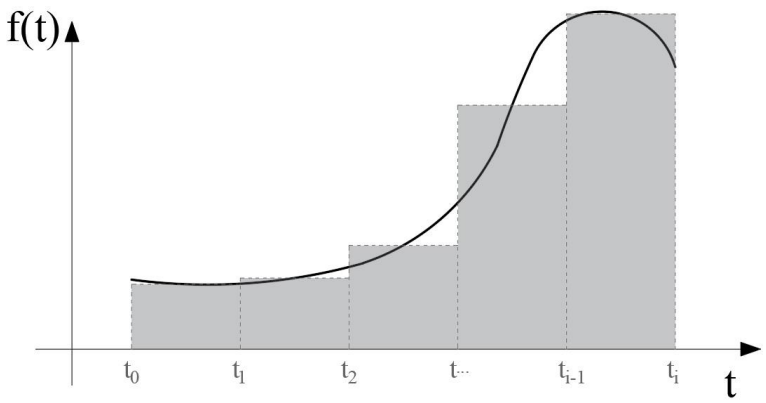


Abb. 10: Rechteckfläche als Näherung für das Integral – Mittelpunktregel

$$\int_{t_0}^{t_i} f(t)\,dt = \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{i} f((t_{n-1} + t_n)/2) \right) \tag{IV}$$

Anhang E Validierung des entwickelten Verfahrens zur Simulation der einphasigen Strömung

E.1 Acrylatgel II

Die gemessenen und ermittelten Injektionsreichweiten von Acrylatgel II werden in Abb. 11 in Abhängigkeit vom Luftdruck einander gegenübergestellt. Acrylatgel II lässt sich in Kies mit einem Luftdruck von 2 [Bar] vollständig injizieren. Der mit Schluff gefüllte Zylinder lässt sich unter einem Luftdruck von 2 [Bar] bis maximal 1,2 [cm] injizieren. Bei einer Erhöhung des Injektionsdrucks ist eine Verdrängung der Bodenpartikel festzustellen. Wie in Abb. 11 zu erkennen ist, lässt sich die Reichweite von Acrylatgel II im Zylinder mit einer guten Annäherung mittels des entwickelten Verfahrens ermitteln.

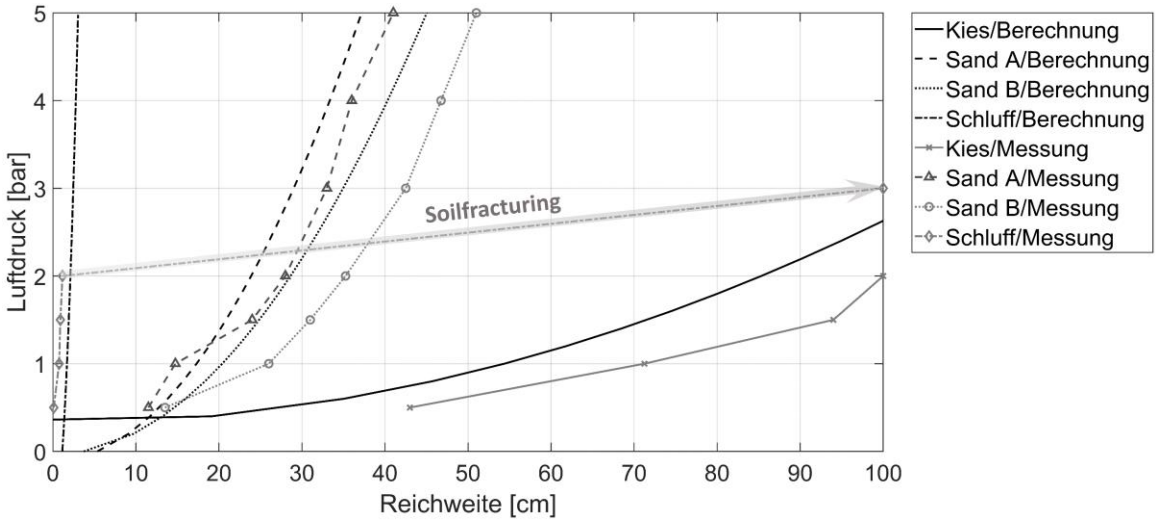


Abb. 11: Validierung des entwickelten Verfahrens (Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Reichweiten von Acrylatgel II)

E.2 Polyurethanharz

Die gemessenen und ermittelten Injektionsreichweiten von Polyurethanharz werden in Abb. 12 in Abhängigkeit vom Luftdruck einander gegenübergestellt. Polyurethanharz lässt sich in Kies mit einem Luftdruck von 1 [Bar] vollständig injizieren. Der mit Schluff gefüllte Zylinder lässt sich unter einem Luftdruck von 1,5 [Bar] bis maximal 2,8 [cm] injizieren und bei der Erhöhung des Injektionsdrucks war eine Verdrängung der Bodenpartikel festzustellen. Die Injektionsreichweite von Polyurethanharz im Versuchszylinder kann mit einer guten Annährung ermittelt werden.

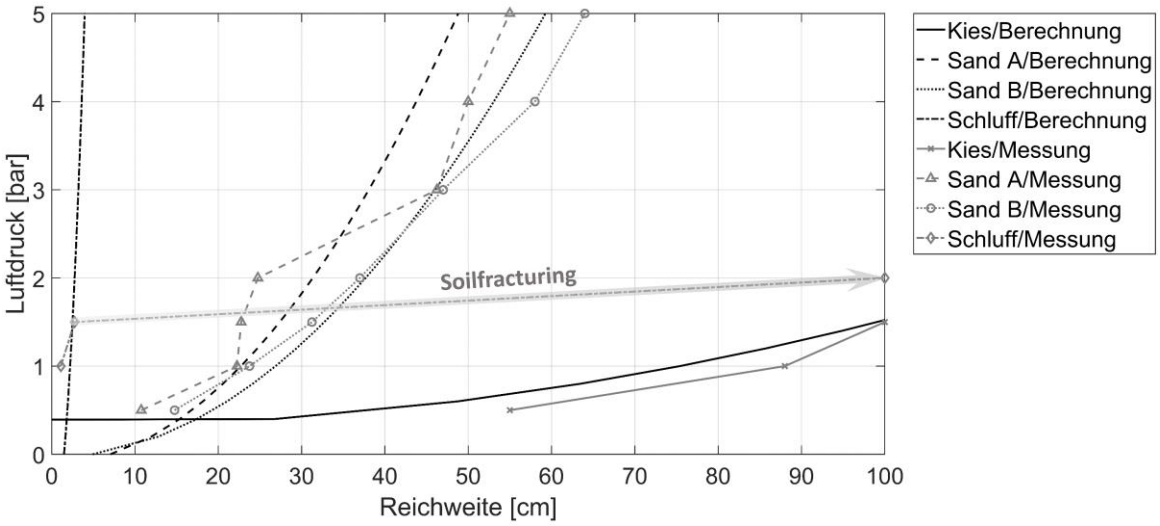
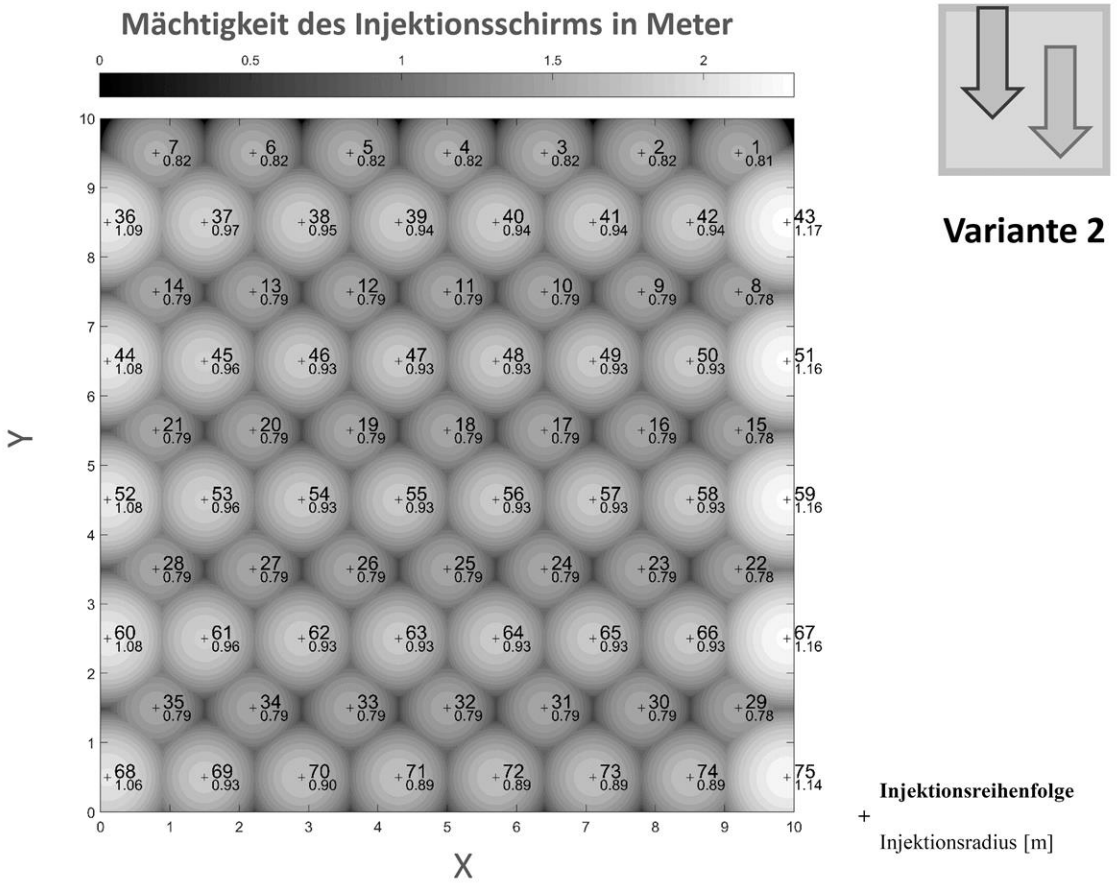
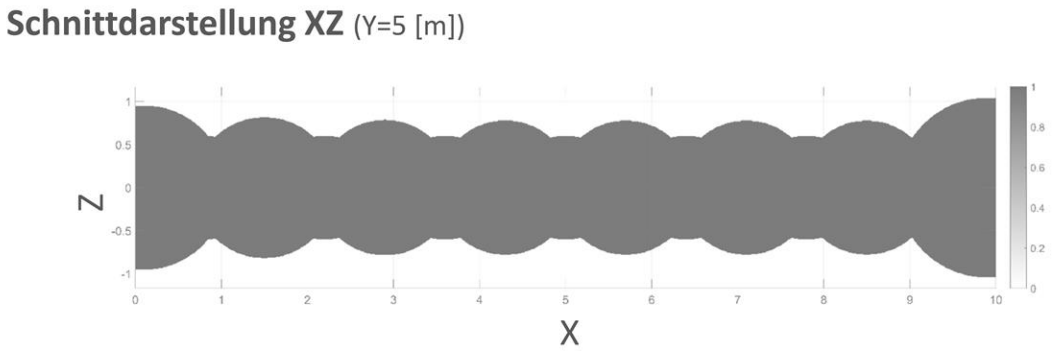


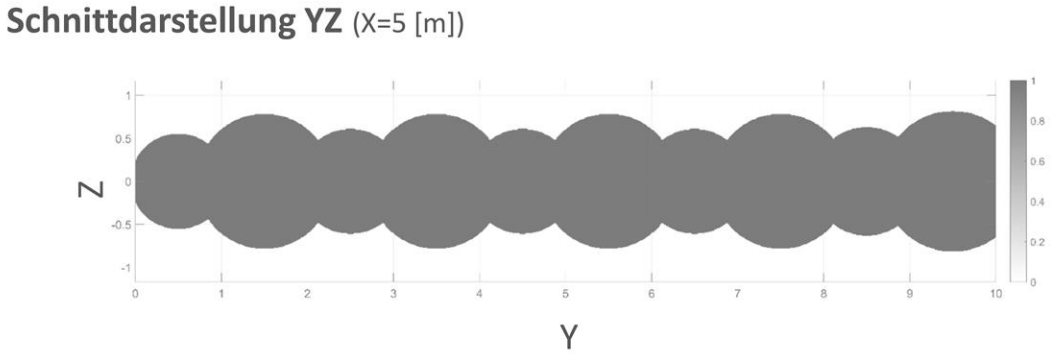
Abb. 12: Validierung des entwickelten Verfahrens (Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Reichweiten von Polyurethanharz)

Anhang F Einwirkung der Injektionsreihenfolge

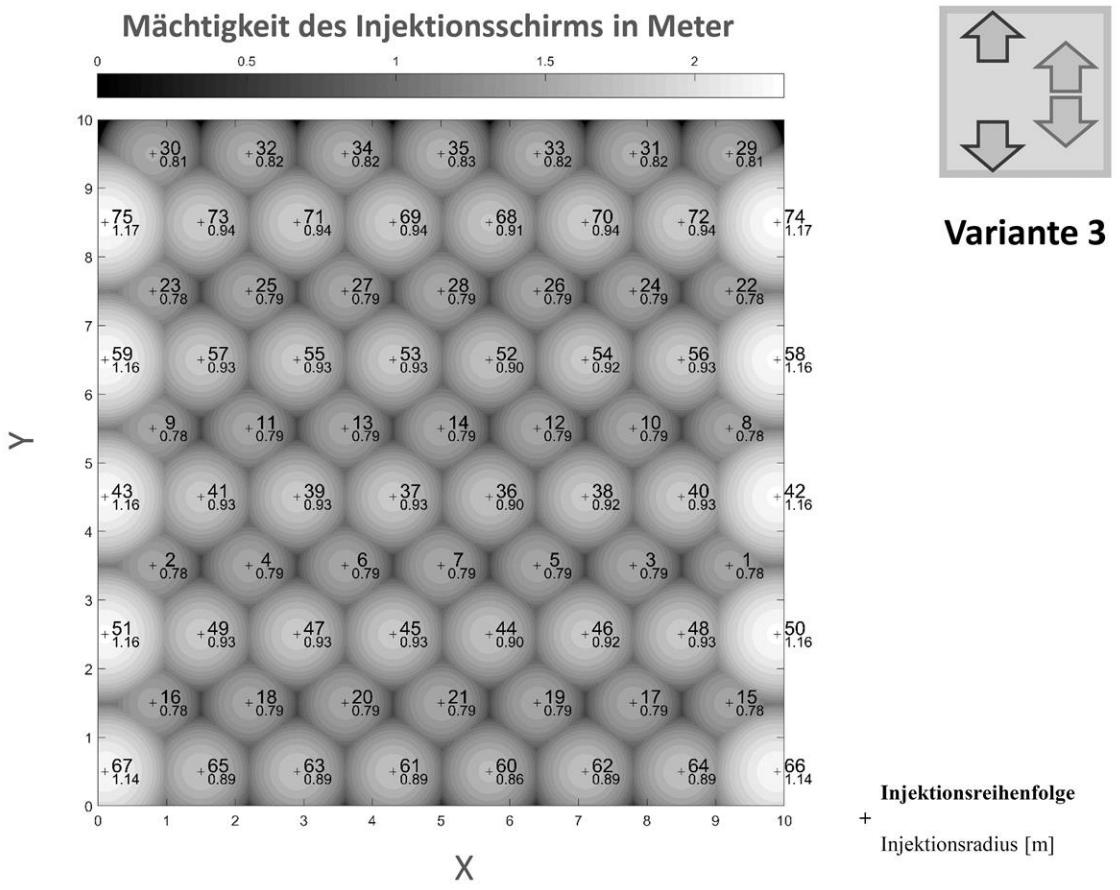
F.1 Variante 2 – Überspringend linear



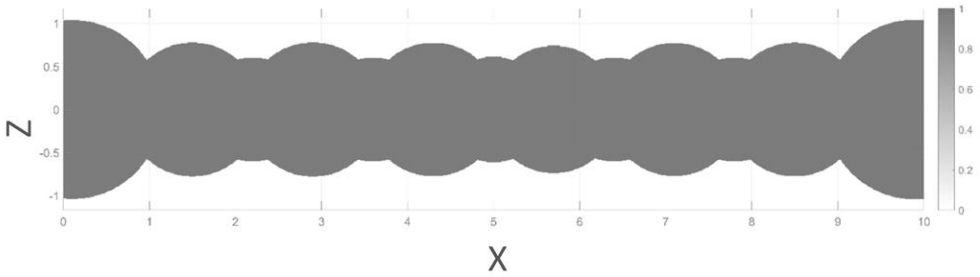




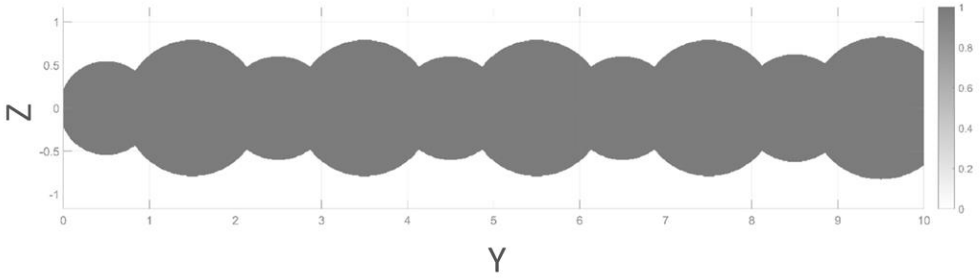
F.2 Variante 3 – Abwechselnd Zentrifugal-Zentripetal



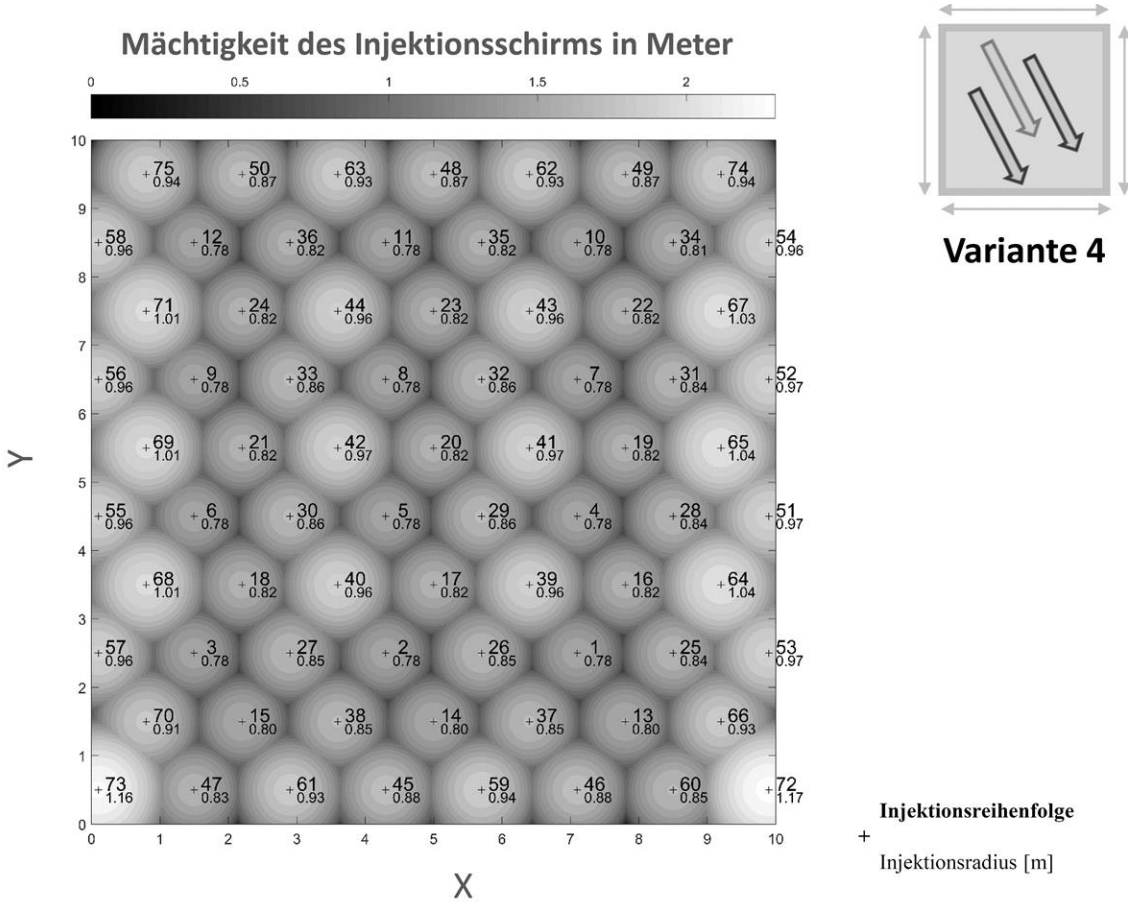
Schnittdarstellung XZ (Y=5 [m])



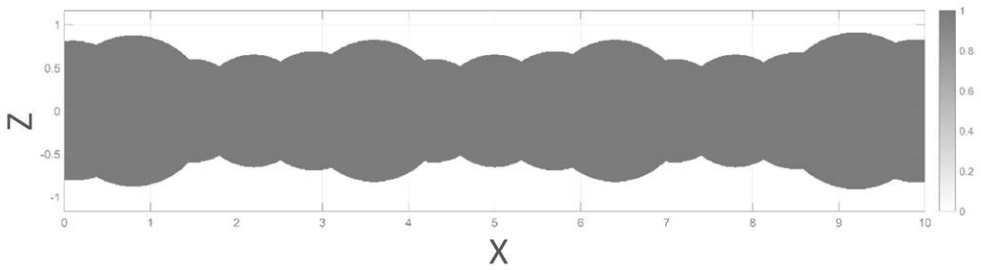
Schnittdarstellung YZ (X=5 [m])



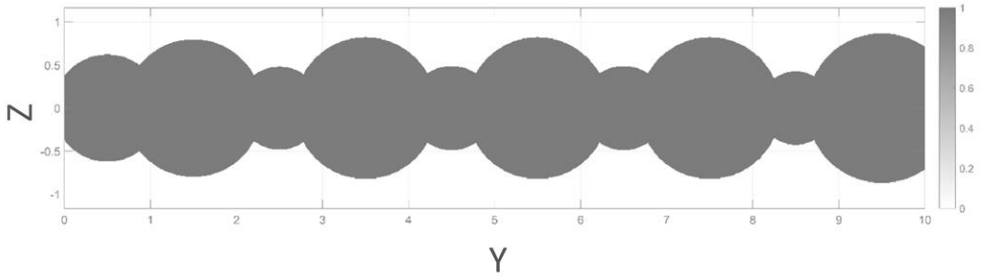
F.3 Variante 4 – Diagonal mit Rahmen



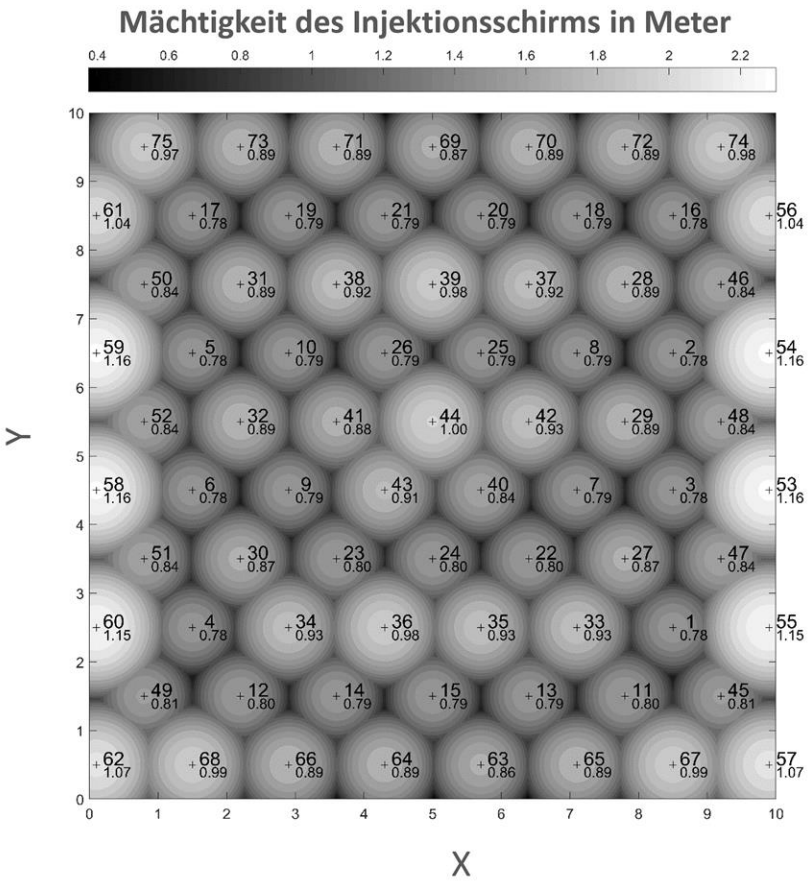
Schnittdarstellung XZ (Y=5 [m])

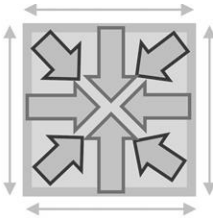


Schnittdarstellung YZ (X=5 [m])



F.4 Variante 5 – Überspringend zentripetal mit Rahmen



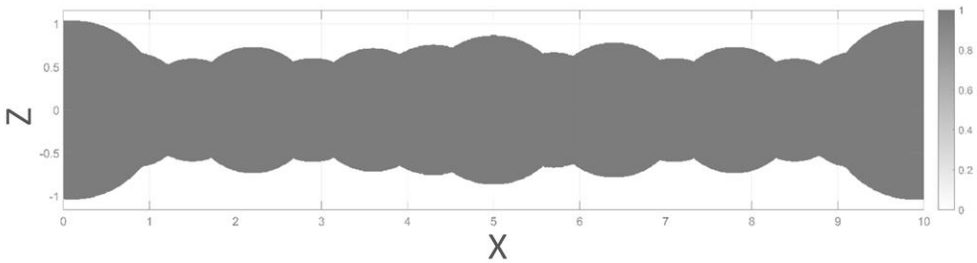


Variante 5

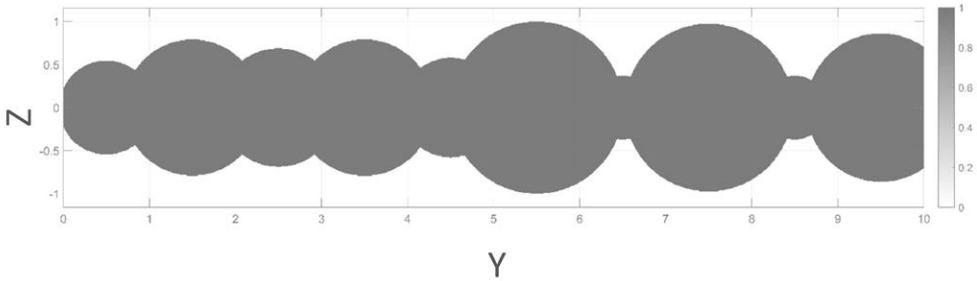
Injektionsreihenfolge

+ Injektionsradius [m]

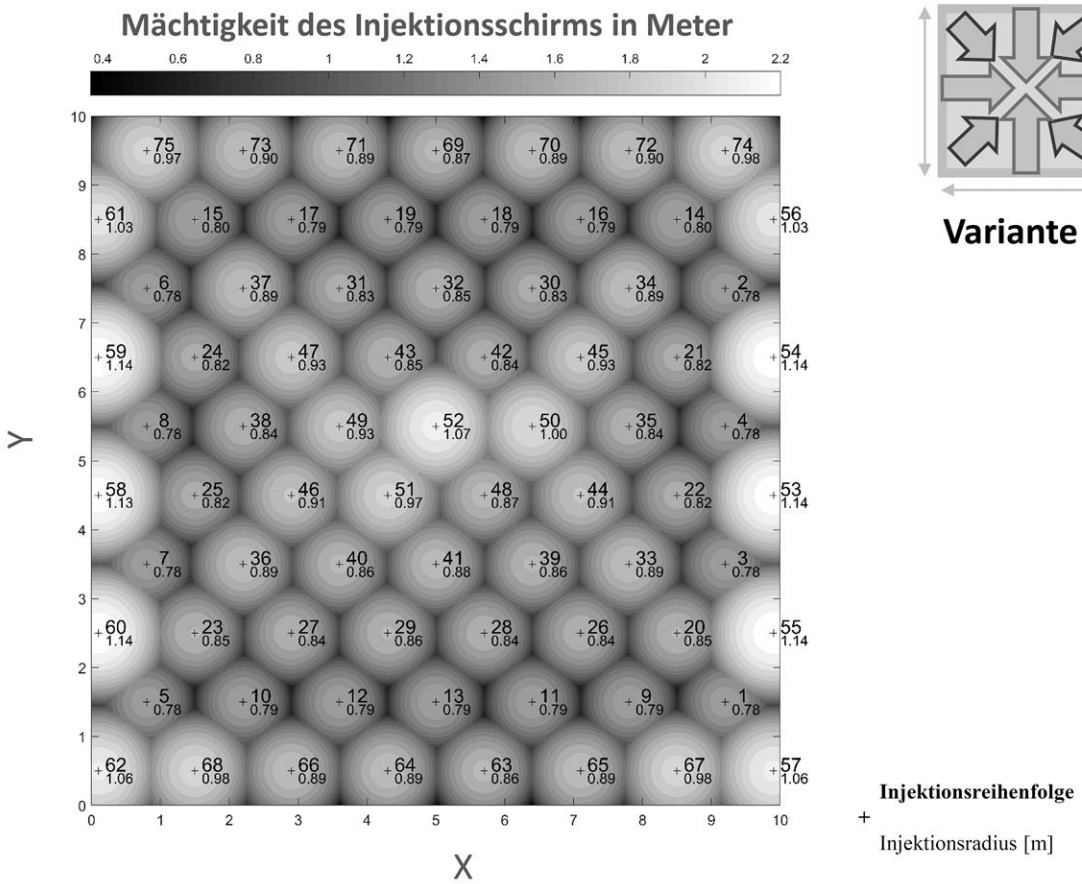
Schnittdarstellung XZ (Y=5 [m])

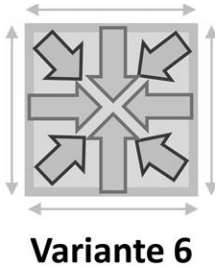


Schnittdarstellung YZ (X=5 [m])

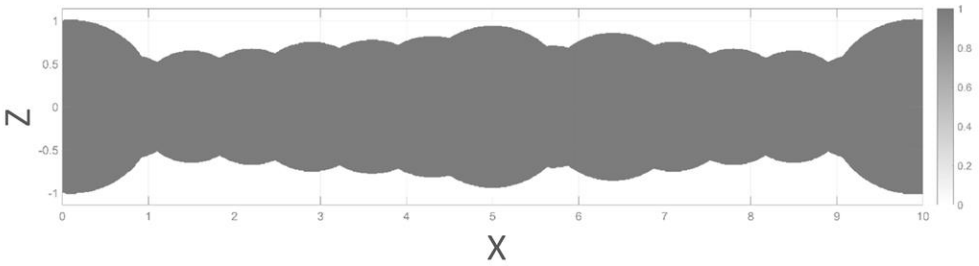
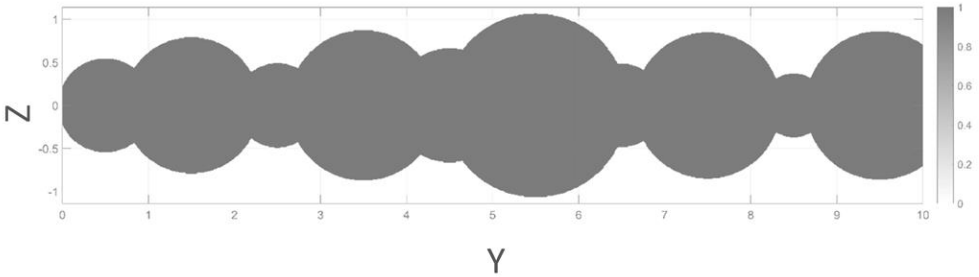


F.5 Variante 6 – Zentripetal mit Rahmen





Schnittdarstellung XZ (Y=5 [m])



Schnittdarstellung YZ (X=5 [m])