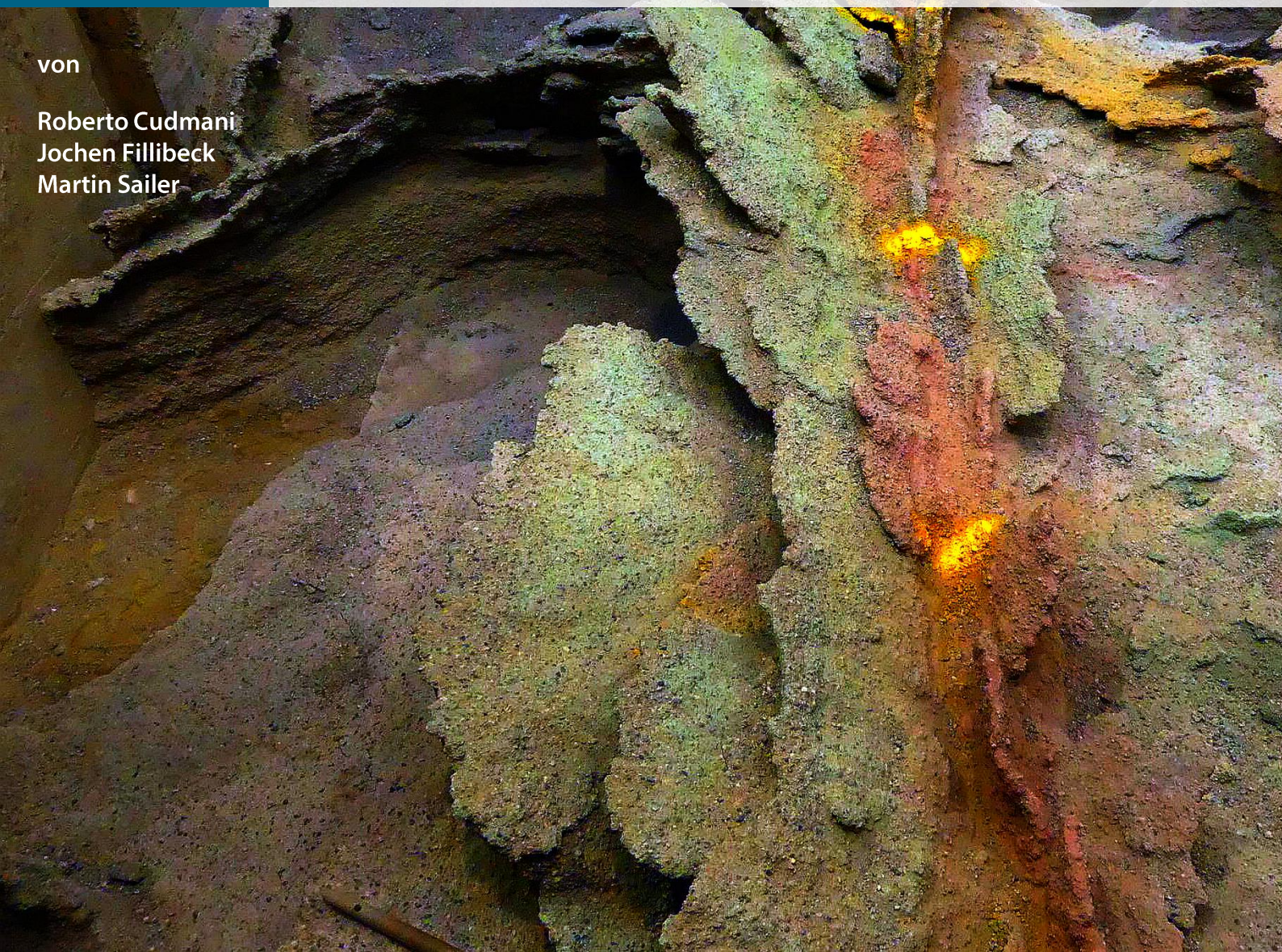
ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

BBSR-
Online-Publikation
10/2022

Ausführung von Hebungsinjektionen unter besonderen Randbedingungen



von

Roberto Cudmani
Jochen Fillibeck
Martin Sailer

Ausführung von Hebungsinjektionen unter besonderen Randbedingungen

Experimentelle Versuche und numerische Simulation

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.66
Projektlaufzeit: 12.2017–09.2020

IMPRESSUM

Herausgeber
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer
Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen"
zb@bbr.bund.de

Autoren
Zentrum Geotechnik, Technische Universität München
Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani (Antragsteller)
roberto.cudmani@tum.de

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Fillibeck (Projektleitung)
jochen.fillibeck@tum.de

Martin Sailer, M. Sc. (Projektbearbeiter)
martin.sailer@tum.de

Stand
Januar 2022

Gestaltung
Martin Sailer

Bildnachweis
Titelbild: Martin Sailer
Martin Sailer: alle Bilder und Abbildungen sofern nicht anders angegeben; Anna Thomas: S. 14, 19; Oliver Mück-Thum: S. 45

Vervielfältigung
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise
Cudmani, Roberto; Fillibeck, Jochen; Sailer, Martin: Ausführung von Hebungsinjektionen unter besonderen Randbedingungen: Experimentelle Versuche und numerische Simulation. BBSR-Online-Publikation 10/2022, Bonn, Juni 2022.

ISSN 1868-0097 Bonn 2022

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **8**

1 Einleitung **10**

1.1 Anlass und Forschungsziele 10

1.2 Das Verfahren der Hebungsinjektionen 12

2 Verwendete Materialien **15**

2.1 Böden 15

2.2 Suspensionen und deren Feststoffe 16

2.2.1 Allgemeines 16

2.2.2 Feststoffe 16

2.2.3 Suspensionen 18

3 Die Bodenfilterpresse – Versuchsgerät zur Eignungsprüfung von Suspensionen **21**

3.1 Allgemeines – Anforderungen an das Versuchsgerät 21

3.2 Filtrations- und eindimensionale Eindringversuche 22

3.3 Prototyp der Bodenfilterpresse 23

3.3.1 Allgemeines 23

3.3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 23

3.3.3 Erste Testreihe 26

3.3.3.1 Übersicht 26

3.3.3.2 Versuchsergebnisse 26

3.3.4 Optimierung des Prototyps 28

3.3.4.1 Übersicht 28

3.3.4.2 Hinweise zur Versuchsauswertung 29

3.3.4.3 Einfluss der Lagerungsdichte des Bodens 30

3.3.4.4 Reproduzierbarkeit der Versuche und erforderliche Optimierungen des Prototyps 31

3.4 Die finale Bodenfilterpresse – Versuchsbeschreibung 33

3.4.1 Allgemeines 33

3.4.2 Versuchsaufbau 34

3.4.3 Verbesserungen gegenüber dem Prototyp 35

3.4.4 Versuchsdurchführung 36

3.4.5 Hinweise zur Versuchsauswertung 37

3.5 Versuche mit der Bodenfilterpresse 39

3.5.1 Übersicht 39

3.5.2 Reproduzierbarkeit der Versuche 40

3.5.3 Variation der Injektionsparameter (Injektionsdruck und Injektionszeit) 42

3.5.4 Eindringverhalten bei unterschiedlichen grobkörnigen Böden 43

3.5.5 Eindringverhalten bei verschiedenen Feststoffzusammensetzungen der Suspension 44
3.5.6 Variation des *w/f*-Werts der Suspension 46
3.6 Zusammenfassung und Fazit 47
4 Großversuche zur Ausführung von Hebungsinjektionen 49
4.1 Ziel der Untersuchungen und Anforderungen an den Versuchsaufbau 49
4.2 Allgemeine Angaben zu den Großversuchen 51
4.2.1 Versuchsaufbau 51
4.2.2 Verformungsmessungen im 1. Großversuch – Seilzug-Wegaufnehmer 55
4.2.3 Verformungsmessungen im 2. Großversuch – Schlauchwaagenmesssystem 57
4.2.4 Verformungsmessungen im 2. Großversuch – hydrostatische Linienvermessung 59
4.2.5 Freilegen der Injektionskörper 61
4.2.6 Digitale Bildbearbeitung 62
4.3 1. Großversuch 63
4.3.1 Allgemeines 63
4.3.2 Versuchsdurchführung 63
4.3.3 Auswertung der Injektionsdaten und Verformungsmessungen 66
4.3.3.1 Injektionsdaten 66
4.3.3.2 Verformungsmessungen 68
4.3.4 Injektionskörper des 1. Großversuchs 71
4.3.4.1 Allgemeine Hinweise 71
4.3.4.2 Übersicht 71
4.3.4.3 Injektionskörperstrukturen am Rohr 1 74
4.3.4.4 Injektionskörperstrukturen am Rohr 2 76
4.3.4.5 Injektionskörperstrukturen am Rohr 3 78
4.3.4.6 Zerteilen der Injektionskörper und Erkenntnisse aus dem 1. Großversuch 81
4.4 2. Großversuch 84
4.4.1 Allgemeines 84
4.4.2 Versuchsdurchführung 84
4.4.3 Auswertung der Injektionsdaten und Verformungsmessungen 86
4.4.3.1 Injektionsdaten 86
4.4.3.2 Verformungsmessungen 88
4.4.3.3 Effizienz der Hebungsinjektionen 89
4.4.4 Injektionskörper des 2. Großversuchs 90
4.4.4.1 Allgemeine Hinweise 90
4.4.4.2 Übersicht 91
4.4.4.3 Injektionskörperstrukturen am Rohr 1 92
4.4.4.4 Injektionskörperstrukturen am Rohr 2 93

4.4.4.5 Injektionskörperstrukturen am Rohr 3 94
4.4.4.6 Zerteilen der Injektionskörper 95
4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den beiden Großversuchen 97
5 Numerische Berechnungen 100
5.1 Allgemeines 100
5.2 Modellierungskonzept für Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden 100
5.2.1 Anwendungsvoraussetzungen 100
5.2.2 Modellierungskonzept 101
5.2.3 Ausgewertete Kenngrößen 103
5.3 Verwendete Stoffmodelle 104
5.3.1 Allgemeine Hinweise 104
5.3.2 Das hypoplastische Stoffmodell 105
5.4 Finite-Elemente-Berechnungen zum 2. Großversuch 107
5.4.1 Modellgeometrie 107
5.4.2 Materialparameter 109
5.4.3 Modellierung der Hebungsinjektion 110
5.4.3.1 Allgemeine Hinweise 110
5.4.3.2 Erforderliche Anzahl aktiver Injektionselemente 110
5.4.3.3 Ermittlung des Anpassungsfaktors η_{2D} 111
5.4.3.4 Ermittlung des Anpassungsfaktors η_{sukz} 113
5.4.3.5 Vertikale Volumendehnung der Injektionselemente 116
5.4.4 Berechnungsablauf 116
5.4.5 Durchgeführte Berechnungen 118
5.4.6 Auswertung der Berechnungsergebnisse 119
5.5 Anwendungsbeispiel - Hebungsinjektionen am Probefeld Oberau 123
5.5.1 Allgemeine Hinweise 123
5.5.2 Allgemeine Angaben zum Projekt Ortsumfahrung Oberau 123
5.5.3 Geologische Verhältnisse 123
5.5.4 Angaben zum Probefeld 124
5.5.5 Finite-Elemente-Berechnungen zum Probefeld Oberau 127
5.5.5.1 Modellgeometrie 127
5.5.5.2 Modellierung der Hebungsinjektionen 129
5.5.5.3 Materialparameter 131
5.5.5.4 Berechnungsablauf 133
5.5.5.5 Durchgeführte Berechnungen 134
5.5.5.6 Auswertung der Berechnungsergebnisse 134
5.6 Zusammenfassung und Bewertung der FE-Berechnungen 140
5.7 Empfehlungen für die projektspezifische Modellierung von Hebungsinjektionsmaßnahmen 142

6 Zusammenfassung und Ausblick **145**
Literaturverzeichnis **148**
Abbildungsverzeichnis **152**
Tabellenverzeichnis **156**
Anhang **158**

Kurzfassung

Mithilfe des Spezialtiefbauverfahrens der Hebungsinjektionen können Gebäude vor schädlichen Setzungen geschützt oder deren Höhenlage nach aufgetretenen Setzungen korrigiert werden. Hierzu wird unter dem betroffenen Bauwerk an einer Vielzahl an Injektionspunkten eine zementhaltige Feststoffsuspension injiziert. Durch wiederholtes Injizieren wird der Boden lokal aufgesprengt und verdrängt. Es entstehen mit Suspension gefüllte Risse, die eine Anhebung des darüber liegenden Bauwerks bewirken. Wesentliche Kostenfaktoren sind die benötigten Injektionsmengen und die erforderliche Bauzeit.

Allerdings ist bei der Ausführung in grobkörnigen Böden unklar, wie groß die Suspensionsverluste sind (Verfüllen der Porenräume des Bodens, Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension) und welche Injektionskörperstrukturen entstehen. Diese beiden Faktoren wirken sich jedoch maßgeblich auf die Größe der Hebungen und damit auf die erforderliche Bauzeit aus. Darüber hinaus ist ohne Kenntnisse über die entstehenden Injektionskörperstrukturen und den daraus resultierenden hebungswirksamen Bodenverformungen auch mit Hilfe Finiter-Elemente-Berechnungen eine realistische Prognose der an der Geländeoberfläche zu erwartenden Hebungen nicht möglich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein einfacher Laborversuch, die sogenannte Bodenfilterpresse, entwickelt anhand dessen die Eignung einer Suspensionsmischung für die Anwendung bei Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden beurteilt werden kann. Eigene Versuche mit der Bodenfilterpresse bei unterschiedlichen Boden-Suspensions-Kombinationen zeigten, dass durch die Reduzierung des Wassers/Feststoff-Werts der Suspension die Porenraumverfüllung und das Ausfiltern deutlich reduziert werden können. Welche Feststoffe in der Suspension verwendet wurden, wirkte sich hingegen kaum auf die gemessenen Suspensionsverluste aus.

Um unter realistischen Bedingungen zu untersuchen, welche Injektionskörperstrukturen bei der Ausführung von Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden entstehen und wie diese im Rahmen Finiter-Elemente-Berechnungen berücksichtigt werden können, wurden in der Versuchsgrube am Zentrum Geotechnik zwei Großversuche durchgeführt. Im zweiten, dem größeren der beiden Versuche, wurden 15 Injektionsdurchgänge ausgeführt. Die an der Geländeoberfläche aufgetretenen Hebungen wurden flächendeckend und kontinuierlich durch zwei hochwertige redundante Messsysteme überwacht. Nach Abschluss der Injektionstätigkeiten wurden die ausgehärteten Injektionskörperstrukturen vollständig freigelegt, dokumentiert und analysiert.

In den Großversuchen zeigte sich, dass infolge der Hebungsinjektionen ca. 0,5–1 cm dicke, plattenförmige Injektionsrisse entstehen. Neue Injektionsrisse folgten vorzugsweise bestehenden Rissstrukturen. Dadurch bildeten sich nach mehreren Injektionsdurchgängen großflächige Injektionskörperstrukturen aus.

Basierend auf den Erkenntnissen der freigelegten Injektionskörperstrukturen wurde ein Konzept zur Modellierung von Hebungsinjektionen mit der Finite-Elemente-Methode erarbeitet. Durch die Nachrechnung des 2. Großversuchs konnte der Einfluss verschiedener Berechnungsannahmen auf die ermittelten Oberflächenhebungen untersucht werden. Insbesondere die Dicke der in situ entstehenden Injektionsrisse, welche in den Finite-Elemente-Berechnungen als Eingangsgröße verwendet wird, wirkte sich signifikant auf die berechneten Oberflächenhebungen aus.

Nachdem eine gute Übereinstimmung mit den im Großversuch gemessenen Oberflächenhebungen erreicht werden konnte, wurde das Modellierungskonzept auch für die Nachrechnung der bei einer Baumaßnahme durch Hebungsinjektionen erzeugten Hebungen verwendet. Auch in diesem Fall wurde eine aus praktischer Sicht zufriedenstellende Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Verformung erzielt. Somit konnten die für das Modellierungskonzept getroffenen Annahmen auch unter in situ Bedingungen bestätigt werden.

1 Einleitung

1.1 Anlass und Forschungsziele

Hintergrund: Durch die zunehmende Verlagerung der Straßen- und Schienenwege auf unterirdische Verkehrsnetze ist der Bau neuer Tunnel und unterirdischer Bauwerke erforderlich. Herstellungsbedingt ist der Bau von Tunnelbauwerken im Lockergestein mit dem Auftreten von Setzungen an der Geländeoberfläche oder an der dort befindlichen Bebauung verbunden. Je nach Form der Setzungsmulde und Sensibilität des betroffenen Bauwerks, können die auftretenden Setzungen zu Gebäudeschäden führen. Gerade Baumaßnahmen im Bereich besiedelter Gebiete stehen im Fokus der Öffentlichkeit und bieten damit erhebliches Konfliktpotential. Daher ist es erforderlich die auftretenden Setzungen soweit wie möglich auf ein verträgliches Maß zu reduzieren. Mit Hilfe des Spezialtiefbauverfahrens der Hebungsinjektionen ist es möglich, Bauwerke nach aufgetretenen Setzungen wieder in ihre ursprüngliche Lage rückzustellen und somit die betroffenen Bauwerke aktiv vor schädlichen Setzungen zu schützen.

Hierzu werden unter dem Gebäude mehrere Injektionsrohre (Manschettenrohre) installiert. Durch das anschließende wiederholte Injizieren einer aushärtenden Suspension wird der Boden lokal aufgerissen und verdrängt. Dabei entstehen mit Suspension gefüllte Injektionsrisse die eine Anhebung des Bauwerks bewirken. Als Suspension werden Feststoffsuspensionen aus Zement und weiteren Zuschlagstoffen verwendet. Eine Kenngröße zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Hebungsinjektionsmaßnahme ist die Effizienz der Hebungsinjektion. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen erreichtem Hebungsvolumen und injiziertem Suspensionsvolumen.

Problemstellung: Bislang erfolgt die Planung und Ausführung von Hebungsinjektionen größtenteils anhand von Erfahrungswerten. Die Übertragung bisheriger Erkenntnisse auf andere Baumaßnahmen ist nur sehr bedingt möglich. Durch den Einsatz von Finite-Elemente-Berechnungen (FE-Berechnungen) konnte zwar die Planung von Hebungsinjektionen verbessert werden, jedoch sind für die Modellierung von Hebungsinjektionen stets gewisse Vereinfachungen erforderlich und die Modelle müssen im Zuge der Bauausführung nochmals angepasst werden. Mögliche Ansätze zur Modellierung von Hebungsinjektionen werden u.a. von Soga et al. (1999), Wawryzniak (2002), Kummerer (2003) sowie Wisser et al. (2005) vorgestellt.

Um eine verlässlichere Prognose des Hebungsvorgangs und der mit der Maßnahme verbundenen Kosten zu ermöglichen, sind Kenntnisse über den Injektionsprozess und die hier auftretenden Mechanismen erforderlich. In diesem Zusammenhang ist grundsätzlich zwischen der Ausführung von Hebungsinjektionen in feinkörnigen (undräniertes Bodenverhalten) und grobkörnigen Böden (dräniertes Bodenverhalten) zu unterscheiden.

Insbesondere – und hier setzt das Forschungsprojekt an – liegen nur wenige Untersuchungen zu Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden vor. Diese Untersuchungen beschränken sich zumeist auf die Durchführung einer einzelnen Injektion im Rahmen kleinmaßstäblicher

Injektionsversuche (Gafar et al., 2008, Bezuijen & van Tol, 2012, Wang et al., 2016). Der Einfluss der umhüllenden Dämmerschicht um das Manschettenrohr (Kapitel 1.2) wurde dabei nur in wenigen Versuchen berücksichtigt. Wie Untersuchungen von Bezuijen (2010) zeigten, wirkt sich dies jedoch signifikant auf die entstehenden Rissstrukturen aus.

Nur sehr vereinzelt wurden Hebungsinjektionsversuche in etwas größer dimensionierten Laborversuchen (Bodenvolumen ca. 0,85–1,65 m³) durchgeführt (Falk, 1998, El-Ashaal et al., 2009). Im Rahmen der Injektionsversuche von El-Ashaal et al. (2009) in einem Sandboden entstanden entweder gedrungene, kugelförmige Injektionskörperstrukturen (locker/mitteldichte Lagerung) oder kurze dicke Risse (dichte/sehr dichte Lagerung). Der Injektionsversuch von Falk (1998), in einem in den Versuchsbehälter eingeschlämmten Sand, führte hingegen zu lamellenartigen Rissstrukturen. Im Vergleich dazu, entstanden bei der Hebungsinjektion an einem Probefeld im Sand Injektionsrisse von mehreren Metern Länge entlang des Manschettenrohrs (Watt, 2002 nach Grotenhuis, 2004). Genaue Kenntnisse hinsichtlich der räumlichen Ausbildung der Injektionsrisse liegen aber auch hier nicht vor.

In bisherigen Laborversuchen blieb der Einfluss infolge der verfahrenstypischen mehrmaligen Injektionen unberücksichtigt (maximal zwei Injektionen am gleichen Injektionspunkt). Aussagen über die tatsächlich in situ entstehenden Injektionskörperstrukturen sind damit nicht möglich. Diese Kenntnisse über die Richtung und räumliche Ausbildung der Injektionskörperstrukturen sind jedoch als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen erforderlich, um bereits in der Planungsphase den Hebungsvorgang und die hierzu erforderlichen Injektionsmengen realistischer ermitteln zu können.

Im Weiteren fehlt es in der Baupraxis an einer einfachen Methode, um beurteilen zu können, inwiefern eine Suspension – neben der grundsätzlichen Gebrauchstauglichkeit (Verarbeitbarkeit, Pumpbarkeit, Stabilität) – ausführungstechnisch für eine Hebungsinjektionsmaßnahme in einem grobkörnigen Boden geeignet ist. Hinsichtlich der ausführungstechnischen Eignung sollte das injizierte Suspensionsvolumen zu einer möglichst adäquaten Verdrängung des Bodens führen. In welchem Maß die Suspension überhaupt eine Verdrängung des Bodens bewirken kann, lässt sich bislang nicht ermitteln.

Aufgrund der höheren Durchlässigkeit grobkörniger Böden besteht die Gefahr, dass die Suspension wirkungslos in den Porenraum des Bodens abfließt (Porenraumverfüllung), anstatt die angestrebte Rissbildung und Verdrängung des Bodens zu bewirken.
Selbst für den Fall, dass die in der Suspension enthaltenen Feststoffpartikel nicht in den Porenraum des Bodens eindringen, kommt es aufgrund des Injektionsdrucks und der auf die Suspension einwirkenden Bodenspannungen zum Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension (Druckfiltration). Während das ausgefilterte Wasser im grobkörnigen Boden

abfließen kann, bildet sich an der Kontaktfläche zum Boden eine aus den Feststoffpartikeln der Suspension bestehende Feststoffschicht aus (Filterkuchen)[1].

Durch die Porenraumverfüllung und die Druckfiltration wird das zur Bodenverdrängung nutzbare Suspensionsvolumen reduziert, was sich negativ auf die Effizienz der Hebungsinjektion auswirkt. Je nach Suspensionseigenschaften, Durchlässigkeit des Bodens und wirkendem Injektionsdruck treten diese beiden Effekte in unterschiedlich starker Ausprägung auf (Eindringverhalten der Suspension in den Boden).
Einen einfachen Standardlaborversuch, um in dieser Hinsicht die Eignung verschiedener Suspensionsmischungen bewerten zu können, gibt es nicht.

Rahmen und Ziele des Forschungsprojekts: Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen befassen sich mit der Ausführung von Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden. Konkret wurden folgende Ziele verfolgt, um die Planbarkeit von Hebungsinjektionsmaßnahmen in grobkörnigen Böden zu verbessern:

- Entwicklung eines Laborversuchs, um die Eignung verschiedener Suspensionen hinsichtlich der Anwendung bei Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden beurteilen zu können.
- Durchführung von Großversuchen zur Ausführung von Hebungsinjektionen, um Erkenntnisse hinsichtlich der entstehenden Injektionskörperstrukturen infolge wiederholter Injektionen zu erlangen.
- Erarbeitung eines geeigneten Modellierungsansatzes für FE-Berechnungen, um den Hebungsvorgang und die erforderlichen Injektionsmengen bei Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden realistischer prognostizieren zu können. Hierzu werden die Ergebnisse der Großversuche genutzt.

Die Durchführung des Forschungsvorhabens erfolgte in Kooperation mit der Firma Keller Grundbau GmbH, welche insbesondere durch die Bereitstellung der technischen Ausrüstung, die Ausführung der beiden Großversuche (Kapitel 4) wesentlich unterstützte.

1.2 Das Verfahren der Hebungsinjektionen

Ziel der Hebungsinjektionen ist es, durch das wiederholte Injizieren einer aushärtenden Suspension im Boden mit Suspension gefüllte Risse zu erzeugen, die zu einer Verdrängung des Bodens führen und eine Anhebung der Geländeoberfläche bzw. des Bauwerks bewirken. Bis eine ausreichende Hebung erzielt wird, sind üblicherweise mehrere Injektionsdurchgänge erforderlich. Hierzu wird an den Injektionsstellen mehrmals Suspension injiziert. Anwendungsbeispiele und

[1] Je nachdem, ob die Phasentrennung an der Kontaktfläche zwischen Suspension und dem Filter (Boden) oder innerhalb des Filters (Korngerüst des Bodens) stattfindet, wird zwischen einer Oberflächenfiltration und einer Tiefenfiltration unterschieden (Gasper, 1990, S. 28 / Schlötzer, 1995, S. 19ff).

eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens können beispielsweise Raabe und Esters (1986), Gabener et al. (1989) oder Moseley und Kirsch (2004) entnommen werden.

In welche Richtung sich die Risse ausbreiten ist abhängig vom Spannungszustand im Boden. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Risse senkrecht zur geringeren Hauptspannungsrichtung im Boden ausbilden (Cambefort, 1969, S.72). Bei Hebungsinjektionen in normalkonsolidierten Böden (effektive Horizontalspannungen σ'_h sind geringer als effektive Vertikalspannungen σ'_v) führt dies dazu, dass der Boden zunächst seitlich verdrängt wird, wodurch sich die Horizontalspannungen erhöhen (Abb. 1.1-links). Die Phase der Injektion, bis im Boden ein annähernd hydrostatischer Spannungszustand ($\sigma'_h \approx \sigma'_v$) erreicht wird, ist die sogenannte Kontaktinjektion. In der Baupraxis deuten erste geringe Hebungen (ca. 1–2 mm) auf den Abschluss der Kontaktinjektion hin. Im Zuge der nachfolgenden Injektionen ergibt sich der maßgebende (= geringere) Widerstand des Bodens aus der Auflast des anzuhebenden Bodens und der in diesem Bereich wirkenden Bauwerkslasten. In der Folge entstehen vorwiegend horizontale Rissstrukturen, die eine Verdrängung des Bodens in vertikaler Richtung nach oben hin bewirken (Abb. 1.1-rechts). Dies entspricht der Phase der eigentlichen Hebungsinjektion.

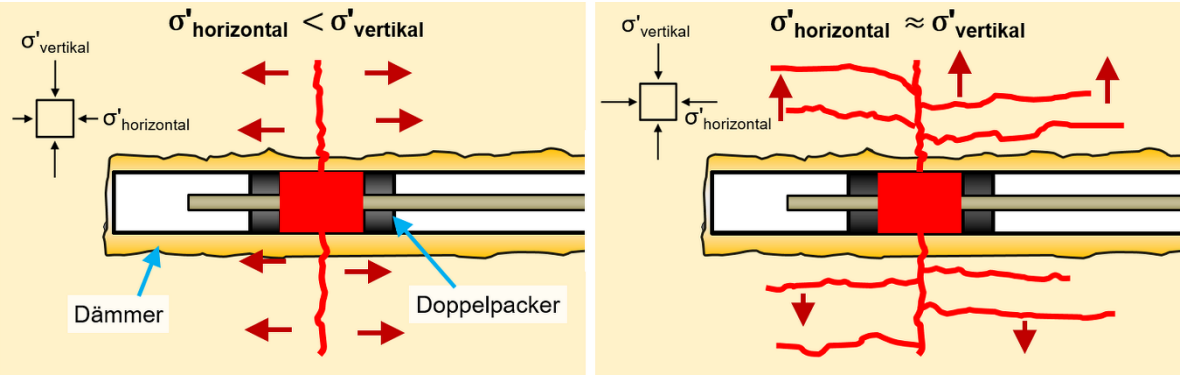


Abb. 1.1: links: Vorwiegend vertikale Rissstrukturen falls $\sigma'_h < \sigma'_v$
rechts: Vorwiegend horizontale Rissstrukturen falls $\sigma'_h \approx \sigma'_v$

Im Rahmen der bautechnischen Ausführung werden zunächst unter dem anzuhebenden Bauwerk ein Fächer oder mehrere parallele Reihen an Manschettenrohre installiert. Die für den Einbau der Manschettenrohre erforderlichen verrohrten Bohrungen können je nach örtlichen Gegebenheiten von der Geländeoberfläche oder auch von Schächten und Stollen aus hergestellt werden. Die Bohrungen werden üblicherweise derart angeordnet, dass der Abstand zwischen den Endpunkten nicht mehr als 2 m beträgt. Nachdem die Manschettenrohre in das Außenrohr der Bohrung eingeführt wurden, wird im Anschluss der Ringraum zwischen Manschettenrohr und Außenrohr mit einem Dämmer verfüllt. Das Außenrohr wird dabei sukzessive ausgebaut. Je nach Anforderungen an die zu erwartende Anzahl an Beaufschlagungen pro Injektionsstelle kommen Kunststoffrohre oder entsprechend robustere Stahlmanschettenrohre zum Einsatz. Die Manschettenrohre besitzen, je nach Typ, in einem Abstand von 0,33 m, 0,5 m oder 1,0 m Injektionsöffnungen die mit einer Gummimanschette umschlossen sind. Das Einpressen der Suspension erfolgt mittels eines Doppelpackers der jeweils an der Injektionsstelle positioniert und

mit dem Manschettenrohr temporär verspannt wird. Im Zuge der Injektionstätigkeiten wird die Verpressrate (ca. 10–15 l/min) und die zu injizierende Suspensionsmenge vorgegeben (ca. 10–80 l)[2]. Die Verpressrate und der auftretende Injektionsdruck wird dabei kontinuierlich aufgezeichnet. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der Injektionsdruck zumeist an der Pumpe und in seltenen Fällen zusätzlich im Injektionsschacht gemessen wird. Der Druckunterschied zu dem tatsächlich im Boden wirkenden Injektionsdruck kann u.a. je nach Länge des Leitungssystems, dem Höhenunterschied zur Injektionsstelle und den an der Manschettenöffnung auftretenden Druckverlusten mehrere Bar betragen.

Ist ein ausreichend großer Injektionsdruck erreicht, öffnet sich die Manschette, die Dämmerschicht um das Manschettenrohr bricht auf und die Suspension dringt in den umliegenden Boden ein. Nach Abschluss der jeweiligen Injektion legt sich die Manschette wieder an das Manschettenrohr an und die Injektionsstelle kann zu einem späteren Zeitpunkt wieder beaufschlagt werden. Der Doppelpacker wird gelöst und an der nächsten zu injizierende Manschette positioniert.

Zur Steuerung der Hebungsinjektionen werden die Verformungen des Bauwerks kontinuierlich mit Hilfe von Echtzeitmessungen z.B. mit Hilfe eines Schlauchwaagenmesssystems überwacht (siehe Kapitel 4.2.3). Je nach Hebungsziel werden die Injektionsstellen im entsprechenden Bauwerksbereich beaufschlagt. Auf diese Art und Weise ist es möglich Bauwerke im Millimeterbereich genau und um mehrere Dezimeter weit anzuheben.

[2] Raabe und Stockhammer (1995)

2 Verwendete Materialien

2.1 Böden

Die im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Böden stammen aus einer Kiesgrube im Münchner Umland. Der Boden 1 wurde in den Großversuchen (Kapitel 4) und in den Versuchen mit der Bodenfilterpresse (Kapitel 3) verwendet. Während der Boden 2 aus einer Lieferchargе stammte, wurden bei Boden 1 die Kennwerte bei verschiedenen Lieferchargen bestimmt. Die Bandbreite der Kornverteilung und der Bodenkennwerte sind in Abb. 2.1 bzw. Tabelle 2.1 dargestellt.

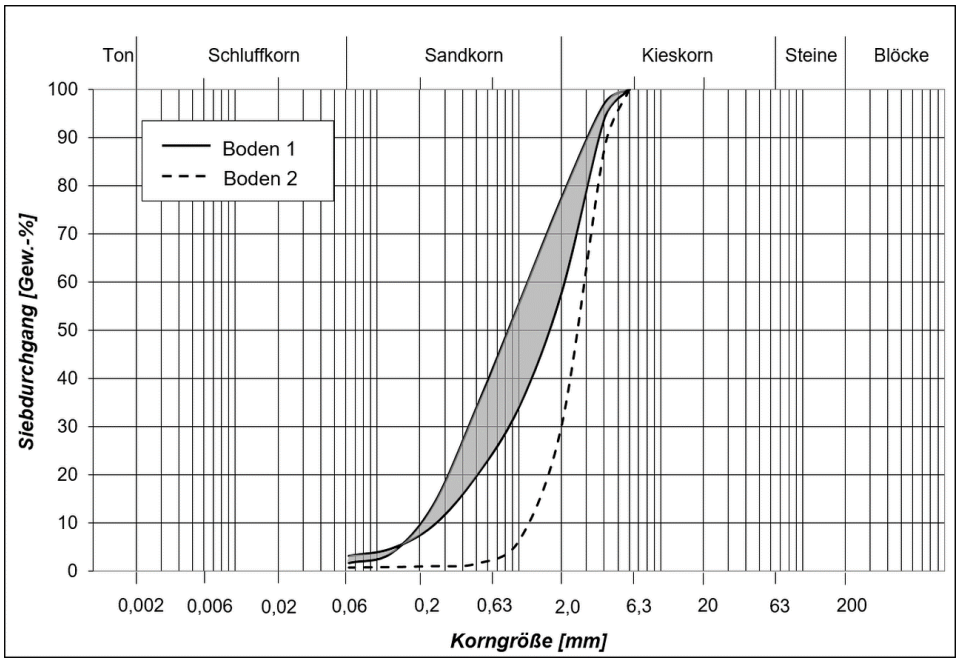


Abb. 2.1: Kornverteilung der verwendeten Böden

Tabelle 2.1: Kennwerte der verwendeten Böden

Kenngröße	Einheit	Boden 1		Boden 2
Lieferkörnung	-	0/4		0/4
Bezeichnung nach DIN 4022	-	S,fg	S/fG	gsfG
Bezeichnung nach DIN 14688-1	-	fgrSa	FGr/Sa	csaFGr
Korndichte ρ_S	g/cm³	2,737	2,739	1,760
Ungleichförmigkeitszahl C_U	-	5,58	7,98	2,63
Krümmungszahl Cc	-	0,82	1,30	1,25
min ρ_d / max ρ_d	g/cm³	1,564 / 1,988	1,636 / 2,044	1,650 / 1,849
max n / min n	-	0,429 / 0,274	0,403 / 0,254	0,402 / 0,330
max e / min e	-	0,750 / 0,377	0,674 / 0,340	0,673 / 0,493
Durchlässigkeit k	m/s	ca. $8x10^{-5}$ – $3x10^{-5}$ (ρ_d=1,80 g/cm³) ca. $1x10^{-3}$ – $2x10^{-3}$ (ρ_d=1,57 g/cm³)		ca. $2x10^{-3}$ (ρ_d=1,85 g/cm³)

2.2 Suspensionen und deren Feststoffe

2.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden zur Herstellung der Suspensionen zwei Fertigmischungsprodukte, die bereits bei Hebungsinjektionsmaßnahmen eingesetzt wurden, sowie zum Vergleich eigene Mischungsrezepturen verwendet.

Die Fertigmischungsprodukte wurden u.a. bei folgenden Projekten verwendet:

- Nord-Süd Metro Amsterdam, Station Vijzelgracht
- Nord-Süd Stadtbahn Köln
- Ortsumfahrung Oberau

Die eigenen Mischungsrezepturen liegen ebenfalls innerhalb der Bandbreite üblicher Suspensionen für Hebungsinjektionsmaßnahmen (Moseley & Kirsch, 2004).

2.2.2 Feststoffe

Zur Herstellung von baupraktisch repräsentativen Suspensionsmischungen wurden die in Tabelle 2.2 aufgeführten Feststoffe verwendet.

Tabelle 2.2: Feststoffe für Suspensionen

Feststoff	**Kurzbezeichnung**	**Korndichte ρ_S [g/cm³]**
Portlandzement	CEM I	3,051
Leicht plastischer Ton	TL	2,75
Kalksteinmehl	KS	2,687
Bentonit	B	2,605
Fertigmischungsprodukt 1	FP 1	2,816
Fertigmischungsprodukt 2	FP 2	2,743

Als hydraulisches Bindemittel wurde ein Portlandzement 42,5 N der Firma Rohrdorfer verwendet.

Um eine allzu große Festigkeit der ausgehärteten Suspension zu vermeiden[3] und um die in der Baupraxis relevanten Suspensionskosten zu reduzieren, wird als Füllstoff ein leicht plastischer Ton[4] verwendet. Dieses Material stammt aus einem Kieswerk im Münchner Raum und fällt dort als Nebenprodukt in der Kieswäsche (Isar-Kies) an. Gemäß der tonmineralogischen

[3] Aufgrund zu großer Festigkeiten der ausgehärteten Suspensionsstrukturen besteht die Gefahr das die Manschetten in nachfolgenden Injektionsdurchgängen nicht mehr aufgesprengt werden können.
[4] Detaillierte Angaben zum verwendeten leicht plastischen Ton können aus Henzinger (2017) S. 159f entnommen werden (Bezeichnung TL 1).

Untersuchung setzt sich die Tonfraktion aus Kaolinit, Illit und Chlorit zusammen (Henzinger, 2017).

Um ein unerwünschtes Eindringen der Suspension in den Boden zu reduzieren, wird als grobkörniger Zuschlagsstoff Kalksteinmehl zugegeben. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde Calcit FW 270 aus dem Calcitwerk Heidenheim an der Benz (Baden-Württemberg) verwendet. Hersteller ist das Calcitwerk Schön+Hippelein.

Mit dem Ziel die Stabilität der Suspension zu erhöhen, wurde einzelnen Suspensionsmischungen eine geringe Menge an Bentonit zugegeben. Hierzu wurde Bentonil® CV 15 der Firma Clariant verwendet. Dabei handelt es sich um einen aktivierten[5] Bentonit aus mediterranen Rohtonen.

Neben den eigenen Suspensionsmischungen wurden zum Vergleich zwei Fertigmischungsprodukte verwendet. Hierbei handelte es sich um Blitzdämmer® 750 der Firma HeidelbergCement (FP 1) und den Injektionsbaustoff RoV 5004 der Firma Rohrdorfer Geosystems Spezialbaustoffe (FP 2).

In Abb. 2.2 sind die Korngrößenverteilungen der Feststoffe dargestellt. Die Korngrößenverteilung des Zements und des Fertigmischungsprodukts 1 wurden mittels Laserbeugungsverfahren ermittelt[6]. Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung des Tons, des Kalksteinmehls und des Fertigmischungsprodukts 2 wurden Sieb- und Schlämmanalysen durchgeführt. Da aufgrund des Quellvermögens von Bentonit, die Korngrößenverteilung nur von geringer Aussagekraft ist, wurde in diesem Fall keine Untersuchung durchgeführt.

[5] Durch Ionenaustausch (“Aktivierung“) wird Calciumbentonit in einen künstlichen Natriumbentonit umgewandelt.
[6] Die Versuche wurden vom Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München durchgeführt.

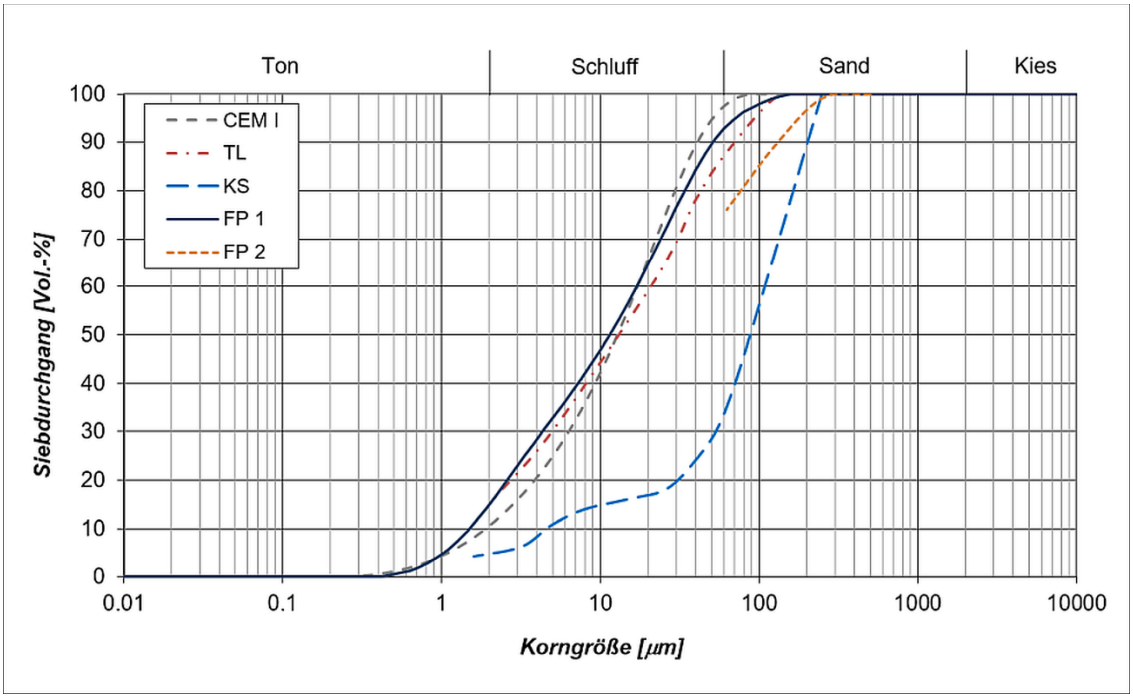


Abb. 2.2: Kornverteilung der Feststoffe

2.2.3 Suspensionen

Zur Herstellung der Suspensionen wurde ein Labormischer mit einem Zahnscheibenrührer (d=100 mm) verwendet (Abb. 2.3). Der Durchmesser des Rührbehälter betrug 21 cm. Bei Suspensionen mit Bentonitanteil, wurde der Bentonit am Vortag bei 3000 U/min für 10 min dispergiert und bis zur weiteren Verwendung in einem verschlossenen Eimer gelagert.

Zum Anmischen der Suspension wurden die Feststoffe, bzw. die vorbereitete Bentonitsuspension nacheinander dem Anmischwasser zugegeben. Der Mischer wurde hierzu auf der niedrigsten Stufe (930 U/min) eingestellt. Der Zement wurde als letzter Feststoff zugegeben. Die Dispergierung der Suspension erfolgte für 10 min bei 930 U/min.

Abb. 2.3: links: Labormischer
rechts: Zahnscheibenrührer

Zur Ermittlung der Suspensionseigenschaften wurde eine feste Abfolge der hierzu durchgeführten Versuche eingehalten. Hinsichtlich der Beschreibung und Durchführung der Versuche wird auf DIN 4127 verwiesen. Folgende Kennwerte wurden bestimmt:

1. Fließgrenze τ mittels Kugelharfe
2. Suspensionstemperatur
3. Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter $t_{M,1000}$ und $t_{M,1500}$
4. Suspensionsdichte mit Messzylinder
5. Filtratwasserabgabe mittels Filterpressversuch

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3) wurde neben der Feststoffzusammensetzung auch der Wasser/Feststoff-Wert (w/f) der Suspensionen variiert. Die ermittelten Kennwerte der verwendeten Suspensionen sind in Tabelle 2.3 angegeben.

Tabelle 2.3: Kennwerte der verwendeten Suspensionen

Suspension	Wasser-feststoff-wert	Bentonit-anteil *	Suspen-sions-dichte	Fließ-grenze	Marsh-Zeiten		Filtratwasser-abgabe	Temperatur
	w/f	B	ρ_{Sus}	τ	$t_{m,1000}$	$t_{m,1500}$	$V_{Filtrat}$	T
[-]	[-]	[%]	[g/cm³]	[N/m²]	[s]	[s]	[ml]	[°C]
FP 1	0.8	k. A.	1.524	45.00	57	133	126	25.0
	1		1.478	35.39	47	83	144	25.8
	1.2		1.415	11.67	39	64	171	23.8
	2		1.306	<5.03	32	54	230	23.6
FP 2	0.7	k. A.	1.603	34,68	46	77	140	23.3
	1		1.469	8.81	35	59	177	24.4
CEM I	0.6	0	1.747	k. A.	55	98	112	23.2

Suspension	Wasser-feststoff-wert	Bentonit-anteil *	Suspen-sions-dichte	Fließ-grenze	Marsh-Zeiten		Filtratwasser-abgabe	Temperatur
	w/f	B	ρ_{Sus}	τ	$t_{m,1000}$	$t_{m,1500}$	$V_{Filtrat}$	T
[-]	[-]	[%]	[g/cm³]	[N/m²]	[s]	[s]	[ml]	[°C]
	1		1.512	4.15	34	56	177	22.0
CEM I (50%) + TL (50%)	1	0	1.483	10.91	40	53	170	23.8
CEM I (30%) + TL (70%)	1		1.478	11.00	38	61	165	22.9
CEM I (30%) + TL (50%) + KS (20%)	0.8	0	1.558	19.72	41	68	147	25.0
	1		1.466	8.84	35	59	178	23.6
	1	1	1.477	21.48	38	66	171	23.4
	1	2	1.477	35.40	48	81	168	22.4
	0.8	2	1.564	44.71	52	105	143	22.0
	1	4	1.482	45.31	47	83	167	23.6

* Der angegebene Bentonitanteil bezieht sich auf die in der Suspension enthaltene Zementmasse

3 Die Bodenfilterpresse – Versuchsgerät zur Eignungsprüfung von Suspensionen[7]

3.1 Allgemeines – Anforderungen an das Versuchsgerät

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, kann nur ein Teil des injizierten Suspensionsvolumens für die angestrebte Rissbildung und damit Verdrängung des Bodens genutzt werden. Gründe hierfür sind das Eindringen der Suspension in die Porenräume des Bodens und das Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension. Bislang gibt es kein einfaches Verfahren, diese Verluste zu quantifizieren und damit die Eignung der Suspension für unterschiedliche Bodenverhältnisse zu beurteilen.

Mit der im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Bodenfilterpresse können verschiedene Boden-Suspension-Kombinationen untersucht und die bautechnische Eignung der Suspension bewertet werden.

Damit derartige Untersuchungen auch in der Baupraxis angewendet werden können, wurde auf eine möglichst einfache Handhabung und kompakte Bauform des Versuchsgeräts geachtet. In Kombination mit einer präzisen, jedoch nicht zu umfangreichen, Versuchsbeschreibung können die Untersuchungen von einem großen Anwenderkreis durchgeführt werden.
Das Versuchsgerät wurde derart konzipiert, dass der erforderliche Injektionsdruck mittels Druckluft aufgebracht werden kann. Seitens der Laboreinrichtung wird lediglich ein Druckluftanschluss benötigt. Damit kann auf zusätzliche technische Einrichtungen wie einen Lastrahmen, Pressen oder Pumpen verzichtet werden. Die Bodenfilterpresse wurde darauf ausgelegt, dass ein Druck von 10 bar aufgebracht werden kann.

Darüber hinaus können die Versuche an unterschiedlichen grobkörnigen Böden und bei verschiedenen Lagerungsdichten durchgeführt werden. Damit ist es möglich, die Untersuchungen an dem Bodenmaterial der jeweiligen Baumaßnahme durchzuführen. Im Gegensatz zu Versuchen mit Filterpapieren, Sieben und Filtersteinen können damit im Versuch auch mögliche Verdichtungseffekte und Kornumlagerungen des Bodengefüges näherungsweise abgebildet werden.

Die Abmessungen des Versuchsgeräts ergaben sich aus einem Kompromiss zwischen dem erforderlichen Zylinderdurchmesser[8], dem Verhältnis zwischen Suspensions- und

[7] Die Ausführung der Versuche erfolgte im Rahmen von Studienarbeiten (Thomas, 2018, Amann, 2019 und Kellner, 2020). Die in diesen Studienarbeiten generierten Rohdaten (Messwerte und Protokollangaben wurden für die in diesem Forschungsbericht dargestellte Versuchsauswertung verwendet.
[8] Je nach Kornverteilung (gleichförmig oder ungleichförmig) sollte der Durchmesser des Zylinders mindestens um das 5- bzw. 10-fache größer sein, als das Größtkorn des Bodens.

Porenvolumen[9] sowie einem geringen Gewicht, um eine möglichst einfache Handhabung des Versuchsgeräts zu gewährleisten.

3.2 Filtrations- und eindimensionale Eindringversuche

Die Effizienz von Hebungsinjektionsmaßnahmen in grobkörnigen Böden hängt wesentlich von dem Eindringverhalten der Suspension ab (Kapitel 1.1). Zwar sind in der Literatur verschiedene Versuche beschrieben, mit denen das Eindringverhalten mehr oder weniger genau untersucht werden kann, jedoch sind diese Versuchsgeräte nicht darauf ausgelegt als einfacher und schnell durchzuführender Standardlaborversuch verwendet zu werden.

Ein Standardlaborversuch, um die Stabilität einer Suspensionsmischung gegenüber dem Ausfiltern der Wasserphase beurteilen zu können, ist der in DIN 4127 beschrieben Filterpressversuch. Die zu untersuchende Suspension wird in einen genormten Behälter eingefüllt und die ausgepresste Filtratmenge bei einem Druck von 7 bar nach einer Versuchsdauer von 7:30 min gemessen. Als Filtermedium dient ein Filterpapier. Ob und wie schnell es zur Filtratabgabe in grobkörnigen Böden kommt, lässt sich damit jedoch nicht überprüfen. Selbst wenn beispielsweise Filtersiebe entsprechend der Durchlässigkeit des Bodens verwendet werden, bleibt der Einfluss der Filtrationslänge unberücksichtigt. Der Vorgang des Ausfilterns der Suspension wird jedoch wesentlich von der Länge des porösen Filtermediums beeinflusst (Wittmann, 1980).

Weitere Versuchsgeräte, um die Filtration von Suspensionen, teils auch mit einem Boden als Filtermedium, untersuchen zu können, wurden unter anderem von McKinley und Bolton (1999), Gustin et al. (2007), Arwanitaki (2009), Bezuijen (2010) und Domes (2015) beschrieben.

Um zu untersuchen, inwiefern eine Suspensionen in den Boden eindringen kann, empfiehlt die DIN EN 12715[10] die Durchführung von Säulenversuchen. Ebenso wird im „*Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein“* (Schulze, 2002) die Durchführung derartiger eindimensionaler Eindringversuche empfohlen. Darüber hinaus enthält dieses Merkblatt Empfehlungen für eine mögliche Versuchsanordnung. Der beschriebene Versuchsaufbau besteht unter anderem aus einem mit Boden befüllten Zylinder (Durchmesser 5–10 cm, Probenhöhe 30–100 cm). Die Suspension wird kontinuierlich gefördert und durchströmt die Bodenprobe von unten nach oben. Die ausströmende Suspension wird in einem Überlaufbehälter aufgefangen. Der Boden kann nach diesem Merkblatt als injizierbar eingestuft werden, wenn in Abhängigkeit der Probenhöhe, die ein- oder mehrfache Suspensionsmenge des Porenvolumens den Boden durchströmt.

[9] Um die Entwicklung der Filtratabgabe messen zu können, sollte das eingefüllte Suspensionsvolumen signifikant größer sein, als das vorhandene Porenvolumen des Bodens. Am finalen Versuchsstand: Suspensionsvolumen min. dreimal größer als Porenvolumen
[10] DIN EN 12715: 2000-10. Injektionen. S.20-21

Als Beispiele für die Konstruktion eindimensionaler Eindringversuche wird auf die Untersuchungen von Müller-Kirchenbauer (1972), Kuk (2004), und Lesemann (2010) verwiesen.

3.3 Prototyp der Bodenfilterpresse

3.3.1 Allgemeines

Für die ersten Untersuchungen wurde zunächst ein einfacher Prototyp der Bodenfilterpresse konstruiert mit dem die Versuchsdurchführung und Handhabung des Geräts getestet werden konnte. Durch Versuche mit unterschiedlichen Suspensionen an verschiedenen Böden sollten erste Erfahrungswerte zur Optimierung der Konstruktion und der möglichen Versuchsauswertung gesammelt werden.

3.3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In Abb. 3.1 sind die Komponenten des Prototyps der Bodenfilterpresse dargestellt.

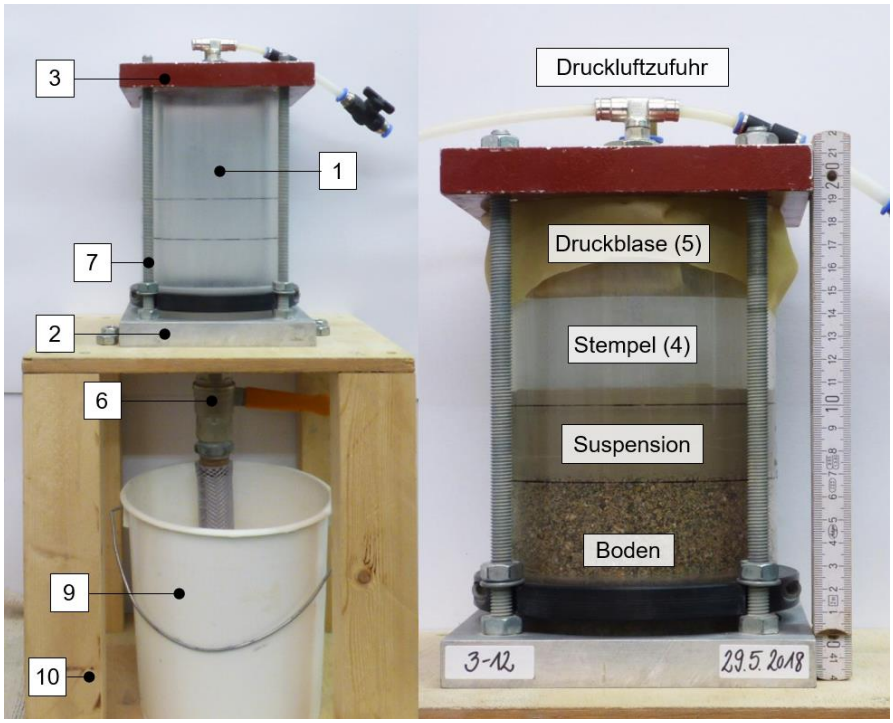


Abb. 3.1: links: Versuchsaufbau[11]
rechts: Prototyp der Bodenfilterpresse[12]

Der Prototyp besteht aus folgenden Komponenten (Tabelle 3.1).

[11] Fotografin: Anna Thomas, Foto entnommen aus der Dokumentation zum Versuchsstand (Thomas, 2018)
[12] Fotografin: Anna Thomas, Foto entnommen aus der Dokumentation zum Versuch 3-12 (Thomas, 2018)

Tabelle 3.1: Komponenten des Prototyps

Prototyp der Bodenfilterpresse	
1	Plexiglaszylinder (d_{innen}=120 mm, t=6 mm, h=200 mm)
2	Stahlbodenplatte mit Vertiefung, Auslauf (d=19 mm) und Nut mit O-Ring (in der Aufstandsfläche des Plexiglaszylinders)
3	Stahldeckel mit Steckanschluss für Druckluftzufuhr, Entlüftungsventil und Nut mit O-Ring (in der Aufstandsfläche des Plexiglaszylinders)
4	Stempel (Kunststoffscheibe mit h=48 mm, d=119 mm)
5	Druckblase
6	Absperrhahn
7	Gewindestangen
8	Druckregler mit Manometer (nicht dargestellt)
9	Auffangbehälter
10	Gestell

Um den Injektionsvorgang beobachten zu können, wurde ein durchsichtiger Plexiglaszylinder verwendet. Dieser wird in die dafür ausgefräste Vertiefung der Stahlbodenplatte gestellt. Die Öffnung des Auslaufs wird mit einem Sieb bedeckt, um ein Ausspülen des Bodenmaterials zu verhindern. Nach dem Bodeneinbau wird die Suspension bis zur Füllstandsmarkierung eingefüllt. Um eine möglichst gleichmäßige Belastung der Suspension zu erreichen, wird eine Kunststoffscheibe (= Stempel) eingesetzt. Da der Injektionsdruck mittels Druckluft aufgebracht wird, muss ein Ausblasen der Druckluft durch den Boden verhindern werden. Hierzu wird eine Latex-Druckblase eingelegt und über den Rand des Plexiglaszylinders gestülpt. Abschließend wird der Deckel aufgesetzt und über Gewindestangen mit dem Plexiglaszylinder und der Stahlbodenplatte verspannt. Die Verbindung zur Druckluftleitung erfolgt über einen Steckanschluss am Stahldeckel. Während des Versuchs wird das durch den Boden geströmte Filtrat (Feststoffpartikel und Wasser) in einem Behälter unter dem Auslauf aufgefangen.

Je nachdem mit welchem Wassergehalt w und welcher Lagerungsdichte D der Boden in die Bodenfilterpresse eingebaut werden sollte, erfolgte der Einbau nach einer der in Tabelle 3.2 aufgeführten Varianten.

Tabelle 3.2: Ausgeführte Varianten des Bodeneinbaus

Wassergehalt w	**Lagerungsdichte D**	**Einbauvariante**
w = 0% (trocken)	< 0,20 (sehr locker)	Trichter + Schüttkegel
	> 0,65 (dicht)	Rütteltisch
w > 0% (teilgesättigt)	je nach Anforderung	Fallgewicht

Um bei einem trockenen Boden eine sehr lockere bzw. dichte Lagerung zu erreichen, wurde ähnlich wie zur Ermittlung der lockersten und dichtesten Lagerung gemäß DIN 18126 vorgegangen. Für die Herstellung einer sehr lockeren Lagerung wurde das zuvor abgewogene Bodenmaterial mit Hilfe eines Trichters in Form eines Schüttkegels in den Plexiglaszylinder eingefüllt. Anschließend wurde der Boden eben über die Querschnittsfläche des

Plexiglaszylinders verteilt. Um eine dichte Lagerung eines trockenen Bodens zu erreichen, wurde das abgewogene Bodenmaterial in den Plexiglaszylinder eingefüllt, mit dem Belastungskolben beschwert und solange mit dem Rütteltisch verdichtet, bis die erforderliche Einbauhöhe des Bodens erreicht wurde.

Für den Fall, dass der Boden bei einem bestimmten Wassergehalt eingebaut werden sollte, wurde zunächst das hierzu erforderliche Bodenmaterial mit dem entsprechenden Wassergehalt angemischt. Im Anschluss daran wurde der Boden in drei Lagen in den Plexiglaszylinder eingefüllt und jeweils mit einer Stahlplatte (d = 120 mm) und einem Fallgewicht (m = 1506,6 g; Fallhöhe h = 50 cm) verdichtet.

Der Versuchsablauf stellt sich damit im Wesentlichen wie folgt dar:

1. Bodeneinbau
2. Dispergieren der Suspension mit anschließender Dichtemessung
3. Einfüllen der Suspension in die Bodenfilterpresse
4. Einsetzen des Stempels und der Druckblase
5. Stahldeckel verschrauben
6. Aufbringen des Injektionsdrucks (mit Druckluft) und Öffnen des Absperrhahns am Auslauf (Versuchsbeginn)
7. Bei Erreichen der geplanten Versuchsdauer, Ablassen des Injektionsdrucks am Druckregler (Versuchsende)

Im Rahmen der ersten Versuche wurden unter anderem die Eindringung der Suspension, die Filtratmasse sowie der Wassergehalt und die Dicke des Filterkuchens ausgewertet.

Das Eindringen der Suspension wurde durch den Plexiglaszylinder beobachtet. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Suspension an der Kontaktfläche zur Innenwand des Plexiglaszylinders tiefer eindringt, als in weiter innen liegenden Bodenbereichen. Eine genaue Quantifizierung der tatsächlich eingedrungenen Suspensionsmenge ist damit nicht möglich.

Für den Fall, dass sich ein Filterkuchen ausgebildet hatte, wurde nach dem Versuch eine Probe des Filterkuchens entnommen und diese für mindestens 12 h bei 105 °C im Ofen getrocknet. Anhand der ermittelten Probenmassen vor und nach dem Versuch konnte der Wassergehalt des Filterkuchens gemäß Gl. 3.1 bestimmt werden.

$$w_{Fk} = \frac{(m_{Fk,t=0} - m_{Fk,105°C,t>12h})}{m_{Fk,105°C,t>12h}} \qquad \text{(Gl. 3.1)}$$

Mit:

$w_{Fk,t=0}$	%	Wassergehalt des Filterkuchens
$m_{Fk,t=0}$	g	Masse der Filterkuchenprobe vor der Ofentrocknung
$m_{Fk,105°C,t>12h}$	g	Masse der Filterkuchenprobe nach mindestens 12 h Ofentrocknung bei 105°C

Im Rahmen der Versuche mit dem Prototyp wurde als Filterkuchen der Suspensionsrückstand angesehen, der mindestens eine steife Konsistenz besaß. Eine exakte Abgrenzung zu weicheren Suspensionsrückständen war jedoch nicht immer möglich. Dennoch kann die Filterkuchendicke, auch wenn diese nur näherungsweise ermittelt wurde, als Vergleichswert zwischen den einzelnen Versuchen dienen.

3.3.3 Erste Testreihe

3.3.3.1 Übersicht

Für die Versuche der ersten Testreihe wurden Bentonit-Zementsuspensionen und Suspensionen aus dem Fertigmischungsprodukt 1 angemischt. Angaben zu den verwendeten Materialien sind in Kapitel 2 enthalten. Die Eindringung der Suspensionen wurde für unterschiedliche w/f-Werte an zwei Böden untersucht. In Tabelle 3.3 sind die Versuchsrandbedingungen angegeben.

Tabelle 3.3: Versuchsrandbedingungen für die erste Testreihe mit dem Prototyp.

Boden			
Boden 1 locker D = 0,35-0,40 w = 10,5% Bodeneinbau: Fallgewicht		Boden 2 locker / mitteldicht D = 0,39-0,52 w = 3,5% Bodeneinbau: Fallgewicht	
Suspension			
FP 1 (w/f = 0,7 / 1,0 / 1,5)	CEM I +0,9% B (w/f = 0,7)	CEM I +1% B (w/f = 1,0)	CEM I +2,6% B (w/f = 1,5)
Injektionsdruck (p_{Inj})			
1 bar			
Injektionszeit (Versuchsdauer)			
00:30 min			

3.3.3.2 Versuchsergebnisse

Während bei den Versuchen mit dem Boden 2 die gesamte Suspension in den Boden eingedrungen ist, bildete sich mit dem Boden 1 ein Filterkuchen aus. Unabhängig vom verwendeten Boden kam es bei allen Versuchen zum Austritt von Filtrat. Die gemessenen Filtratmassen, aufgeteilt nach Feststoff- und Wasser im Filtrat, sind in Abb. 3.2 dargestellt.

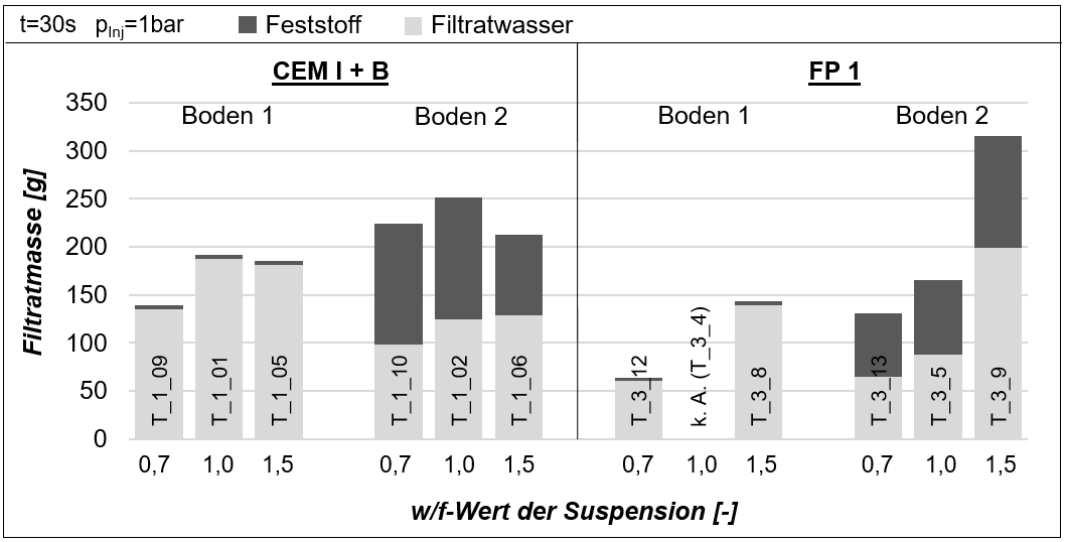


Abb. 3.2: Gemessene Filtratmassen bei Versuchen der ersten Testreihe

Erwartungsgemäß fielen die Filtratmassen mit dem weniger durchlässigen Boden 1 geringer aus als mit dem Boden 2. Bestand das Filtrat in den Versuchen mit dem Boden 1 fast ausschließlich aus Wasser, wies es bei den Versuchen mit dem Boden 2 nahezu den gleichen *w/f*-Wert auf, wie die getestete Suspension. In fast allen Fällen erhöhte sich die Filtratmasse mit steigendem *w/f*-Wert. Auffällig sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der Bentonit-Zementsuspensionen bei einem *w/f*-Wert von 1,5. Bei beiden Böden traten geringere Filtratmassen auf, als bei den feststoffreicheren Suspensionen. Inwiefern dies möglicherweise am unterschiedlichen Bentonitanteil, an der Konstruktion des Prototyps oder an eventuell noch nicht ausreichend definierten Arbeitsabläufen zur Vorbereitung der Versuche lag, war im Zuge der Weiterentwicklung der Bodenfilterpresse zu untersuchen. Abgesehen von den Versuchen bei einem *w/f*-Wert von 1,5, fielen die Filtratmassen mit dem Fertigmischungsprodukt geringer aus als bei den Bentonit-Zementsuspensionen.

Wenn sich ein Filterkuchen ausgebildet hat, wurde dessen Dicke und der Wassergehalt bestimmt. Abb. 3.3-links zeigt die entnommene Probe eines Filterkuchens. Die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung und der Messung der Filterkuchendicke sind in Abb. 3.3-rechts dargestellt.

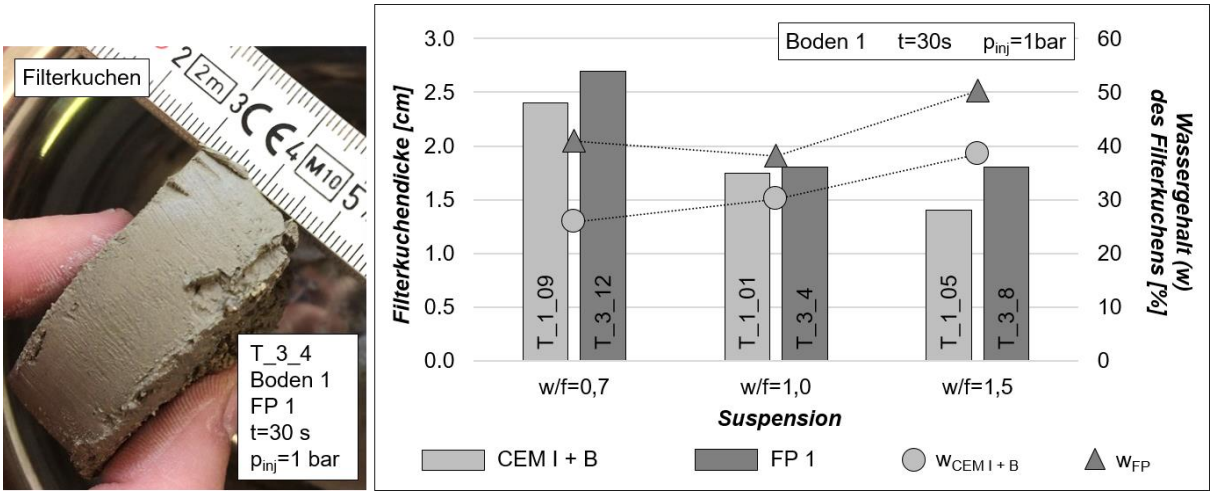


Abb. 3.3: links: Entnommene Probe eines Filterkuchens[13]
rechts: Dicke und Wassergehalt des jeweiligen Filterkuchens bei Versuchen mit dem Boden 1

Mit abnehmendem Feststoffgehalt der Suspensionen nimmt auch die Filterkuchendicke ab. Im Gegenzug nimmt der Wassergehalt des Filterkuchens zu. Dieser lag zwischen 26-50%. In den Versuchen mit dem Fertigmischungsprodukt bildet sich ein etwas dickerer Filterkuchen mit einem höheren Wassergehalt aus als mit den Bentonit-Zementsuspensionen.

Anhand der ersten Testreihe konnte die Funktionalität des Prototyps der Bodenfilterpresse bestätigt werden. Mit der gewählten Versuchskonstruktion war es auf einfache Art und Weise möglich, das prinzipielle Eindringverhalten unterschiedlicher Boden-Suspension-Kombinationen zu untersuchen. Inwiefern eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben war und welche Optimierungen erforderlich waren, wurde im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Versuche untersucht.

3.3.4 Optimierung des Prototyps

3.3.4.1 Übersicht

In Tabelle 3.4 ist eine Übersicht der gewählten Versuchsrandbedingungen zusammengestellt.

Tabelle 3.4: Variation der Versuchsbedingungen bei Untersuchungen mit dem Prototyp

Boden		
Boden 1		
sehr locker D = 0-0,17 w = 0% Bodeneinbau: Einrieseln	dicht D = 0,87-1,17 w = 0% Bodeneinbau: Rütteltisch	mitteldicht bis dicht D = 0,64-0,68 w = 9,57% Bodeneinbau: Fallgewicht

[13] Fotografin: Anna Thomas, Foto entnommen aus dem Versuchsdokumentation zum Versuch 3-4 (Thomas, 2018)

Suspension	
CEM I + 1% Bentonit, w/f = 1,0 CEM I + 2,6% Bentonit , w/f = 1,5	FP 1, w/f = 1,0
Injektionsdruck (p_{Inj})	
1 bar	2 bar
Injektionszeit (Versuchsdauer)	
00:30 min	

Je nach Versuch wurde ein Injektionsdruck von 1 bar bzw. 2 bar aufgebracht. Neben unterschiedlichen Suspensionen wurde die Ausführbarkeit verschiedener Einbauvarianten des Bodens getestet.

3.3.4.2 Hinweise zur Versuchsauswertung

In den Testversuchen konnte durch die Auswertung der Filterkuchendicke und der aufgefangenen Filtratmasse bislang nur näherungsweise auf die infolge der Druckfiltration und der Porenraumverfüllung entstehenden Suspensionsverluste geschlossen werden. Insbesondere ist die gemessene Filtratmasse abhängig vom Sättigungsgrad des Bodens und der eingefüllten Suspensionsmenge. Bei Versuchen mit einem trockenen Boden reichte die Suspensionsmenge teilweise nicht aus, um einen Filtrataustritt zu messen. Generell unterlag die Messung des Filtrats einer zu großen Streuung[14], um verschiedene Suspensionen mit der gewünschten Genauigkeit vergleichen zu können. Je nachdem wie gleichmäßig das Filtrat in den Porenraum des Bodens eindringt und wie viel Porenwasser im Filtrat enthalten ist, führt dies zu unterschiedlichen Messergebnissen.
Um eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen, wurde für die weiteren Untersuchungen zusätzlich der Suspensionsrückstand, d. h. das Volumen der nicht eingedrungenen Suspension, bezogen auf das ursprünglich eingefüllte Suspensionsvolumen bestimmt (Gl. 3.2).

$$\eta_{S,res} = \frac{V_{S,t>0}}{V_{S,t=0}} \qquad \text{(Gl. 3.2)}$$

$\eta_{S,res}$	%	Suspensionsrückstand
$V_{S,t>0}$	cm³	Volumen der nicht eingedrungenen Suspension nach Abschluss des Versuchs (t=Versuchsdauer)
$V_{S,t=0}$	cm³	Gesamtes Suspensionsvolumen

Das nicht eingedrungene Suspensionsvolumen $V_{S,t>0}$ wurde am Ende des Versuchs anhand der Position des Stempels im Plexiglaszylinder berechnet.

[14] Ebenso wie das daraus ermittelte Verhältnis von eingefüllter Suspensionsmasse zu gemessener Filtratmasse

$$V_{S,t>0} = \left(t_{A,Boden} - h_{Stempel} - t_{A,Stempel}\right) * \frac{\pi * (d_{i,Zylinder})^2}{4} \quad \text{(Gl. 3.3)}$$

Mit:

$t_{A,Boden}$	*cm*	Abstich von Oberkante (OK) Zylinder bis OK-Boden
$h_{Stempel}$	*cm*	Höhe des Stempels (4,8 cm)
$t_{A,Stempel}$	*cm*	Abstich von OK-Zylinder bis OK-Stempel
$d_{i,Zylinder}$	*cm*	Innendurchmesser des Plexiglaszylinders (12 cm)

Das eingefüllte Suspensionsvolumen $V_{S,t=0}$ ließ sich am genauesten aus der eingefüllten Suspensionsmasse und der gemessenen Suspensionsdichte berechnen.

$$V_{S,t=0} = \frac{m_{S,t=0}}{\rho_{Sus}} \quad \text{(Gl. 3.4)}$$

Mit:

$m_{S,t=0}$	*g*	Eingefüllte Suspensionsmasse
ρ_{Sus}	*g/cm³*	Dichte der eingefüllten Suspension

Neben der Ermittlung des Suspensionsrückstands $\eta_{S,res}$ wurde weiterhin die Dicke und der Wassergehalt des Filterkuchens ermittelt.

3.3.4.3 Einfluss der Lagerungsdichte des Bodens

Die Durchlässigkeit des Bodens ist unter anderem abhängig von der Lagerungsdichte des Bodens. Um zu untersuchen, wie sich die Lagerungsdichte des Bodens auf das Eindringverhalten von den hier verwendeten Suspensionen auswirkt, wurden zwei unterschiedliche Suspensionsmischungen bei jeweils sehr lockerer und dichter Lagerung in den Prototyp eingebaut. In Abb. 3.4 ist der jeweils ermittelte Suspensionsrückstand dargestellt.

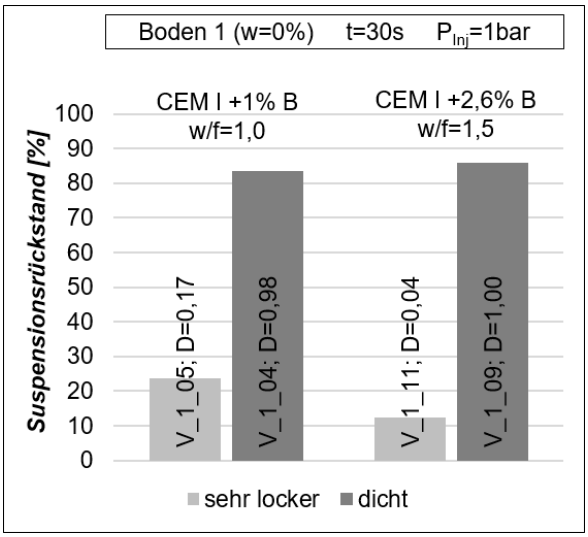


Abb. 3.4: Ermittelter Suspensionsrückstand bei unterschiedlichen Lagerungsdichten

Bei beiden Suspensionsmischungen zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Lagerungsdichte des Bodens auf das Eindringverhalten der Suspensionen. Bei einer sehr lockeren Lagerungsdichte drang die Suspension fast vollständig in den Boden ein. Im Gegensatz dazu, trat bei dichter Lagerung kaum ein Eindringen der Suspension auf, sondern es bildete sich ein ca. 1,5–2 cm dicker Filterkuchen aus. Nach einer Versuchsdauer von 30 s betrug der Suspensionsrückstand bei dichter Lagerung über 80 %. In den Versuchen bei sehr lockerer Lagerung hingegen belief sich der Suspensionsrückstand auf 13 % bzw. 24 %. Durch eine kompaktere Anordnung der Bodenkörner verkleinern sich die Porenengstellen und die Durchlässigkeit des Bodens nimmt ab. Im Fall der hier durchgeführten Versuche reduzierte sich dadurch deutlich die Eindringtiefe der Suspension.

3.3.4.4 Reproduzierbarkeit der Versuche und erforderliche Optimierungen des Prototyps

Um zu untersuchen, inwiefern bereits mit der einfachen Versuchskonstruktion des Prototyps eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuche gegeben ist, wurden die Versuche teilweise mehrmals wiederholt. In Abb. 3.5 sind die Ergebnisse des jeweils ermittelten Suspensionsrückstands dargestellt.

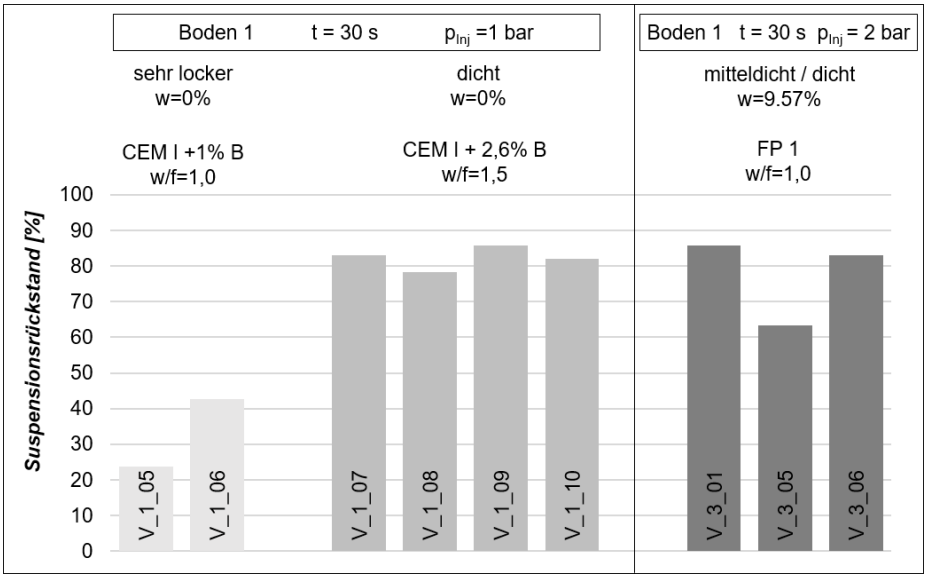


Abb. 3.5: Ermittelter Suspensionsrückstand bei Versuchen mit dem Prototyp der Bodenfilterpresse

Die Auswertung des Suspensionsrückstands zeigt, dass es teilweise zu großen Abweichungen zwischen den jeweiligen Versuchsergebnissen gekommen ist. Im besten Fall betrug die Abweichung des ermittelten Suspensionsrückstands 1 %, im schlechtesten Fall 22 %. Im Folgenden werden die möglichen Ursachen sowie die daraus gezogenen Konsequenzen für die weitere Entwicklung der Bodenfilterpresse aufgeführt:

Ursache 1 – Vorhalten der Suspension

Teilweise wurde vor Durchführung der Versuche eine größere Suspensionsmenge angemischt und die Suspension für mehrere Versuche an einem Tag verwendet. Zwar wurde die Suspension mit einem Rührer in Bewegung gehalten, jedoch konnte auch dadurch eine Änderung der Suspensionseigenschaften nicht verhindert werden. Aufgrund von Wasserverdunstung erhöhte sich mit zunehmender Standzeit die Dichte der Suspension.

Lösung:

Für die weiteren Versuche wurde stets eine frische Suspensionsmischung verwendet.

Ursache 2 – Ausfließen des Filtrats

Das Filtrat kann nicht gleichmäßig über den gesamten Querschnitt des Bodens, sondern nur im Bereich des Auslaufs aus der Bodenfilterpresse fließen. Dies führte möglicherweise dazu, dass sich das Filtrat in den Versuchen ungleichmäßig über den Querschnitt des Bodens verteilte.

Lösung:

Für die Konstruktion des neuen Versuchsstands wurde die Öffnung in der Bodenplatte deutlich vergrößert.

Ursache 3 – Abdichtung des Ringspalts

Als problematisch erwies sich der Ringspalt zwischen Stempel und Plexiglaszylinder. Durch den Injektionsdruck wurde der Stempel nach unten auf die Suspension gedrückt. Dabei konnte nicht

verhindert werden, dass teilweise Suspension und Filtrat durch den Ringspalt am Stempel vorbei abfloss. Der Einbau eines Dichtungsrings führte je nach verwendetem Dichtungsring entweder dazu, dass nach wie vor keine ausreichende Abdichtung gegeben war oder, dass durch den Anstieg der Reibungskräfte ein Einsetzen und insbesondere das Entfernen des Stempels nach dem Versuch kaum noch möglich waren. Die technisch möglichen Fertigungstoleranzen sind bei Verwendung eines Plexiglaszylinders nicht ausreichend, um die Bauteile und Abdichtungselemente entsprechend der gewünschten Anforderung herzustellen.

Lösung:

Um eine ausreichende Abdichtung des Ringspalts sowie ein möglichst ungehindertes Gleiten des Stempels im Zylinder zu erreichen, wurden Materialien verwendet die eine deutlich höhere Fertigungsgenauigkeit und damit eine präzise Abstimmung der Bauteile und Abdichtungselemente zueinander ermöglichen.

Ursache 4 – Bodeneinbau

Der Bodeneinbau in den Plexiglaszylinder gestaltete sich nicht optimal. Beim Einbau mit einer (sehr) lockeren Lagerungsdichte war die Herstellung einer ebenen Bodenoberfläche nur sehr umständlich möglich. Außerdem kann bei der Verdichtung mit dem Rütteltisch nicht gewährleistet werden, dass tatsächlich eine homogene Bodenprobe erzeugt wird[15]. Je nach Kornabstufung kann es aufgrund der Vibrationen zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Entmischung von groben und feinen Bodenkörner kommen. Eine annähernd gleiche Durchlässigkeit über die Probenhöhe ist damit nicht mehr gegeben.

Lösung:

Auf den Bodeneinbau mit dem Rütteltisch wurde vollständig verzichtet. Die Verdichtung erfolgte stattdessen mit dem Proctorhammer (Fallgewicht 2,5 kg, Fallhöhe 30 cm). Durch den Einbau des Bodens in einen separaten Zylinder konnte bei der Herstellung einer (sehr) lockeren Lagerungsdichte der Schüttkegel sorgfältig mit dem Lineal abgezogen werden.

3.4 Die finale Bodenfilterpresse – Versuchsbeschreibung

3.4.1 Allgemeines

Die Erkenntnisse aus den in Kapitel 3.3.3 und 3.3.4 durchgeführten Untersuchungen an einem Prototyp der Bodenfilterpresse sowie den unter Kapitel 3.1 genannten Anforderungen wurden für die Konstruktion des finalen Versuchsstands der Bodenfilterpresse mitberücksichtigt. Im Weiteren wurden die Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung sowie die Dokumentation der Versuche definiert. Eine Übersicht der Versuche am finalen Versuchsstand der Bodenfilterpresse ist im Anhang A.1 dargestellt.

[15] Vergleichende Durchlässigkeitsuntersuchungen bei Verdichtung mit dem Proctorhammer und der Verdichtung mit dem Rütteltisch konnten dies bestätigen

3.4.2 Versuchsaufbau

In Abb. 3.6-links ist der Versuchsaufbau der entwickelten Bodenfilterpresse dargestellt. In Abb. 3.6-rechts ist die dazugehörige Konstruktionszeichnung der Versuchsapparatur abgebildet. Der Injektionsstempel ist in Abb. 3.7 dargestellt.

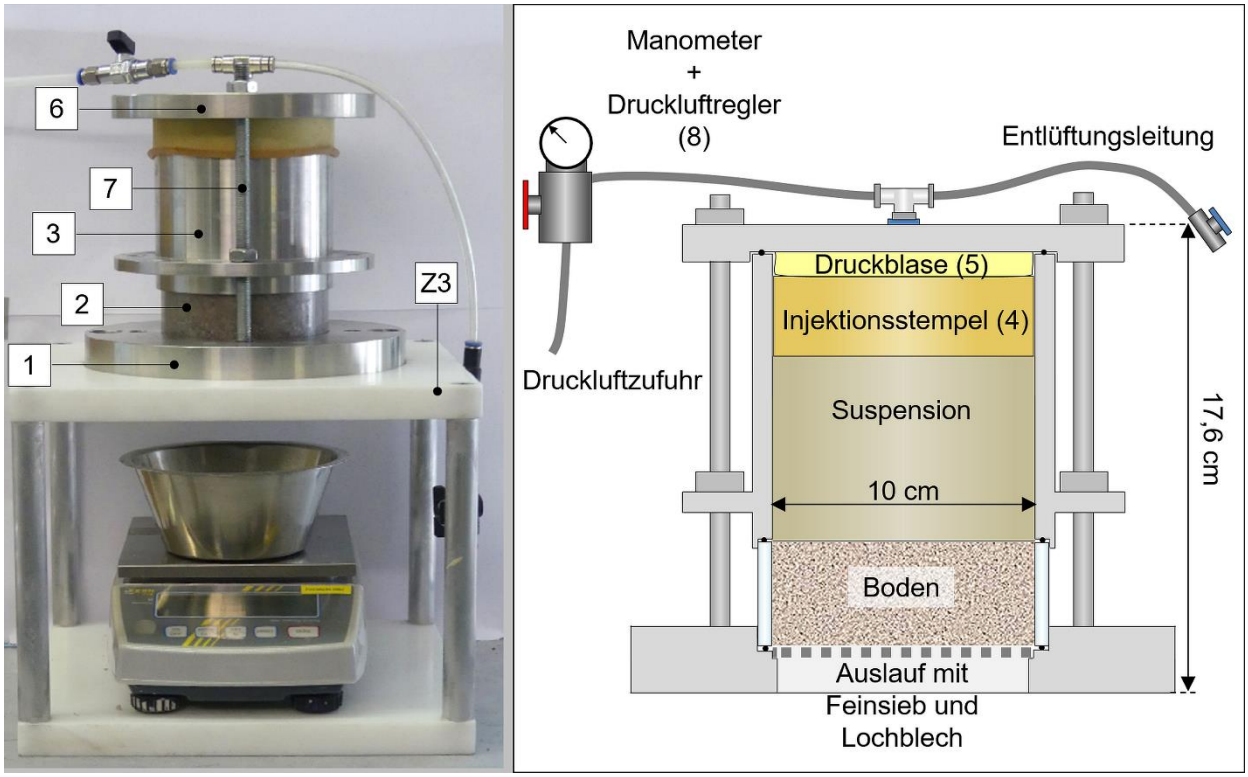


Abb. 3.6: links: Versuchsstand der Bodenfilterpresse
rechts: Aufbau der Bodenfilterpresse

Abb. 3.7: Injektionsstempel

Die Komponenten und Zubehörteile der Bodenfilterpresse sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Bauteile der Bodenfilterpresse

Bodenfilterpresse	
1	Grundplatte (d = 210 mm) mit Öffnung (d = 95 mm), Lochblech und Sieb
2	Injektionszelle (d_i =100 mm, h = 39 mm)
3	Suspensionszelle (d_i = 100 mm)
4	Injektionsstempel (h = 30 mm)
5	Druckblase
6	Zylinderdeckel mit Druckluftanschluss
7	Gewindestangen
8	Druckregler mit Manometer
Zubehör	
Z1	Halbschalen
Z2	Hilfsbodenplatte (für Bodeneinbau)
Z3	Unterkonstruktion

Für den Einbau des Bodens und der Suspension werden zusätzlich folgende Hilfsgeräte benötigt:

1) Handschaufel
2) Schüssel/Eimer mit Deckel
3) Tiefenlehre
4) Proctorhammer (2,5 kg) und dazugehörige Stahlplatte (d = 100 mm) mit abnehmbarem Griff
5) Messbecher (750 ml)
6) Waage
7) Latex-Membran (d ≈ 9 cm)
8) Schmiermittel (Knochenöl/Vaseline)

3.4.3 Verbesserungen gegenüber dem Prototyp

Im Gegensatz zur Versuchsapparatur des Prototyps, ist es mit der nun deutlich robusteren Konstruktion der Bodenfilterpresse möglich, Injektionsdrücke von bis zu 10 bar aufzubringen. Anstatt den Boden und die Suspension zusammen in einen Zylinder einzubauen, besteht der neue Versuchsapparat aus zwei separaten Zylindern: einer Suspensionszelle und einer Injektionszelle. Die Suspensionszelle mit einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Wandstärke von 5 mm wurde aus Edelstahl gefertigt. Damit wird zum einen eine ausreichende Stabilität des Bauteils sichergestellt, zum anderen kann dadurch eine sehr hohe Fertigungsgenauigkeit erreicht werden. Um weiterhin den Injektionsvorgang beobachten zu können, wurde für den mit Boden gefüllten Teil der Bodenfilterpresse (Injektionszelle) ein transparenter Polycarbonatzylinder verwendet. Mit einer Zugfestigkeit von 60 MPa und einer Wandstärke von 5 mm besitzt dieser eine ausreichende Stabilität bei einem maximalen Injektionsdruck von 10 bar.

Da der Boden nicht auf einer Filterplatte oder dem hier verwendeten Filtersieb eingebaut wird, sondern die Verdichtung des Bodens auf einer Hilfsbodenplatte erfolgt, kann verhindert werden, dass die Durchlässigkeit des Filtermediums durch eingedrungene Bodenpartikel verringert wird. Um das Auspressen von Suspension oder Filtrat durch den Ringspalt zwischen Injektionsstempel und Suspensionszelle zu verhindern, wurden die beiden Bauteile präzise aufeinander abgestimmt. Durch das Benetzen der Kontaktfläche mit einem Ölfilm konnte die Gleitfähigkeit des Injektionsstempels in der Suspensionszelle verbessert werden. Damit konnte bereits, ohne weitere Abdichtungselemente, der Filtrataustritt durch den Ringspalt auf wenige Milliliter reduziert werden. Der Einfluss derartig kleiner Filtrataustritte auf die Messergebnisse kann vernachlässigt werden. Optional besteht auch die Möglichkeit in einer dafür vorgesehenen Nut am Injektionsstempel einen O-Ring einzusetzen. Damit wird eine vollständige Abdichtung des Ringspalts erreicht, allerdings erfordert das Einsetzen und Entfernen des Injektionsstempels aus der Suspensionszelle in diesem Fall etwas mehr Vorsicht und Krafteinsatz.

3.4.4 Versuchsdurchführung

Nachfolgend werden die wesentlichen Arbeitsschritte zur Durchführung eines Versuchs mit der Bodenfilterpresse beschrieben. Ergänzend sind in Abb. 3.8 wesentliche Montagezustände (A bis D) dargestellt.

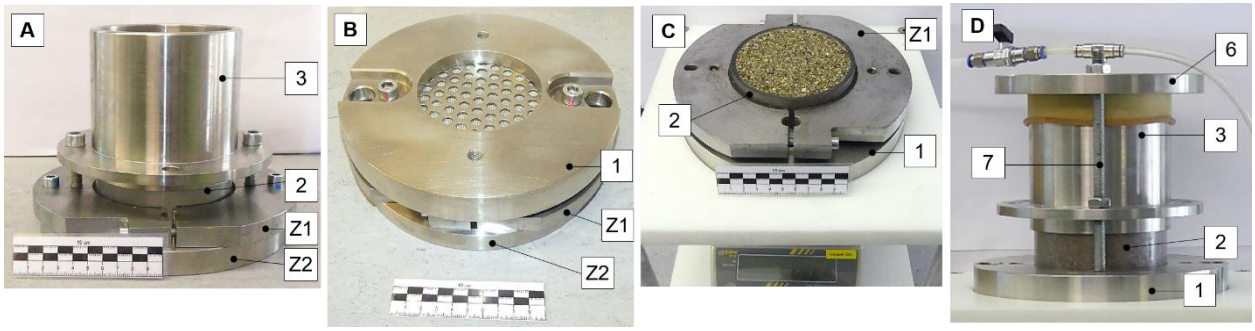


Abb. 3.8: Montagezustände während der Versuchsvorbereitung: A-Bodeneinbau, B-Montage der Grundplatte, C-Wenden und positionieren auf der Unterkonstruktion, D-Versuchsbeginn

Für den Einbau des Bodens wird die Injektionszelle (2) mit Hilfe der Halbschalen (Z1) auf der Hilfsbodenplatte (Z2) befestigt. Darauf wird die Suspensionszelle (3) direkt mit der Hilfsbodenplatte (Z2) verschraubt (Zustand A).
Zur Herstellung der lockersten Lagerung kann der Boden mit einem Trichter in die Injektionszelle (2) eingefüllt und anschließend mit einem Stahllineal glatt abgezogen[16]. Für die Herstellung einer höheren Lagerungsdichte wird der Boden lagenweise in die Injektionszelle (2) eingefüllt, eine

[16] Vorgehen analog zur Herstellung der lockersten Lagerung gemäß DIN 18126:1996, S. 8

flächig aufliegende Stahlplatte aufgesetzt und z.B. mit Hilfe eines Proctorhammers soweit wie erforderlich verdichtet[17].
Danach wird die Suspensionszelle (3) entfernt und es werden ein Filterpapier[18], ein Filtersieb, das Lochblech und die Grundplatte (1) auf die Bodenprobe aufgelegt. Die Grundplatte (1) wird mit den Halbschalen (Z1) verschraubt (Zustand B) und auf der Unterkonstruktion (Z3) platziert.
Die Hilfsbodenplatte kann nun entfernt (Zustand C), die Suspensionszelle (3) auf die Injektionszelle (2) gestellt und mit Hilfe der Gewindestangen (7) mit der Grundplatte (1) verschraubt werden. Anschließend kann die Suspension eingefüllt werden. Die eingefüllte Suspensionsmasse ist zu dokumentieren.
Auf die Suspensionsoberfläche wird ein feuchtes Filterpapier aufgelegt, der Injektionsstempel (4) eingeführt und eine Latex-Membran[19] aufgelegt. Nach Anbringen der Druckblase (5) wird der Zylinderdeckel (6) aufgesetzt und über die Gewindestangen (7) mit der Grundplatte (1) verschraubt. Abschließend wird die Druckluftleitung angeschlossen (Zustand D). Falls die Entwicklung der Filtratmenge mit dokumentiert werden soll, kann eine Waage unter dem Auslauf der Bodenfilterpresse platziert werden. Nach einstellen des Injektionsdrucks auf 7 bar, wird der Versuch durch Öffnen des Absperrhahns an der Druckluftleitung gestartet.
Nach Abschluss des Versuchs wird die Druckluft abgelassen, der Zylinderdeckel (6) abgenommen und die Position des Injektionsstempels (4) innerhalb der Suspensionszelle (3) gemessen.
Die Versuche am finalen Versuchsstand der Bodenfilterpresse wurden erst nach Abschluss der Druckfiltration, d. h. die Filtratmasse änderte sich nicht mehr wesentlich, beendet. Analog zum Filterpressversuch (Kapitel 3.2) wurde jedoch eine Mindestversuchsdauer von 07:30 min eingehalten.
Anhand der eingebauten Suspensionsmasse und der Position des Injektionsstempels (4) nach Abschluss der Druckfiltration kann der effektive Suspensionsanteil berechnet werden (Gl. 3.5).

3.4.5 Hinweise zur Versuchsauswertung

Im Zuge der Vorversuche mit dem Prototyp wurde die zeitliche Entwicklung der Druckfiltration noch nicht berücksichtigt. Zwar wurde, um die Versuche miteinander vergleichen zu können, eine einheitliche Versuchsdauer gewählt, jedoch war zu diesem Zeitpunkt die Druckfiltration zumeist noch nicht abgeschlossen. Im Falle einer längeren Versuchsdauer filtert weiterhin Wasser aus der Suspension aus, wodurch sich der Suspensionsrückstand $\eta_{S,res}$ weiter reduziert .
Wann bei der baupraktischen Ausführung von Hebungsinjektionen, die Druckfiltration an den frisch erzeugten Injektionskörperstrukturen beendet ist und somit kein Wasser mehr aus der injizierte Suspension ausfiltert, lässt sich nicht genau ermitteln. Zwar ist die Injektionsdauer

[17] Verwendeter Proctorhammer: Fallgewicht 2,5 kg, Fallhöhe 30 cm.
[18] Alle Versuche an Boden 1 und Boden 2 wurden ohne Filterpapier ausgeführt. Der Einbau eines Filterpapiers war erst bei Versuchen mit einem gering durchlässigen Sand (k=1E-6) erforderlich, um die Ausbildung von Erosionskanälen im Boden zu verhindern.
[19] Verhindert, dass die Druckblase an den Bohrlöchern im Deckel des Druckstempels eingedrückt und beschädigt wird.

bekannt, jedoch sind nach Abschluss des Injektionsvorgangs die frischen Injektionskörperstrukturen weiterhin dem Spannungsniveau des Bodens ausgesetzt. Des Weiteren ist der im Boden tatsächliche auftretende Injektionsdruck nicht bekannt. Als oberer Grenzwert für den maximalen Volumenverlust der Suspension infolge der Druckfiltration kann jedoch vereinfachend davon ausgegangen werden, dass:

- der maximale, auf die Suspension wirkende Druck während der Injektion auftritt
- der maximale Injektionsdruck den effektiven Vertikalspannungen des Bodens auf Höhe des Injektionsbereichs entspricht
- bereits mit Abschluss der Injektion die Druckfiltration vollständig abgeschlossen ist.

Das verbleibende Suspensionsvolumen, welches nach Abschluss der Druckfiltration und nach einer evtl. auftretenden Porenraumverfüllung im Injektionsriss zurückbleibt bewirkt eine entsprechende Verdrängung des Bodens.
Zur Ermittlung des effektiv zur Bodenverdrängung wirksamen Suspensionsvolumens wurden die Versuche mit der Bodenfilterpresse erst nach Abschluss der Druckfiltration beendet.

Um Verwechslungen mit den Versuchen am Prototyp zu vermeiden, wird der nach Abschluss der Druckfiltration ermittelte Suspensionsrückstand nachfolgend als effektiver Suspensionsanteil $\eta_{S,eff}$ bezeichnet.

$$\eta_{S,eff} = \frac{V_{S,t\to\infty}}{V_{S,t=0}} \qquad \text{(Gl. 3.5)}$$

Mit:

$\eta_{S,eff}$	%	Effektiver Suspensionsanteil
$V_{S,t\to\infty}$	cm³	Volumen der nicht eingedrungenen Suspension am Ende des Versuchs nach Abschluss der Druckfiltration. Ermittlung analog zu (Gl. 3.3)
$V_{S,t=0}$	cm³	Eingefülltes Suspensionsvolumen (Gl. 3.4)

Bezüglich der Ausführung von Hebungsinjektion beschreibt der effektive Suspensionsanteil $\eta_{S,eff}$ den Anteil des injizierten Suspensionsvolumens, welcher zu einer Verdrängung des Bodens beiträgt. Je höher der effektive Suspensionsanteil ist, desto größer ist das Bodenvolumen das verdrängt werden kann.

Das Eindringverhalten und der Verlauf der Druckfiltration der Suspension können durch die zeitliche Darstellung der relativen Filtratmasse F_{rel} veranschaulicht werden:

$$F_{rel} = \frac{m_{F,t}}{m_{S,t=0}} \qquad \text{(Gl.3.6)}$$

Mit:

F_{rel}	%	Relative Filtratmasse
$m_{F,t}$	g	Filtratmasse zum Zeitpunkt t
$m_{S,t=0}$	g	Eingefüllte Suspensionsmasse

Die aufgefangene Filtratmasse wurde während des Versuchs kontinuierlich gemessen. Die nach den Versuchen durchgeführten Kontrollmessungen der Filtratmasse an einer zweiten Waage ergaben, dass die kontinuierliche Messung einer geringen Ungenauigkeit unterliegt. Da sich die Filtratmasse während des Versuchs kontinuierlich ändert und insbesondere gegen Versuchsende nur noch sehr geringe Änderungen auftreten, wird diese Massenänderung von der Waage[20] nicht immer exakt erfasst. Für die Auswertung der relativen Filtratmasse wurden die Messdaten um den entsprechenden Verhältniswert zwischen der Filtratmasse zum Versuchsende und der Filtratmasse aus der Kontrollmessung angepasst. Abgesehen von den Versuchen mit reinen Bentonitsuspensionen (sehr geringe Filtratwasserabgabe nach der Filterkuchenbildung), betrug die maximale Abweichung der Filtratmassen ca. 10 g. Dies entspricht einer Abweichung der relativen Filtratmassen von ca. 1,3 % (Abb. 3.9). In Abb. 3.9-rechts ist zusätzlich die Entwicklung der relativen Filtratmasse über die Zeitachse im Wurzel-Maßstab dargestellt. Hierbei ist der lineare Verlauf kennzeichnend für die Phase der Druckfiltration.

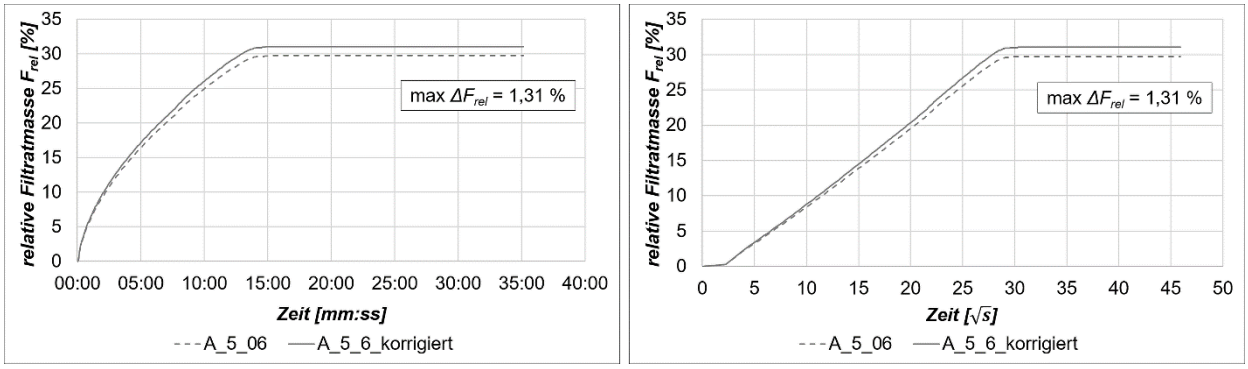


Abb. 3.9: Relative Filtratmasse mit und ohne Korrektur durch Kontrollmessung

3.5 Versuche mit der Bodenfilterpresse

3.5.1 Übersicht

Nachfolgend werden die Untersuchungen mit der Bodenfilterpresse dargestellt. Die thematische Gliederung der durchgeführten Versuche kann Tabelle 3.6 entnommen werden.

Tabelle 3.6: Übersicht der Voruntersuchungen

Kapitel	Fokus der Untersuchung
3.5.2	Reproduzierbarkeit der Versuche
3.5.3	Variation der Injektionsparameter (Injektionsdruck, Injektionszeit)
3.5.4	Eindringverhalten bei unterschiedlichen grobkörnigen Böden
3.5.5	Eindringverhalten bei unterschiedlichen Feststoffzusammensetzungen der Suspension
3.5.6	Variation des *w/f*-Werts der Suspension

[20] Kern PCB1000-1

Die Versuchsrandbedingungen und die verwendeten Suspensionen sind in Tabelle 3.7 bzw. Tabelle 3.8 aufgeführt. Detailliertere Angaben zu den verwendeten Materialien sind in Kapitel 2 beschrieben.

Tabelle 3.7: Versuchsrandbedingungen für die Versuche mit der Bodenfilterpresse

Boden	
Boden 1 ρ_d=1,80 g/cm³ (mitteldicht / dicht) w=9,57 % k=ca. 1x10E-5 m/s Bodeneinbau: Proctorhammer	Boden 2 ρ_d=1,85 g/cm³ (dicht) w=3,5 % k=ca. 2x10E-3 m/s Bodeneinbau: Proctorhammer
Injektionsdruck (p_{Inj})	
7 bar (sofern nicht anders angegeben)	
Injektionszeit (Versuchsdauer)	
Minimum: 07:30 min	

Tabelle 3.8: Verwendete Suspensionen

Suspensionstyp (Massenanteil des Feststoffs)	***w/f*-Wert**	**Bentonitanteil *B***
[-]	**[-]**	**[%]**
FP 1	1	k. A.
	0.8	k. A.
	1.2	k. A.
	2	k. A.
FP 2	1	-
	0.7	-
CEM I	0.6	-
CEM I	1	-
CEM I (50%) + TL (50%)	1	-
CEM I (30%) + TL (70%)	1	-
CEM I (30%) + TL (50%) + KS (20%)	0.8	-
	1	-
	1	1
	1	2
	0.8	2
	1	4

3.5.2 Reproduzierbarkeit der Versuche

Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse stellt ein wichtiges Qualitätskriterium für die entwickelte Bodenfilterpresse dar. Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit wurde bei mehreren Versuchen ein Wiederholungsversuch durchgeführt und jeweils der effektive Suspensionsanteil bestimmt. In Tabelle 3.9 sind die jeweils untersuchten Boden-Suspension-Kombinationen

aufgeführt. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abb. 3.10 dargestellt. Für jedes Versuchspaar bestehend aus Erst- und Wiederholungsversuch, wurde die Differenz zwischen dem jeweils ermittelten effektiven Suspensionsanteil bestimmt.

Tabelle 3.9: Boden-Suspension-Kombinationen der Erst- und Wiederholungsversuche

Versuche	Boden	*w/f*-Wert	Suspension
[-]	[-]	[-]	[-]
K_2	Boden 1	1.0	FP 1
K_3	Boden 2	1.0	FP 1
K_4	Boden 1	1.0	CEM I (30%)+TL (50%)
K_5	Boden 1	1.0	CEM I (30%)+ TL1(70%)
K_6	Boden 1	0.8	FP 1
K_7	Boden 1	1.2	FP 1
K_8	Boden 1	1.0	CEM I (30%)+TL (50%)+KS (20%)
K_9	Boden 1	0.8	CEM I (30%)+TL (50%)+KS (20%)
K_11	Boden 1	1.0	CEM I (30%)+TL (50%)+KS (20%) +B (1%)
K_13	Boden 1	1.0	CEM I (30%)+TL (50%)+KS (20%)+ B (2%)
K_14	Boden 1	1.0	FP 2
K_15	Boden 1	0.7	FP 2
K_2 A_5*	Boden 1	1.0	FP 1

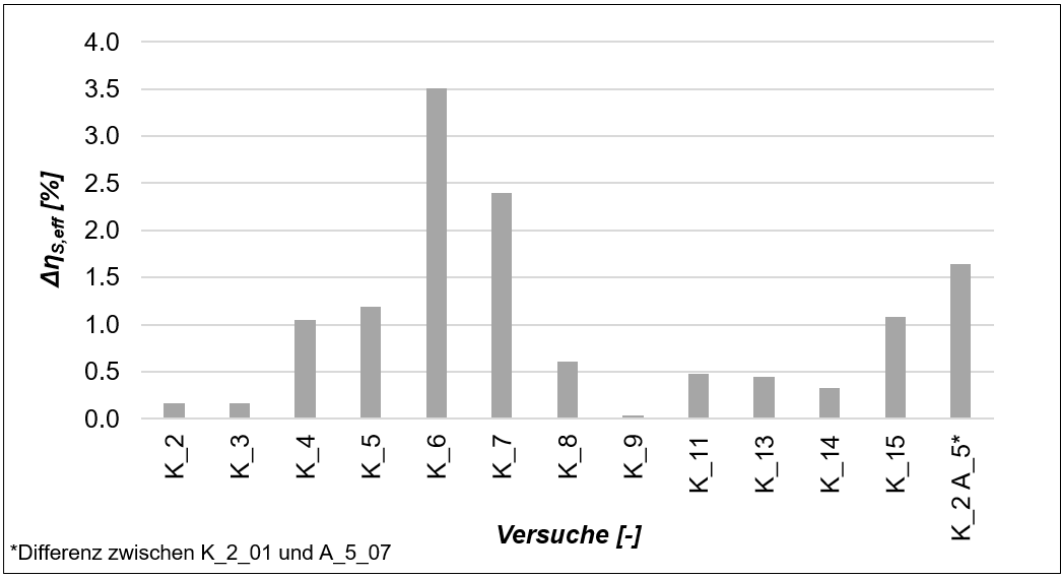


Abb. 3.10: Differenz des effektiven Suspensionsanteils zwischen Erst- und Wiederholungsversuch

Die Versuchsergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Bei einem Großteil der Versuche weichen die jeweiligen Versuchsergebnisse um weniger als 1 % voneinander ab. Nur vereinzelt kam es auch zu etwas größeren Abweichungen (max. 3,5 %). Die Versuche der Gegenüberstellung K_2 A_5 wurden von zwei verschiedenen Personen, in einem zeitlichen

Abstand von ca. 6 Monaten durchgeführt. Mit einer Abweichung von ca. 1,5 % zeigt sich auch in diesem Fall eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse.

Im Rahmen des hier durchgeführten Forschungsprojekts konnte damit die grundsätzliche Reproduzierbarkeit der Versuche bestätigt werden.

In Anbetracht der erreichten Messgenauigkeit des ausgewerteten effektiven Suspensionsanteils ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Suspensionsmischungen möglich.

3.5.3 Variation der Injektionsparameter (Injektionsdruck und Injektionszeit)

Der Einfluss des Injektionsdrucks und der Injektionszeit auf den effektiven Suspensionsanteil kann indirekt anhand der relativen Filtratmasse aufgezeigt werden. In Abb. 3.11 ist die Entwicklung der Filtratmasse bei einem Injektionsdruck von 2 und 7 bar dargestellt.

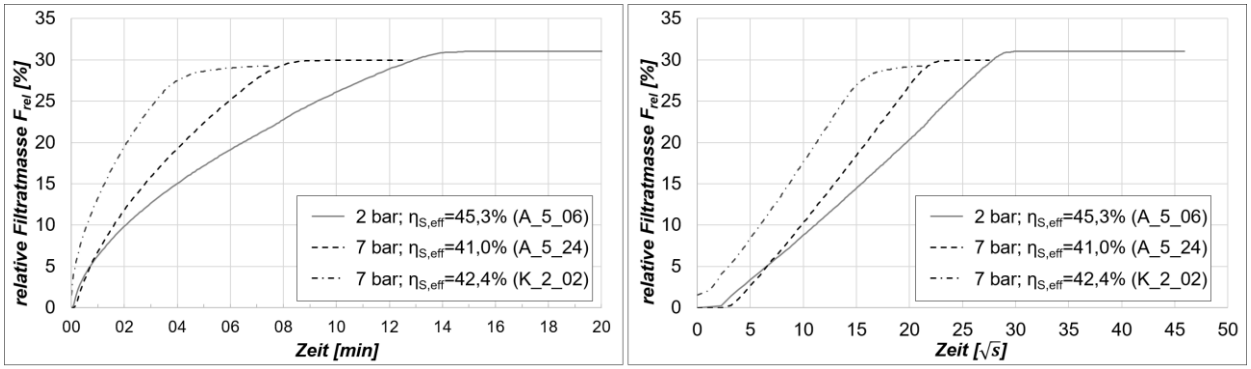


Abb. 3.11: Einfluss des Injektionsdrucks auf die Versuchsdauer

Die relative Filtratmasse betrug bei allen drei Versuchen am Versuchsende ca. 30 %. Dass dieser Wert bei dem geringeren Injektionsdruck von 2 bar etwas höher ausfiel, liegt im Rahmen der Streuung (siehe Kapitel 3.3.4.2). Die Abweichungen zwischen den Kurvenverläufen bei einem Druck von 7 bar ergaben sich aufgrund des unterschiedlichen Ablaufs zur Erzeugung des Injektionsdrucks. In Versuch K_2_02 wurde der Injektionsdruck von 7 bar sofort zu Versuchsbeginn aufgebracht. Bei Versuch A_5_24[21] wurde der Injektionsdruck innerhalb von ca. 30 s aufgebracht. Auf den ermittelten effektiven Suspensionsanteil wirkt sich dies nicht erkennbar aus. In der Darstellung der Versuchszeit im Wurzelmaßstab zeigt sich, dass die Kurven bei 7 bar lediglich etwas zeitversetzt, jedoch nahezu parallel verlaufen. Hingegen verläuft bei einem Injektionsdruck von 2 bar, aufgrund der dazu im Vergleich langsamer ablaufenden Druckfiltration, die Kurve signifikant flacher.

[21] Sowie bei Versuch A_5_06

Insgesamt wirkte sich der Injektionsdruck nur in geringem Maße auf den schlussendlich erreichten effektiven Suspensionsanteil aus. Infolge des höheren Injektionsdrucks reduzierte sich jedoch die erforderliche Versuchsdauer von ca. 14 min auf ca. 7–8 min.

3.5.4 Eindringverhalten bei unterschiedlichen grobkörnigen Böden

Im Rahmen der ersten Testreihe mit dem Prototyp konnte bereits gezeigt werden, dass beispielsweise anhand der Auswertung der Feststoff- und Wasseranteile des Filtrats auf das Eindringverhalten von Suspensionen bei unterschiedlichen Böden geschlossen werden kann (Kapitel 3.3.3.2). Inwiefern sich bei unterschiedlichen Böden der effektive Suspensionsanteil und die Entwicklung der relativen Filtratmasse ändert, wurde am finalen Versuchsstand der Bodenfilterpresse exemplarisch an zwei Böden untersucht (Abb. 3.12).

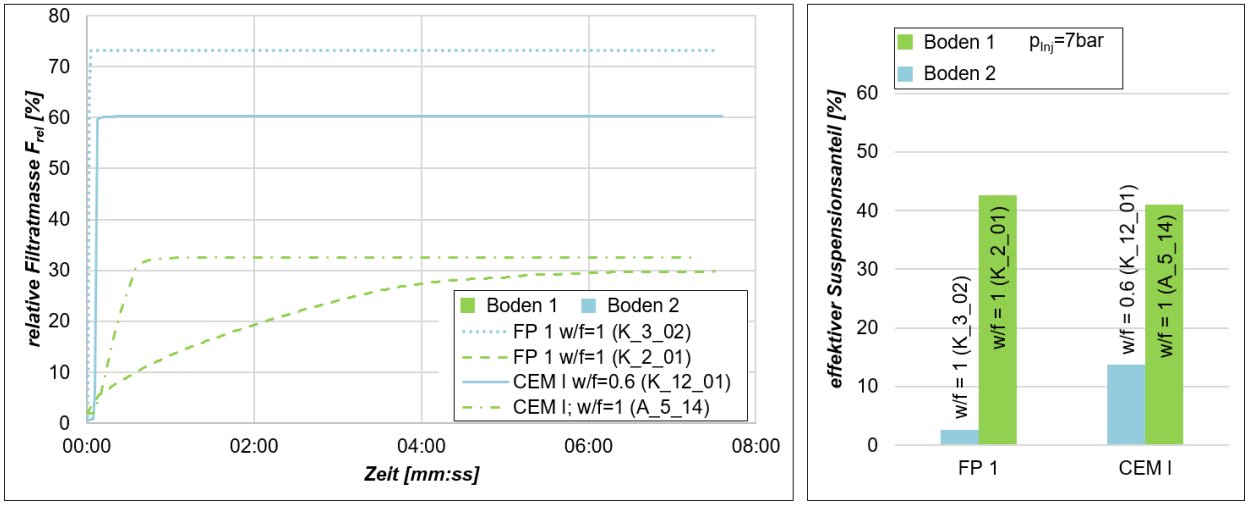


Abb. 3.12: links: Entwicklung der relativen Filtratmasse
rechts: Effektiver Suspensionsanteil

Während die Suspensionen in den Boden 1 kaum eingedrungen sind, konnten beim durchlässigeren Boden 2 die Suspensionen vollständig bzw. nahezu vollständig eindringen. Im Versuch mit Boden 2 und der Fertigproduktsuspension (w/f = 1,0) konnte sich kein Filterkuchen ausbilden und die Suspension drang vollständig in den Boden ein. Bei Verwendung einer feststoffreicheren Zementsuspension (w/f = 0,6), die aufgrund ihrer Instabilität zu einer sehr schnellen Filterkuchenbildung neigt, konnte sich ein ca. 1 cm dicker Filterkuchen ausbilden und damit ein effektiver Suspensionsanteil von ca. 14 % erreicht werden. Bei beiden Versuchen änderte sich die Filtratmasse bereits nach wenigen Sekunden nicht weiter. Die Eindringung sowie ein Ausfiltern der Suspension waren damit abgeschlossen. In den Versuchen am Boden 1 dauerte die Filtratwasserabgabe je nach Suspension bis zu ca. 06:30 min. Sowohl bei Verwendung einer reinen Zementsuspension, als auch beim Versuch mit der Fertigproduktsuspension bildete sich ein ca. 2,8 cm dicker Filterkuchen aus.

Aufgrund der vergleichsweise geringeren Filterkuchendicke bei den Versuchen am Boden 2, hängt in diesem Fall die Größe des effektiven Suspensionsanteils wesentlich von der Eindringung der Suspension in den Boden ab. Um die Eindringung zu reduzieren und damit den effektiven Suspensionsanteil zu erhöhen, könnte beispielsweise der Suspension ein grobkörnigerer Feststoff („Stopfkorn“) beigemischt werden. Inwiefern der effektive Suspensionsanteil bei Injektionen im Boden 1 durch unterschiedliche Feststoffzusammensetzungen oder Zugabe von Bentonit erhöht werden kann, wurde in den nachfolgend beschriebenen Versuchen untersucht.

3.5.5 Eindringverhalten bei verschiedenen Feststoffzusammensetzungen der Suspension

Um beurteilen zu können, durch welche Feststoffzusammensetzung einer Suspensionsmischung ein möglichst hoher effektiver Suspensionsanteil erreicht wird, wurden verschiedene Suspensionsmischungen untersucht. Hierzu wurden, ausgehend von einer reinen Zementsuspension, als Zuschlagsstoffe ein leicht plastischer Ton (TL 1) und Kalksteinmehl (KS) verwendet. Alle Suspensionen wurden mit einem *w/f*-Wert von 1,0 angemischt und bei einem Injektionsdruck von 7 bar in der Bodenfilterpresse getestet. Vorab der Versuche mit der Bodenfilterpresse, wurde anhand der rheologischen Eigenschaften, eine Vorauswahl an zu untersuchenden Suspensionen getroffen.

In Abb. 3.13 sind die Versuchsergebnisse der Bodenfilterpresse für verschiedene Suspensionsmischungen dargestellt. Zum Vergleich sind zusätzlich die Versuchsergebnisse des Fertigprodukts 1 eingetragen.

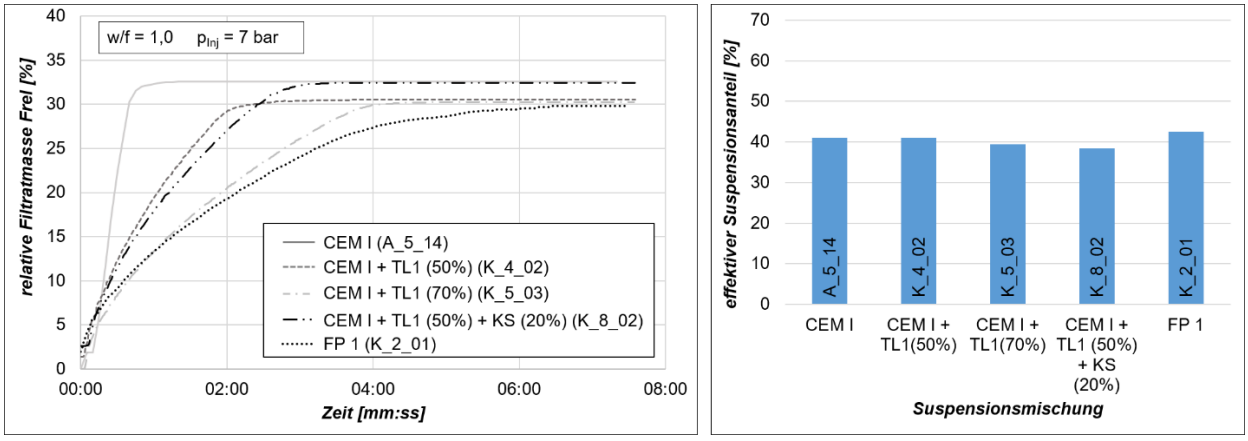


Abb. 3.13: Einfluss der Suspensionsmischung auf die relative Filtratmasse und den effektiven Suspensionsanteil

Während es infolge der Druckfiltration bei der reinen Zementsuspension zu einer vergleichsweise schnellen Abgabe der Wasserphase aus der Suspension kommt, kann durch die Zugabe des leicht plastischen Tons, dieser Prozess etwas verlangsamt werden (Abb. 3.13-oben). Aufgrund des höheren Tonanteils in der Suspension, entsteht ein weniger durchlässiger Filterkuchen. Mit dem Ziel, die Porenengstellen des Bodens durch größere Partikel schneller zu verschließen und

die anfängliche Eindringung der Suspension zu reduzieren, wurde der Ton-Zement-Suspension zusätzlich Kalksteinmehl zugegeben. Die ohnehin geringe Eindringung konnte dadurch jedoch nicht weiter reduziert erreicht werden. Unabhängig von den hier gewählten Feststoffzusammensetzungen der Suspensionen betrug der effektive Suspensionsanteil ca. 40 % (Abb. 3.13-unten). Damit unterscheiden sich die selbst zusammengestellten Suspensionen nur unwesentlich von der Suspension mit dem Fertigprodukt 1.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde im Weiteren untersucht, ob durch die Zugabe eines quellfähigen Bentonits die Durchlässigkeit des entstehenden Filterkuchens reduziert werden kann.

In Abb. 3.14 sind die relative Filtratmasse und der effektive Suspensionsanteil der untersuchten Suspensionen dargestellt.

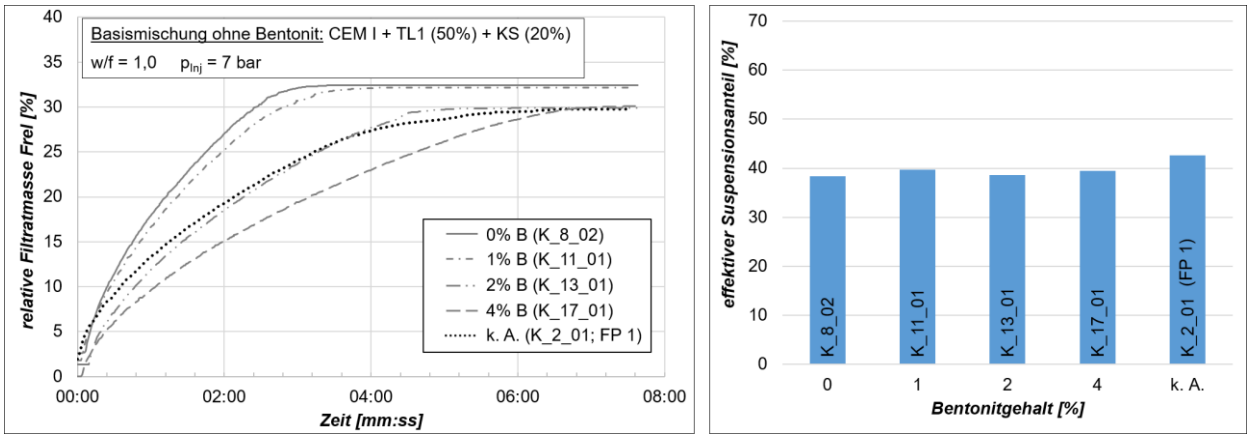


Abb. 3.14: Einfluss des Bentonitgehalts auf die relative Filtratmasse und den effektiven Suspensionsanteil

Wie die Auswertung der relativen Filtratmasse zeigt (Abb. 3.14-oben), wird das Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension mit zunehmendem Bentonitgehalt verlangsamt. Insgesamt konnte jedoch die Filtratmasse nicht reduziert werden. Nach spätestens ca. 6:30 min war die Druckfiltration bei allen Suspensionen abgeschlossen. Der effektive Suspensionsanteil betrug bei allen Suspensionen in etwa 40 % (Abb. 3.14-unten).

Die Untersuchungen zeigen, dass alle hier verwendeten Suspensionen kaum in den hier untersuchten Boden eindringen, sondern stattdessen sich ein knapp 3 cm dicker Filterkuchen ausbildet. Dadurch wird die Größe des effektiven Suspensionsanteils maßgeblich vom Prozess der Druckfiltration bestimmt.

Während Bentonitsuspensionen erfahrungsgemäß eine verhältnismäßig geringe Filtratwasserabgabe aufweisen, konnte bei den untersuchten Bentonit-Zement-Suspensionen keine Reduzierung der Filtratwasserabgabe bzw. Erhöhung des effektiven Suspenionsanteils erreicht werden. Gemäß Geil (1989) ist dies auf zwei Prozesse zurückzuführen:

Bei Bentonitsuspensionen kann sich, unter der Abgabe von Wasser, ein dichter Filterkuchen aus geschichteten Bentonitblättchen ausbilden. Sind größere Feststoffpartikel in der Suspension enthalten, wie z.B. Zementkörner, wird der Filterkuchen durch die darin enthaltenen größeren Körner aufgelockert. Die Durchlässigkeit des Filterkuchens wird dadurch erhöht. Außerdem kommt es zur chemischen Reaktion zwischen Zement und Bentonit. Der Zement führt dazu, dass der Natrium-Bentonit[22] teilweise in Calcium-Bentonit umgewandelt wird. Aufgrund des geringeren Wasserbindevermögens von Calciumbentonit, erhöht sich die Filtratwasserabgabe gegenüber einer reinen Bentonitsuspension.

3.5.6 Variation des *w/f*-Werts der Suspension

Zur Beurteilung welchen Einfluss der *w/f*-Wert auf den effektiven Suspensionsanteil hat, wurden unter den gleichen Einbaubedingungen des Bodens die Suspensionen mit unterschiedlichen *w/f*-Werten getestet. In Abb. 3.15 ist der Einfluss des *w/f*-Werts für verschiedene Suspensionsmischungen dargestellt.

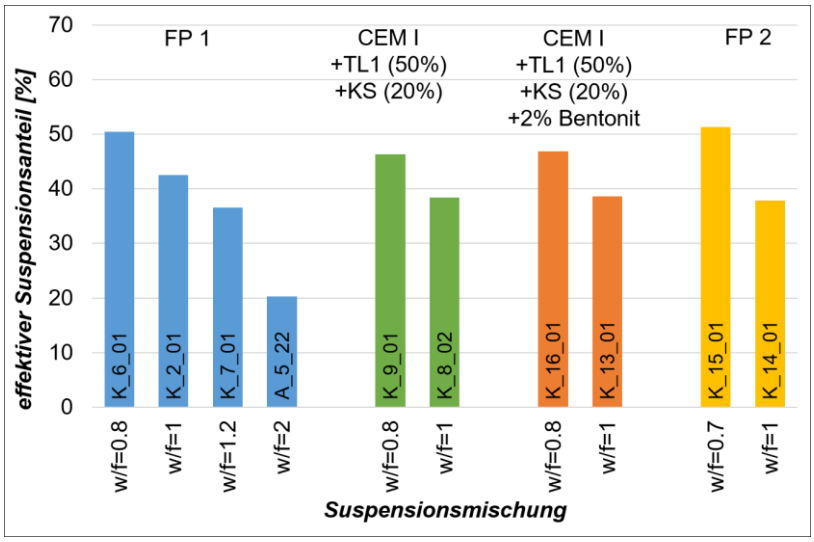


Abb. 3.15: Einfluss des *w/f*-Werts auf den effektiven Suspensionsanteil

Erwartungsgemäß erhöht sich der effektive Suspensionsanteil, indem der *w/f*-Wert der Suspension reduziert wird. Durch die Reduzierung des *w/f*-Werts von 1,0 auf 0,8 konnte der effektive Suspensionsanteil um ca. 8 % erhöht werden. Je weniger Wasser die Suspension enthält, desto geringer ist die Wassermenge, die infolge der Druckfiltration aus der Suspension ausfiltern kann.

[22] In den hier durchgeführten Versuchen wurde ebenfalls ein (aktivierter) Natrium-Bentonit verwendet (vgl. Kapitel 2.2.2.

Die Auswertung der im Filtrat enthaltenen Feststoffmasse zeigt, dass sich der Feststoffanteil mit zunehmendem *w/f*-Wert erhöht (Abb. 3.16). Je größer der *w/f*-Wert, desto mehr Suspension dringt in den Boden ein, bis ein ausreichend dichter Filterkuchen entstanden ist.

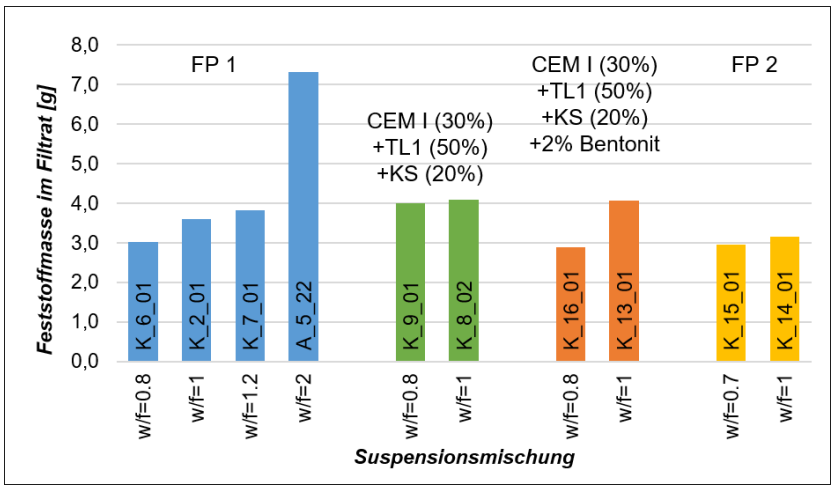


Abb. 3.16: Gemessene Feststoffmasse im Filtrat

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass es sich für die Ausführung von Hebungsinjektionen empfiehlt, eine möglichst feststoffreiche Suspension zu verwenden. Dadurch können die Verluste infolge des Eindringens der Suspension und dem Ausfiltern der Wasserphase minimiert werden.

3.6 Zusammenfassung und Fazit

Mit der entwickelten Bodenfilterpresse steht ein Laborversuch zur Verfügung, mit dessen Hilfe auf einfache Art und Weise ein Vergleich zwischen verschiedenen Suspensionen hinsichtlich deren Eignung für Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden möglich ist. Damit kann im Rahmen einer konkreten Baumaßnahme das Eindringverhalten verschiedener Suspensionen an Bodenmaterial aus dem geplanten Injektionsbereich untersucht werden. Der an der Bodenfilterpresse einzustellende Injektionsdruck sollte dabei mindestens den vertikalen Bodenspannungen aus dem Eigengewicht des Bodens und den Bauwerkslasten auf Höhe des Injektionsbereichs entsprechen. Als Bewertungskriterium dient der aus dem Versuch ermittelte effektive Suspensionsanteil. Je größer der effektive Suspensionsanteil einer Suspension ist, desto geringer sind die Verluste, die sich durch das Eindringen der Suspension in den Porenraum des Bodens und dem Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension ergeben.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben ist. Der in den Versuchen gewählte Injektionsdruck wirkte sich in erster Linie auf die erforderliche Versuchsdauer bis zum Abschluss der Druckfiltration aus. Die Größe des am Versuchsende erreichten effektiven Suspensionsanteils änderte sich durch Variation des Injektionsdrucks nur geringfügig.

Je nach Boden-Suspension-Kombination zeigte sich ein unterschiedliches Eindringverhalten der Suspensionen. Während sich die Feststoffzusammensetzung der Suspension lediglich auf den zeitlichen Verlauf der Druckfiltration auswirkte, konnte durch die Reduzierung des w/f-Werts auch der effektive Suspensionsanteil erhöht werden.

4 Großversuche zur Ausführung von Hebungsinjektionen

4.1 Ziel der Untersuchungen und Anforderungen an den Versuchsaufbau

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, gibt es nur unzureichende Erkenntnisse über die tatsächliche Ausbildung und Entwicklung der bei Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden entstehenden Injektionskörperstrukturen.

Aus diesem Grund erfolgte die Ausführung von Hebungsinjektionen in zwei Großversuchen in der Versuchsgrube am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München.

Folgende Schwerpunkte wurden untersucht:

- Räumliche Ausbildung (Form und Größe) der Injektionskörper
- Entwicklung der Injektionskörperstrukturen infolge mehrfacher Injektionen
- Einfluss der Dämmerschicht um das Manschettenrohr auf die Ausbildung der resultierenden Injektionskörper
- Wirkungsweise unterschiedlicher Injektionskonzepte: Führt das mehrfache Injizieren kleiner Suspensionsmengen oder das weniger häufige Injizieren entsprechend größerer Injektionsmengen schneller zum Erreichen der angestrebten Hebungsziele?

Um eine möglichst praxisnahe Ausführung der Hebungsinjektionen zu erreichen, wurde die Versuchsanordnung entsprechend groß ausgelegt. Die Injektionsparameter (Verpressrate und Injektionsvolumina pro Injektion) liegen im Bereich der üblichen baupraktischen Ausführung. Da keine gesicherten Erfahrungen zur Größe der entstehenden Injektionskörper und damit zur erforderlichen Größe des „Versuchsfelds“ bis dato vorlagen, sollte vermieden werden, dass ein großer Teil der Suspension bis an den Rand der Versuchsgrube oder bis an die Geländeoberfläche vordringt. Aus diesem Grund wurde das zu injizierende Suspensionsvolumen zunächst auf 10 l pro Injektion festgelegt. Eine weitere wesentliche Anforderung an den Versuchsaufbau war es, dass die resultierenden Injektionskörper vollständig freigelegt werden können. Anstatt wie ursprünglich geplant, die Hebungsinjektionen einzeln in einer vergleichsweise kleinen Versuchsvorrichtung auszuführen, wurde die Möglichkeit wahrgenommen, die Versuche in der Versuchsgrube am Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München durchzuführen. Dies ermöglichte zudem bereits mehrere Manschettenrohre in einem Versuchsaufbau zu integrieren.

Zur Durchführung der Großversuche wurden im Weiteren die folgenden Punkte berücksichtigt:

- Als Injektionsgut wurde eine Suspension verwendet, die auch in der baupraktischen Ausführung von Hebungsinjektionen eingesetzt wird[23]. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Gestalt der Injektionskörperstrukturen nicht eine Folge praxisferner Suspensionseigenschaften ist.
- Durch die gewählte Bodenüberlagerung und die zusätzliche Auflast konnte auf Höhe der eingebauten Manschettenrohre ein Spannungsniveau erreicht werden, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf geotechnische Anwendungsfälle gewährleistet.
- Indem die erforderliche zusätzliche Auflast an der Geländeoberfläche durch mit Boden gefüllte Big Bags erzeugt wurde, anstatt mit einer starren Auflast, wurde die Bodenverformung an der Geländeoberfläche nicht behindert. Damit konnte die tatsächliche räumliche Ausbildung der erzeugten Hebungen und das Verhältnis zwischen injiziertem Suspensionsvolumen und erreichtem Hebungsvolumen untersucht werden.
- Um den Einfluss der Dämmerschicht um das Manschettenrohr auf die Gestalt der Injektionskörper zu untersuchen, wurde ein entsprechender Verbundkörper aus Manschettenrohr und umhüllendem Dämmer im Boden verbaut. Zum Vergleich wurden auch Injektionen an einem Manschettenrohr ohne umhüllende Dämmerschicht ausgeführt.

Für die Großversuche wurde der in Kapitel 2.1 beschriebene Boden 1 ausgewählt. Versuche mit dem Prototyp der Bodenfilterpresse (Kapitel 3.3.3 und 3.3.4) zeigten, dass die Durchlässigkeit des Bodens zum einen ausreichend groß ist, damit die in Kapitel 1.1 genannten charakteristischen Mechanismen (Druckfiltration und Porenraumverfüllung) auftreten können. Zum anderen ist der Boden nicht zu durchlässig, wodurch die Gefahr einer übermäßigen Porenräumverfüllung und damit eines entsprechenden Mehrverbrauchs an Suspensionsmenge minimiert wird. Neben den technischen Aspekten wurde auch berücksichtigt, dass mindestens für den Zeitraum der Projektbearbeitung die Verfügbarkeit des Bodens mit gleicher Lieferkörnung gegeben ist.

Aufgrund des enormen Aufwands der mit der Durchführung derartiger Versuche verbunden ist, wäre für den Fall von Fehlversuchen die Ausführung von Wiederholungsversuchen weder finanziell noch zeitlich im Rahmen des Forschungsvorhabens umzusetzen gewesen. Aus diesem Grund wurde zunächst ein etwas kleiner dimensionierter Großversuch ausgeführt, um die grundsätzliche technische Umsetzung zu erproben. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden für einen zweiten, größeren Großversuch genutzt, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die baupraktische Anwendung gewährleistet. In nachfolgenden Kapiteln wird im Detail auf die beiden durchgeführten Großversuche eingegangen.

[23] Fertigmischungsprodukt 1, siehe Kapitel 2.2

4.2 Allgemeine Angaben zu den Großversuchen

4.2.1 Versuchsaufbau

Die beiden Großversuche wurden in der Versuchsgrube am Zentrum Geotechnik der TU München durchgeführt. Abb. 4.1 zeigt eine Übersicht der Versuchsanordnungen des 1. Großversuchs (Abb. 4.1-links) und 2. Großversuchs (Abb. 4.1-rechts).

Abb. 4.1: Übersicht des Versuchsaufbaus

In Abb. 4.2 bzw. Abb. 4.3 ist der jeweilige Versuchsaufbau schematisch im Schnitt und im Grundriss dargestellt.

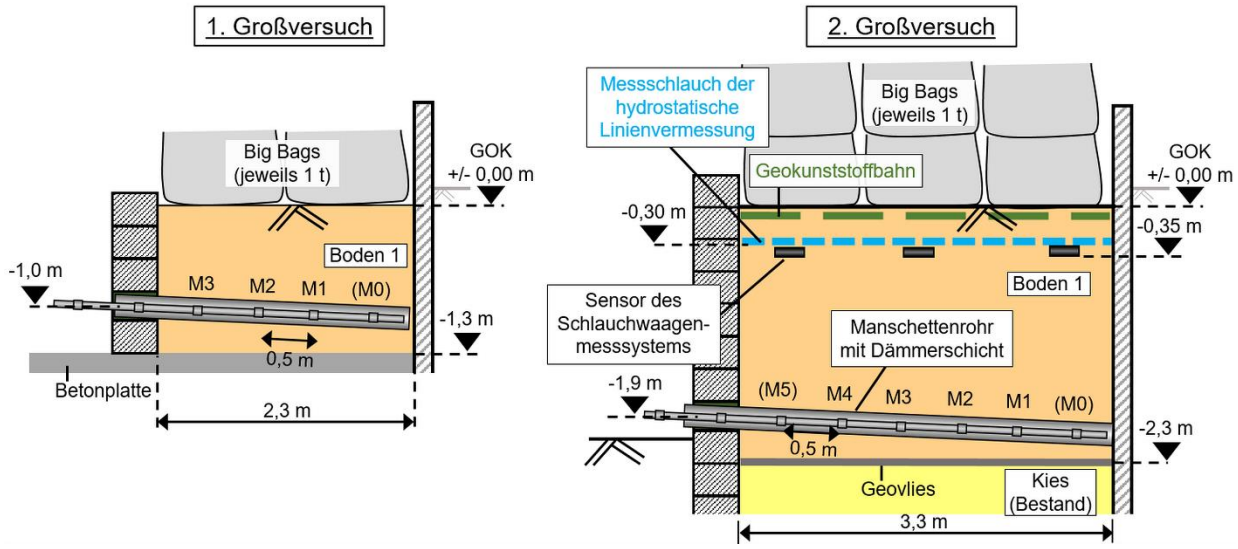


Abb. 4.2: Schema des Versuchsaufbaus im Schnitt (an den Manschetten M0 und M5 wurde nicht injiziert)

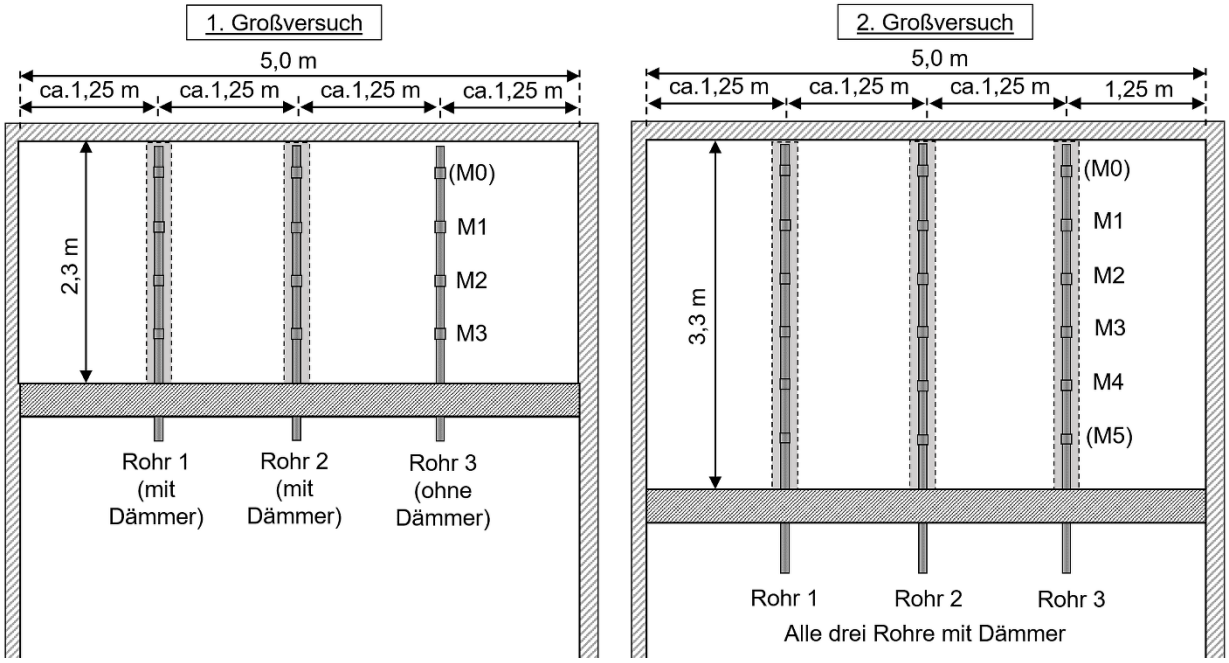


Abb. 4.3: Schematischer Grundriss des Versuchsaufbaus

Die Abmessungen der Versuchsanordnung betrug im 1. Großversuch 5 × 2,3 × 1,3 m (Länge × Breite × Höhe der gesamten Bodenschicht), im 2. Großversuch 5 × 3,3 × 2,3 m. Der Sandboden wurde hierzu lagenweise in 30 cm Schichten eingeschüttet und mit einer Rüttelplatte[24] verdichtet. Als zusätzliche Auflast wurden an der Geländeoberfläche im 1. Großversuch zehn Big Bags bzw. im 2. Großversuch 30 Big Bags platziert. Diese waren jeweils mit ca. 1 t Sand gefüllt. Bei beiden Versuchen wurden jeweils drei Manschettenrohre (MR), in einem Abstand von je ca. 1,25 m, horizontal nebeneinander angeordnet.

Die Verbundkörper, aus einem Manschettenrohr und der umhüllenden Dämmerschicht, wurden vorab dem Einbau in das Versuchsfeld hergestellt. Hierzu wurden die Manschettenrohre jeweils in ein senkrecht stehendes Hüllrohr (KG-Rohr DN 160) zentrisch eingestellt, mit Abstandshaltern versehen und anschließend der Ringspalt mit Dämmer (FP 1 mit *w/f*-Wert = 0,8) von unten nach oben verfüllt. Damit konnte auf einfache Art und Weise die gewünschte vollflächige und gleichmäßige Einbettung des Manschettenrohrs in den Dämmer erreicht werden. Nach einer Aushärtungszeit von ein bis zwei Tagen, wurden die Verbundkörper auf die unterste Sandschicht gelegt und die Hüllrohre entfernt (Abb. 4.4). Alle Rohre wurden mit einem Gefälle von 3 % zum „Bohrlochtiefsten“ in das Versuchsfeld eingebaut. Um den Einfluss der Dämmerschicht auf die Ausbildung der Injektionskörperstrukturen zu untersuchen, wurde im 1. Großversuch das Rohr 3 ohne Dämmerschicht im Boden verbaut. Ansonsten wurden alle Manschettenrohre mit einer umhüllenden Dämmerschicht versehen. Sowohl für die Dämmerschicht als auch die späteren Injektionen wurde das Fertigmischungsprodukt FP 1 verwendet (vgl. Kapitel 2.2.2).

[24] Wacker Neuson DPU 2550

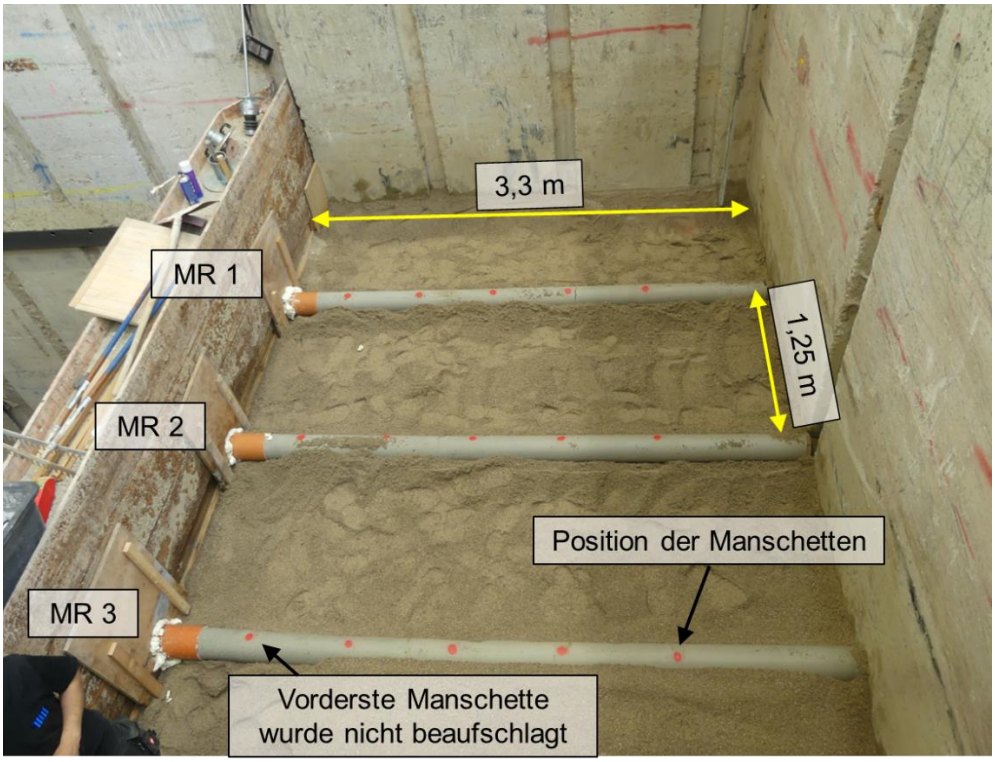


Abb. 4.4: Verbundkörper aus Manschettenrohr und umhüllender Dämmerschicht (2. Großversuch)

Um die Manschettenrohre durch die Vorderseite des Versuchsfelds führen zu können, wurde auf Höhe der Manschettenrohre anstatt eines Stahlträgers, eine Lage aus Holzbalken eingebaut. Durch Aussparungen in der Holzbalkenlage war eine Durchführung der Manschettenrohre bzw. der Verbundkörper möglich. Auf der Innenseite wurde die Aussparung mit Holzbrettern verschlossen und zusätzlich mit Bauschaum abgedichtet (Abb. 4.4).

Nach der Positionierung der Manschettenrohre wurde der lagenweise Einbau des restlichen Bodens fortgesetzt. Die erreichte Lagerungsdichte wurde anhand von mehreren Ausstechzylindern bestimmt. Im 2. Großversuch wurde die Gleichmäßigkeit der Bodenverdichtung zusätzlich in jeder Lage durch mehrere dynamische Plattendruckversuche kontrolliert (Anhang A.3.1). In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Einbaukontrolle aus beiden Großversuchen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Einbaukontrolle

Kennziffer	**Einheit**	**1. Großversuch**	**2. Großversuch**
w (Mittelwert)	[%]	5,9	4,1
ρ_d (Mittelwert)	[g/cm³]	1,70	1,83
D	[-]	0,29 (locker)	0,5 (mitteldicht)
E_{vd} (Mittelwert über alle Lagen)	[MN/m²]	-	21

Zur Messung möglicher Hebungen und Senkungen an der Geländeoberfläche kamen je nach Anforderungsprofil unterschiedliche Messsysteme zum Einsatz. Im 1. Großversuch stellte die Verwendung von Seilzug-Wegaufnehmern eine zweckmäßige Lösung dar (Kapitel 4.2.2). Im 2. Großversuch wurden die Verformungen zum einen kontinuierlich mit Hilfe eines Schlauchwaagenmesssystems (Kapitel 4.2.3) erfasst, zum anderen nach einzelnen Injektionsdurchgängen flächendeckend mittels dem System der hydrostatischen Linienvermessung gemessen (Kapitel 4.2.4).

Um feststellen zu können, wie sich die injizierte Suspension in den einzelnen Durchgängen im Boden verteilt hat, wurden den jeweiligen Suspensionschargen unterschiedliche Farbpigmente beigemischt. Bei den Farbpigmenten handelt es sich um anorganische Oxidfarben, die unter anderem zum Einfärben von Beton verwendet werden (Anhang A.2.1 und A.3.2). Für das Anmischen der Suspension wurden in eine Wanne (250 l Fassungsvermögen) die erforderliche Wassermenge eingefüllt, anschließend die gleiche Masse des Fertigmischungsprodukts zugegeben und mit einem Rührwerk mit Wendelrührer bei ca. 480 U/min verrührt. Nach einer Mischdauer von ca. 10 min wurde die Dichte der Suspension mittels eines Messzylinders kontrolliert. Eventuell aufgetretene kleine Abweichungen konnten durch eine entsprechende Feststoff- oder Wasserzugabe korrigiert werden. Nachdem die vom Hersteller angegebene Solldichte erreicht wurde (1,466 g/cm), erfolgte die Zugabe der Farbpigmente (Abb. 4.5). Im 2. Großversuch wurde auch die geringe Dichteänderung infolge der Farbpigmentzugabe durch die Zugabe einer kleinen Wassermenge ausgeglichen. Abschließend wurde die Suspensionsdichte erneut kontrolliert. Um ein mögliches Absinken oder Entmischen zu vermeiden, wurde die Suspension während der Versuchsdurchführung nach wenigen Minuten immer wieder mit dem Rührwerk durchmischt.

Abb. 4.5: Eingefärbte Suspensionen (1. Großversuch) (Mück-Thum, 2018)

Die Förderung der Suspension erfolgte mittels der in Abb. 4.6 dargestellten Kolbenpumpe. Die Fördergeschwindigkeit wurde an der Pumpe reguliert. Der daraus resultierende Injektionsdruck und die eingestellte Verpressrate wurde mit Hilfe eines separaten Durchlaufzählers und einer

Druckmesseinheit in einem Schlauchabschnitt ca. 2 m nachlaufend zur Pumpe gemessen. Aufgrund von technischen Problemen in den Schnittstellen zwischen Durchlaufzähler, Druckaufnehmer und Ausleseeinheit konnten zunächst der Druck und die Verpressrate nicht digital aufgezeichnet werden. Der Druckaufnehmer konnte kurzfristig bereits nach dem ersten Injektionsdurchgang im 1. Großversuch ausgetauscht werden. Eine Aufzeichnung der Verpressrate war allerdings erst zum 2. Großversuch möglich, nachdem der Durchlaufzähler ausgetauscht und zusätzlich die Ausleseeinheit durch den Messtechniker entsprechend konfiguriert werden konnte.
Zur einfacheren Kontrolle der injizierten Suspensionsmenge wurde vor jeder Injektion die Sollmenge in einen Behälter mit Füllstandsmarkierung gefüllt und zusätzlich die Suspensionsmasse vor und nach der Injektion abgewogen. Durch den Einsatz einer entsprechenden Waage konnte im 2. Großversuch außerdem die Änderung der Suspensionsmasse im Behälter während der Injektion digital aufgezeichnet werden.

Nach Abschluss der Injektionsarbeiten des Tages wurden die Rohre mit Wasser gespült.

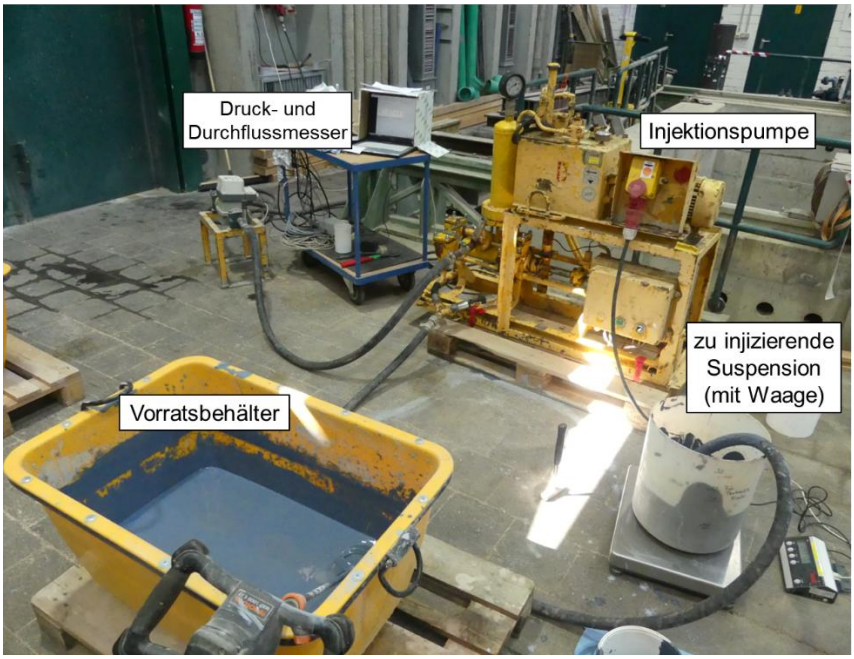


Abb. 4.6: Injektionsgeräte (2. Großversuch)

4.2.2 Verformungsmessungen im 1. Großversuch – Seilzug-Wegaufnehmer

Im Zuge des 1. Großversuchs wurden die Verformungen an der Geländeoberfläche lokal an drei Stellen mit Hilfe von Seilzug-Wegaufnehmern gemessen. Zu deren Befestigung wurde über dem Versuchsfeld, auf die Wände der Versuchsgrube, ein massiver Stahlträger angebracht. Die Seilzug-Wegaufnehmer wurden in einem Abstand von 1,3 m zur Vorderwand, in den freien Bereichen zwischen den Big Bags positioniert (Abb. 4.7). Das Stahlseil wurde an einem

Gegengewicht, das auf der Geländeoberfläche auflag, befestigt. Während der einzelnen Injektionsdurchgänge wurden die Höhenänderungen an den Messstellen kontinuierlich erfasst.

Abb. 4.7: Seilzug-Wegaufnehmer zur lokalen Verformungsmessung (1.Großversuch)

In Abb. 4.8 sind die geometrischen Verhältnisse zwischen den Manschettenrohren und den Messpunkten (MP) der Seilzug-Wegaufnehmer dargestellt.

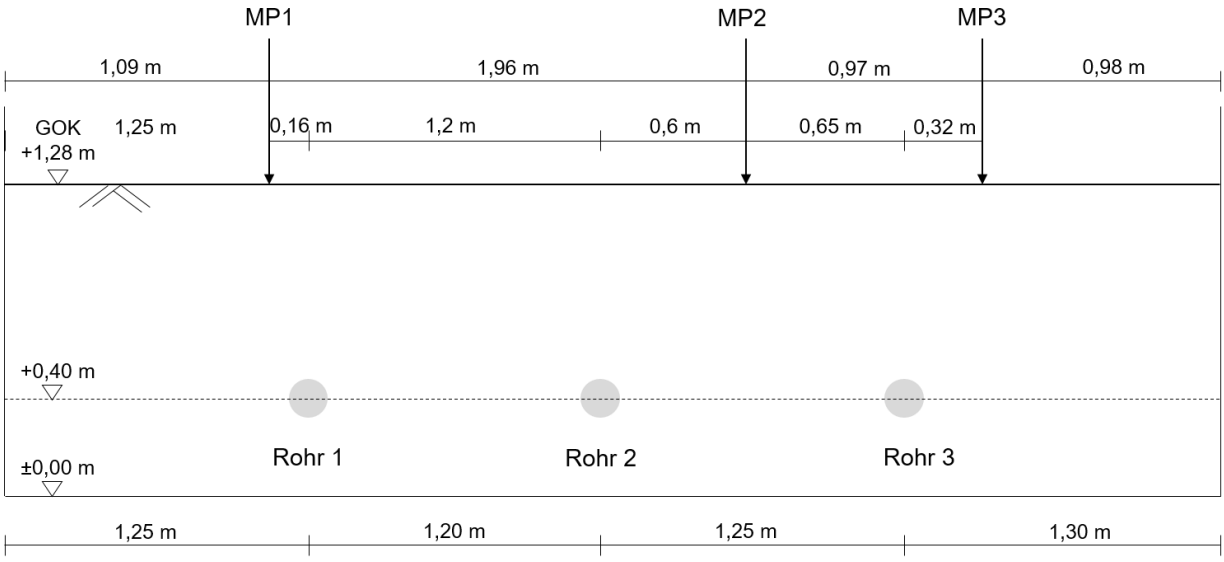


Abb. 4.8: Anordnung der Seilzug-Wegaufnehmer und Manschettenrohre im Schnitt

4.2.3 Verformungsmessungen im 2. Großversuch – Schlauchwaagenmesssystem

Stellte die Verwendung von Seilzug-Wegaufnehmern im 1. Großversuch noch eine zweckmäßige und kostengünstige Möglichkeit der Verformungsmessung dar, wäre deren Einsatz im 2. Großversuch nur noch sehr bedingt geeignet gewesen. Da im 2. Großversuch auch die freien Bereiche zwischen den Big Bags mit Sand ausgefüllt wurden, wäre eine fachgerechte Installation der Seilzug-Wegaufnehmer, die eine zuverlässige Messung der Geländeverformungen gewährleistet, nicht mehr möglich gewesen. Stattdessen wurde im 2. Großversuch, zur kontinuierlichen Messung der Geländeverformung, ein Schlauchwaagenmesssystem verwendet. Das Schlauchwaagenmesssystem wurde seitens der GeTec Ingenieurgesellschaft mbH, einem Tochterunternehmen unseres Kooperationspartners der Keller Holding GmbH, bereitgestellt. In Abb. 4.9 ist das Funktionsprinzip des hier verwendeten Schlauchwaagenmesssystems dargestellt.

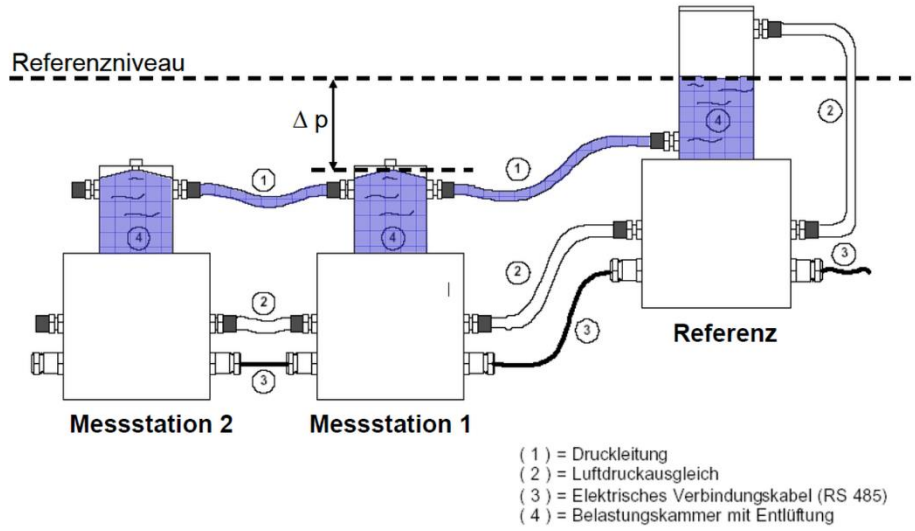


Abb. 4.9: Funktionsprinzip des Schlauchwaagenmesssystems (Fillibeck, 2012)

Das Schlauchwaagenmesssystem besteht aus mehreren Messstellen, einer Referenzmessstelle und einem Ausgleichsgefäß. Die Messstellen sind in Reihe über eine mit Messflüssigkeit gefüllte Druckleitung und eine Belüftungsleitung mit der Referenzmessstelle verbunden. Über ein Ausgleichsgefäß wird der freie Flüssigkeitsspiegel an der Referenzmessstelle auf ein konstantes Referenzniveau reguliert. An den einzelnen Messstellen wird der dort verbaute Drucksensor durch den Schweredruck der Messflüssigkeit gegenüber dem freien Flüssigkeitsspiegel belastet. Ändert sich die Höhenlage der Messstelle kann anhand der gemessenen Druckänderung die Höhenänderung an der jeweiligen Messstelle berechnet werden. Der Luftdruckausgleich erfolgt über eine separate Belüftungsleitung.

Die Messstellen wurden ca. 35 cm unterhalb der späteren Geländeoberfläche eingebaut. Da die Messstellen nach dem Einbau nicht mehr zugänglich sind, wurde jede Messstelle und die Referenzmessstelle mit einem separaten elektrischen Verbindungskabel an den Schaltkasten

angeschlossen. Bei Störungen oder dem Ausfall einer Messstelle führt dies nicht zu einem Ausfall der gesamten Messkette, sondern es sind lediglich die Messungen der defekten Messstelle betroffen. In Abb. 4.10-links ist der Einbau der Messstellen dargestellt. Die Messstelle wurde auf eine Stahlplatte montiert und eben auf dem Sand positioniert (Abb. 4.10-rechts oben). Die Referenzmessstelle und das Ausgleichsgefäß wurden an der Vorderseite des Versuchsfelds befestigt (Abb. 4.10-rechts unten). Die Lage der Referenzmessstelle blieb über die gesamte Versuchsdauer unverändert. Zur Temperaturkompensation waren die Referenzmessstelle sowie die Messstellen 1 bis 6, 9 und 10 zusätzlich mit einem Temperatursensor versehen.

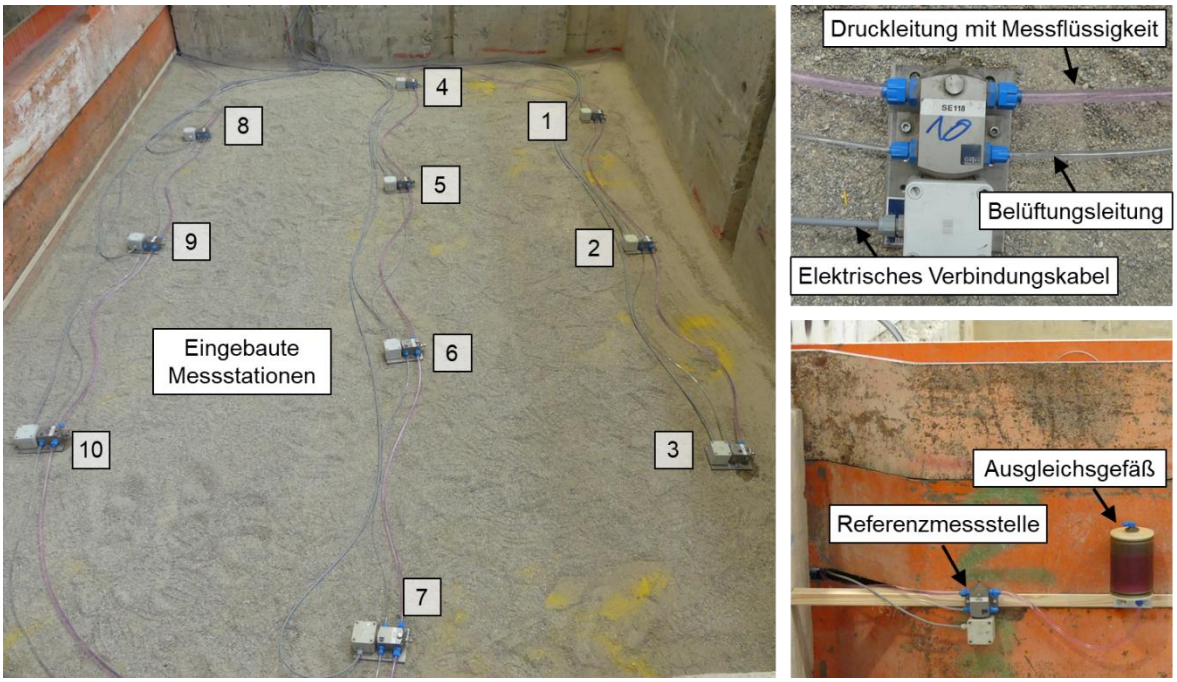


Abb. 4.10: Einbau des Schlauchwaagenmesssystems

Insgesamt wurden zehn Messstellen gleichmäßig über das Versuchsfeld verteilt. Die Messstellen 1 bis 3 sowie 8 bis 10 wurden in der Achse der Manschettenrohre positioniert, die Messstellen 4 bis 7 wurden in der Mitte zwischen den Manschettenrohren bzw. der Außenwand angeordnet (Abb. 4.11). Nach der Installation des Schlauchwaagenmesssystems wurden die Messstellen in eine ca. 5 cm dicke Sandschicht eingebettet und die Messung erstmalig gestartet. Die Messdaten wurden vom Schaltkasten aus an eine Auswertestation übermittelt und konnten an einem Rechner in Echtzeit visuell dargestellt und tabellarisch ausgelesen werden. Das Messintervall wurde entsprechend der aktuellen Tätigkeiten angepasst. Während bei längeren Ruhephasen der Messtakt bis zu einer Stunde betrug, wurden die Messwerte während der Injektionstätigkeiten im 1-Minutentakt aktualisiert. Hinsichtlich der Auswertung der Verformungsmessungen wird auf Kapitel 0 verwiesen.

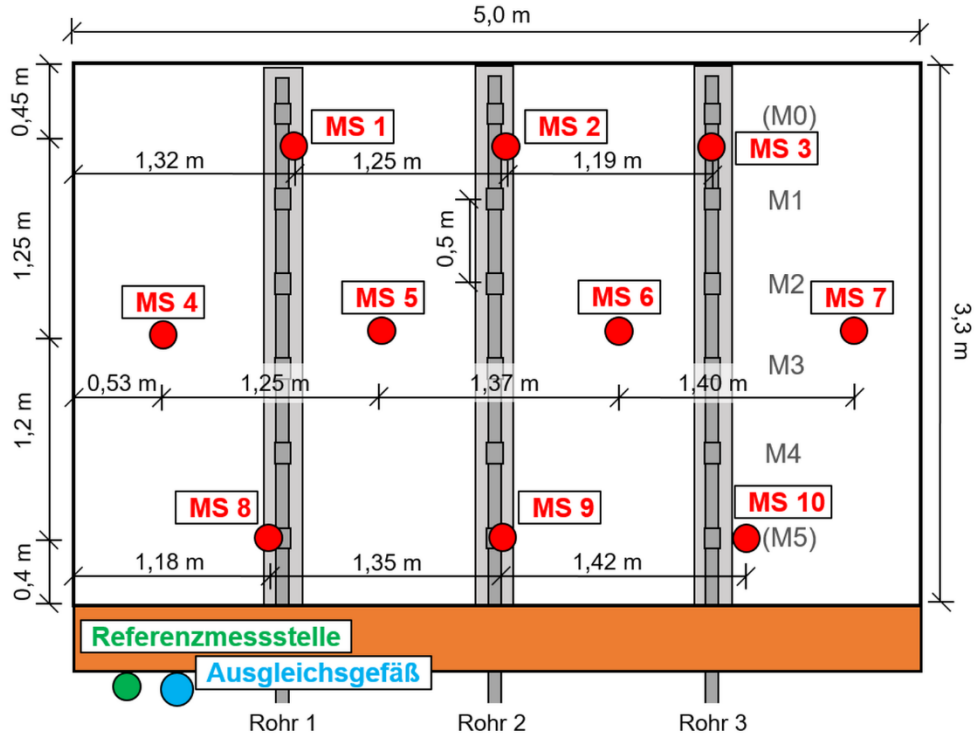


Abb. 4.11: Position der Schlauchwaagensensoren (Skizze nicht maßstäblich)

4.2.4 Verformungsmessungen im 2. Großversuch – hydrostatische Linienvermessung

Neben der kontinuierlichen, jedoch lokal beschränkten Verformungsmessung, ist die räumliche Ausbildung der Hebungen von Interesse. Anhand des resultierenden Hebungsvolumens kann auf die Effizienz, d.h. das Verhältnis aus erreichtem Hebungsvolumen zu injiziertem Suspensionsvolumen (Kapitel 4.4.3.3), geschlossen werden. Darüber hinaus war es aufgrund des enormen Aufwands zur Durchführung des 2. Großversuchs wichtig, ein redundantes Messsystem zu implementieren. Hierzu wurde zusätzlich auf das Verfahren der hydrostatischen Linienvermessung der Lhotzky + Partner Ingenieurgesellschaft mbH zurückgegriffen.

Mit Hilfe der hydrostatischen Linienvermessung können Höhenänderungen entlang eines im Boden verbauten Messschlauchs gemessen werden. Hierzu wird in einem Messdurchgang der hydrostatische Differenzdruck und damit der Höhenunterschied zwischen der Referenz am Messkoffer und diskreten Messpunkten entlang des Messschlauchs bestimmt. Vor jedem Messdurchgang wird der Messschlauch zunächst vollständig mit entgastem Wasser befüllt. Im Zuge der anschließenden Messung wird aus dem Messschlauch schrittweise eine definierte Wassermenge entnommen und jeweils der Differenzdruck zwischen der Referenz und der aktuellen Position des Wasserminiskus gemessen. Die Position des Wasserminiskus im Messschlauch wird anhand der entnommenen Wassermenge bestimmt. Zur Ermittlung der Bodenverformungen werden die gemessenen Höhendifferenzen zweier Messdurchgänge ausgewertet.

Um im Zuge des 2. Großversuchs die erwarteten Verformungen nahe der Oberfläche möglichst flächendeckend zu erfassen, wurde ein ca. 90 m langer Messschlauch in parallelen Strängen an der Geländeoberfläche eingebaut (Abb. 4.12-oben).

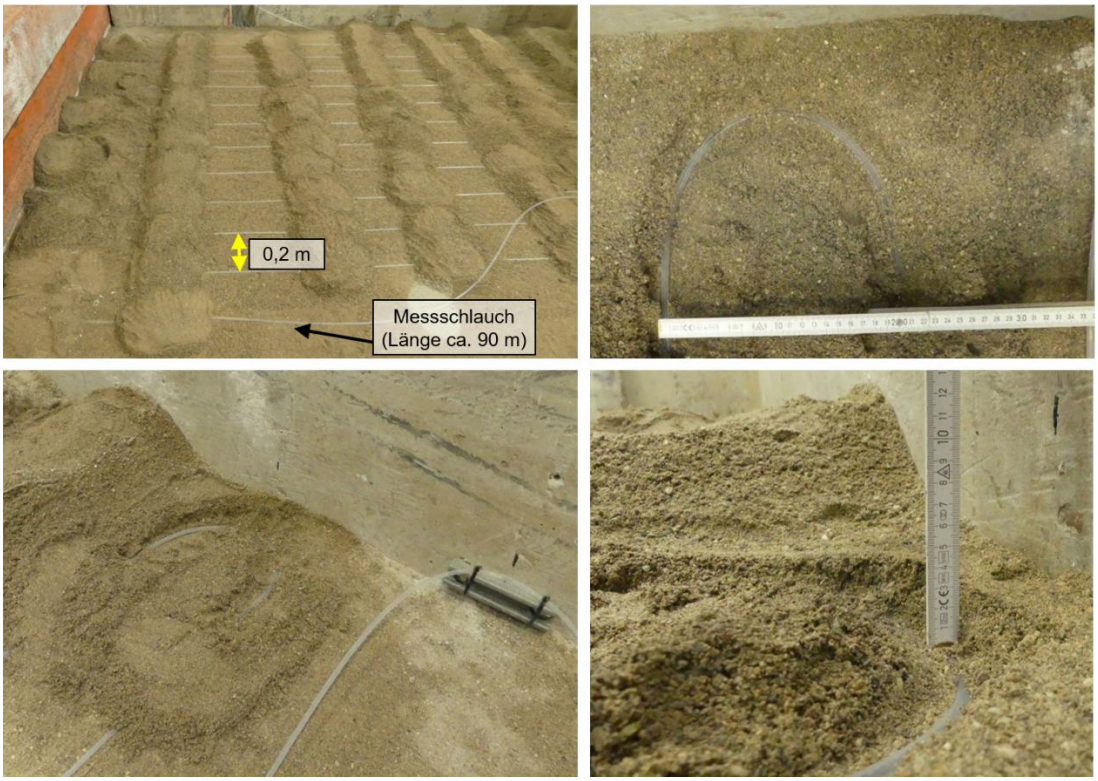


Abb. 4.12: Einbau des Messschlauchs der hydrostatischen Linienvermessung

Die Stränge wurden in einem Abstand von 20 cm zueinander verlegt. Um eine möglichst genaue Zuordnung zwischen den Messpunkten entlang des Messschlauchs und deren Lage im Versuchsfeld erreichen zu können, wurde der Messschlauch an insgesamt sechs festen Auflagern befestigt. Die Auflager befanden sich ca. 7 cm oberhalb des übrigen Schlauchniveaus (Abb. 4.12-links unten). Zusätzlich wurde in der Spitze der Kehren der Messschlauch ca. 3 cm tiefer verlegt (Abb. 4.12-rechts unten). In Kombination mit dem Aufmaß der Messschlauchanordnung konnte damit die Lage der Messstellen genau bestimmt werden. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Messpunktabstand von 32 mm gewählt. Daraus ergab sich eine Messdauer von jeweils ca. 19,5 Stunden pro Messdurchgang.

In Abb. 4.13 ist die Anordnung des Messschlauchs sowie die Position der Auflager dargestellt.

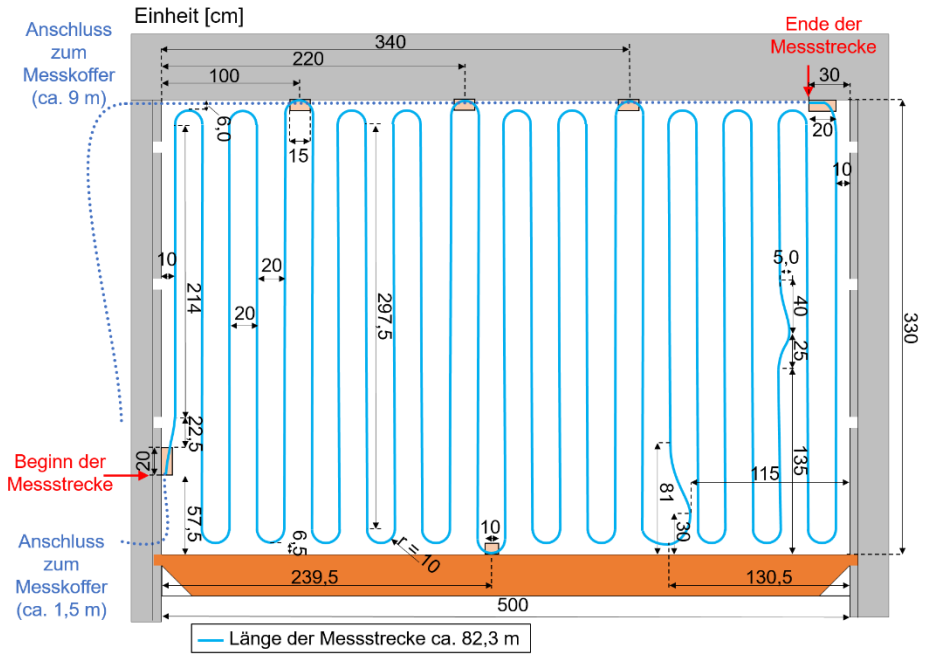


Abb. 4.13: Einbauplan des Messschlauchs der hydrostatischen Linienvermessung

4.2.5 Freilegen der Injektionskörper

Nach Abschluss der Injektionsarbeiten und einer mehrwöchigen Aushärtezeit wurde mit der Freilegung der Injektionskörper begonnen. Um eine Beschädigung der Injektionskörper zu vermeiden, wurde der Großteil des Bodens zunächst mit Hilfe eines Saugbaggers entfernt (Abb. 4.14-oben). Die Arbeiten wurden dabei laufend fotographisch dokumentiert. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass auch im Falle einer Beschädigung des Injektionskörpers, der ursprüngliche Zustand zuvor dokumentiert wurde. In Anhang A.2.5 ist beispielhaft der Arbeitsfortschritt während der Freilegung des Injektionskörpers am Manschettenrohr 1 veranschaulicht. Nach Abschluss der Saugbaggerarbeiten wurden der Sand im Bereich nahe der Injektionskörper entfernt. Diese, teils fast archäologische, Freilegung der einzelnen Injektionskörperstrukturen beanspruchte mehrere Wochen. Der Sand im näheren Umfeld der Injektionskörper, konnte dabei nur mit der Handschaufel entfernt werden. Damit die unterschiedlichen Farben der Injektionskörper sichtbar wurden, mussten Sand- und Staubschichten auf den Injektionskörpern zusätzlich mit Bürsten, Handbesen oder durch Druckluft entfernt werden. Zur weiteren Untersuchung der entstandenen Strukturen wurde der Injektionskörper mittels Handsäge, Meißelhammer und Winkelschleifer zerlegt (Abb. 4.14- unten). Auch während der Freilegung und der Zerteilung der Injektionskörper wurden die Arbeiten und die entstandenen Injektionskörperstrukturen umfangreich fotographisch dokumentiert (ca. 2700 Bilder). Des Weiteren wurden für markante Injektionskörperstrukturen der Neigungswinkel β gegenüber der Horizontalen sowie die Abmessungen der Struktur bestimmt.

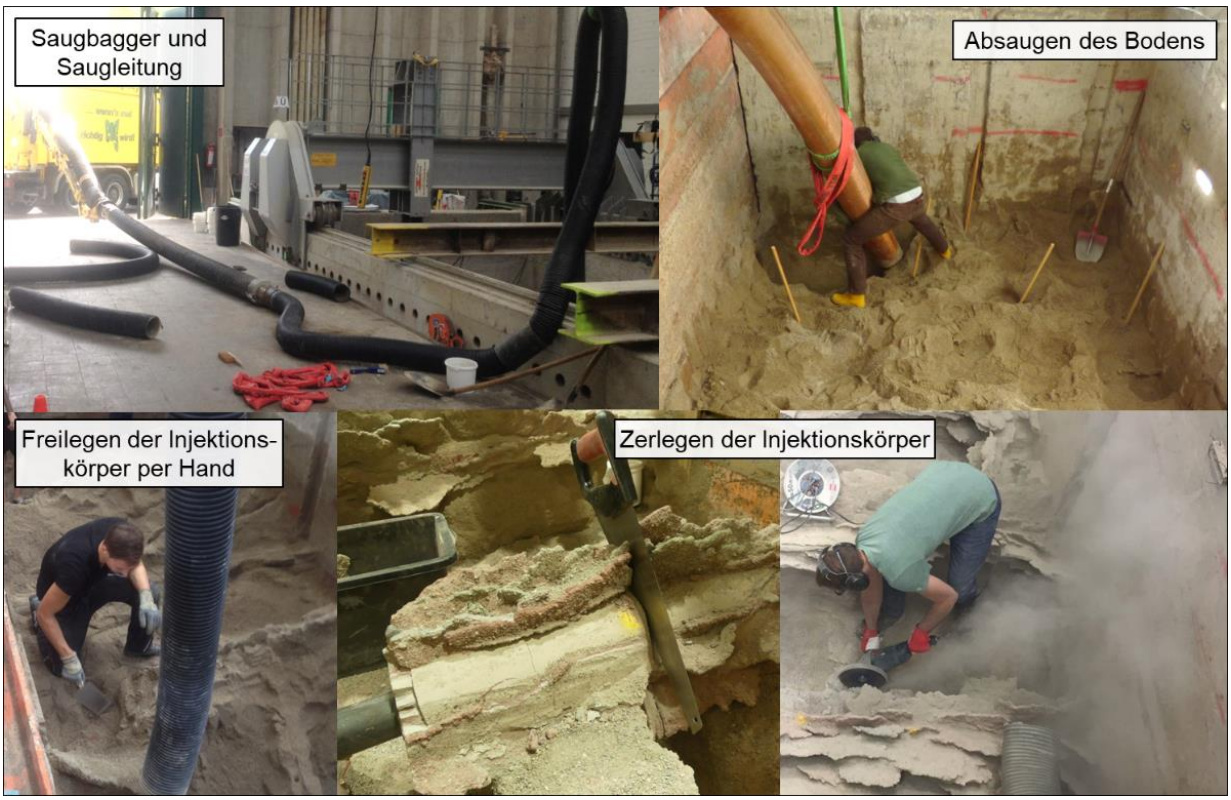


Abb. 4.14: Saugbaggerarbeiten zum Bodenausbau (oben). Freilegen und Zerlegen der Injektionskörper (unten)

Auf die Beschreibung und Auswertung der entstandenen Injektionskörperstrukturen wird in den Kapiteln 4.3.4 (1. Großversuch), Kapitel 4.4.4 (2. Großversuch) sowie Kapitel 4.5 (Zusammenfassung und Schlussfolgerungen) detailliert eingegangen.

4.2.6 Digitale Bildbearbeitung

Ließen sich die unterschiedlichen Farben der einzelnen Injektionskörperstrukturen vor Ort noch gut erkennen, gestaltete sich diese Differenzierung, je nach Belichtungsverhältnissen und Kameraeinstellungen (u.a. Belichtungszeit, Blende, Weißabgleich, ISO-Wert, Farbkomposition), auf den Aufnahmen als deutlich schwieriger. Um die Farbpigmentierung der Injektionskörper in den hier dargestellten Abbildungen deutlicher hervorzuheben, wurden die Aufnahmen der Injektionskörper digital nachbearbeitet. Größtenteils reichte es hierzu aus, die Farbsättigung der Aufnahmen zu erhöhen sowie kleinere Anpassungen an der Bildschärfe, der Helligkeit, dem Kontrast und der Farbtemperatur vorzunehmen. Damit konnte im Allgemeinen eine deutliche Verbesserung der Farbdarstellung erreicht werden. Abb. 4.15 zeigt den Vergleich zwischen einem Bildausschnitt in der Originalaufnahme und dem Ergebnis nach der typischerweise durchgeführten Bildbearbeitung.

Abb. 4.15: Aufnahme der Injektionskörperstrukturen. Links die Originalaufnahme, rechts die Aufnahme nach der Bildbearbeitung (hier mittels PowerPoint: Schärfe +10 %, Helligkeit+5 %, Kontrast +15 %,Farbsättigung 130 %, Temperatur 7.500)

4.3 1. Großversuch

4.3.1 Allgemeines

Im Rahmen des 1. Großversuchs sollte, neben der grundsätzlichen Betrachtung der resultierenden Injektionskörper, außerdem untersucht werden, inwiefern sich die Ringspaltverfüllung und damit die Bettung des Manschettenrohrs in eine umhüllende Dämmerschicht auf die Ausbildung der Injektionskörper auswirkt. Wie bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben, wurden hierzu die Manschettenrohre 1 und 2 mit einer umhüllenden Dämmerschicht und vergleichend dazu Manschettenrohr 3 ohne Dämmer im Boden eingebaut. Je Rohr konnten jeweils drei Manschetten (Nr. 1 bis 3, Abb. 4.3) beaufschlagt werden. Wie auch in der Baupraxis kann die hinterste Manschette (M0) aufgrund der Länge des Doppelpackers nicht angefahren und injiziert werden.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Die Herstellung des Versuchsaufbaus für den 1. Großversuch war mit dem Aufbringen der Big Bags am 13.06.2018 abgeschlossen. Die Ausführung der Injektionen erfolgte zwischen 14.06.2018 bis 28.08.2018. Insgesamt wurden drei Injektionsdurchgänge ausgeführt. In Tabelle 4.2 ist die zeitliche Abfolge der durchgeführten Injektionen aufgeführt.

Tabelle 4.2: Zeitliche Abfolge der Injektionen des 1. Großversuchs

	Durchgang (Farbpigment)		
Manschette Nr.	**1. Durchgang (rot)**	**2. Durchgang (blau)**	**3. Durchgang (grün)**
1 und 3	14.06.2018	07.08.2018	23.08.2018
2	20.06.2018	13.08.2018	28.08.2018

Innerhalb eines Injektionsdurchgangs wurden zunächst in allen drei Rohren die Manschetten 1 und 3 beaufschlagt. Nach fünf bis sechs Tagen wurde schließlich jeweils die dazwischenliegende Manschette 2 injiziert. Der jeweilige Injektionsdurchgang war damit abgeschlossen.

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 erläutert, wurde der Suspension in jedem Durchgang ein anderes Farbpigment zugegeben (Tabelle 4.2). Je nach Farbintensität betrug die Zugabemenge zwischen 2 bis 6 M.% bezogen auf die in der Suspension enthaltene Masse an Feststoff. Um eventuell nach der Freilegung die Injektionen an Manschette 2 von Injektionen an Manschette 1 und 3 unterscheiden zu können, wurden für eine hellere bzw. dunklere Färbung unterschiedliche Massenanteile an Farbpigment zugegeben. Die Zugabemengen sowie die Dichte der Suspensionen sind in Anhang A.2.2 aufgeführt.

Infolge der Farbpigmentzugabe ergibt sich im Vergleich zur reinen Wasser-Fertigprodukt-Mischung eine etwas höhere Dichte. Bei der Suspensionsprüfung ergaben sich dadurch lediglich etwas längere Marsh-Zeiten und eine etwas geringere Filtratmenge im Filterpressversuch (Anhang A.2.3). Ein Einfluss auf die Fließgrenze und das Absetzmaß konnte nicht festgestellt werden. Aufgrund der geringen Abweichungen gegenüber der Suspension ohne Farbzugabe war davon auszugehen, dass die Ausbildung der Injektionskörper dadurch nicht erkennbar beeinflusst wird. Die Ergebnisse des 2. Großversuchs, bei dem sowohl Suspensionen mit als auch ohne Farbpigmente verwendet wurden, können diese Annahme bestätigen.

Vor Injektionsbeginn wurde die Fördergeschwindigkeit der Injektionspumpe auf eine Verpressrate von ca. 5 l/min eingestellt. In jedem Durchgang sollten alle Manschetten mit jeweils 10 l Suspension beaufschlagt werden.
In Tabelle 4.3 sind die Injektionsdaten aller Injektionen des 1. Großversuchs zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Injektionsparameter der durchgeführten Injektionen des 1. Großversuchs[25]

Durchgang und Farbe	MR	Manschette Nr.	Injektions-dauer	Injektions-menge	Aufspreng-druck	Injektions-druck	Abbruch
[-]	[-]	[-]	[min]	[l]	[bar]	[bar]	[-]
1 rot	1	1	0:35	ca. 10.0	18	8	Nein
			7:24*	ca.10.0	-	8	Nein
		2	0:43	7.4	18	6-8	Nein
		3	0:45	5.3	16	6-8	Ja
	2	1	2:30	8.0	16	8	Ja
		2	0:28	4.2	14	6-8	Ja
		3	0:13	1.4	16	6-8	Ja
	3	1	1:38	10.1	18	6-8	Nein
		2	3:00	8.8	18	6-8	Nein
		3	0:25	3.0	16	6-8	Ja
2 blau	1	1	1:54	7.8	16.7	4-7	Nein
		2	1:48	1.6	31.9	-	Ja
		3	0:24	2.6	15.0	5	Ja
	2	1	1:30	8.9	14.0	4-8	Nein
		2	0:57	2.5	21.7	-	Ja
		3	0:12	2.0	15.7	6	Ja
	3	1	1:53	9.4	9.3	7-13	Nein
		2	4:05	8.7	11.7	5-12	Nein
		3	1:55	11.0	10.1	3-13	Nein
3 grün	1	1	2:40	10.6	22.2	3-15	Nein
		2	3:30	2.7	21.6	1-7	Ja
		3	0:00	-	-	-	-
	2	1	2:29	10.6	18.6	3-13	Nein
		2	3:00	11.0	13.4	3,5-6,5	Nein
		3	0:12	-	-	-	-
	3	1	4:12	7,9	16.5	4-13	Nein
		2	1:50	11.1	13.5	5.5-12	Nein
		3	2:08	7.1	12.1	1-11.5	Ja

* Technische Schwierigkeiten mit der Injektionspumpe

Wie aus Tabelle 4.3 hervorgeht, konnte nicht an allen Manschetten die Sollmenge von 10 l eingebracht werden. Oftmals mussten Injektionen abgebrochen werden, da die Suspension an der Vorderseite, im Bereich der Durchführung des Manschettenrohrs, austrat (Abb. 4.16). Der

[25] Daten entnommen aus der Studienarbeit Mück-Thum (2018)

Bereich der Durchführung wurde während der Injektionsarbeiten laufend überwacht. Im Falle eines Suspensionsaustritts konnte der Injektionsvorgang sofort abgebrochen und damit die Suspensionsverluste auf ein Minimum reduziert werden.

Abb. 4.16: Austritt von Suspension im Bereich der Durchführung des Manschettenrohrs an der Vorderwand des Versuchsaufbaus

4.3.3 Auswertung der Injektionsdaten und Verformungsmessungen

4.3.3.1 Injektionsdaten

In den drei Injektionsdurchgängen des 1. Großversuchs wurden insgesamt 183,5 l Suspension injiziert. Die Verteilung der Suspensionsmenge auf die einzelnen Manschetten ist in Abb. 4.17 dargestellt. In den hinteren Manschetten (M1) konnte nahezu die gesamte Sollmenge von insgesamt 30 l eingebracht werden. Bei Manschettenrohr 1, Manschette 1 betrug die Sollmenge ausnahmsweise 40 l. Im Zuge der allerersten Injektion wurden an dieser Manschette zweimal 10 l injiziert, um möglicherweise bereits erste Höhenänderungen an den Seilzug-Wegaufnehmern zu erzeugen. Auffällig ist, dass bei Rohr 3 (ohne Dämmer) an allen Manschetten fast die gesamte Injektionsmenge eingebracht werden konnte, während bei den Rohren 1 und 2 (beide mit Dämmer) die Injektionen oftmals vorzeitig abgebrochen werden mussten (Austritt der Suspension im Bereich der Vorderwand, vgl. Abb. 4.16).

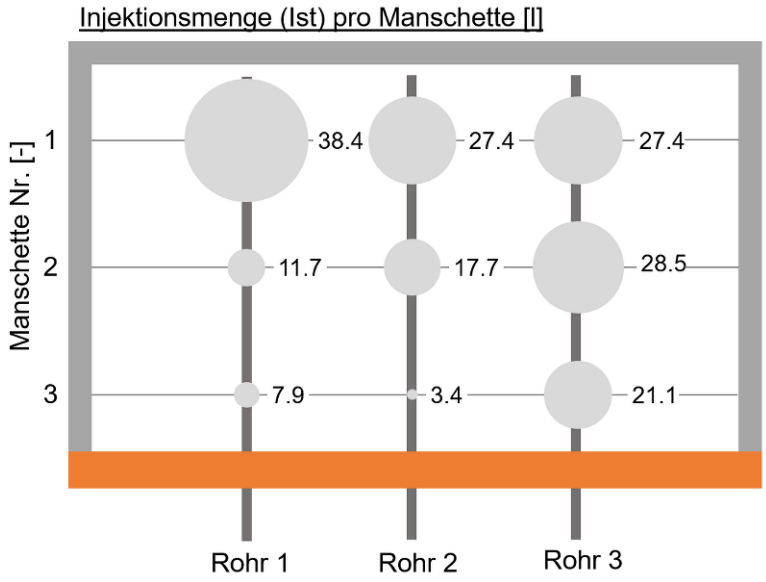


Abb. 4.17: Injiziertes Suspensionsvolumen

In Abb. 4.18 ist die Entwicklung der Injektionsvolumina über die drei Injektionsdurchgänge hinweg dargestellt. Daraus geht hervor, dass an den Rohren 1 und 2 nicht nur an der vordersten Manschette 3, sondern auch an Manschette 2 – bis auf eine Injektion – in keinem Durchgang die geplante Sollmenge von 10 l injiziert werden konnte.

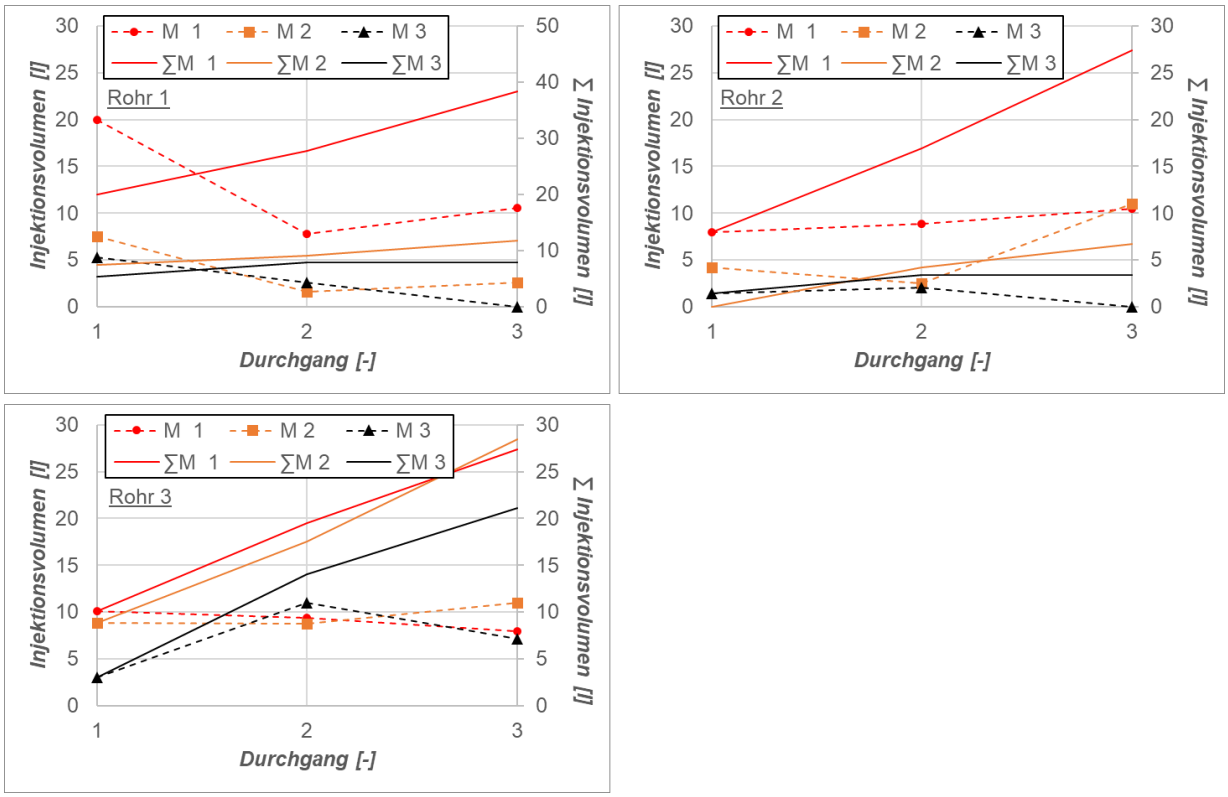


Abb. 4.18: Injizierten Suspensionsmengen in den Durchgängen 1 bis 3

Des Weiteren konnte im 3. Durchgang die Manschette 3 weder an Rohr 1 noch an Rohr 2 injiziert werden. Selbst der Versuch die Manschetten mit Wasser und Drücken von bis zu 60 bar aufzusprengen und damit wieder gangbar zu machen, blieb erfolglos. Weshalb eine Injektion hier nicht mehr möglich war, ließ sich vorab der Freilegung der Injektionskörper nicht klären.

In Abb. 4.19 sind die gemessenen Aufsprengdrücke aller Injektionen dargestellt.

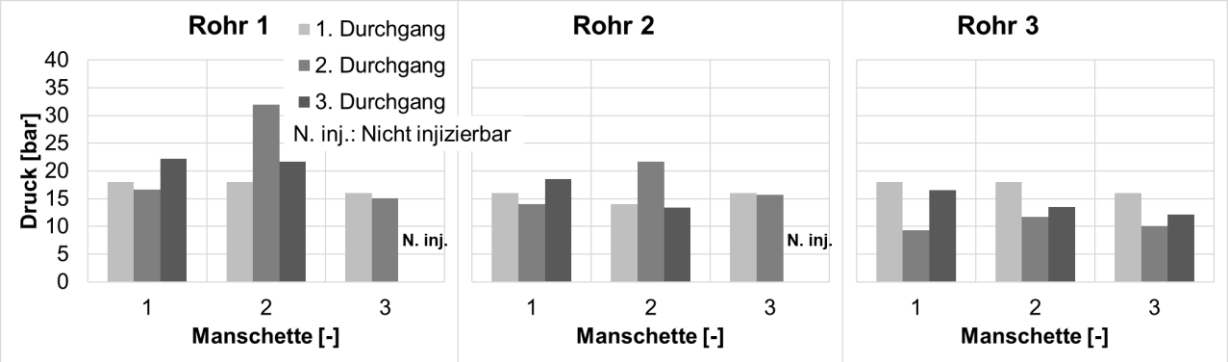


Abb. 4.19: Gemessene Aufsprengdrücke

Für den überwiegenden Teil der Injektionen wurde ein Druck von ca. 10–20 bar benötigt, um die Manschetten auszusprengen. Das mehrfache Injizieren scheint sich nicht negativ auf die erforderlichen Aufsprengdrücke ausgewirkt zu haben. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass sich im Bereich des Manschettenrohrs die Suspension nicht in großen Mengen z.B. als „kugelförmiger“ Injektionskörper angesammelt hat.

4.3.3.2 Verformungsmessungen

In Abb. 4.20 ist die Messungen der drei Seilzug-Wegaufnehmer während der drei Injektionsdurchgänge des 1. Großversuchs dargestellt (Messpunkte: MP1, MP2 und MP3). Die größten Hebungen von ca. 1 mm und 1,3 mm traten am MP1 und MP2 auf. Die Hebungen im Bereich von Rohr 3 fielen mit insgesamt ca. 0,6 mm etwas geringer aus (MP3), obwohl hier die größten Suspensionsmengen injiziert werden konnten. Da die Hebungen nur an drei Messstellen erfasst wurden, ist es jedoch durchaus möglich, dass an anderen Stellen auch größere Hebungen aufgetreten sind. Dennoch zeigt der Vergleich zwischen injizierten Suspensionsmengen (Tabelle 4.3) und dem Auftreten von Verformungen an den Seilzug-Wegaufnehmern der entsprechenden Rohre eine weitestgehend gute Übereinstimmung. Beispielsweise wurden am Rohr 1 im 1. Durchgang die Manschetten 1 und 2 mit 20 bzw. 7,4 l beaufschlagt. In der Folge wurden jeweils Hebungen am MP1 registriert. Im Falle deutlich geringerer Injektionsmengen (z.B. 2. Durchgang, Rohr 1, Manschette 2, 1,6 l) treten auch am MP1 keine Hebungen auf.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Verformungsmessungen mit einigen Minuten Vor- und Nachlauf im Zeitraum der Injektionen ausgeführt wurden. In den mehrtägigen Pausen zwischen den einzelnen Injektionen wurden keine Messungen durchgeführt (gestrichelte Linien in Abb.

4.20). Die Auswertung der Verformungsmessung zeigt jedoch, dass mögliche Setzungen bereits innerhalb weniger Minuten nach den Injektionen abgeklungen sind. Dies konnte auch durch die kontinuierlichen Verformungsmessungen im Rahmen des 2. Großversuchs bestätigt werden.

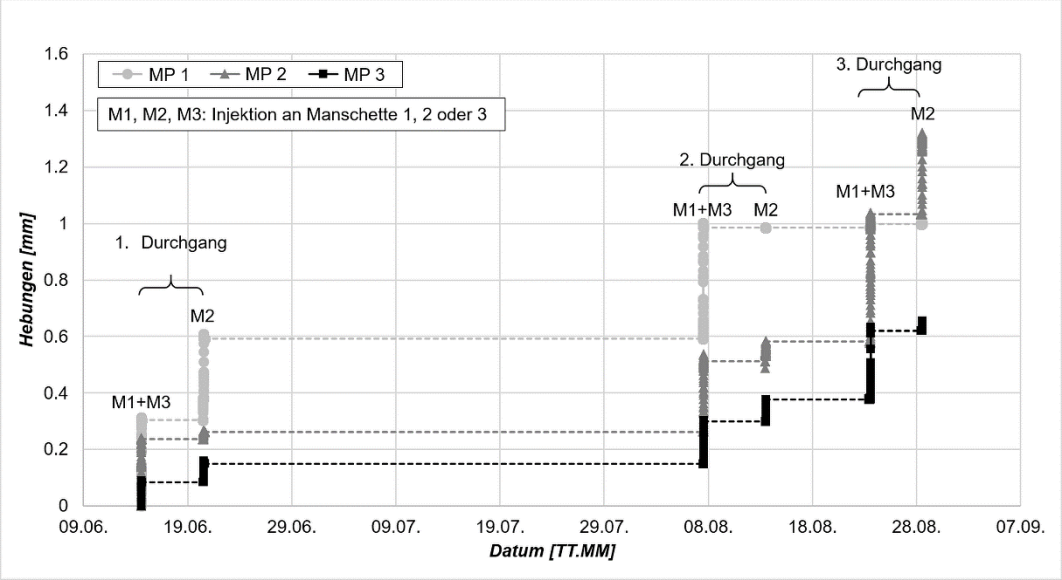


Abb. 4.20: Gemessene Hebungen im 1. Großversuch

Repräsentativ für den Einfluss der einzelnen Injektionen auf die Verformungsmessungen sind in Abb. 4.21 die gemessenen Hebungen während des 2. Injektionsdurchgangs sowie die Zeiträume der Injektionstätigkeiten mit den jeweils injizierten Suspensionsmengen dargestellt.

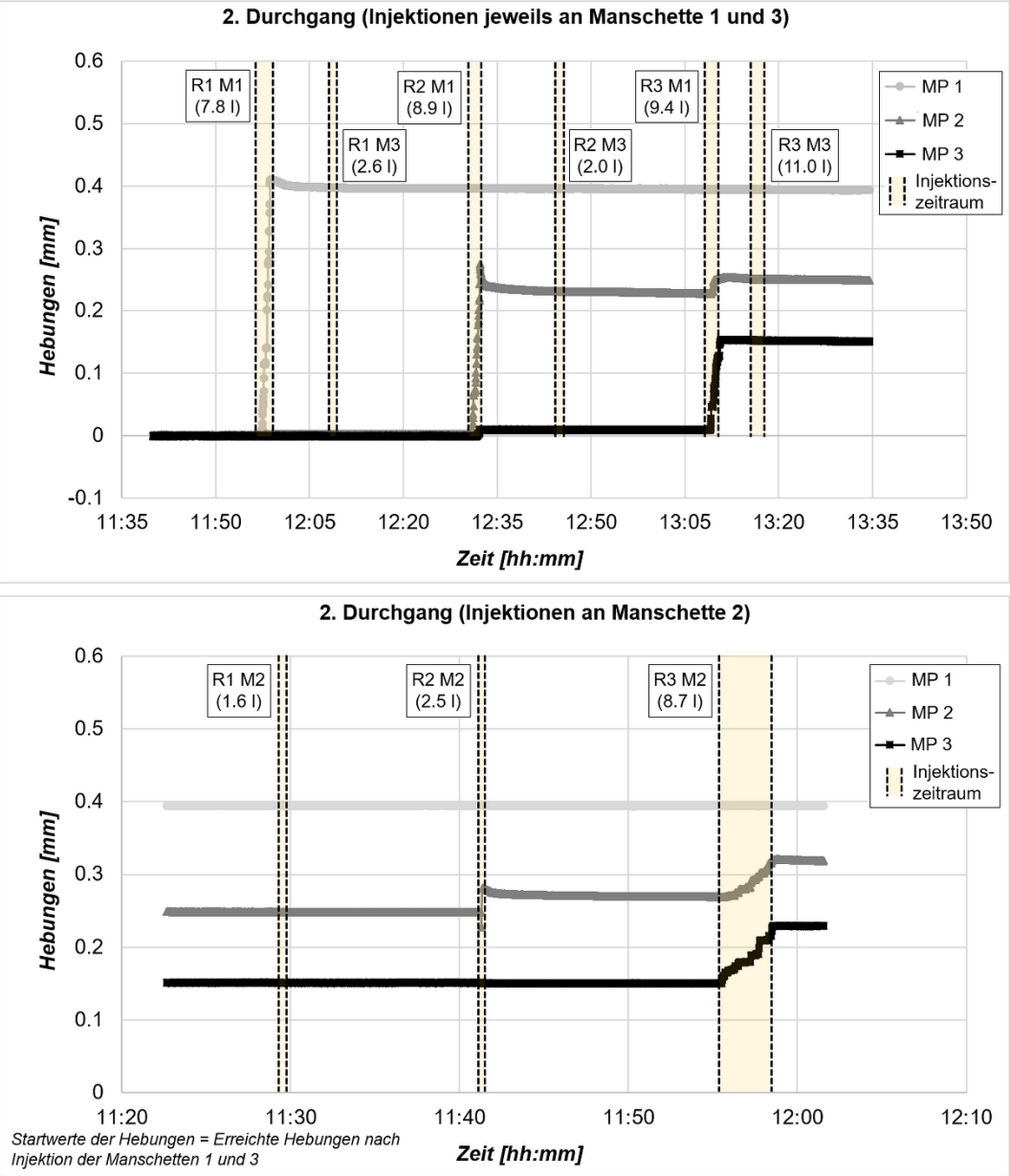


Abb. 4.21: Gemessene Hebungen im 1. Großversuch

Generell führten bei allen drei Rohren jeweils nur die Injektionen an Manschette 1 und 2 zu einer Änderung der gemessenen Verformungen. Injektionen an Manschette 3 wirkten sich nicht auf die Verformungsmessungen aus. Zwar waren die dort injizierten Suspensionsmengen zumeist deutlich geringer als an den Manschetten 1 und 2, jedoch auch im Falle großer Injektionsmengen (Rohr 3, 2. Durchgang: 11 l bzw. 3. Durchgang: 7 l) blieben die Verformungsmessungen davon unbeeinflusst. Des Weiteren hatten die Injektionen an den Rohren 1 und 2 keinen Einfluss auf die Verformungsmessungen an den jeweils benachbarten Messpunkten. Am MP2, der sich nahezu mittig zwischen Rohr 2 und 3 befand, traten hingegen Hebungen sowohl infolge von Injektionen an Rohr 2 als auch aufgrund von Injektionen an Rohr 3 auf.

4.3.4 Injektionskörper des 1. Großversuchs

4.3.4.1 Allgemeine Hinweise

Durch das Einfärben der Suspension ließen sich die Injektionskörper sehr gut den entsprechenden Injektionsdurchgängen zuordnen. Wie in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen ist, war die Einfärbung der blauen Suspension an den ausgehärteten Injektionskörpern größtenteils nur noch sehr schwach zu erkennen. Diese Injektionskörper wiesen, anstatt einer blauen, überwiegend eine hellgraue Farbgebung auf. Der geringere Farbpigmentanteil für die Injektionen an Manschette 2 (siehe Kapitel 4.3.2) wirkte sich kaum auf die Farbgebung der ausgehärteten Suspension aus. Nur in seltenen Fällen, und zwar ausschließlich für die roten Injektionskörperstrukturen, war eine Unterscheidung zur eigentlich farbintensiveren Suspensionsmischung, wie sie an den Manschetten 1 und 3 injiziert wurde, möglich. Zur einfacheren Zuordnung sind in den nachfolgenden Abbildungen die entstandenen Strukturen teilweise mit einer laufenden Nummer und dem Anfangsbuchstaben des Farbpigments markiert (r=rot, b=blau, g=grün).

4.3.4.2 Übersicht

In Abb. 4.22 und Abb. 4.23 sind die freigelegten Injektionskörper des 1. Großversuchs dargestellt.

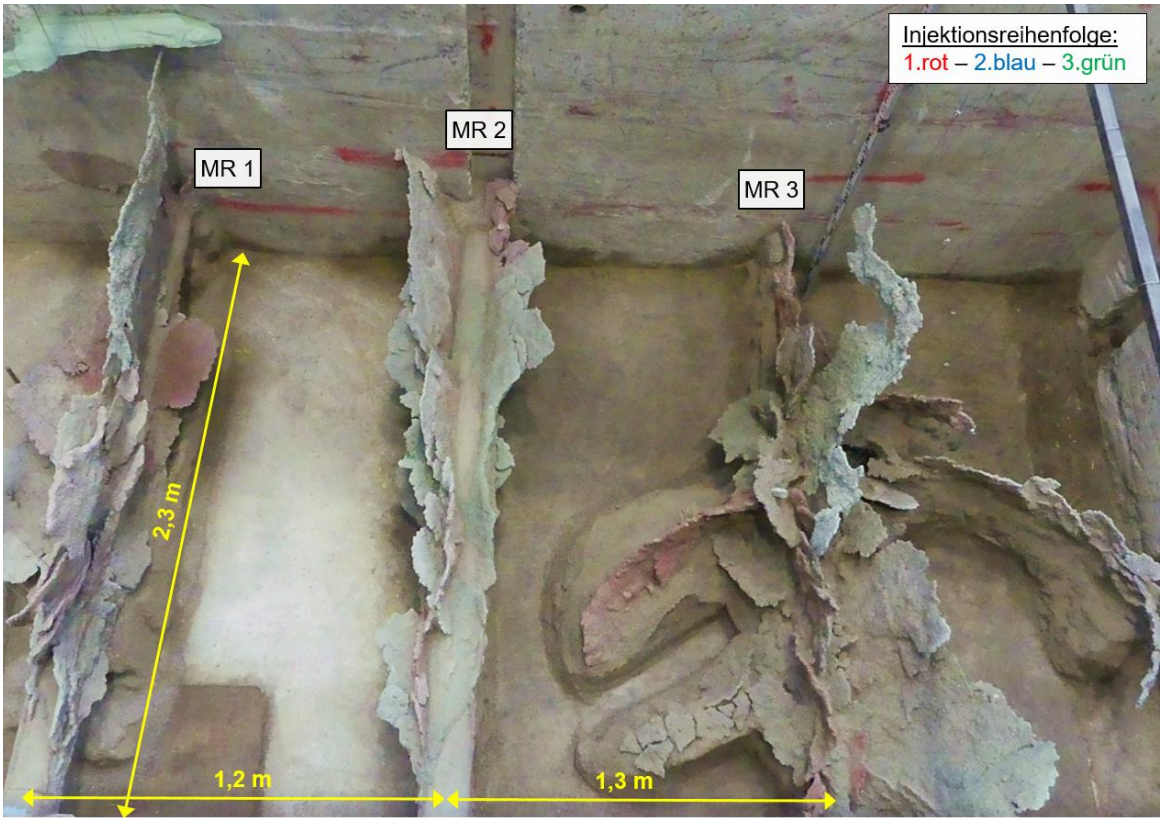


Abb. 4.22: Übersicht der Injektionskörper des 1. Großversuchs

Bezüglich der in Abb. 4.22 dargestellten Injektionskörper sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich an den Auskragungen des Injektionskörpers bei Manschettenrohr 3 zum Zeitpunkt der Aufnahme noch relativ viel Sand im näheren Umfeld dieser Strukturen befand. Der entstandene Injektionskörper wirkt dadurch möglicherweise auf den ersten Blick deutlich massiver als die Strukturen im Bereich der Manschettenrohre 1 und 2. Der Sand diente der Stützung der entstandenen Plattenstrukturen. Da es nicht möglich war den Sand ohne größere Beschädigung der Strukturen zu entfernen, erfolgte die vollständige Freilegung erst im Zuge der planmäßigen Zerteilung des Injektionskörpers.

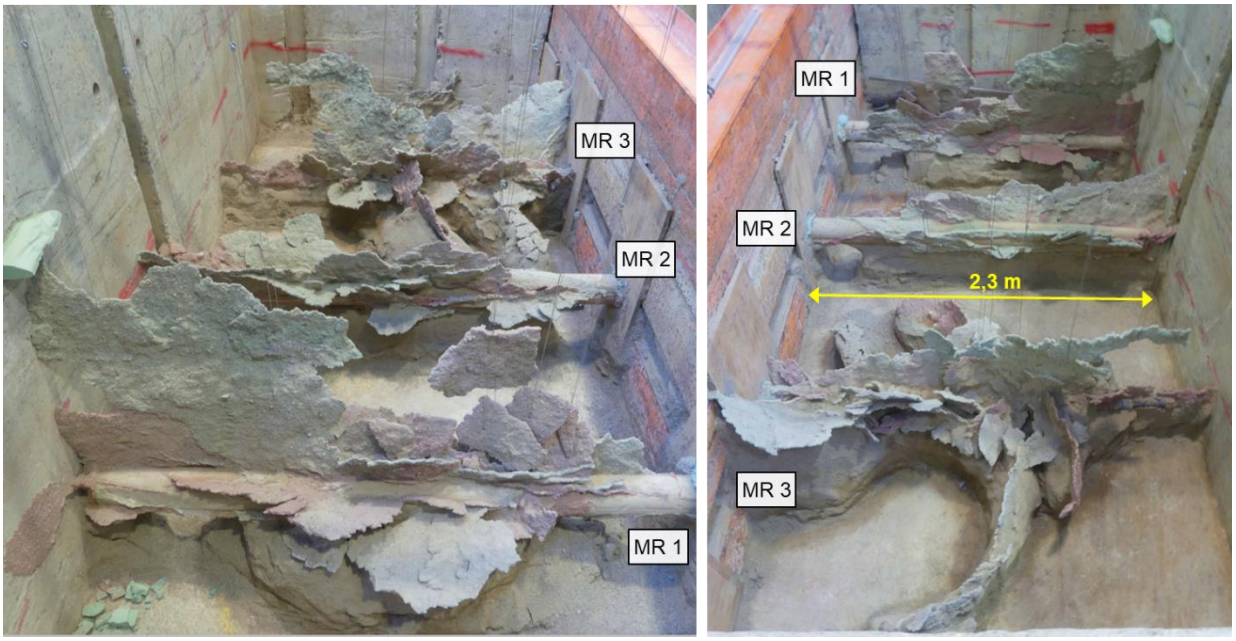


Abb. 4.23: Seitenansicht der Injektionskörper des 1. Großversuchs

Die Injektionskörper haben sich an allen drei Manschettenrohren in Form von plattenartigen Strukturen ausgebildet. Gedrungene kugelförmige oder dünne verzweigte Injektionskörper sind an keinem Manschettenrohr entstanden. Infolge der Injektionen kam es (trotz lockerer Lagerung) zu keiner sphärischen Verdrängung des Bodens, sondern zur beabsichtigten hydraulischen Rissbildung im Boden. Daraus ergaben sich im Allgemeinen Platten mit einer Dicke von ca. 1 cm. Im Bereich der umhüllenden Dämmerschicht bildeten sich teilweise dickere Injektionskörperstrukturen aus, die aus mehreren Lagen ausgehärteter Suspension bestanden. Während sich an den Rohren 1 und 2 (Manschettenrohr mit umhüllender Dämmerschicht) die Platten ausschließlich radial entlang der Rohrachse ausbreiteten, bildeten sich an Manschettenrohr 3 teilweise lange Auskragungen senkrecht zur Rohrachse. Des Weiteren sind an den Rohren 1 und 2, aufgrund der geringen Injektionsmengen an der vordersten Manschette (M3), deutlich kleinere Platten entstanden als entlang des restlichen Manschettenrohrs. Bei Manschettenrohr 3 wurde an allen Manschetten annähernd die gleichen Suspensionsmengen

injiziert (vgl. Abb. 4.17). In diesem Fall finden sich entlang des gesamten Manschettenrohrs ausgeprägte Plattenstrukturen.

Im Bereich der Rohre 1 und 3 drangen geringe Suspensionsmengen bis an die Geländeoberfläche vor (Abb. 4.24). Detaillierte Aufnahmen der Suspensionsaustritte sind in Anhang A.2.6 dargestellt.

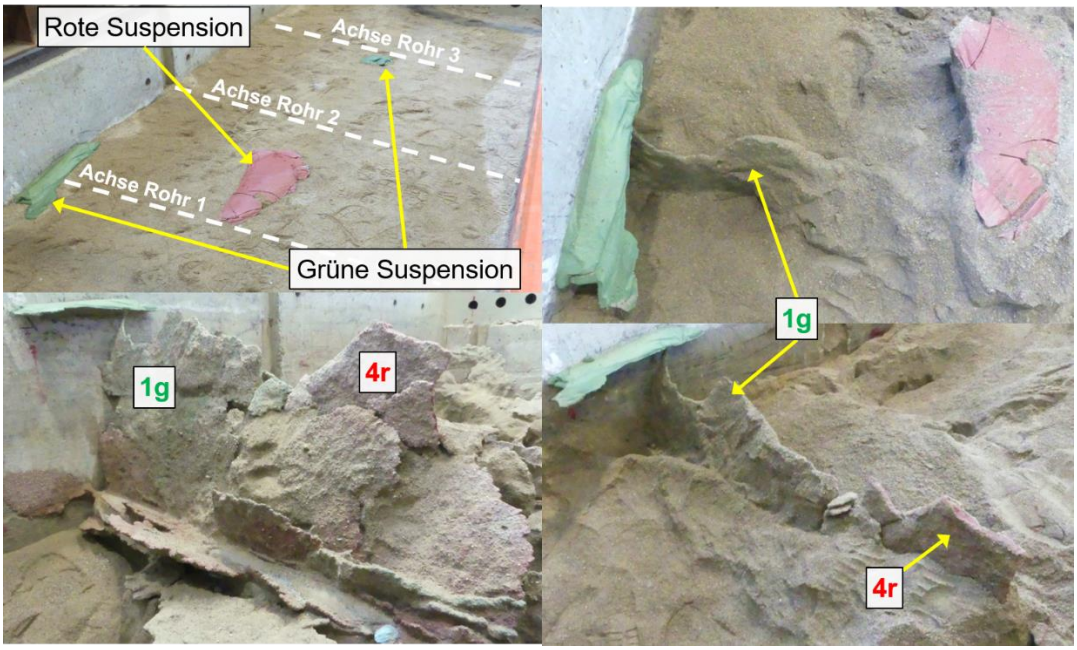


Abb. 4.24: Austritt von geringen Suspensionsmengen an der Geländeoberfläche

Wie die Fotodokumentation der Freilegung zeigt, lassen sich die Suspensionen an der Geländeoberfläche den jeweiligen Plattenstrukturen zuordnen. Im Bereich von Rohr 1 kann die grüne Suspension der großen vertikalen Platte 1g und die rote Suspension der vertikalen Platte 4r zugeordnet werden. Die grüne Suspension im Bereich von Rohr 3 ist Teil der dort erzeugten großen vertikalen Platte (vgl. Abb. 4.30 Plattenstruktur 1g).

Möglicherweise sind die ausgeprägten vertikalen Plattenstrukturen am Rohr 1 und 3 bzw. die geneigten Strukturen am Rohr 2 aufgrund der Lasteinleitung durch die Big Bags entstanden. Da zwischen den Aufstandsflächen der Big Bags jeweils kleine unbelastete Lücken vorhanden waren, könnte dies die Ausbildung ausgeprägter vertikaler Strukturen am Rohr 1 und 3 bzw. geneigter Strukturen am Rohr 2 begünstigt haben (siehe Anhang A.2.7).

Nachfolgend werden die Injektionskörper an den jeweiligen Rohren im Detail vorgestellt sowie die wesentlichen Besonderheiten aufgezeigt.

4.3.4.3 Injektionskörperstrukturen am Rohr 1

In Abb. 4.25 ist der an Rohr 1 entstandene Injektionskörper dargestellt. Die am Rohr 1 injizierten Suspensionsmengen sind in
Tabelle 4.4 aufgeführt. Um die Gestalt des Injektionskörpers zu erhalten, mussten die Strukturen mit Drahtseilen gesichert und bereits abgebrochene Bruchstücke zumindest annähernd an ihre ursprüngliche Position gebracht werden.

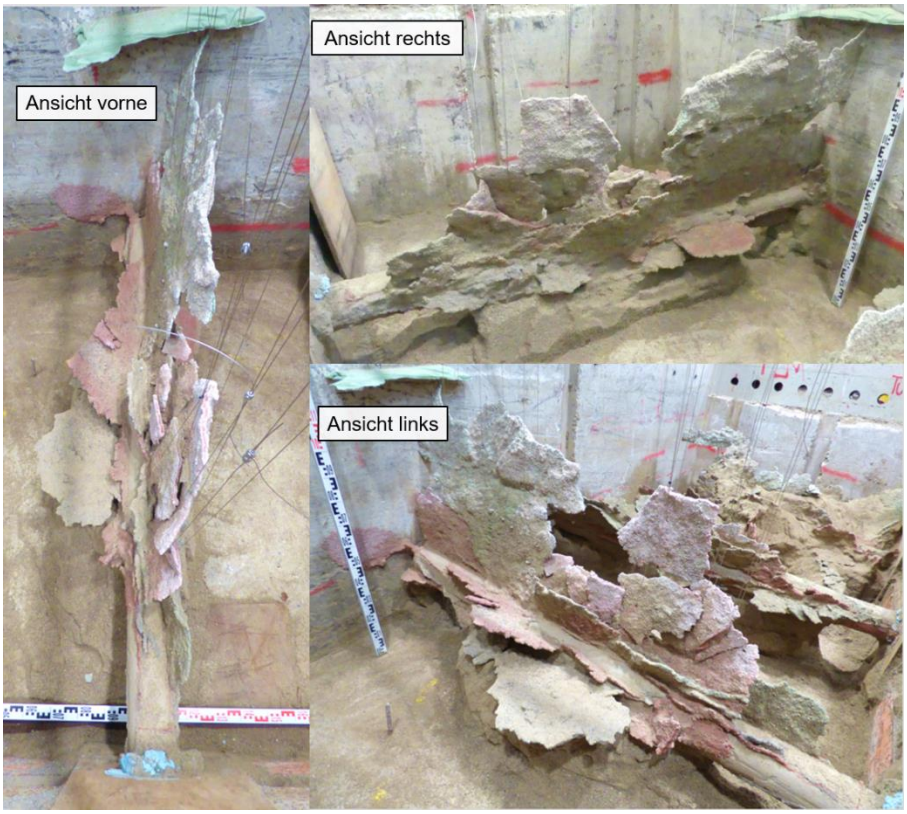


Abb. 4.25: Injektionskörper am Manschettenrohr 1

Tabelle 4.4: Injektionsmengen am Rohr 1

Durchgang	Injektionsmenge pro Manschette [l]		
	M1	M2	M3
1	20	7,4	5,3
2	7,8	1,6	2,6
3	10,6	2,7	0

Aufgrund der entsprechend größeren Injektionsmengen prägen in erster Linie die roten Plattenstrukturen das Erscheinungsbild des Injektionskörpers. Markante größere blaue und grüne Strukturen finden sich als Bestandteile der großen vertikalen Platte im hinteren Rohrabschnitt. Außerdem bildete sich auf der linken Seite in Rohrmitte eine relativ große blaue horizontale Platte aus. Insgesamt entstanden am Rohr 1 vorwiegend ausgeprägte vertikale Plattenstrukturen.

Insbesondere im hinteren Bereich entstand eine verhältnismäßig große vertikale Platte. In Abb. 4.26 ist die Platte im Detail mit den an Manschette 1 injizierten Suspensionsmengen dargestellt. Durch die unterschiedliche Färbung der Suspension lässt sich erkennen, dass sich die Platte aus den Suspensionen aller drei Injektionsdurchgänge zusammensetzt. Es zeigte sich (wie im Übrigen auch an den anderen Rohren), dass sich die Injektionsrisse vorzugsweise entlang bereits bestehender Strukturen orientieren. Der untere Teil der Platte (7r) besteht vorwiegend aus der roten Suspension des 1. Injektionsdurchgangs. Infolge der Durchgänge 2 und 3 vergrößerte sich die Platte weiter in vertikaler Richtung (Platten 3b bzw. 1g).

In einem deutlich kleineren Umfang entstanden entlang der Rohrachse auch annähernd horizontal geneigte Platten. Die drei größten horizontalen Platten an Rohr 1 sind in Abb. 4.26. markiert. Der Neigungswinkel β der Platte gegenüber der Horizontalen betrug bei Platte 8r ca. +32° (steigend) und bei Platte 3r ca. -15° (fallend). Die Platte 1b verlief nahezu horizontal ($\beta \approx 0°$).

Abb. 4.26: Großflächige Plattenstrukturen im hinteren Bereich von Rohr 1

In Abb. 4.27 sind der mittlere und vordere Rohrabschnitt sowie die an Manschette 2 und 3 injizierten Suspensionsmengen dargestellt. Im Bereich zwischen Manschette 2 und 3 bildeten sich ausgeprägte vertikale Plattenstrukturen aus. Die Platten 5r und 6r sind im Zuge der Freilegung zerbrochen. Das Plattenstück 4r war zum einen nur über einen schmalen Abschnitt mit den Platten unterhalb verbunden, andererseits, wie bereits in Kapitel 4.3.4.1 erläutert, erstreckte sich der Injektionsriss bis an die Geländeoberfläche. Aufgrund der Lage und der injizierten Suspensionsmengen sind die Platten 5r bzw. 6r vermutlich infolge der Injektionen an Manschette 3, die Platte 4r durch die Injektion an Manschette 2 entstanden. Eine eindeutige Zuordnung war auch im Rahmen der späteren Zerteilung des Injektionskörpers nicht möglich.

Zwischen Manschette 3 und der Vorderwand sind im wesentlichen nur Risse innerhalb der Dämmerschicht entlang der Rohrachse aufgetreten. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Suspensionsaustritte an der Vorderwand (vgl. Abb. 4.16) infolge der Rissbildung

innerhalb der Dämmerschicht und nicht aufgrund von Injektionsrissen im Bereich des Bodens entstanden sind.
Im 3. Injektionsdurchgang war es, wie auch bei Rohr 2, nicht mehr möglich die Manschette 3 zu injizieren. Die ursprüngliche Vermutung, dass sich möglicherweise im Bereich der Manschette 3 besonders viel Suspension angesammelt hat und damit ein Öffnen der Manschette unterbunden wird, konnte durch die Freilegung nicht bestätigt werden.

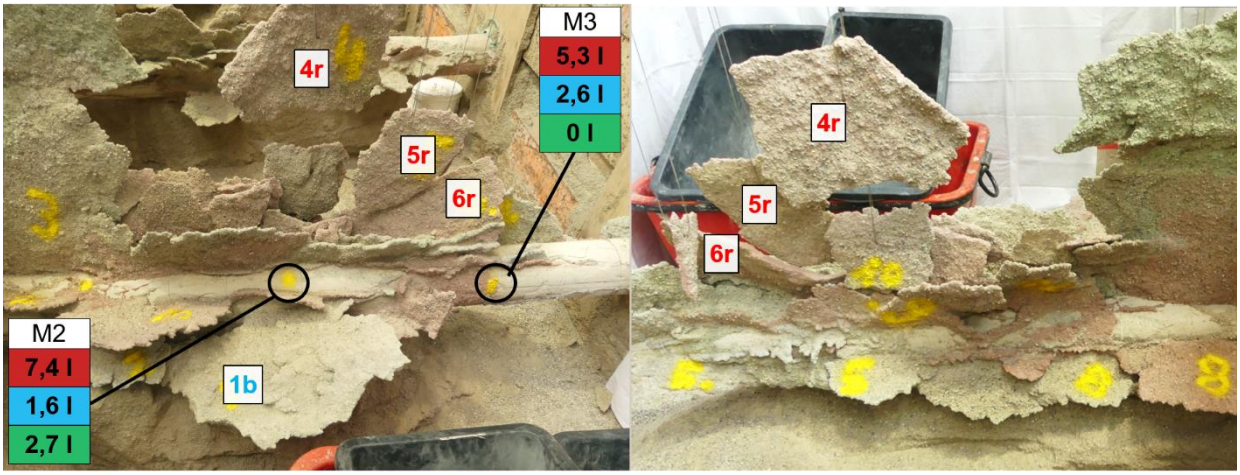


Abb. 4.27: Mittlerer und vorderer Rohrabschnitt mit horizontalen und vertikalen Plattenstrukturen

4.3.4.4 Injektionskörperstrukturen am Rohr 2

In Abb. 4.28 ist der an Rohr 2 erzeugte Injektionskörper dargestellt. Die injizierten Suspensionsmengen sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

Tabelle 4.5: Injektionsmengen am Rohr 2

Durchgang	Injektionsmenge pro Manschette [l]		
	M1	M2	M3
1	8	4,2	1,4
2	8,9	2,5	2,0
3	10,6	11,0	0

Das Erscheinungsbild des Injektionskörpers an Rohr 2 ist im Wesentlichen von grünen und blauen (hier grauen) Plattenstrukturen geprägt. Rote Strukturen traten zwar entlang der gesamten Rohrachse auf, jedoch reichten diese meist nur wenige Zentimeter in den umgebenden Boden. Auffällig ist die schräge („V-förmige“) Anordnung der größeren Injektionskörperstrukturen (Abb. 4.29-links). Im Vergleich zu den Injektionskörpern an den Rohren 1 und 3, sind am Rohr 2 deutlich kleinere Platten entstanden. Die größte radiale Ausdehnung vom Rand des Dämmers bis zur Rissspitze betrug ca. 40 cm.

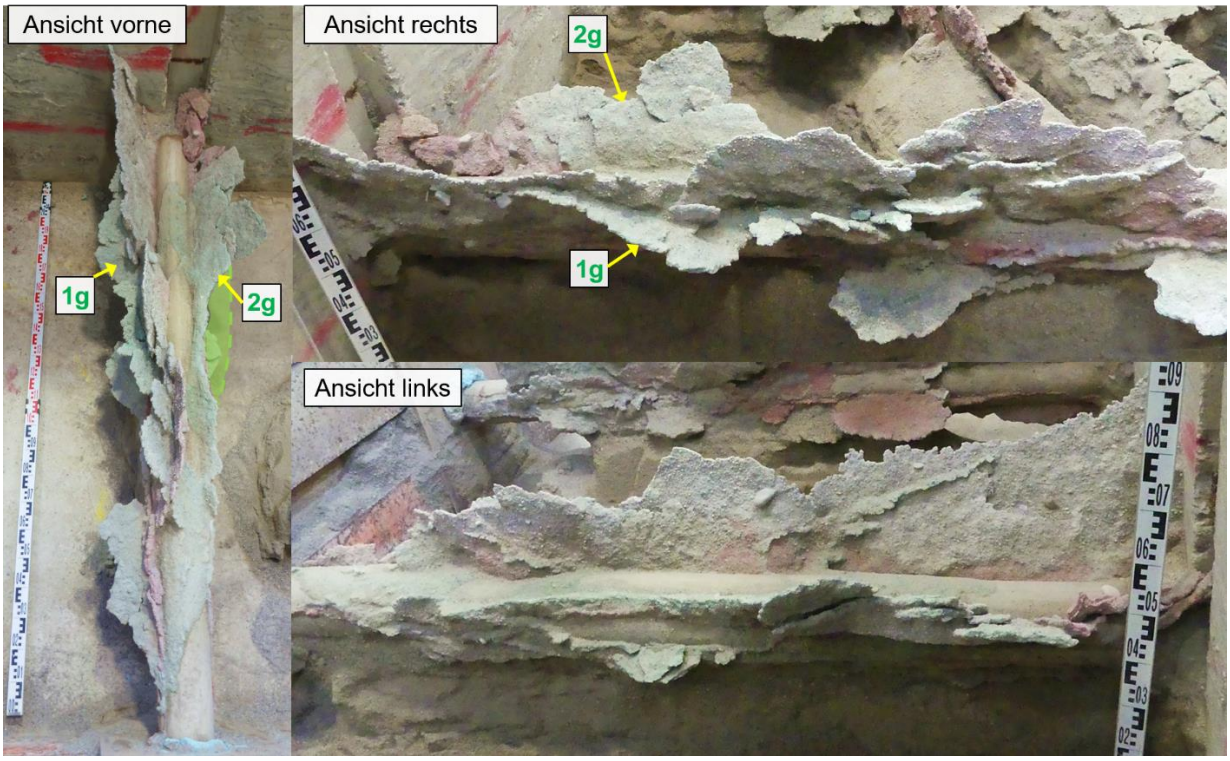


Abb. 4.28: Injektionskörper am Manschettenrohr 2

Im Bereich zwischen Manschette 2 bis zur Rückwand entstanden an der rechten Rohrseite fast ausschließlich grüne Plattenstrukturen (2g). Diese traten mit einem Neigungswinkel von $\beta \approx 40–45°$ radial aus dem Dämmer und reichten bis ca. 20 cm in den Boden. Im Zuge der Freilegung ist ein Teil der Platten abgebrochen. Der Bereich des fehlenden Plattensegments ist in Abb. 4.28-links markiert. Weitere grüne Strukturen entstanden auch auf der linken Rohrseite (1g), hier jedoch in einem etwas kleinerem Umfang. Die größte Plattenstruktur (1b) wurde im Zuge des 2. Durchgangs im Bereich zwischen Manschettenrohr 3 und der Rückwand erzeugt. Die Injektionsplatte 1b wies einen Neigungswinkel von $\beta \approx 70°$ auf. Anhand der injizierten Suspensionsmengen kann davon ausgegangen werden, dass diese Plattenstruktur hauptsächlich infolge der Injektion an Manschette 3 entstanden ist (Abb. 4.29-rechts).

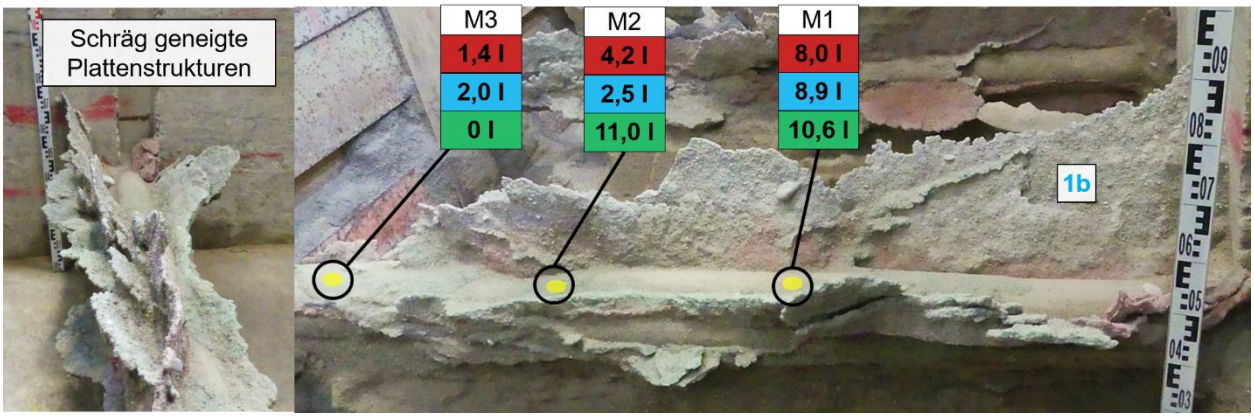


Abb. 4.29: links: Schräg geneigte Anordnung der Plattenstrukturen (je nach Platte $\beta \approx 45–70°$) rechts: Injizierte Suspensionsmengen an Manschettenrohr 2

Wie in Kapitel 4.3.3.1 erwähnt, konnte im 3. Durchgang die Manschette 3 nicht mehr injiziert werden. Dass die Injektion durch eine größere Suspensionsansammlung an dieser Stelle verhindert wurde, konnte durch die Freilegung nicht bestätigt werden. Inwiefern es stattdessen zu einem Verstopfen der Manschettenöffnung gekommen ist, wurde im Rahmen der Zerteilung des Injektionskörpers untersucht (Kapitel 4.3.4.6).

4.3.4.5 Injektionskörperstrukturen am Rohr 3

Im Gegensatz zu den Rohren 1 und 2 wurde Rohr 3 ohne umhüllende Dämmerschicht im Boden verbaut. Die am Rohr 3 entstandenen Injektionskörperstrukturen sind in Abb. 4.30 und Abb. 4.31 dargestellt. In Tabelle 4.6 sind die am Rohr 3 injizierten Suspensionsmengen in aufgeführt.

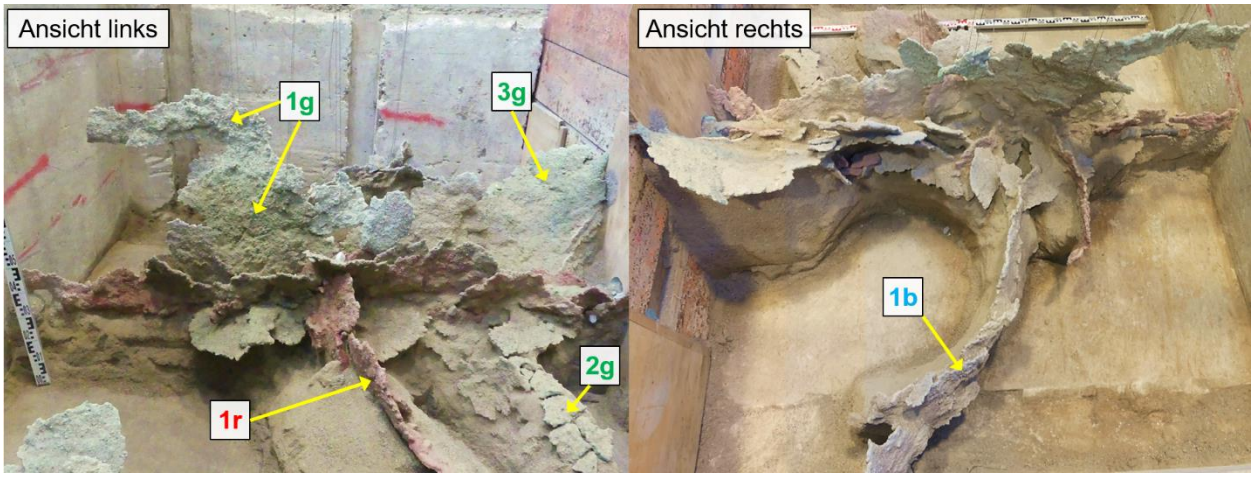


Abb. 4.30: Seitenansichten des Injektionskörpers an Rohr 3

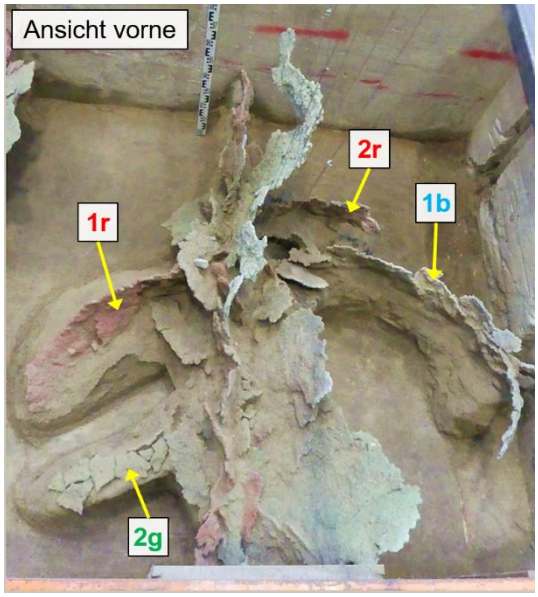


Abb. 4.31: Vorderansicht des Injektionskörpers an Rohr 3

Tabelle 4.6: Injektionsmengen am Rohr 3

Durchgang	Injektionsmenge pro Manschette [l]		
	M1	M2	M3
1	10,6	8,8	3,0
2	9,4	8,7	11,0
3	7,9	11,1	7,1

Die Gestalt des Injektionskörpers am Rohr 3 wird durch keinen Injektionsdurchgang besonders geprägt. Für alle Injektionsdurchgänge lassen sich größere Strukturen am Injektionskörper ausmachen. Besonders auffällig sind hier die langen, senkrecht zur Rohrachse verlaufenden, Auskragungen des Injektionskörpers (1r, 2r, 1b, 2g). Die Auskragungen verlaufen in der horizontalen Ebene der Rohrachse und sind überwiegend vertikal ausgerichtet. Charakteristisch für diese Strukturen ist deren linienförmige Gestalt. Es lässt sich hier vielmehr von schmalen Ästen als von plattenartigen Strukturen sprechen. Derartige Auskragungen sind in allen drei Injektionsdurchgängen entstanden. Im Weiteren bildete sich im Bereich von Manschette 1 eine relativ große grüne vertikale Platte aus (1g, Abb. 4.33-rechts). Diese reichte zum Teil bis an die Geländeoberfläche (vgl. Abb. A 4 im Anhang A.2.6). Außerdem entstand zwischen Manschette 3 und der Vorderwand eine große schräg geneigte ($\beta \approx 45–60°$) grüne Platte (3g).

Abb. 4.32-links zeigt eine Detailaufnahmen im Bereich von Manschette 1 (rechte Rohrseite). Hier ist deutlich das Austreten der roten Suspension (2r) in einem Winkel von ca. 45° zur Rohrachse zu erkennen. Im darauffolgenden Durchgang verläuft der Injektionsriss 1b in der Nähe des Rohres zunächst noch horizontal. Mit zunehmender Risslänge ändert sich jedoch die Ausrichtung des Risses bis schließlich ein vertikaler Riss (ohne Änderung der Höhenlage) entsteht. Dieser vertikale Riss dringt bis zur Außenwand der Versuchsgrube vor. Vermutlich wurden durch die vertikalen Rissstrukturen infolge des 1. Injektionsdurchgangs nur die Horizontalspannungen des Bodens in der Nähe des Rohres erhöht. Da der Injektionsriss 1b jedoch auch in weiter entfernte, noch „unverbesserte“ Bodenbereiche[26] vorgedrungen ist, bildete sich dort ein vertikaler Injektionsriss aus.

[26] Die Horizontalspannungen des Bodens wurden hier noch nicht durch vertikale Injektionsrisse erhöht.

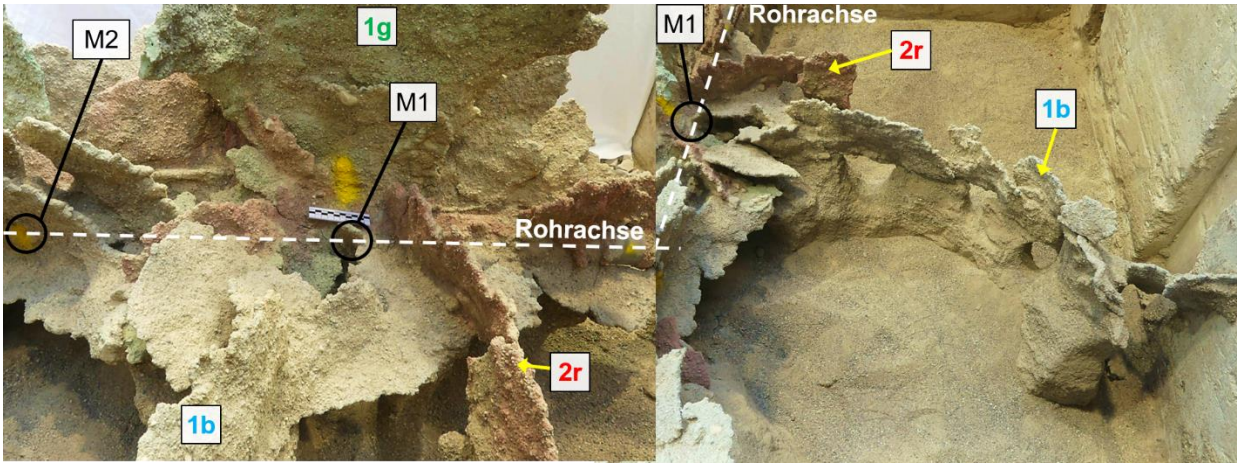


Abb. 4.32: links: Austritt der Suspension im Winkel von ca. 45° im Bereich der Manschette 1 (rechte Rohrseite)
rechts: Ausbildung von Injektionskörperästen an Manschette 1

In Abb. 4.33-links sind die beiden Auskragungen des Injektionskörpers auf der linken Rohrseite dargestellt. Die Struktur 1r ist vermutlich zuerst von Manschette 1 aus entstanden und wurde durch die Injektion an Manschette M2 verlängert. Da das Rohr u.a. zwischen diesen beiden Manschetten von roter Suspension umhüllt wurde, war auch nach der Zerteilung des Injektionskörpers keine eindeutige Zuordnung zu einer Manschette möglich.
In Abb. 4.33-rechts ist die im Bereich von Manschette 1 entstandene vertikale Platte (1g) dargestellt. Die horizontale Auskragung im oberen Teil der Platte reichte bis ca. 20 cm unterhalb der Geländeoberfläche und verlief im Bereich entlang der Kontaktfläche zweier Big Bags (vgl. Abb. A 4 im Anhang A.2.6).

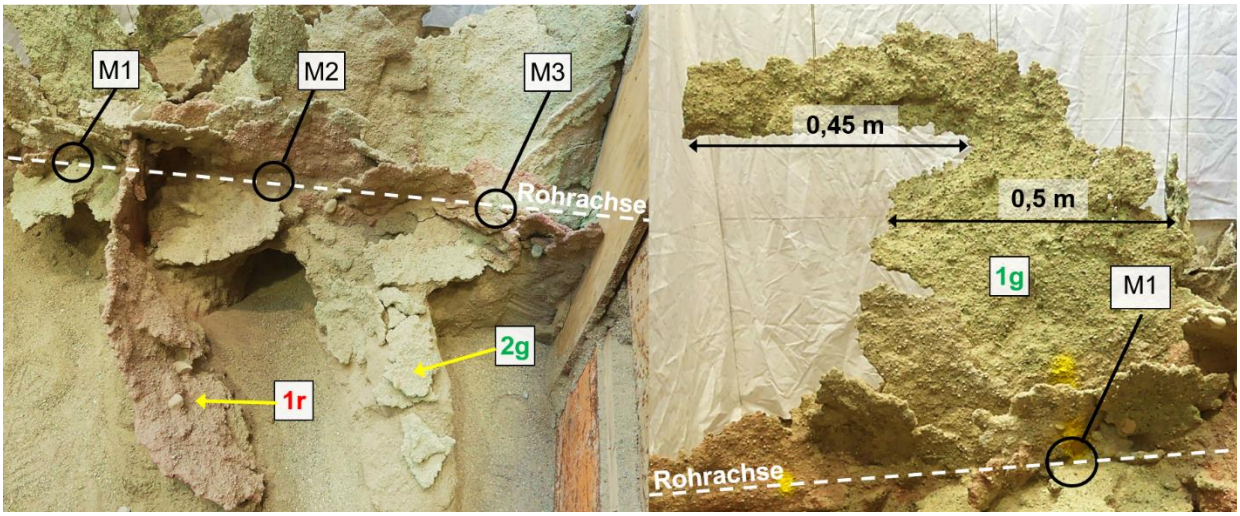


Abb. 4.33: links: Auskragungen zwischen Manschette 1 und 2 (1r) sowie zwischen Manschette 2 und 3 (2g) auf der linken Rohrseite
rechts: Ausgeprägte vertikale Platte (1g) im Bereich von Manschette 1.

4.3.4.6 Zerteilen der Injektionskörper und Erkenntnisse aus dem 1. Großversuch

Nach der Freilegung der Injektionskörper wurden die entstandenen Strukturen für weitere detailliertere Untersuchungen zerteilt. Nachfolgend werden die daraus gewonnen, wesentlichen Erkenntnisse dargestellt.

Einfluss der Dämmerschicht um das Manschettenrohr

Infolge einer Injektion bricht das relativ spröde Dämmermaterial nicht nur im Bereich der injizierten Manschette auf, sondern reißt über einen längeren Abschnitt entlang der Rohrachse auf (ca. 0,5 – 1 m, Abb. 4.34-links). Die Suspension tritt damit über die gesamte Risslänge in den Boden ein. Für den hier eingetretenen Fall, einer hydraulischen Rissbildung im Boden, entstehen plattenartige Injektionskörperstrukturen (siehe Injektionskörper am Rohr 1 und 2). Ist hingegen keine Dämmerschicht vorhanden, tritt die Suspension tendenziell sehr lokal in den Boden ein und es bilden sich schmälere, längere Rissstrukturen aus (siehe Rohr 3).

Dass die Suspension auch tatsächlich zu einer Rissbildung innerhalb des Dämmers führt und nicht nur ein Riss entlang der Grenzfläche zwischen Boden und Außenseite des Dämmers entsteht, verdeutlicht Abb. 4.34-rechts.

Abb. 4.34: links: Aufreißen der Dämmerschicht entlang der Rohrachse (hier am Bsp. von Rohr 1)

Im Weiteren entstand im Falle einer umhüllenden Dämmerschicht, entlang der Rohrachse, vorwiegend im 1. Injektionsdurchgang, eine mit Suspension gefüllte Fuge zwischen Manschettenrohr und Dämmer (Abb. 4.35). Dadurch und infolge des Aufreißens des Dämmers entlang der Rohrachse wäre es möglich, dass die Suspension von der Manschette aus verhältnismäßig lange Strecken zurücklegen kann und an anderer Stelle in den Boden eintritt. Dies könnte erklären weshalb im Zuge der baupraktischen Ausführungen teilweise Hebungen in mehreren Metern Entfernung zur eigentlichen Injektionsstelle auftreten können (Bezuijen 2010).

Eine bevorzugte Richtung für das radiale Aufreißen des Dämmers (z.B. vertikal oder horizontal) konnte nicht festgestellt werden. Diesbezüglich kann der in Abb. 4.35 dargestellte Querschnitt als repräsentativ angesehen werden.

Abb. 4.35: links und rechts: Radiales Aufreißen der Dämmerschicht entlang der Rohrachse sowie Suspension zwischen Dämmer und Manschettenrohr

Entwicklung der Injektionskörperstrukturen infolge mehrfacher Injektionen

Die im Zuge einer erneuten Injektion entstehenden Risse orientieren sich überwiegenden entlang bereits bestehender Injektionskörperstrukturen. Typischerweise bildete sich ein Verbund aus mehreren Plattenlagen, die jeweils einem Injektionsdurchgang zugeordnet werden können (Abb. 4.36).

Abb. 4.36: Verbund aus mehreren Schichten an Injektionsrissen/ Plattenlagen

Rissausprägung

Im Rahmen des 1. Großversuchs haben sich überwiegend Rissstrukturen mit einer Dicke von ca. 0,5 bis 1 cm ausgebildet. Im Bereich der Rohre wurden teilweise auch etwas dickere Strukturen (bis ca. 2 cm) angetroffen. Die Suspension drang entlang der Rissflanken nur wenige Millimeter in den Boden ein. Im Bereich vor der Rissspitze konnte zumeist eine etwas tiefere Eindringung in den Porenraum des Bodens festgestellt werden. Bereits wenige Zentimeter hinter der Rissspitze erreichten die mit Suspension gefüllten Risse eine Dicke von ca. 3 bis 5 mm. Lediglich in einem kurzen Bereich unmittelbar an der Rissspitze traten teilweise dünnere Risse von 1 bis 2 mm auf (Abb. 4.37).

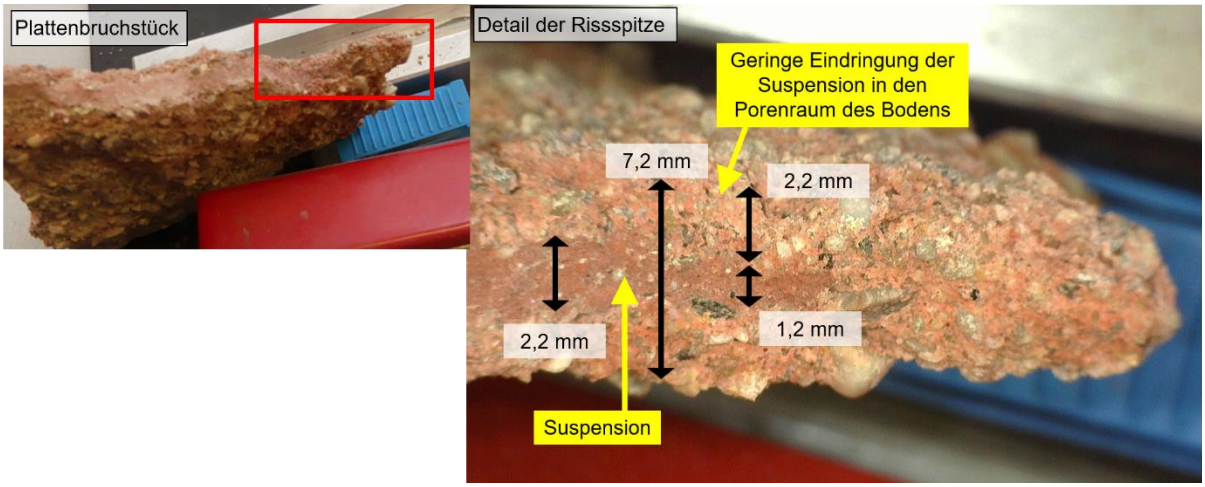


Abb. 4.37: Detailaufnahme eines Injektionsrisses

Nicht injizierbare Manschetten:

An den Rohren 1 und 2 konnte die Manschette 3 im 3. Durchgang nicht mehr injiziert werden. Um das Manschettenrohr selbst hatten sich keine größeren Suspensionsmengen angesammelt (Abb. 4.38-links). Ein Auftrennen der beiden Manschetten zeigte, dass jeweils alle vier Öffnungen (Bohrung Ø 8 mm) mit Suspensionsresten verstopft waren (Abb. 4.38-rechts).

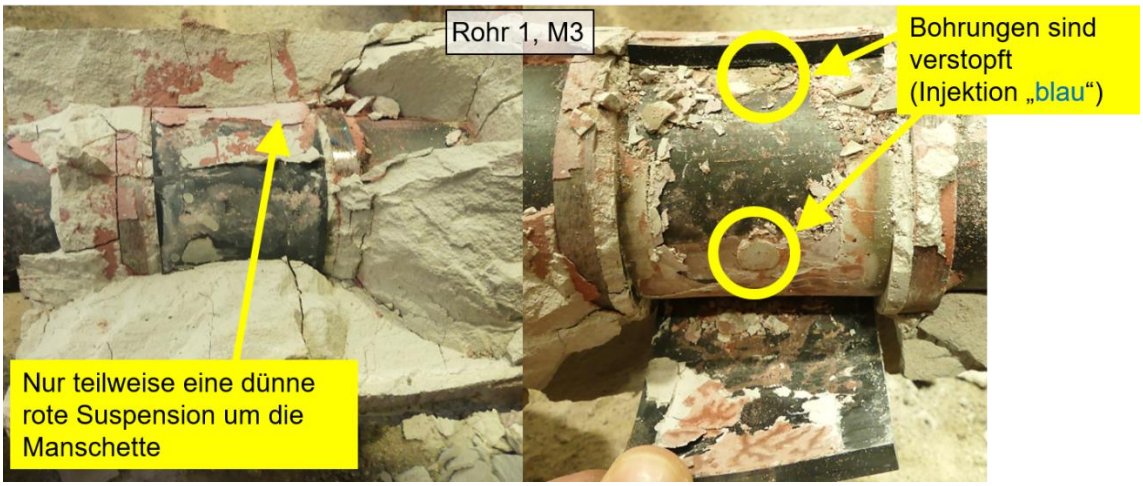


Abb. 4.38: Verstopfte Manschette (hier Rohr 1, Manschette 3)

Um im Zuge des 2. Großversuchs das Aufbrechen von evtl. verstopften Manschetten zu erleichtern, wurden hierzu alle Bohrungen auf einen Durchmesser von 15 mm aufgeweitet.

4.4 2. Großversuch

4.4.1 Allgemeines

Nachdem mit dem 1. Großversuch unter anderem erste Erkenntnisse zur Gestalt der Injektionskörperstrukturen, dem Einfluss der Ringspaltverfüllung sowie der Rissentwicklung nach mehreren Injektionsdurchgängen erlangt werden konnten, sollten im 2. Großversuch folgende Schwerpunkte behandelt werden:

- Deutlichere Anhebung der Geländeoberfläche durch eine größere Anzahl an Injektionsdurchgängen
- Einfluss unterschiedlicher Injektionskonzepte auf die resultierenden Hebungen
- Verhältnis aus injiziertem Suspensionsvolumen zu erreichtem Hebungsvolumen
- Einfluss des Injektionskonzepts auf die Effizienz der Hebungsinjektionen
- Gestalt der Injektionskörper im Vergleich zum 1. Großversuch

Um die Gefahr von Suspensionsaustritten an der Geländeoberfläche und an der Vorderwand zu reduzieren, wurden die Dimensionen der Versuchsanordnung gegenüber dem 1. Großversuch vergrößert (siehe Kapitel 4.2.1). Durch eine Erhöhung der Auflast sollte zudem ein Spannungsniveau erreicht werden, das die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die baupraktische Anwendung ermöglicht. Zur redundanten Erfassung der Hebungen an der Geländeoberfläche, kam ein Schlauchwaagenmesssystems und die hydrostatische Linienvermessung zum Einsatz.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Im 2. Großversuch wurden bis zu 15 Injektionsdurchgänge ausgeführt. Teilweise wurden die Suspensionen in den einzelnen Durchgängen mit unterschiedlichen Farbpigmenten eingefärbt. Neben der kontinuierlichen Verformungsmessung durch das Schlauchwaagenmesssystem, wurde die hydrostatische Linienvermessung nach ausgewählten Injektionsdurchgängen ausgeführt.
Für den Vergleich zweier Injektionskonzepte (siehe Kapitel 4.4.1) wurden die Hebungsinjektionen wie folgt ausgeführt:

- Rohr 1 und 2: Sollmenge 10 l pro Manschette, Injektion in jedem Durchgang (15 ausgeführte Durchgänge)
- Rohr 3: Sollmenge 20 l pro Manschette, Injektion in jedem zweiten Durchgang (8 ausgeführte Durchgänge)

In Tabelle 4.7 ist eine allgemeine Übersicht zum Ablauf des 2. Großversuchs dargestellt.

Tabelle 4.7: Ablauf des 2. Großversuchs

Durchgang (Suspensionsfarbe)	Injizierte Manschettenrohre	Zeitabstand zum nächsten Injektions-durchgang [Tage]	Ausgeführten Messungen der hydrostatische Linienvermessung
			Referenzmessung
1 (Rot)	1 + 2 + 3	4	1. Folgemessung
2 (Blau)	1 + 2	4	2. Folgemessung
3 (Schwarz)	1 + 2 + 3	4	3. Folgemessung
4 (Orange)	1 + 2	5	4. Folgemessung
5 (Grün)	1 + 2 + 3	4	
6 (Ohne)	1 + 2	4	5. Folgemessung
7 (Gelb)	1 + 2 + 3	4	6. Folgemessung
8 (Ohne)	1 + 2	0	
9 (Ohne)	1 + 2 + 3	1	
10 (Ohne)	1 + 2	0	
11 (Ohne)	1 + 2 + 3	7	7. Folgemessung
12 (Ohne)	1 + 2	1	
13 (Ohne)	1 + 2 + 3	4	8. Folgemessung
14 (Braun)	1 + 2	1	
15 (Dunkelgrün)	1 + 2 + 3		9. Folgemessung

Die Referenzmessung der hydrostatischen Linienvermessung wurde 19 Tage vor Beginn des 1. Injektionsdurchgangs ausgeführt. Innerhalb eines Injektionsdurchgangs wurden zunächst die Manschetten 1 und 3 injiziert und nach 2 bis 3 Tagen, erfolgte die Injektion der Manschetten 2 und 4. Bis zum 8. Injektionsdurchgang betrug der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Durchgängen 4 bis 5 Tage. Ab dem 8. Injektionsdurchgang wurden alle Manschetten eines Rohres innerhalb eines Tages beaufschlagt. Der zeitliche Abstand zwischen den jeweiligen Durchgängen betrug dann zwischen 0 und 7 Tagen. Die genaue zeitliche Abfolge der Injektionen kann Anhang A.3.3 entnommen werden.

Der Massenanteil an Farbpigmenten wurde lediglich für die rote und grüne Suspension zwischen der Injektion der Manschetten 1 und 3 (4 M-%) bzw. Manschette 2 und 4 (2 M-%) variiert.

Eine tabellarische Übersicht der injizierten Suspensionsmengen je Manschette und Durchgang ist in Anhang A.3.4 dargestellt.

Die Verpressrate wurden in den Durchgängen 1 bis 6 auf 5 l/min eingestellt und ab dem 7. Durchgang auf 10 l/min erhöht. Durch die Erhöhung der Verpressrate konnten die Aussetzer der Injektionspumpe reduziert und damit eine gleichmäßigere Förderung der Suspension erreicht werden.

Trotz eines Abstandes von ca. 1 m der vordersten Manschetten (M4) zur Vorderwand des Versuchsaufbaus, mussten die Injektionen an diesen Manschetten fast immer aufgrund von Suspensionsaustritten vorzeitig abgebrochen werden.

4.4.3 Auswertung der Injektionsdaten und Verformungsmessungen

4.4.3.1 Injektionsdaten

In Abb. 4.39 sind die injizierten Suspensionsmengen pro Manschette dargestellt. Die Sollmenge pro Manschette an Rohr 1 und 2 betrug 150 l, am Rohr 3 160 l. Insgesamt wurde ein Suspensionsvolumen von ca. 1 440 l injiziert.

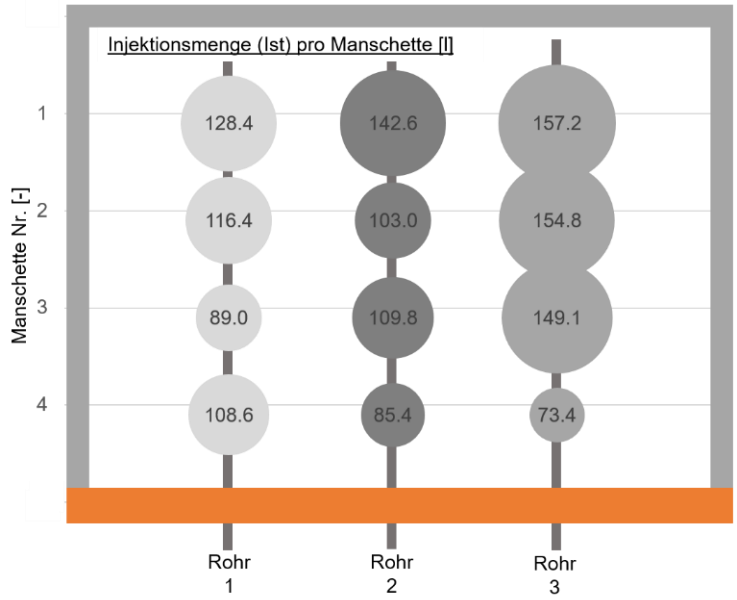


Abb. 4.39: Übersicht der injizierten Suspensionsmengen [l]

In den hintersten Manschetten (M1) konnten ca. 90–100 % der Sollmenge injiziert werden. Geringe Verluste ergaben sich beispielsweise infolge eines nicht vollständig gefüllten Injektionsschlauchs oder dem Abbruch der Injektion aufgrund eines Kurzschlusses zwischen den Manschetten eines Rohres (Austritt der Suspension aus dem Manschettenrohr). An den vordersten Manschetten (M4) konnten je nach Rohr 45–70 % der Sollmenge injiziert werden (Abbruch der Injektionen bei Suspensionsaustritten an der Vorderwand).

In Abb. 4.40 sind die injizierten Suspensionsmengen an den jeweiligen Manschettenrohren dargestellt.

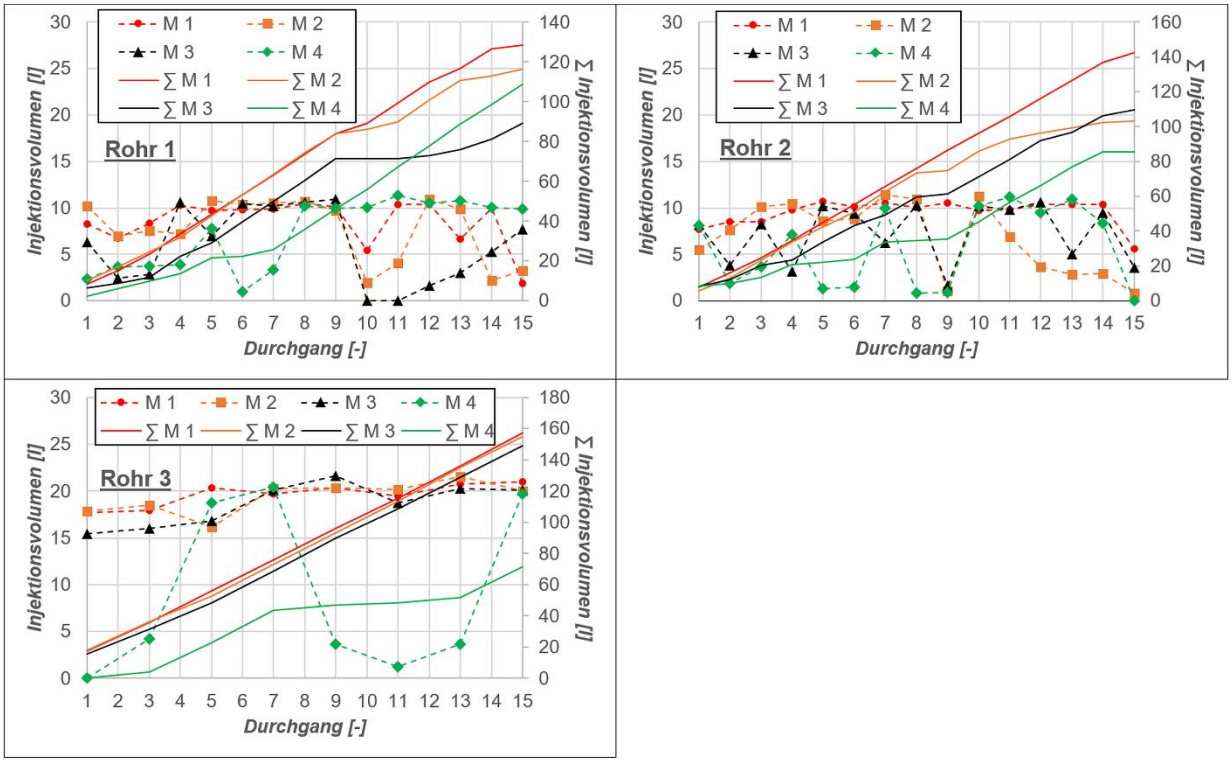


Abb. 4.40: Injizierte Suspensionsmengen je Rohr und Durchgang

Während an Manschette 1 relativ gleichmäßig über alle Durchgänge hinweg die geplante Suspensionsmenge injiziert werden konnte, war es an den anderen Manschetten nicht immer möglich die Sollmenge zu injizieren. So konnte es durchaus vorkommen, dass eine Injektion aufgrund von Suspensionsaustritten abgebrochen werden musste, in einem späteren Durchgang jedoch wieder planmäßig/vollständig beaufschlagt werden konnte.

Die zum Aufbrechen der umhüllenden Dämmerschicht benötigten Drücke, sind in Abb. 4.41-links, am Beispiel von Manschette 1, dargestellt. Der Aufsprengdruck variierte in den meisten Fällen zwischen 5 und 20 bar. Vereinzelt traten sowohl höhere (bis zu ca. 36 bar) als auch geringere Drücke (ca. 1 bar) auf. Abb. 4.41-rechts zeigt exemplarisch den Verlauf der Druck- und Verpressrate. Auch für den hier dargestellten Fall eines sehr geringen Aufsprengdrucks, der nicht deutlich höher ist, als der anschließende Druck während des Injektionsvorgangs, kann dieser aus den Messdaten ermittelt werden. Kennzeichnend für den Zeitpunkt des Aufsprengens der Manschette ist der sprunghafte Anstieg und Abfall der Verpressrate (hier bei ca. 10 Sekunden) mit der anschließenden Suspensionsförderung. Damit lässt sich aus dem Druckverlauf der dazugehörige Aufsprengdruck von ca. 0,5 bar ermitteln.

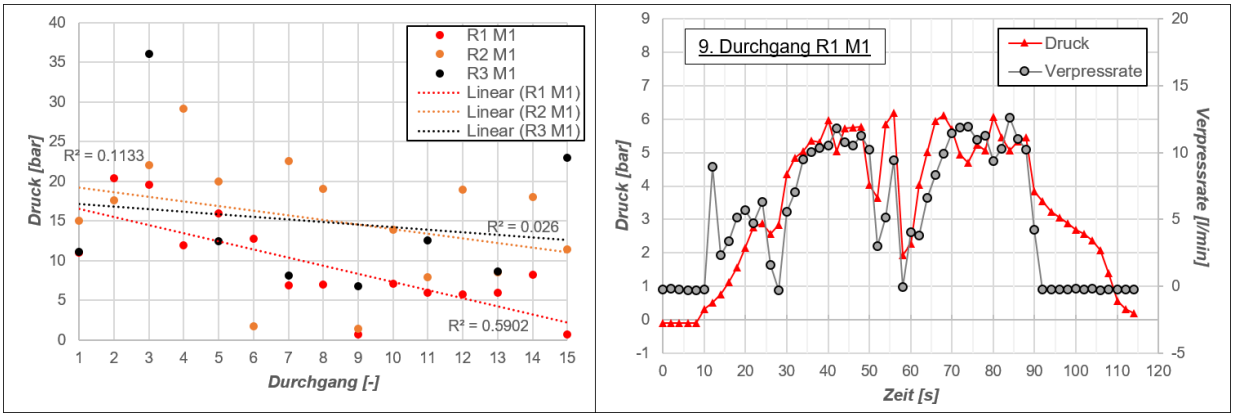


Abb. 4.41: links: Aufsprengdrücke an Manschette 1 der Rohre 1, 2 und 3
rechts: Verlauf des Injektionsdrucks und der Verpressrate (9. Durchgang, Rohr 1, Manschette1)

4.4.3.2 Verformungsmessungen

In Abb. 4.42 ist, basierend auf den Ergebnissen der hydrostatischen Linienvermessung, die räumliche Ausbildung der erreichten Oberflächenhebungen dargestellt.

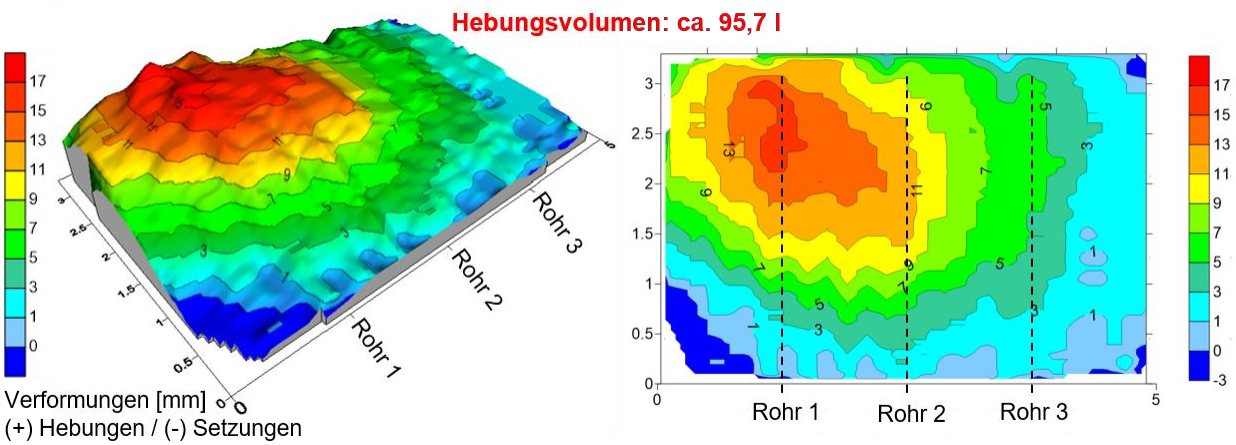


Abb. 4.42: Verformungsmessungen der hydrostatischen Linienvermessung am Ende des 2. Großversuchs (nach 15. Durchgängen)

Während im Bereich von Rohr 1 Hebungen von bis zu ca. 17 mm erreicht werden konnten, betrugen die Hebungen im Bereich von Rohr 3 ca. 7 mm. Im Bereich der Vorderwand wurde aufgrund der teils sehr geringen Injektionsmengen kaum eine Anhebung der Geländeoberfläche erreicht (ca. 2 mm).

Der zeitliche Hebungsverlauf an den zehn Messstellen des Schlauchwaagenmesssystems ist in Abb. 4.43 dargestellt. Die Verformungsmessungen über die gesamte Dauer der Schlauchwaagenmessungen kann Anhang A.3.5.1 entnommen werden. Vermutlich aufgrund des unkonventionellen Einsatzes der Schlauchwaagensensoren (Einbau im Boden) fiel die Messstelle 5 noch vor Beginn der Injektionstätigkeiten aus.

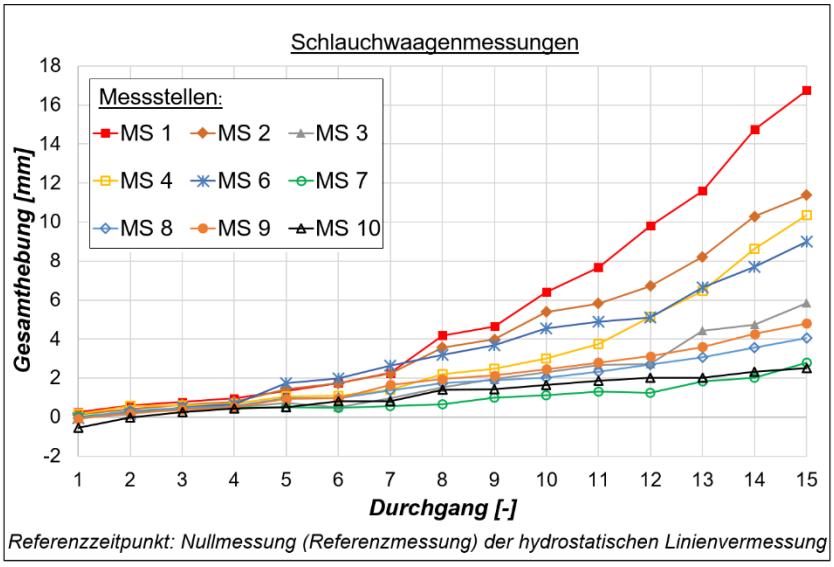


Abb. 4.43: Verformungsmessungen der Schlauchwaage

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der hydrostatischen Linienvermessung traten die größten Hebungen (ca. 17 mm) im Bereich von Rohr 1 auf (MS1). Die geringsten Hebungen wurden an der Vorderwand sowie im Bereich zwischen der Außenwand der Versuchsgrube und Rohr 3 gemessen (MS10 und MS7). Während nach Abschluss des 7. Injektionsdurchgangs die Hebungen maximal ca. 2 mm betrugen, nahmen insbesondere im hinteren Bereich von Rohr 1 und 2 (MS1 und MS2) die Hebung deutlich zu. Für die in Abb. 4.43 dargestellten Hebungen wurde als Referenzzeitpunkt die Nullmessung der hydrostatischen Linienvermessung gewählt. Eine detaillierte Angaben zur Festlegung des Referenzzeitpunkts und der Messwertschwankung im Zeitraum der mehrstündigen Nullmessung können Anhang A.3.5.2 entnommen werden.

Die Schlauchwaagenmesssungen zeigten im Tagesverlauf Schwankungen im Bereich von ca. ± 0,3 mm. Die Messwerte der hydrostatischen Linienvermessung wichen davon, je nach Messstelle, 0,5–2 mm ab. In Anbetracht einer Messstrecke von ca. 82 m, der hydrostatischen Linienvermessung, stellt dies eine sehr gute Übereinstimmung der beiden eingesetzten Messsysteme dar. Die Auswertung hinsichtlich der Differenz der Verformungsmessungen zwischen der hydrostatischen Linienvermessung und der Schlauchwaagenmessungen ist in Anhang A.3.5.3 dargestellt.

4.4.3.3 Effizienz der Hebungsinjektionen

Die Effizienz der Hebungsinjektion errechnet sich aus dem Verhältnis von erreichtem Hebungsvolumen zum injizierten Suspensionsvolumen (Kapitel 1.1). Zur Ermittlung des Hebungsvolumens wurden die Ergebnisse der hydrostatischen Linienvermessung verwendet.

Die Berechnung des Hebungsvolumens erfolgte mit Hilfe des Softwareprogramms Surfer[27]. Das jeweilige Injektionsvolumen wurde anhand der Messdaten des Durchlaufzählers bestimmt.

In Abb. 4.44 sind die Effizienz sowie die Hebungs- und Suspensionsvolumina über die 15 Injektionsdurchgänge hinweg dargestellt.

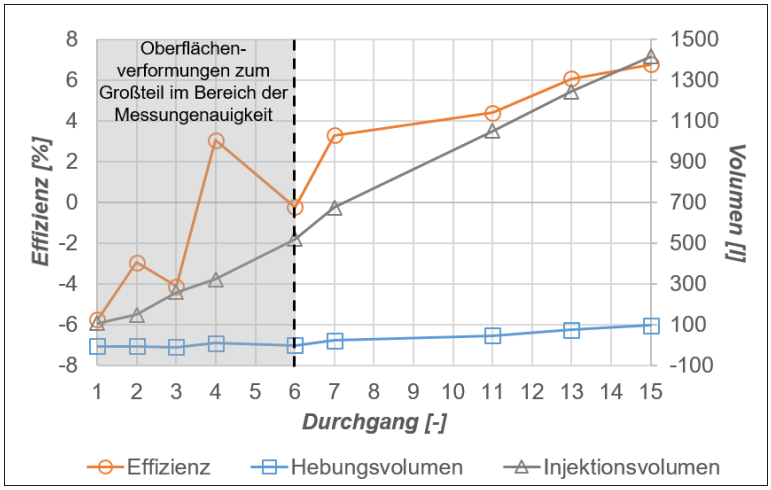


Abb. 4.44: Entwicklung von Effizienz, Hebungs- und Injektionsvolumen

Die infolge der ersten Injektionsdurchgänge aufgetreten Verformungen lagen zum Großteil im Bereich der Messungenauigkeit der hydrostatischen Linienvermessung (±1 mm). Die daraus ermittelten Hebungsvolumina können deshalb nur sehr bedingt für die weitere Auswertung verwendet werden. Tendenziell zeigt sich jedoch, dass überwiegend Setzungen aufgetreten sind, während Hebungen allenfalls im Bereich entlang der Rohrachsen erzeugt wurden. Außerdem ist hierbei zu berücksichtigen, dass ein Teil der Setzungen aus der Auflast der Big Bags resultiert (siehe Anhang A.3.5.4). Erst mit dem 7. Durchgang sind auch insgesamt mehr Hebungen als Setzungen entstanden. Nach Abschluss der Injektionstätigkeiten lag die Effizienz der Hebungsinjektionen bei ca. 6–7%.

4.4.4 Injektionskörper des 2. Großversuchs

4.4.4.1 Allgemeine Hinweise

Die eingefärbten Suspensionen mit den Farben Rot, Grün, Gelb und Orange waren auch an den ausgehärteten Injektionskörpern sehr gut zu erkennen. Dunkelgrüne und braune Injektionskörper ließen sich weitestgehend gut erkennen. Die Farben Schwarz und Blau kamen jedoch kaum zur Geltung und ließen sich nur schwer von den ausgehärteten Suspensionen ohne Farbpigmentzugabe unterscheiden. Da sich die Injektionskörperstrukturen zu einem Großteil aus

[27] Hersteller Golden Software. Version 10.7.972. Berechnung der geschlossenen Oberfläche durch Triangulation mit linearer Interpolation; Volumenberechnung mittels Trapezregel

den Suspensionen verschiedener Durchgänge zusammensetzten, werden nachfolgend, zur einfacheren Zuordnung, einzelne Injektionskörperstrukturen mit einer laufenden Nummer und je nach ungefährem Neigungswinkel mit h für horizontal bzw. v für vertikal gekennzeichnet.

4.4.4.2 Übersicht

In Abb. 4.45 sind die im Rahmen des 2. Großversuchs erzeugten Injektionskörper dargestellt.

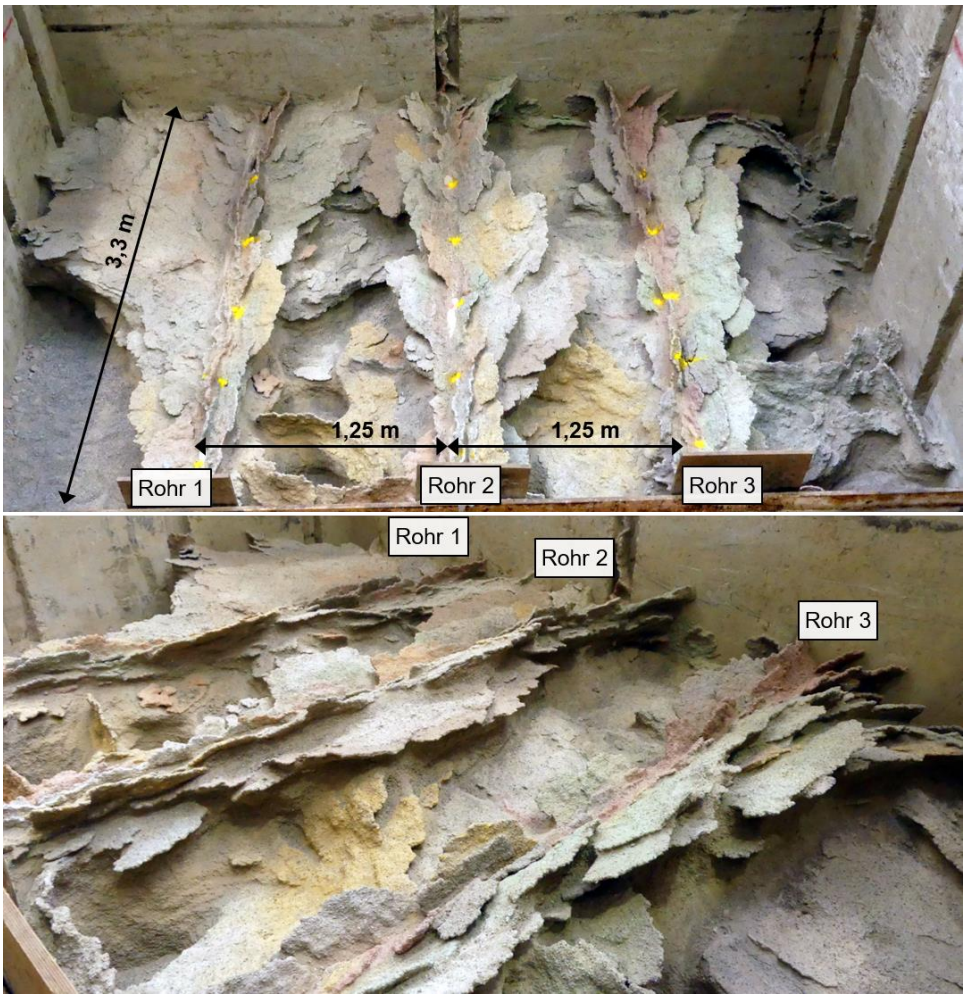


Abb. 4.45: Freigelegte Injektionskörper des 2. Großversuchs

Wie im 1. Großversuch bildeten sich die Injektionskörper in Form von plattenartigen Strukturen aus. Die Strukturen waren überwiegend nahezu horizontal oder leicht geneigt (Abb. 4.46-links, markierte Bereiche 1h-5h). Größere vertikale Formationen traten als Auskragungen vor allem an den vorderen Rohrabschnitten auf (Abb. 4.46-links, markierte Bereiche 6v–10v). Infolge des 1. und 2. Durchgangs (rot und blau) bildeten sich vorwiegend entlang der Rohrachse kleinere vertikale oder geneigte ($\beta > 70°$) Rissstrukturen aus (Abb. 4.46-rechts). In den weiteren Injektionsdurchgängen entstanden sowohl geneigte ($\beta \approx 40–60°$) als auch annähernd horizontale Strukturen. Die eingefärbten Suspensionen der letzten beiden Durchgänge 14. und 15. (braun und dunkelgrün) wurden im Allgemeinen in horizontalen Strukturen angetroffen.

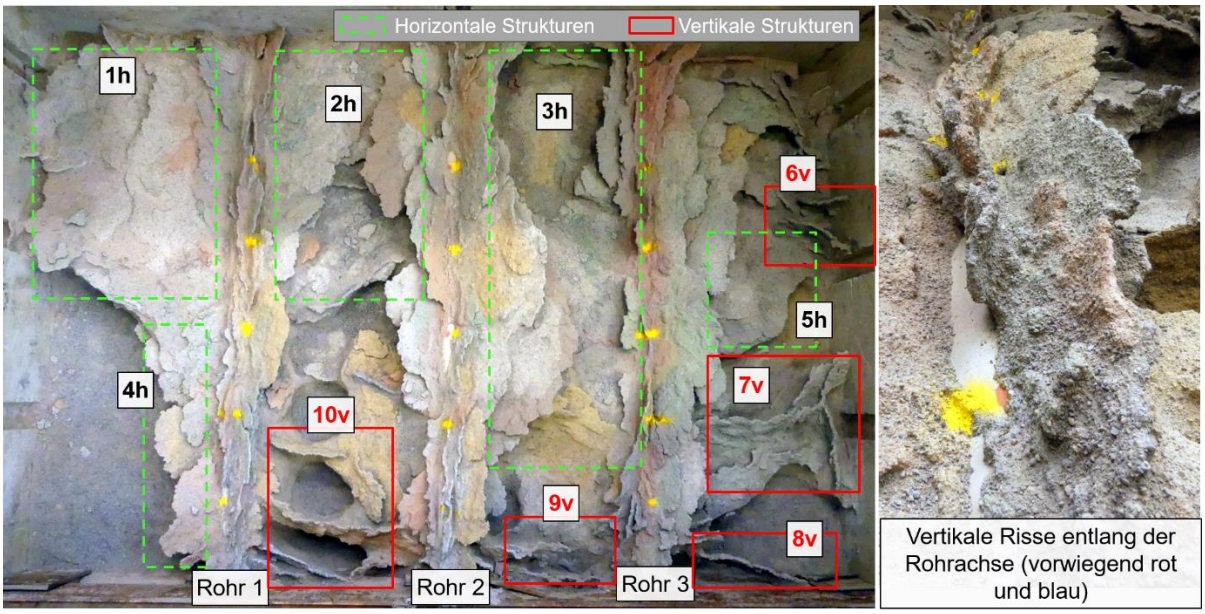


Abb. 4.46: links: Verteilung ausgeprägter horizontaler und vertikaler Strukturen
rechts: Vertikale Risse infolge der Durchgänge 1. und 2. entlang der Rohrachse

4.4.4.3 Injektionskörperstrukturen am Rohr 1

In Abb. 4.47 ist der Injektionskörper an Rohr 1 dargestellt.

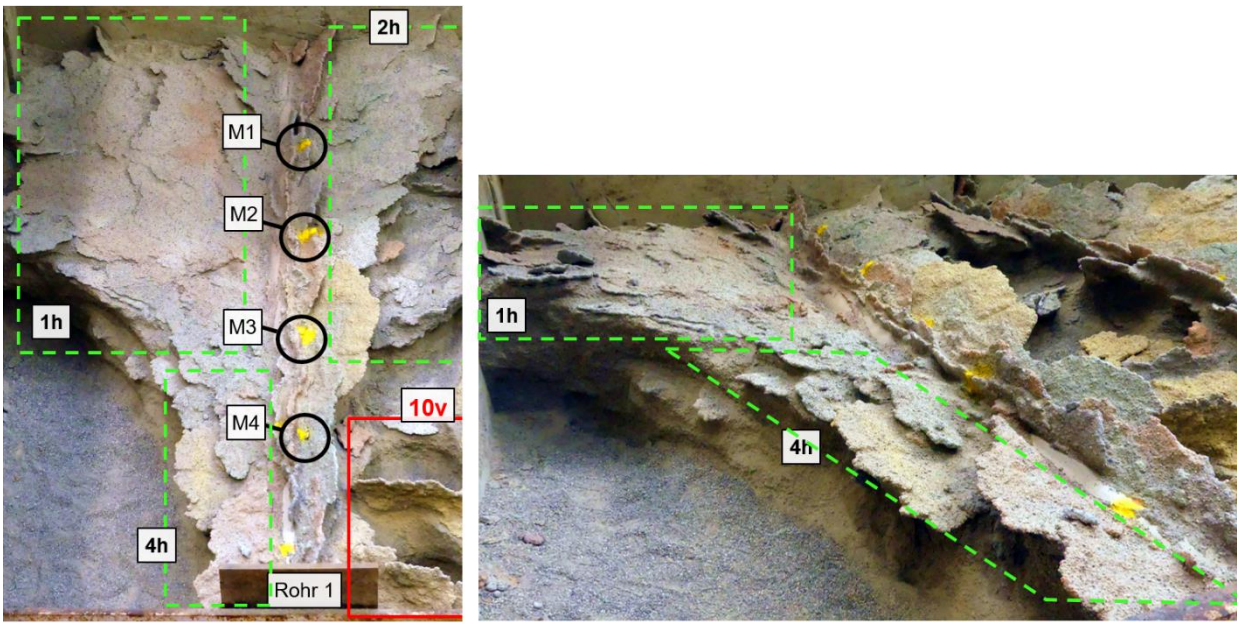


Abb. 4.47: Injektionskörper am Rohr 1

Besonders markant sind die infolge mehrerer Injektionsdurchgänge entstanden horizontalen Plattenstrukturen ab ca. Rohrmitte bis zur Rückwand der Versuchsgrube (1h und 2h). Auf der linken Rohrseite reicht der Injektionskörper teilweise bis an die Außenwand der Versuchsgrube.

Auf der rechten Rohrseite verbinden sich die Strukturen mit dem Injektionskörper von Rohr 1. Im vorderen Rohrabschnitt, auf der linken Rohrseite breiteten sich die horizontalen Injektionsrisse hingegen nur bis zu einem Abstand von ca. 40 cm zur Rohrachse aus. Im Unterschied dazu, sind auf der rechten Rohrseite, zwischen Rohr 1 und 2, größere vertikale Auskragungen (gelb und blau, 10v) entstanden.

4.4.4.4 Injektionskörperstrukturen am Rohr 2

In Abb. 4.48 ist der am Rohr 2 entstandene Injektionskörper dargestellt.

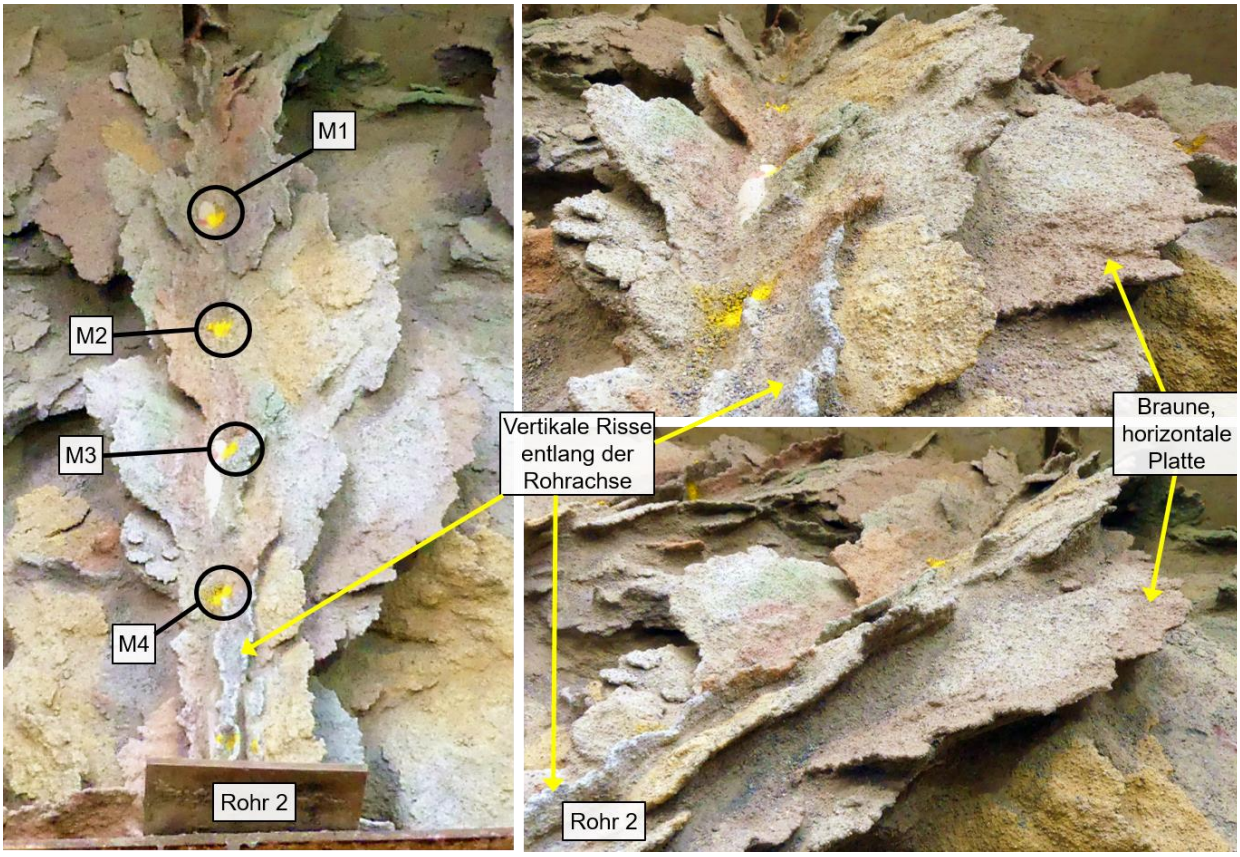


Abb. 4.48: Injektionskörper am Rohr 2

Entlang der Rohrachse haben sich zum einen ausgeprägte geneigte Plattenstrukturen sowie zu den benachbarten Rohren 1 und 3 durchgängige horizontale Strukturen ausgebildet. Ein durchgängiger Injektionskörper entlang des Manschettenrohrs, wurde nach ca. 6–7 Injektionsdurchgängen erreicht. Dieser drang ca. 20–40 cm in den Boden ein. Vertikale Rissstrukturen sind zum Großteil im vorderen Rohrabschnitt ab Manschette 4 bis zur Vorderwand aufgetreten. Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen entstanden zunehmend flacher geneigte Plattenstrukturen. Besonders markant ist beispielweise, die im vorletzten Durchgang, auf der rechten Rohrseite entstandene, braune Plattenstruktur ($\beta \approx 0$–$10°$).

4.4.4.5 Injektionskörperstrukturen am Rohr 3

In Abb. 4.49 sind die am Rohr 3 entstandenen Injektionskörperstrukturen dargestellt.

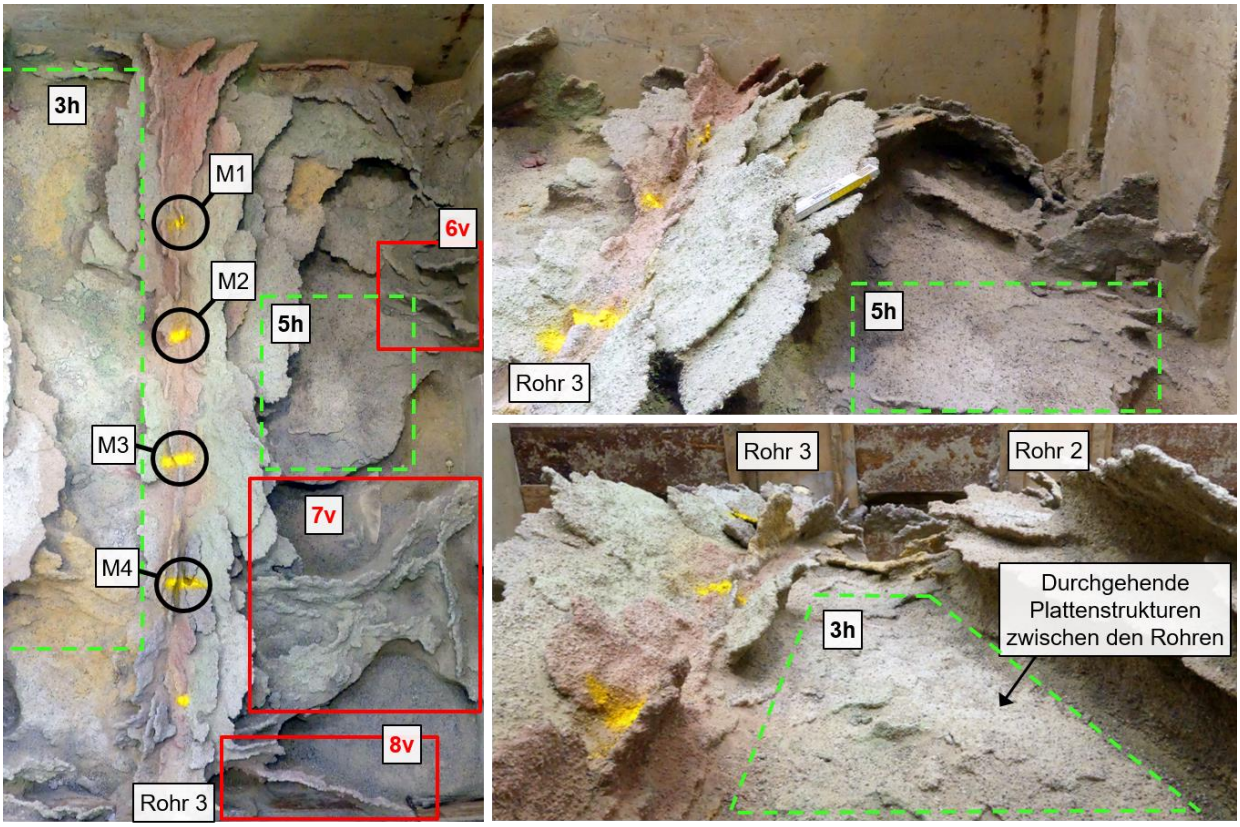


Abb. 4.49: Injektionskörper am Rohr 3

Die Rissstrukturen infolge des 1. Injektionsdurchgangs (rot) sind bei Rohr 3 am deutlichsten zu erkennen. In den beiden folgenden Durchgängen (schwarz und grün) entstanden vorwiegend geneigte Platten ($\beta \approx 45°$). Die grünen Strukturen des 3. Injektionsdurchgangs sind noch deutlich ausgeprägter. Fast entlang des gesamten Manschettenrohr bildeten sich flächige Plattenstrukturen aus, die 10–50 cm weit in den Boden eindrangen. Jedoch können auch Teile der markante vertikale Auskragung an Manschette 4 (7v) dem 3. Injektionsdurchgang zugeordnet werden. Im Laufe der weiteren Durchgänge bildeten sich sowohl horizontale Plattenstrukturen (3h und 5h), als auch vertikale Auskragungen (6v und teilweise 7v) aus. Aufgrund der größeren Suspensionsmengen pro Injektionsdurchgang entstanden bei der jeweiligen Injektion längere Rissstrukturen. Beispielsweise reichen die Auskragungen bis an die Außenwand der Verbauwand (7v) oder es bildete sich eine einzelne große Platte aus (5h). Die Dicke der Plattenstrukturen unterschied sich hingegen nicht signifikant von den Strukturen an den Rohren 1 und 2. Zwischen Rohr 3 und 2 bildete sich, wie auch zwischen Rohr 1 und 2, eine durchgehende horizontale Plattenstruktur aus. Im Bereich zwischen Rohr 3 und der Außenwand der Versuchsgrube bildete sich im Vergleich zu Rohr 1 keine großflächige, mehrere Zentimeter mächtige, horizontale Plattenstruktur aus.

4.4.4.6 Zerteilen der Injektionskörper

Für eine detailliertere Untersuchung der entstandenen Injektionskörperstrukturen und, um zu sehen, welche Strukturen unterhalb der großflächigen horizontalen Plattenstrukturen entstanden sind, wurden die Injektionskörper zerteilt.

In Abb. 4.50 ist das schrittweise Zerteilen der Plattenstrukturen im Bereich zwischen Rohr 1 und 2 dargestellt.

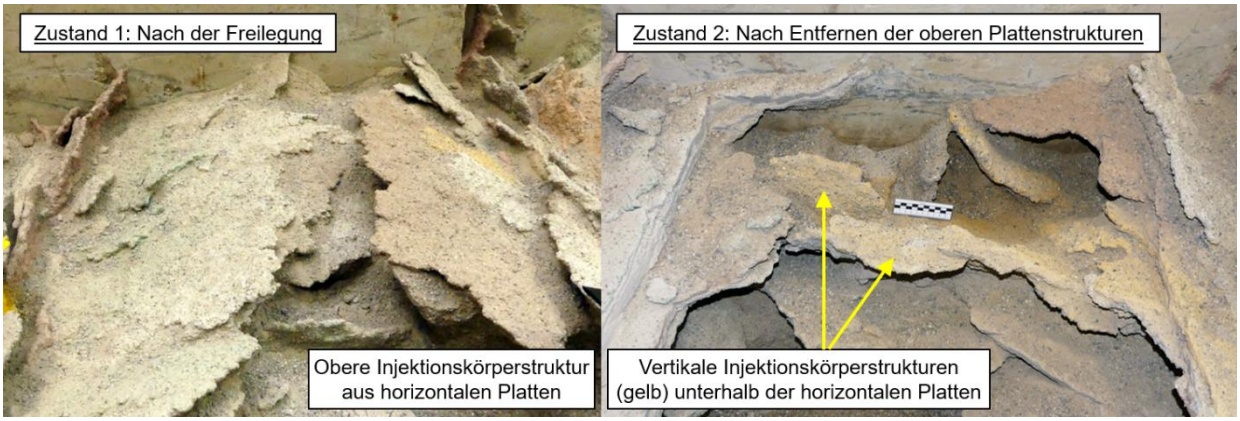


Abb. 4.50: Schrittweise Zerteilung der Injektionskörper

Während nach der Freilegung (Bodenaushub) lediglich die obersten Plattenschichten zu erkennen waren (Abb. 4.50-links), zeigte sich im Zuge der Zerteilung, dass sich darunter auch vertikale Strukturen ausgebildet hatten (Abb. 4.50-rechts). Diese vertikalen Strukturen entstanden in den Injektionsdurchgängen vor Ausbildung der darüber liegenden horizontalen Plattenstrukturen.

Die horizontalen Plattenstrukturen setzen sich aus den einzelnen Schichten der verschiedenen Injektionsdurchgänge zusammen (Abb. 4.51).

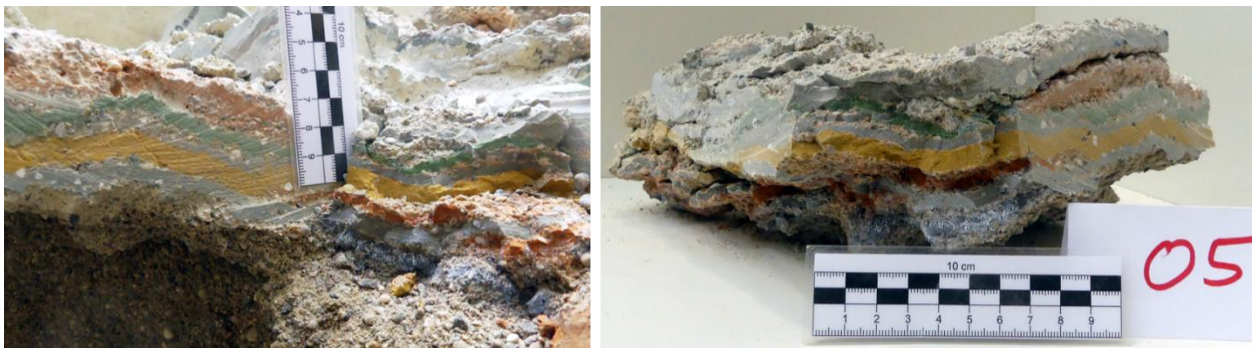


Abb. 4.51: links: Aufgetrennte horizontale Plattenstruktur (Rohr 1, 1h)
rechts: Bruchstück einer horizontalen Plattenstruktur

Die Schichten sind klar voneinander abgetrennt. Vereinzelt wurden jedoch auch bestehende Schichten von nachfolgenden Injektionsrissen durchkreuzt. Die Dicke der einzelnen Injektionsrisse betrug im Allgemeinen ca. 0,5–1 cm. Teilweise bildeten sich sowohl innerhalb der mehrlagigen Plattenstrukturen dünnere Injektionsrisse von ca. 3 mm aus (Abb. 4.51) und in der Nähe der Manschetten vereinzelt auch etwas dickere Injektionsrisse von ca. 2 cm. Je nach Entfernung zum Rohr erreichte der Verbund aus mehreren Plattenlagen eine Dicke von ca. 10 cm (Abb. 4.52).

Abb. 4.52: links und rechts: Verbund aus mehreren Platten mit einer Dicke von insgesamt ca. 10 cm

Neue Injektionsrisse folgten vorwiegend bestehenden Strukturen. Infolge des wiederholten Injizierens vergrößerten sich die Plattenstrukturen. Hierbei nahm zum einen die Dicke der gesamten Plattenstruktur sowie die flächenhafte Ausdehnung zu. Wie beispielsweise die Zerteilung der Plattenstruktur 1h zeigte (Abb. 4.53), drangen die ersten größeren horizontalen Rissstrukturen bis ca. 60 cm in den Boden ein (gelb, 7. Durchgang). Durch nachfolgende Injektionen vergrößerte sich die Plattenstruktur bis zur Außenwand der Versuchsgrube (ca. 1,2 m zur Rohrachse).

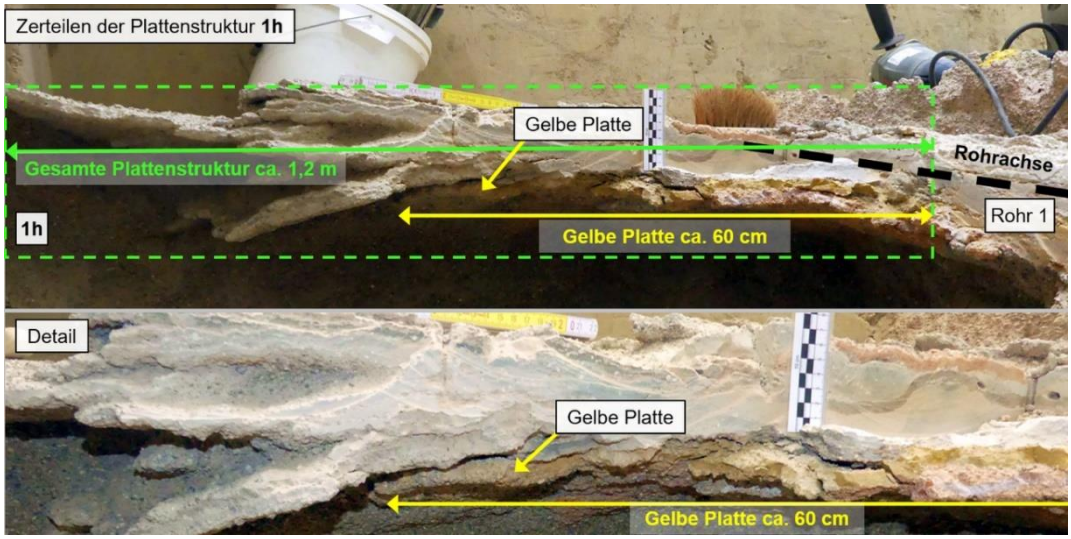


Abb. 4.53: Horizontale Plattenstruktur am Rohr 1: Neue Injektionsrisse folgen bestehenden Strukturen und führen damit zu einer Vergrößerung der Plattenstruktur

4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den beiden Großversuchen

Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den durchgeführten Großversuchen nochmals zusammengefasst:

Versuchsanordnung

- Mit der gewählten Versuchsanordnung konnte eine praxisnahe Ausführung der Hebungsinjektionen erreicht werden. Dabei wurden bis zu 15 Injektionsdurchgänge ausgeführt und die Geländeoberfläche um bis zu 17 mm angehoben (2. Großversuch).
- Durch das Freilegen und Zerteilen der Injektionskörper war es möglich die Gestalt der entstandenen Rissstrukturen detailliert aufzunehmen.
- Das Einfärben der Suspension ermöglichte es die Ausbildung der Injektionskörperstrukturen infolge mehrerer Injektionsdurchgänge nachzuvollziehen.
- Im 1. Großversuch wurde die Ausbildung der Injektionsrisse vermutlich durch die Ballastierung (Big Bags) wesentlich beeinflusst (siehe Kapitel 4.3.4.2). Im 2. Großversuch war, aufgrund der deutlich größeren Überdeckungshöhe der Manschettenrohre, kein Einfluss aus der Ballastierung zu erkennen.
- Durch den Einsatz zweier hochwertiger, voneinander unabhängiger Messsysteme konnten die aufgetretenen Oberflächenhebungen detailliert erfasst werden. Mit Hilfe des Schlauchwaagenmesssystems konnten die Verformungen während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich an mehreren Messstellen gemessen werden. Mittels der hydrostatischen Linienvermessung war es möglich die Verformungen bei einem geringen lokalen Messpunktabstand flächendeckend zu erfassen.

Einfluss des Injektionskonzepts auf die erreichten Oberflächenhebungen

- Bei in Summe nahezu gleichen Injektionsmengen konnten durch das mehrmalige Injizieren kleiner Suspensionsmengen deutlich größere Hebungen erreicht werden, als durch das weniger häufige Injizieren von entsprechend größeren Suspensionsmengen.

Gestalt der Injektionskörperstrukturen

(1) Je Injektionsdurchgang bildeten sich überwiegend ca. 0,5–1 cm dicke Injektionsrisse aus. Darüber hinaus drang die Suspension an den Rissflanken ca. 1–2 mm und an der Rissspitze im Allgemeinen weniger als ca. 1 cm in den Boden ein. Das injizierte Suspensionsvolumen pro Manschette je Durchgang (10 bzw. 20 l) wirkte sich nur geringfügig auf die der Dicke einzelnen Injektionsrisse aus. Tendenziell nahm die Dicke der Injektionsrisse mit zunehmender Entfernung vom Injektionspunkt (Manschette) ab.

(2) Durch die Injektion wurde die Dämmerschicht entlang der Rohrachse aufgesprengt. Die Suspension drang über diese Risslänge flächig in den Boden ein. Folglich bildeten sich im Bereich nahe des Dämmers fast ausschließlich flächenhafte Strukturen aus. Wurde hingegen das Manschettenrohr direkt im Boden eingebaut (1. Großversuch), drang die

Suspension wesentlich punktueller in den Boden ein. In der Folge entstanden vermehrt schmale, lange Injektionsrisse (siehe Kapitel 4.3.4.6).

(3) Vertikale Injektionsrisse entlang der Manschettenrohrachse entstanden überwiegend in den ersten beiden Injektionsdurchgängen. Diese drangen zumeist nur wenige Zentimeter in den Boden ein. Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen verliefen die Rissstrukturen zunehmend in horizontaler Richtung (1. Großversuch ist aus den oben genannten Gründen hierfür nicht repräsentativ, siehe Kapitel 4.3.4.2).

(4) Durch die Ausführung mehrerer Injektionsdurchgänge entstanden aus den einzelnen Injektionsrissen, mehrlagige plattenartige Injektionskörperstrukturen.

(5) Am Rohr 3 entstand nach drei Injektionsdurchgängen (Injektionsvolumen 20 l pro Manschette je Durchgang) fast entlang des gesamten Manschettenrohrs eine durchgängige Plattenstruktur. Die Injektionskörper reichten dabei ca. 10–50 cm in den Boden (Abb. 4.54-links). Am Rohr 2 (Injektionsvolumen 10 l pro Manschette je Durchgang) bildete sich ein vergleichbarer Injektionskörper – soweit dies nachvollzogen werden konnte – vermutlich erst nach sechs bis sieben Durchgängen aus (Abb. 4.54-rechts). Am Rohr 1 konnte, aufgrund der farblich heterogenen Oberfläche des Injektionskörpers, nicht nachvollzogen werden nach welchem Injektionsdurchgang entlang des Manschettenrohrs eine durchgängige Plattenstruktur entstanden ist.

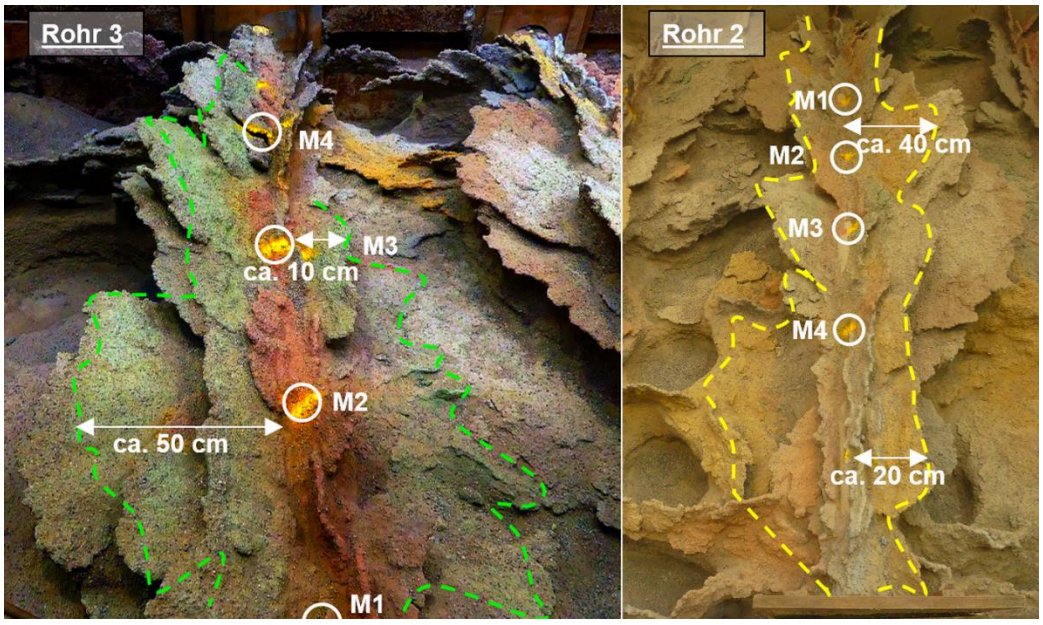


Abb. 4.54: Injektionskörperstrukturen am Rohr 2 und 3

(6) Die Injektionskörperstrukturen vergrößerten sich mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen.

(7) In der Nähe des Manschettenrohrs waren die Injektionskörperstrukturen besonders stark ausgeprägt (ca. 10 cm dick, 2. Großversuch). Mit zunehmender Entfernung zur Manschettenrohrachse verringerte sich die Dicke der Injektionskörperstrukturen.

(8) Hinsichtlich der Gestalt der Injektionsrisse, ist zwischen der Rissausbildung nahe des Manschettenrohrs (< ca. 0,5 m) und Bereichen mit bereits vorhandenen Injektionsrissen (Fall A) gegenüber der erstmaligen Rissbildung in größerer Entfernung zum Manschettenrohr zu unterscheiden (Fall B):
Während im Fall A die Suspension flächig in den Boden eindrang, entstanden im Fall B schmale, lange Injektionskörperauskragungen die vorwiegend vertikal ausgerichtet auf Höhe der Manschettenrohrachse verliefen. Im Zuge nachfolgender Injektionen bildeten sich auch in diesem Bereich horizontale, flächige Injektionsrisse aus.

(9) Das Injizieren größerer Suspensionsmengen führte in der Nähe des Manschettenrohrs tendenziell zu großflächigeren bzw. in weiter entfernten Bereichen zu längeren, schmäleren Rissstrukturen, als das Injizieren kleinerer Injektionsmengen (2. Großversuch).

Schlussfolgerungen für die Modellierung von Hebungsinjektionen in FE-Berechnungen

A: aus (2) bis (4) folgt:

Die Gestalt der Injektionskörper kann durch einen flächigen Injektionsbereich annähernd wiedergegeben werden. Die infolge des Injektionsvorgangs erzeugten Verformungen können beispielsweise vereinfacht durch eine vertikale Verdrängung des Bodens im Injektionsbereich abgebildet werden.

B: aus (3), (5) und (6) folgt:

Im 1. Injektionsdurchgang wird nur in unmittelbarer Nähe der Manschettenrohre eine Verdrängung des Bodens aufgebracht. Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen vergrößert sich dieser Bereich kontinuierlich in horizontaler Richtung. Nach drei Durchgängen an Rohr 3 bzw. sechs Durchgängen an Rohr 1 und 2 kann entlang des Manschettenrohrs, pro Rohrseite, ein ca. 30 cm großer Injektionsbereich angesetzt werden.

C: aus (1) und (7) folgt:

Die durch die Injektionen erzeugte Verdrängung des Bodens verringert sich mit zunehmendem Abstand zum Manschettenrohr.

D: aus (8) und (9) folgt:

Es werden lediglich die hebungswirksamen, d.h. annähernd horizontal orientierten plattenartigen Injektionskörperstrukturen in den Finite-Elemente-Berechnungen berücksichtigt. Schmale, lange (vertikale) Auskragungen werden aufgrund der fehlenden Hebungswirkung nicht modelliert.

5 Numerische Berechnungen

5.1 Allgemeines

Basierend auf den Erkenntnissen der durchgeführten Großversuche wurde ein Modellierungskonzept für Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden zur Anwendung in FE-Berechnungen entwickelt. Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurde der FE-Code PLAXIS verwendet. In einem ersten Schritt erfolgte die Nachrechnung des 2. Großversuchs mit PLAXIS 2D (2019.00). Die Berechnungen basieren dabei auf der Annahme eines ebenen Verformungszustands. Aufgrund der begrenzten Versuchsabmessungen handelt es sich jedoch vielmehr um ein räumliches Randwertproblem. Um den Einfluss der räumlichen Hebungswirkung der Injektionen auf die Ergebnisse der 2D-FE-Berechnungen abschätzen zu können, wurden zusätzlich 3D-FE-Berechnungen mit dem Programm PLAXIS 3D (2018.01) durchgeführt.

Darauf aufbauend wurde anhand von weiteren 2D-FE-Berechnungen überprüft, inwiefern der entwickelte Modellierungsansatz auch auf eine reale Baumaßnahme angewendet werden kann. Als Referenz dienten hierzu die im Rahmen des Projekts Ortsumfahrung Oberau ausgeführten Hebungsinjektionen an einem Probefeld.

Im folgenden Kapitel 5.2 wird zunächst das entwickelte Modellierungskonzept für Hebungsinjektionen vorgestellt. Danach werden in Kapitel 5.3 die wesentlichen Merkmale und Parameter des verwendeten Stoffmodells zur Abbildung des Verformungsverhaltens des Bodens erläutert. In Kapitel 5.4 wird auf die Modellannahmen und durchgeführten FE-Berechnungen zur Nachrechnungen des 2. Großversuchs eingegangen. Es folgen die Projektbeschreibung zur Hebungsinjektionsmaßnahme am Probefeld Oberau und hierzu durchgeführten FE-Berechnungen (Kapitel 5.5). Abschließend werden in Kapitel 5.6 die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und in Kapitel 5.7 Empfehlungen zur Übertragung des Modellierungskonzepts auf andere Hebungsinjektionsmaßnahmen gegeben.

5.2 Modellierungskonzept für Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden

5.2.1 Anwendungsvoraussetzungen

Auf Grundlage der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen sollten folgende Anwendungsgrenzen des entwickelten Konzepts zur Modellierung von Hebungsinjektionen eingehalten werden:

- Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden
- Näherungsweise homogene Baugrundverhältnisse hinsichtlich der Korneigenschaften und der Lagerungsdichte
- Hydrostatische Grundwasserbedingungen und vernachlässigbare Änderungen des Porenwasserdrucks während der Injektion

- Keine Störung des Baugrunds durch Vorabmaßnahmen, wie z.B. Porenrauminjektion oder Vereisung.
- Es werden praxisübliche Suspensionsmischungen verwendet, die im Wesentlichen aus Wasser, Zement, Füller und Bentonit bestehen können.
- Die Injektion bewirkt ein lokales Aufreißen des Bodens. Die Suspension dringt nur unwesentlich in die Porenräume des Bodens ein. Die Vergrößerung der entstandenen Risse durch die fließende Suspension führt zur Anhebung.
- Die injizierte Suspensionsmenge beträgt ca. 5 bis 30 l pro Manschette.
- Die Verpressrate liegt zwischen 5 bis 20 l/min.

5.2.2 Modellierungskonzept

Die aus den Großversuchen abgeleiteten Schlussfolgerungen zur Modellierung von Hebungsinjektionen (vgl. Kapitel 4.5) wurden im Rahmen der FE-Berechnungen wie folgt umgesetzt:

- Es wird ein Schnitt quer zu den in situ verlaufenden Manschettenrohrachsen betrachtet.
- Die Modellierung der durch die Injektionskörperstrukturen entstehenden Hebungen erfolgt durch Kontinuumselemente, die im Boden eigebettet sind. Diese werden nachfolgend als Injektionselemente bezeichnet (siehe Abb. 5.1).
- Im Ausgangszustand (vor Beginn der Injektionen) entspricht das Materialverhalten der Injektionselemente dem des umliegenden Bodens (inaktive Injektionselemente).
- In den Berechnungsphasen der modellierten Hebungsinjektion wird für eine bestimmte Anzahl an Injektionselementen ein linear-elastisches Materialverhalten angesetzt und eine vertikale Dehnung vorgegeben (aktive Injektionselemente). Dabei wird in Abhängigkeit der Querdehnzahl und dem Verhältnis der Steifigkeit des aktiven Injektionselements zur Steifigkeit der umliegenden Elemente eine geringe horizontale Dehnung erzeugt.
- Die Anzahl an aktiven Injektionselementen entspricht in etwa der zu erwartenden horizontalen Ausdehnung (Risslänge) der in diesem Durchgang entstehenden plattenförmigen Injektionskörperstruktur.
- An dem zum aktiven Injektionselement angrenzenden inaktiven Injektionselement wird ebenfalls ein linear-elastisches Materialverhalten angesetzt[28].

[28] Damit konnte, aufgrund der in diesem Bereich auftretenden Zugspannungen, ein frühzeitiger Berechnungsabbruch verhindert werden.

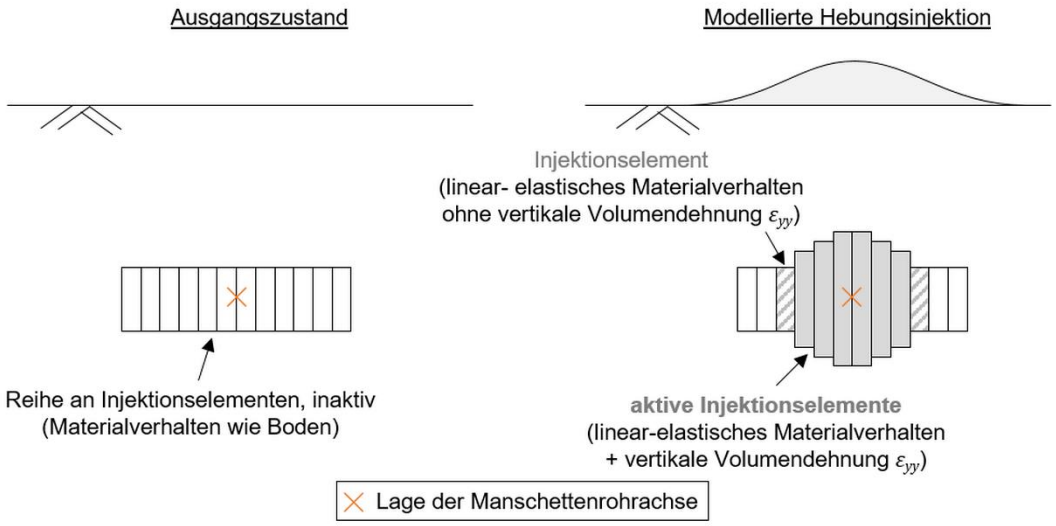


Abb. 5.1: Schema zur Modellierung der Hebungsinjektionen (Betrachtung quer zur Manschettenrohrachse)

- Zur Berechnung der Volumendehnung an den Injektionselementen wird wie folgt vorgegangen:
    1. An den Injektionselementen eine vertikale Dehnung vorgegeben, die näherungsweise zu den im Großversuche gemessenen Rissdicken von 0,5 bis 1 cm führt.
    2. Da die Injektionsrisse in den Großversuchen nahe dem Manschettenrohr tendenziell dicker waren als im Bereich der Rissspitze ($t \approx 0{,}4$ cm, siehe Kapitel 4.3.4.6), wird außerdem von einer linearen Verteilung der entstehenden Verformungen entlang der Injektionselemente ausgegangen. Damit reduziert sich die infolge der vertikalen Dehnung zu erzeugende Verformung von 0,5–1 cm im Bereich der Rohrachse bis auf 0,4 cm an dem Injektionselement an der Rissspitze.
    3. Falls in situ von keinem annähernd ebenen Verformungszustand ausgegangen werden kann (z.B. nur wenige Injektionen entlang der Rohrachse), wird der Anpassungsfaktor η_{2D} ermittelt. Der Anpassungsfaktor η_{2D} kann anhand von vereinfachten 3D-FE-Berechnungen (Hebungsinjektion an einem einzelnen Rohr) abgeschätzt werden (siehe Kapitel 5.4.3.3).
    4. In den FE-Berechnungen wird vereinfachend die vertikale Dehnung innerhalb einer Berechnungsphase über die gesamte modellierte „Risslänge“ aufgebracht („unmittelbare Rissbildung“). Hingegen vergrößern sich die Injektionsrisse in Realität erst allmählich während des Injektionsvorgangs („sukzessive Rissbildung“). Der Einfluss dieser Vereinfachung kann durch den Anpassungsfaktor η_{sukz} berücksichtigt werden.
       Der Anpassungsfaktor η_{sukz} kann aus Vergleichsberechnungen zwischen „sukzessiver“ und „unmittelbarer“ Aktivierung der Injektionselemente an einem Einzelrohr ermittelt werden (siehe Kapitel 5.4.3.4).

5. Die schlussendlich in den FE-Berechnungen anzusetzende vertikale Volumendehnung ε_{yy} an der Rohrachse und an der Rissspitze errechnet sich gemäß Gl. 5.1 bzw. Gl. 5.2. Die vertikale Dehnung an den dazwischenliegenden Injektionselementen ergibt sich durch lineare Interpolation.

$$\varepsilon_{yy,Rohrachse} = t \cdot \frac{\eta_{2D} \cdot \eta_{sukz}}{h_{IE}} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.1)}$$

$$\varepsilon_{yy,Rissspitze} = t_{Spitze} \cdot \frac{\eta_{2D} \cdot \eta_{sukz}}{h_{IE}} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.2)}$$

Mit:

ε_{yy}	*[%]*	Vertikale Dehnung am Injektionselement
t	*[cm]*	Dicke der Injektionsrisse je Injektion in situ
t_{Spitze}	*[cm]*	Dicke der Injektionsrisse im Bereich der Rissspitze in situ
η_{2D}	*[-]*	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung eines räumlich begrenzten Injektionsbereichs (siehe Kapitel 5.4.3.3)
η_{sukz}	*[-]*	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der vereinfacht modellierten Rissbildung (siehe Kapitel 5.4.3.4)
h_{IE}	*[cm]*	Höhe des Injektionselements

5.2.3 Ausgewertete Kenngrößen

Zur Bewertung der numerischen Berechnungen wurden die vertikalen Verformungen u_y an der Geländeoberfläche mit den Ergebnissen der Verformungsmessungen in situ verglichen.

Welches Injektionsvolumen in den FE-Berechnungen tatsächlich erzeugt wurde, konnte anhand der vertikalen Verformungen an der Ober- und Unterseite der aktiven Injektionselemente ermittelt werden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Anpassungsfaktoren η_{2D} und η_{sukz} im Zuge der Volumenermittlung zu berücksichtigen sind (Gl. 5.3).

$$V_{Inj,FEM} = \frac{|u_{y,IE_oben}| + |u_{y,IE_unten}|}{\eta_{2D} \cdot \overline{\eta}_{sukz}} \qquad \text{(Gl. 5.3)}$$

Mit:

$V_{Inj,FEM}$	*[m³/lfm]*	Injektionsvolumen der FE-Berechnung
u_{y,IE_oben}	*[m]*	Vertikale Verformung an der Oberkante der aktiven Injektionselemente
u_{y,IE_unten}	*[m]*	Vertikale Verformung an der Unterkante der aktiven Injektionselemente
$\overline{\eta}_{sukz}$	*[-]*	Mittelwert[29] der Anpassungsfaktoren η_{sukz} zur Berücksichtigung der vereinfacht modellierten Rissbildung (siehe Kapitel 5.4.3.4)

[29] Vereinfachend wird der Mittelwert verwendet, da η_{sukz} nicht zwingend konstant ist, sondern über die Injektionsdurchgänge hinweg variieren kann.

Das Verhältnis zwischen dem Injektionsvolumen der FE-Berechnungen und dem Injektionsvolumen in situ wird durch den Verhältnisfaktor η_V ausgedrückt (Gl. 5.4).

$$\eta_V = \frac{V_{Inj,FEM}}{V_{Inj,in\ situ}} \cdot 100 \qquad \text{(Gl. 5.4)}$$

Mit:

η_V	*[%]*	Verhältnisfaktor der Injektionsvolumina von „FEM“ zu „in situ“
$V_{Inj,in\ situ}$	*[m³/lfm]*	Injektionsvolumen in der baupraktischen Ausführung

Wie groß die infolge der Volumendehnung ε_{yy} entstehende vertikale Verformung am Injektionselement $u_{y,Phase}$ tatsächlich ist, hängt vom Verhältnis der Steifigkeiten zwischen den Injektionselementen und des umliegenden Bodens ab. Ohne Berücksichtigung der Steifigkeitsverhältnisse ergibt sich die Vertikalverformung am Injektionselement gemäß Gl. 5.5.

$$\Delta u_{y,i} = \varepsilon_{yy} \cdot h_{IE} \qquad \text{(Gl. 5.5)}$$

Mit:

$\Delta u_{y,i}$	*[cm]*	Vertikale Verformung am Injektionselement je Berechnungsphase

5.3 Verwendete Stoffmodelle

5.3.1 Allgemeine Hinweise

Die Nachrechnung der Hebungsinjektionen (2. Großversuche und Probefeld Oberau) erfolgte vereinfachend anhand von 2D-FE-Berechnungen. Um das Verformungsverhalten des Bodens mit Ent- und Wiederbelastungsvorgängen infolge der mehrmaligen Injektionen an unterschiedlichen Manschettenrohren möglichst realistisch abzubilden, wurde das hypoplastische Stoffmodell mit der Erweiterung um das Konzept der Intergranularen Dehnung (IGD) verwendet.

Neben den 2D-FE-Berechnungen wurden auch 3D-FE-Berechnungen durchgeführt. Anstatt der Ermittlung absoluter Verformungswerte, wie sie für die Nachrechnung Hebungsinjektionen relevant sind, dienten die 3D-FE-Berechnungen dazu, den Unterschied zwischen ebenen (2D-FE-Berechnungen) und räumlichen Verformungsberechnungen aufzuzeigen (siehe Kapitel 5.4.3.4). In den 3D-FE-Berechnungen wurden mehrere Injektionsdurchgänge an lediglich einem einzelnen Manschettenrohr betrachtet. Dadurch kommt es nur zu einer Belastung des Bodens. Die 3D-FE-Berechnungen wurden mit dem hypoplastischen Stoffmodell ohne IGD durchgeführt. In Versuchen Im Fall einer Berücksichtigung der zusätzlichen IGD-Stoffmodellparameter konnte keine Konvergenz in den modellierten Phasen der Hebungsinjektion erreicht werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte die Ursache hierfür nicht geklärt werden.

5.3.2 Das hypoplastische Stoffmodell

Zur Abbildung des Verformungsverhaltens des grobkörnigen Bodens wurde in den 2D-FE-Berechnungen das hypoplastische Stoffmodell (von Wolffersdorff, 1996) mit der Erweiterung um das Konzept der Intergranularen Dehnungen (IGD) verwendet (Niemunis und Herle, 1997). Zwar ist dieses Stoffmodell nicht standardmäßig in PLAXIS 2D (2019) enthalten, jedoch steht dessen Implementierung als benutzerdefiniertes Stoffmodell[30] zur Verfügung (Gudehus et al., 2008).

Dieses Stoffmodell wurde verwendet, da es wesentliche Merkmale des Verhaltens grobkörniger Böden, die für die Modellierung von Hebungsinjektionen eine wesentliche Rolle spielen, realistisch erfassen kann. Hierzu zählen unter anderem:

- Dichteänderung
- Pfadabhängigkeit (Deformationsgeschichte)
- Kompressions- und Dilatanzverhalten
- Grenz- und asymptotische Zustände des Scherwiderstands
- Zyklische Scherung und Kompression

Für das hypoplastische Stoffmodell (von Wolffersdorff, 1996) werden acht Stoffmodellparameter benötigt. Hinsichtlich detaillierter Informationen zu deren Bestimmung wird auf Herle und Gudehus (1999) verwiesen.

- Der kritische Reibungswinkel φ_c des Bodens kann bei kohäsionslosen Böden aus dem Schüttkegelversuch ermittelt werden. Wesentlichen Einfluss haben die Kornform und die Korngröße.
- Die Grenzporenzahlen e_{d0} (Porenzahl bei dichtester Lagerung), e_{c0} (Porenzahl im kritischen Zustand) und e_{i0} (Porenzahl bei lockerster isotroper Lagerung) sind Referenzwerte (bei einem mittleren Druck p_s = 0), die zur Ermittlung der zulässigen Porenzahl des Bodens erforderlich sind. Zusammen mit der Granularhärte h_s und dem Exponenten n wird gemäß der Gleichung von Bauer (1996) das Kompressionsverhalten des Bodens beschrieben (Gl. 5.6). In Abb. 5.2 ist der qualitative Verlauf der Grenzporenzahlen in Abhängigkeit des durch die Granularhärte h_s normierten mittleren Drucks p_s dargestellt.

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = exp\left[-\left(\frac{3p_s}{h_s}\right)^n\right] \qquad \text{(Gl. 5.6)}$$

[30] In PLAXIS: user defined soil model (udsm)

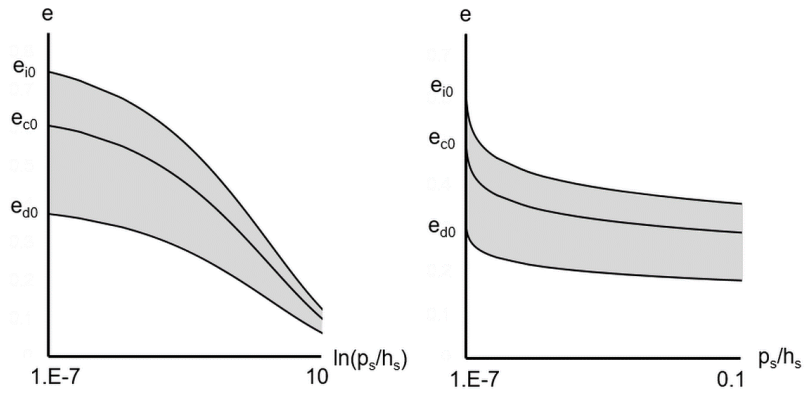


Abb. 5.2: Entwicklung der Grenzporenzahlen nach Gleichung von Bauer (1996)

Durch die Ermittlung der lockersten und dichtesten Lagerungsdichte des Bodens (vgl. Kapitel 2.1) können die Grenzporenzahl e_{d0}, e_{c0} und e_{i0} wie folgt abgeschätzt werden:

$$e_{d0} \approx e_{min} \quad \text{(Gl. 5.7)}$$

$$e_{c0} \approx e_{max} \quad \text{(Gl. 5.8)}$$

$$e_{i0} \approx 1{,}2 \cdot e_{max} \quad \text{(Gl. 5.9)}$$

Die Granularhärte h_s und der Exponent n können anhand des Kompressionspfads eines Ödometerversuchs ermittelt werden.

- Durch den Parameter α wird insbesondere der Einfluss der Dichte auf den Peakreibungswinkel bestimmt. Die Kalibrierung des Parameters α kann anhand eines drainierten triaxialen Scherversuchs einer dichten Probe erfolgen (Abb. 5.3-links). Bei einem kritischen Reibungswinkel zwischen 28° und 36° beträgt α ca. 0,1 – 0,3.
- Der Parameter β kontrolliert die Abhängigkeit der Bodensteifigkeit zur bezogenen Lagerungsdichte des Bodens. Erst nachdem alle übrigen Stoffmodellparameter ermittelt wurden, kann β beispielsweise durch die Anpassung an die Versuchsergebnisse eines triaxialen Scherversuchs bestimmt werden (Abb. 5.3-rechts).

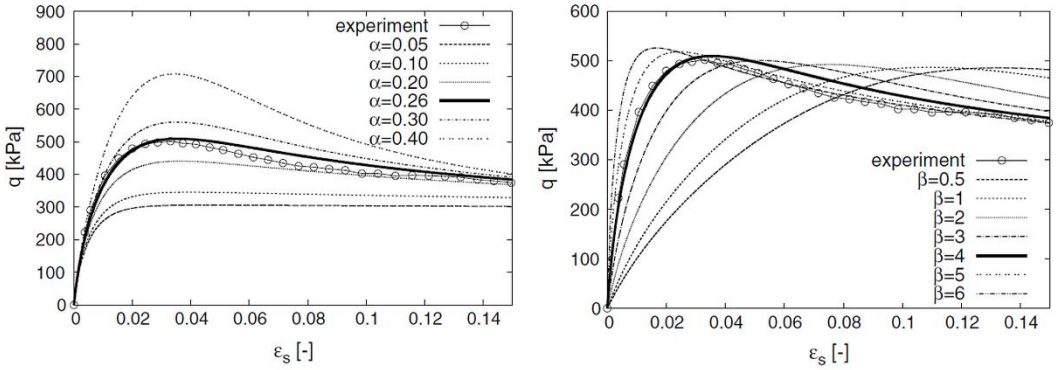


Abb. 5.3: Kalibrierung des Parameters α (links) und des Parameters β (rechts) anhand der Spannungs-Dehnungsverläufe eines triaxialen Scherversuchs (Mašín, 2019)

Im Zuge der Modellierung von Hebungsinjektionen ist zu berücksichtigen, dass der Boden aufgrund der wechselnden Injektionen an unterschiedlichen Injektionsstellen zahlreichen Be- und Entlastungsvorgängen ausgesetzt wird. Ohne die zusätzliche Berücksichtigung des Konzepts der Intergranularen Dehnung würden die ermittelten Deformationen überschätzt und ein zu „weiches" Bodenverhalten simuliert werden.

Mit Hilfe des Konzepts der Intergranularen Dehnung wird die höhere Steifigkeit des Bodens im Bereich sehr kleiner und kleiner Dehnungen realistischer berücksichtigt. Dadurch kann das Bodenverhalten unter zyklischer Belastung gegenüber der Hypoplastizität ohne IGD signifikant verbessert werden. Für die Anwendung des Konzepts der Intergranularen Dehnung sind zusätzlich fünf Stoffmodellparameter erforderlich.

- Der Parameter R definiert die Größe des elastischen Bereichs.
- m_R kontrolliert die Schubsteifigkeit im Bereich sehr kleiner Dehnungen bei Erstbelastung und dem Wechsel der Dehnungsrichtung um 180°.
- m_T kontrollieren die Schubsteifigkeit bei sehr kleinen Dehnungen infolge einer Richtungsänderung der Dehnungen um 90°.
- Durch den Parameter β_r wird die Entwicklungsrate des Intergranularen Dehnungstensors kontrolliert.
- Die Interpolation zwischen reversiblen elastischen und nichtlinearen Verformungen wird durch den Parameter χ gesteuert.

Hinsichtlich einer detaillierten Beschreibung der Hypoplastizität und dem Konzept der Intergranularen Dehnung wird auf Niemunis und Herle (1997) und Mašín (2019) verwiesen.

5.4 Finite-Elemente-Berechnungen zum 2. Großversuch

5.4.1 Modellgeometrie

Zur Nachrechnung des 2. Großversuchs wurde das in Abb. 5.4 dargestellte FE-Modell erstellt.

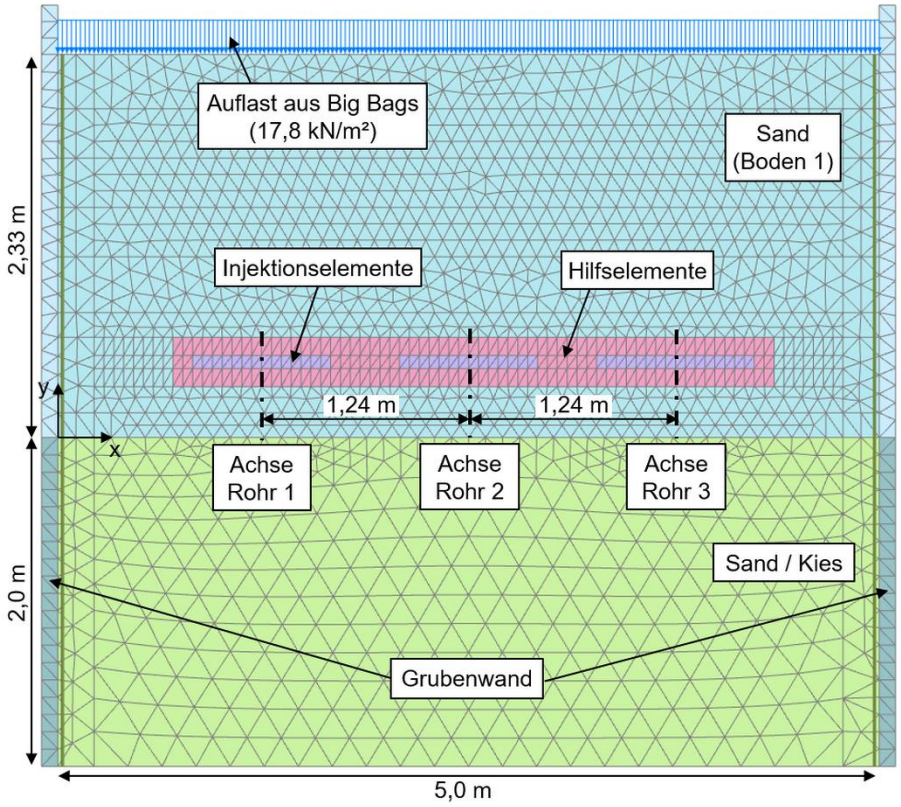


Abb. 5.4: 2D-FE-Modell zum 2. Großversuch

Das für die Berechnungen verwendete Modell (ebener Verformungszustand) besteht aus insgesamt 3.748 Elementen (15-knotige Dreieckselemente) und 31.005 Knoten. Die Abmessungen entsprechen dem 2. Großversuch. Als repräsentativer Berechnungsquerschnitt wird der Schnitt quer zu den Rohrachsen in der Mitte des Versuchsfelds gewählt. Die Auflast der Big Bags wird durch eine Flächenlast von 17,8 kN/m² an der Geländeoberfläche berücksichtigt. Der untere und die seitlichen Modellränder sind horizontal und vertikal unverschieblich. Der Bodenbereich wird an der linken und rechten Modellseite durch die Wände der Versuchsgrube begrenzt. Um Relativverschiebungen zwischen Boden und den Wandbereichen zu ermöglichen, wurden Interface-Elemente verwendet.

Zur Modellierung der Injektionselemente wurde bereichsweise ein strukturiertes Netz erstellt (Abb. 5.4 bzw. Abb. 5.5). Ein Injektionselement setzt sich aus zwei Dreieckselementen zusammen. Die an die Injektionselemente angrenzenden Elemente wurden ebenfalls in Form eines strukturierten Netzes angeordnet. Um die ansonsten auftretende Konvergenzprobleme infolge mehrerer Injektionsdurchgänge zu vermeiden, wurde an den Injektionselementen und teilweise an den angrenzenden Elementen ein linear-elastisches Materialverhalten angesetzt. Aufgrund der Entlastung des Bodens im Bereich zwischen den aktiven Injektionselementen, traten in diesem Bereich an einzelnen Spannungspunkten Zugspannungen auf, die zum Berechnungsabbruch führten. Indem ab der entsprechenden Berechnungsphase das

Verformungsverhalten des Bodens mit einem linear-elastischen Materialverhalten modelliert wurde (Hilfselemente), konnten die Berechnungen fortgeführt werden.

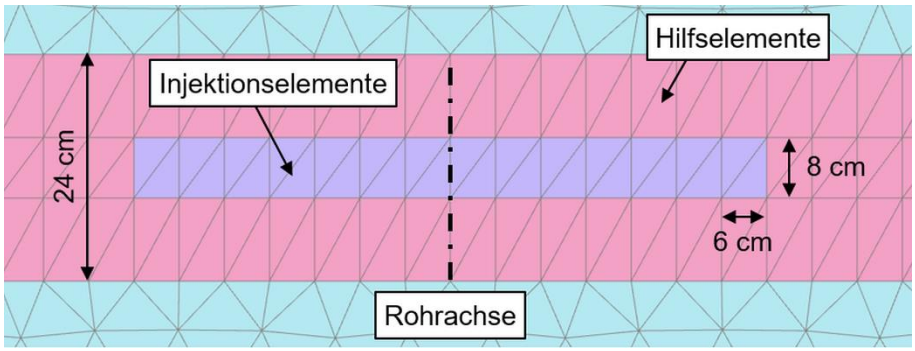


Abb. 5.5: Injektions- und Hilfselemente

5.4.2 Materialparameter

Der Sand (= Boden 1 vgl. Kapitel 2.1) in der oberen Modellhälfte wurde im Rahmen des 2. Großversuchs neu in der Versuchsgrube eingebaut. Für diesen Boden wurde der kritische Reibungswinkel φ_c aus Schüttkegelversuchen ermittelt. Die Grenzporenzahlen e_{d0}, e_{c0} und e_{i0} wurden anhand Gl. 5.5 bis Gl. 5.7 bestimmt. Für α und β wurden in erster Näherung Werte innerhalb der üblichen Bandbreite angesetzt. Die Parameter h_s und n wurde anhand der Kompressionskurve eines Ödometerversuchs bestimmt (Anhang A.4.1).

Für den bereits in der Versuchsgrube vorhanden Boden (Sand/ Kies) lagen keine Ergebnisse aus Laborversuchen vor, um die erforderlichen Parameter für das hypoplastische Stoffmodell ermitteln zu können. Zur Modellierung des Verformungsverhaltens dieser Bodenschicht wurde deshalb vereinfachend auf die Parameter für Hochstetten Kies zurückgegriffen.

In Tabelle 5.1 sind die beiden verwendeten Parametersätze des hypoplastischen Stoffmodells dargestellt.

Tabelle 5.1: Hypoplastische Stoffmodellparameter

Boden	φ_c **[°]**	h_s **[MPa]**	n	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β
Sand (Boden 1)	33,5	100	0,4	0.34	0.674	0.815	0.25	2
Sand/ Kies*	36	32000	0,18	0,26	0,45	0,5	0,1	1,9

*Parameter für Hochstetten Kies (Herle und Gudehus 1999)

Zur Berücksichtigung des Konzepts der Intergranularen Dehnung werden fünf weitere Stoffmodellparameter benötigt. Deren Bestimmung ist allerdings sehr aufwändig und es werden spezielle Laborversuche benötigt. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde deshalb ein Parametersatz des Karlsruher Sands (Rebstock, 2011) verwendet (Tabelle 5.2).

Auch wenn diese Parameter nicht auf den hier verwendeten Boden abgestimmt sind, wird das Verformungsverhalten des Bodens deutlich realistischer abgebildet, als wenn auf das Konzept der Intergranularen Dehnung gänzlich verzichtet wird.

Tabelle 5.2: Parameter der Intergranularen Dehnung

m_R	m_T	R_{max}	β_r	χ
5,0	2,0	1E-4	0,1	1,0

Für die Injektions- und Hilfselemente wurde ein linear elastisches Materialverhalten angesetzt. Im Rahmen der durchgeführten Berechnungen wurden die in Tabelle 5.3 dargestellten Parameter verwendet.

Tabelle 5.3: Parameter der Injektions- und Hilfselemente

Variante	E (E_s) **[MN/m²]**	ν **[-]**
A	29,7 (33)	0,2
B	89,1 (99)	

Durch den Parametersatz A sollte vereinfachend die Steifigkeit des Sandbodens bei Erstbelastung abgebildet werden. Die Steifigkeit wurde auf Basis den Ergebnissen des im Labor durchgeführten Ödometerversuchs für eine Spannung zwischen ca. 10 kPa und σ_{max} = 800 kPa. Der Parametersatz B wurde näherungsweise entsprechend der Steifigkeit des Bodens bei Ent- und Wiederbelastung (3-facher Wert des Steifemoduls von Variante A) gewählt.

5.4.3 Modellierung der Hebungsinjektion

5.4.3.1 Allgemeine Hinweise

Bezüglich des grundsätzlichen Vorgehens zur Modellierung der Hebungsinjektionen wird auf die Ausführungen in Kapitel 5.2 verwiesen. Nachfolgend werden die spezifisch getroffenen Annahmen für die Nachrechnung des 2. Großversuchs erläutert.

5.4.3.2 Erforderliche Anzahl aktiver Injektionselemente

Die Anzahl aktiver Injektionselemente orientiert sich an der im jeweiligen Durchgang erreichten Ausdehnung der plattenförmigen Injektionskörperstrukturen des 2. Großversuchs. Diese Injektionskörperstrukturen erreichten im dritten Injektionsdurchgang am Rohr 3[31] bzw. im sechsten oder siebten Injektionsdurchgang am Rohr 2[32] eine Ausdehnung von jeweils ca. 30 cm

[31] Injektionsvolumen: 20 l pro Manschette
[32] Injektionsvolumen: 10 l pro Manschette

links und rechts der Manschettenrohrachse (siehe Kapitel 4.5, Punkt B). Darauf basierend und aufgrund der Erkenntnis, dass die Größe der Plattenstrukturen mit steigender Anzahl an Injektionsdurchgängen zunimmt, wurde die Anzahl an aktiven Injektionselementen für die übrigen Injektionsdurchgänge festgelegt. Eine Übersicht der in den jeweiligen Injektionsdurchgängen angesetzten Anzahl an aktiven Injektionselementen ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Aktive Injektionselemente

Rohr 1 und 2							
Durchgang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Anzahl aktiver Injektionselemente pro Rohrseite [-]	1	1	2	3	4	5	6
Länge d. Injektionselemente pro Rohrseite [m]	0.06	0.06	0.12	0.18	0.24	**0.30**	0.36
Rohr 3							
Durchgang	**1**		**3**		**5**		7
Anzahl aktiver Injektionselemente pro Rohrseite [-]	1		3		5		7
Länge d. Injektionselemente pro Rohrseite [m]	0.06		0.18		**0.30**		0.42

Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen wurde der Bereich der aktiven Injektionselemente vergrößert. An den Rohren 1 und 2 um jeweils ein weiteres aktives Injektionselement. An Rohr 3, aufgrund der doppelten Injektionsmengen pro Manschette, um jeweils zwei weitere aktive Injektionselemente.

5.4.3.3 Ermittlung des Anpassungsfaktors η_{2D}

Die 2D-FE-Berechnungen erfolgen unter dem Ansatz eines ebenen Verformungszustands. Damit wird in der Berechnung von einem linienförmigen, unendlich langen Injektionsbereich ausgegangen. Aufgrund der in Realität begrenzten Versuchsabmessungen und punktuellen Injektionsaustritte stellen die Hebungsinjektionen des 2. Großversuchs jedoch vielmehr ein räumliches Randwertproblem dar. Folglich ist davon auszugehen, dass mit den 2D-FE-Berechnungen die Oberflächenhebungen gegenüber den Ergebnissen der Verformungsmessung überschätzt werden. Um diesen Umstand in den 2D-FE-Berechnungen zu berücksichtigen, werden die Volumendehnungen an den Injektionselementen um den Anpassungsfaktor η_{2D} reduziert.

Die Größe des Anpassungsfaktors η_{2D} wurde mit Hilfe von 3D-FE-Berechnungen abgeschätzt. Hierzu wurden die resultierenden Oberflächenhebungen im Falle eines „unendlich“ langen Injektionsstrangs sowie eines räumlich begrenzten Injektionsbereichs ermittelt. Unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen wurde die Injektion an einem einzelnen Rohr (mittleres Rohr 2) untersucht. Die Modellabmessungen entsprechen denen des 2. Großversuchs bzw. denen des 2D-FE-Modells (siehe Kapitel 5.4.1). In Abb. 5.6 ist das verwendete 3D-FE-Modell dargestellt

(39.659 Elemente, 59.240 Knoten). Durch eine entsprechende Aktivierung der modellierten Grubenwände, Injektionselemente und Randbedingungen konnte die jeweils zu untersuchende Modellvariante simuliert werden.

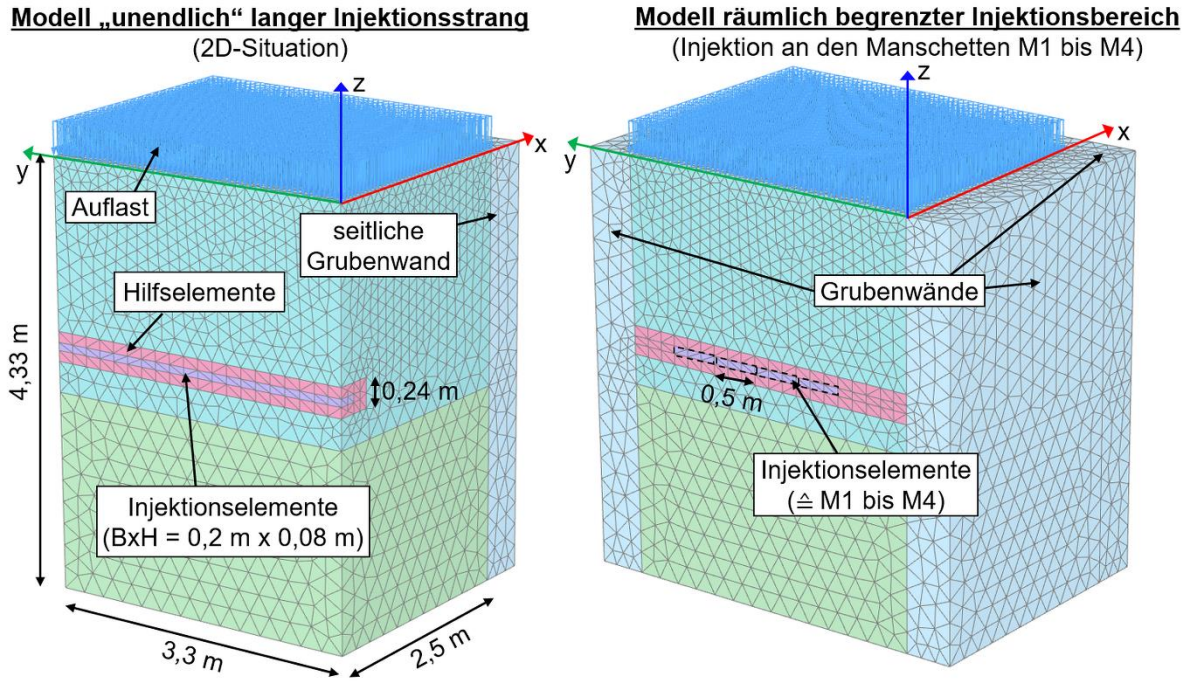


Abb. 5.6: 3D-FE-Modelle zur Ermittlung von η_{2D}

Insgesamt wurden sieben Injektionsdurchgänge modelliert. Pro Injektionsdurchgang wurde an den Injektionselementen eine vertikale Dehnung von ε_{yy} = 9% aufgebracht.

Zur Modellierung eines „unendlich“ langen Injektionsstrangs (IK_{∞}) wurden die Injektionselemente über die gesamte Modelllänge angeordnet. Die Modellränder an der Vorder- und Rückseite sowie in der Symmetrieebene wurden als horizontal unverschieblich angesetzt. Im Gegensatz dazu wurden für den Fall eines räumlich begrenzten Injektionsbereichs auch die Grubenwände an der Vorder- und Rückseite des Modells mitberücksichtigt. Gemäß des 2. Großversuchs wurde zwischen den Injektionspunkten ein durchgehender Injektionskörperbereich angesetzt. Hierzu wurde an den vier Injektionspunkten je ein Injektionselement mit einer Länge von 0,5 m angeordnet ($IK_{0,5}$).

Der Anpassungsfaktor η_{2D} ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der maximalen Vertikalverformung $u_{z,max}$ an der Geländeoberkante (GOK) im Falle des räumlich begrenzten Injektionsbereichs und dem Fall eines „unendlich“ langen Injektionsstrangs (Gl. 5.10).

$$\eta_{2D} = \frac{u_{z,max,IK_l}}{u_{z,max,IK_\infty}} \qquad \text{(Gl. 5.10)}$$

Mit:

η_{2D}	-	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der räumlich begrenzten Versuchsanordnung
u_{z,max,IK_l}	*mm*	Maximale Vertikalverformung an GOK im Fall eines räumlich begrenzten Injektionsbereichs mit Injektionselementen der Länge l [m]
u_{z,max,IK_∞}	*mm*	Maximale Vertikalverformung an GOK im Fall eines „unendlich“ langen Injektionsstrangs

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Anpassungsfaktor η_{2D} um keinen konstanten Wert handelt. Der Anpassungsfaktor η_{2D} variiert unter anderem je nach Abstand der Injektionspunkte zueinander, Größe der Injektionselemente und Tiefe der Injektionspunkte unter GOK. In den hier durchgeführten Berechnungen zum 2. Großversuch wurden diese Randbedingungen entsprechend der Gegebenheiten in situ berücksichtigt.

In Abb. 5.7 sind die Vertikalverformungen an der Geländeoberfläche für die beiden untersuchten Varianten dargestellt. Während für die 2D-Situation entlang der Rohrachse eine konstante Hebung erreicht wird, bilden sich im Falle eines räumlich begrenzten Injektionskörperbereichs die Hebungen sehr lokal in der Mitte des Manschettenrohrs aus. Der Anpassungsfaktor ergibt sich zu η_{2D} = 0,52.

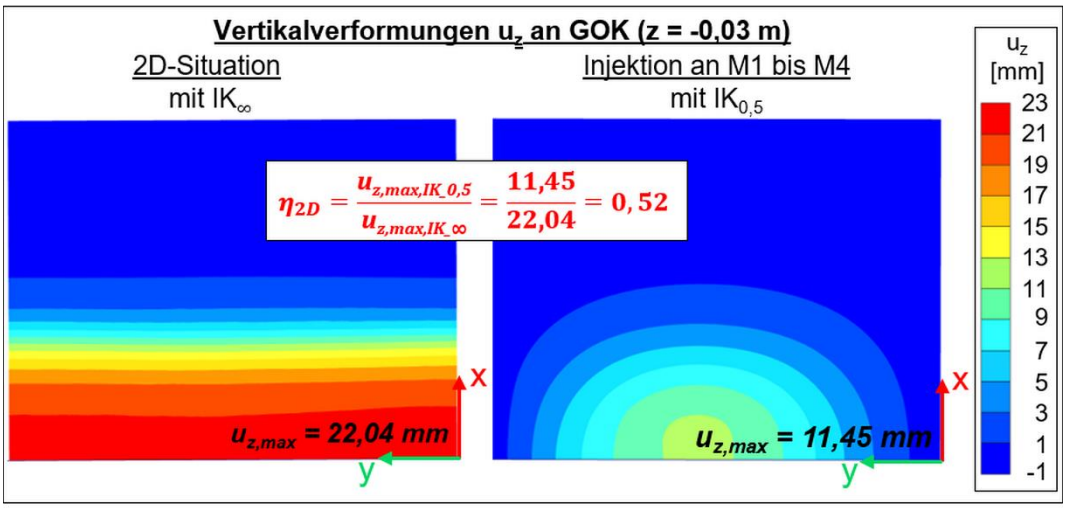


Abb. 5.7: Kontur der Vertikalverformungen der 3D-FE-Berechnungen (Draufsicht)

5.4.3.4 Ermittlung des Anpassungsfaktors η_{sukz}

In Realität wachsen die Injektionsrisse bei jedem Injektionsdurchgang sukzessive an. Damit vergrößert sich der Bereich, an dem eine Verformung des Bodens erzeugt wird, kontinuierlich während des Injektionsvorgangs. Im Gegensatz dazu werden in der FE-Berechnung die

einzelnen Phasen (vgl. Abb. 5.8) eines Injektionsdurchgangs nicht abgebildet. Die volumetrische Dehnung wird auf einmal durch gleichzeitiges Ausdehnen von mehreren Injektionselementen aufgebracht (= aktive Injektionselemente).

Anhand von Vergleichsberechnungen wurde der Einfluss der Modellierungsansätze „unmittelbare“ und „schrittweise“ Vergrößerung des Injektionsrisses untersucht. In Abb. 5.8 ist das Prinzip dieser beiden Modellierungsvarianten dargestellt. Die schrittweise Rissbildung wird als realitätsnäher angesehen.

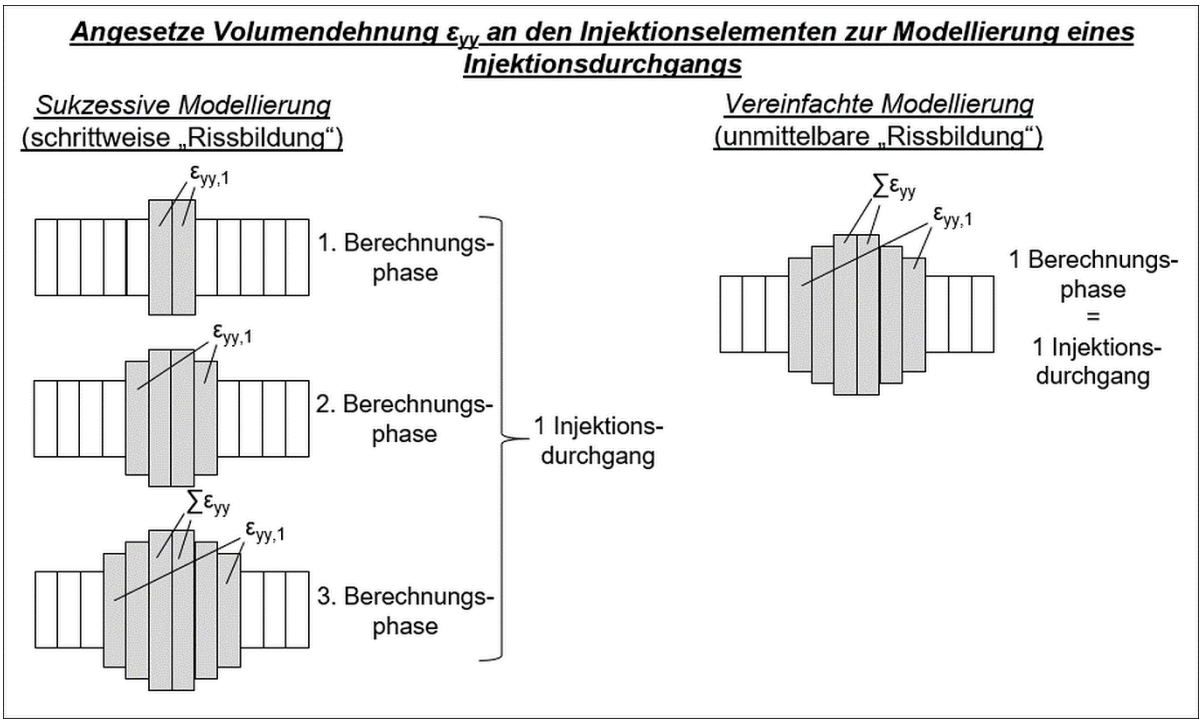


Abb. 5.8: Sukzessive und vereinfachte Modellierung der „Rissbildung“

Für diese Vergleichsberechnungen wurde das FE-Modell zur Nachrechnung des 2. Großversuchs verwendet (Kapitel 5.4.1). Lediglich die Breite der einzelnen Injektionselemente wurde von 6 cm auf 2 cm verkleinert. Aufgrund der ansonsten sehr großen Anzahl an erforderlichen Berechnungsphasen wurden die Injektionen exemplarisch nur an einem Rohr (Rohr 2) modelliert. In den Berechnungen wurden insgesamt sieben Injektionsdurchgänge berücksichtigt und jeweils die resultierenden Verformungen an der Geländeoberfläche ausgewertet. Zur Modellierung der sukzessiven Vergrößerung des Injektionsrisses innerhalb eines Injektionsdurchgangs, wurde die Anzahl an aktiven Injektionselementen mit jeder Berechnungsphase um ein weiteres aktives Injektionselement erhöht. Eine Übersicht der in den jeweiligen Injektionsdurchgängen aktiven Injektionselemente ist in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Aktive Injektionselemente je Injektionsdurchgang je Rohrseite

Injektionsdurchgang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Gesamte „Risslänge“ [cm]	6	6	12	18	24	30	36
Sukzessive Modellierung (schrittweise „Rissbildung“)							
Aktive Injektionselemente	1-3	1-3	1-6	1-9	1-12	1-15	1-18
Vereinfachte Modellierung (unmittelbare „Rissbildung“)							
Aktive Injektionselemente	3	3	6	9	12	15	18

In Abb. 5.9 sind die resultierenden Vertikalverformungen an der Geländeoberfläche für den Fall einer sukzessiven Modellierung und einer vereinfachten Modellierung mit und ohne Berücksichtigung des Anpassungsfaktor η_{sukz} dargestellt.

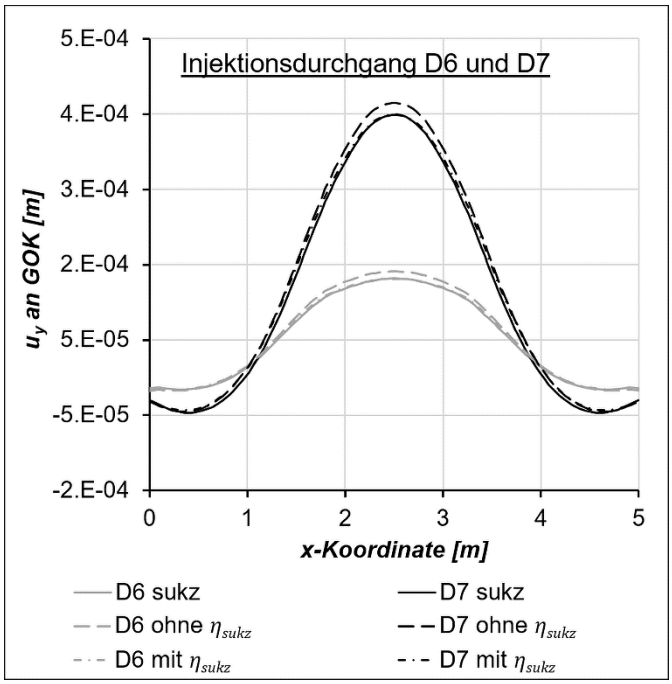


Abb. 5.9: Vertikalverformungen bei sukzessiver „Rissbildung“ und unmittelbarer „Rissbildung“ mit und ohne Berücksichtigung des Anpassungsfaktors η_{sukz}

Durch die in den FE-Berechnungen getroffene Vereinfachung einer unmittelbaren „Rissbildung“ ohne die Berücksichtigung des Anpassungsfaktors η_{sukz} werden die Vertikalverformungen an der Geländeoberfläche gegenüber der sukzessiven Modellierungsvariante nur minimal überschätzt. Bereits durch die Berücksichtigung eines Anpassungsfaktors im 1. Injektionsdurchgang (Tabelle 5.6), ergibt sich ein nahezu deckungsgleicher Verlauf der Vertikalverformungen (Abb. 5.9).

Tabelle 5.6: Gewählter Anpassungsfaktor η_{sukz}

Injektionsdurchgang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Anpassungsfaktor η_{sukz} [-]	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Für die Nachrechnung des 2. Großversuchs wurde vereinfachend für alle Injektionsdurchgänge von einem konstanten Anpassungsfaktor von η_{sukz} = 1,0 ausgegangen.

5.4.3.5 Vertikale Volumendehnung der Injektionselemente

In Tabelle 5.7 sind die vertikale Dehnung der Injektionselemente und die für dessen Ermittlung erforderlichen Parameter dargestellt. Die vertikale Dehnung wurde für verschiedene Rissdicken (siehe Kapitel 5.2.2) gemäß Gl. 5.1 bzw. Gl. 5.2 ermittelt.

Tabelle 5.7: Eingangsgrößen und daraus ermittelte vertikale Volumendehnung der Injektionselemente

Rissdicke	**Anpassungsfaktor „2D-Modell“**	**Anpassungsfaktor „sukzessive Rissbildung“**	**Höhe der Injektions-elemente**	**vertikale Dehnung am Injektions-element**
$t_{Rohrachse}$ $(t_{Rissspitze})$	η_{2D}	η_{sukz}	h_{IE}	$\varepsilon_{yy,Rohrachse}$ $(\varepsilon_{yy,Rissspitze})$
[cm]	[-]	[-]	[cm]	[%]
0,5 (0,4)	0,5	1,0	8,0	3,125 (2,5)
0,8 (0,4)				5,0 (2,5)

5.4.4 Berechnungsablauf

Zur Ermittlung des Primärspannungszustands werden die Vertikalspannungen tiefenabhängig aus dem Bodeneigengewicht berechnet. Die Horizontalspannungen ergeben sich durch Multiplikation mit dem Seitendruckbeiwert K_0. Da der Sandboden in den Großversuchen lagenweise eingebaut und verdichtet wurde, wird K_0 = 1,0 angesetzt. Für die untere Bodenschicht die bereits in der Versuchsgrube vorhanden war (Sand/Kies) wird von normalkonsolidierten Bodenverhältnissen ausgegangen ($K_0 = 1\text{-}\sin\varphi'$).

Gemäß den Empfehlungen zur Anwendung des hypoplastischen Stoffmodells in PLAXIS (Mašín, 2017) wurde in den Einstellungen zu den numerischen Kontrollparametern[33] der Berechnungsphasen die Funktion „*Arc-length control*“ (PLAXIS, 2019) deaktiviert. Außerdem wurde in den modellierten Injektionsphasen, aufgrund der im Bereich der Injektionselemente lokalen Deformationen, die Option „*updated mesh*“[34] aktiviert. Damit werden die Verformungen in der jeweiligen Phase nicht wie konventionell am unverformten, sondern am verformten FE-Netz ermittelt.

[33] „edit phase“ →“numerical control parameters“ → “Arc-length control type”
[34] Zur kinematischen Formulierung der Verschiebungen wird auf das verformte FE-Netz zurückgegriffen. Das hierzu in PLAXIS implementierte Verfahren basiert auf der *Updated Lagrangeschen Betrachtungsweise* (PLAXIS, 2019).

Im Rahmen der Vergleichsberechnungen zum 2. Großversuch wurden die Injektionen bis einschließlich des 7. Injektionsdurchgangs berücksichtigt. Bis zu diesem Durchgang können die ermittelten Hebungen mit den Verformungsmessungen des hydrostatischen Linienvermessungssystems verglichen werden. Da die darauffolgenden Injektionsdurchgänge in deutlich kürzeren Zeitabständen ausgeführt wurden, liegen erst wieder nach Abschluss des 11. Injektionsdurchgangs Ergebnisse aus der hydrostatischen Linienvermessung vor. Ab dem 10. Injektionsdurchgang sind jedoch vermehrt Kurzschlüsse zwischen den Manschetten eines Rohrs aufgetreten. Die Ergebnisse der 2D-Berechnungen können damit nur sehr bedingt mit den ab diesem Zeitpunkt gemessenen Hebungen verglichen werden.

Eine Übersicht der modellierten Berechnungsphasen ist in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Berechnungsphasen

Phase	**Name / Beschreibung**	
0	Initial Phase / Ermittlung des Primärspannungszustands	
1	Grubenwände aktivieren	
2	1. Lage Big Bags	
3	2. Lage Big Bags	
4	1. Durchgang	Injektion am Rohr 1
5		Injektion am Rohr 2
6		Injektion am Rohr 3
7	2. Durchgang	Injektion am Rohr 1
8		Injektion am Rohr 2
9	3. Durchgang	Injektion am Rohr 1
10		Injektion am Rohr 2
11		Injektion am Rohr 3
12	4. Durchgang	Injektion am Rohr 1
13		Injektion am Rohr 2
14	5. Durchgang	Injektion am Rohr 1
15		Injektion am Rohr 2
16		Injektion am Rohr 3
17	6. Durchgang	Injektion am Rohr 1
18		Injektion am Rohr 2
19	7. Durchgang	Injektion am Rohr 1
20		Injektion am Rohr 2
21		Injektion am Rohr 3

In Abb. 5.10 sind die effektiven Vertikal- und Horizontalspannungen für den Primärspannungszustand (Phase 0) dargestellt.

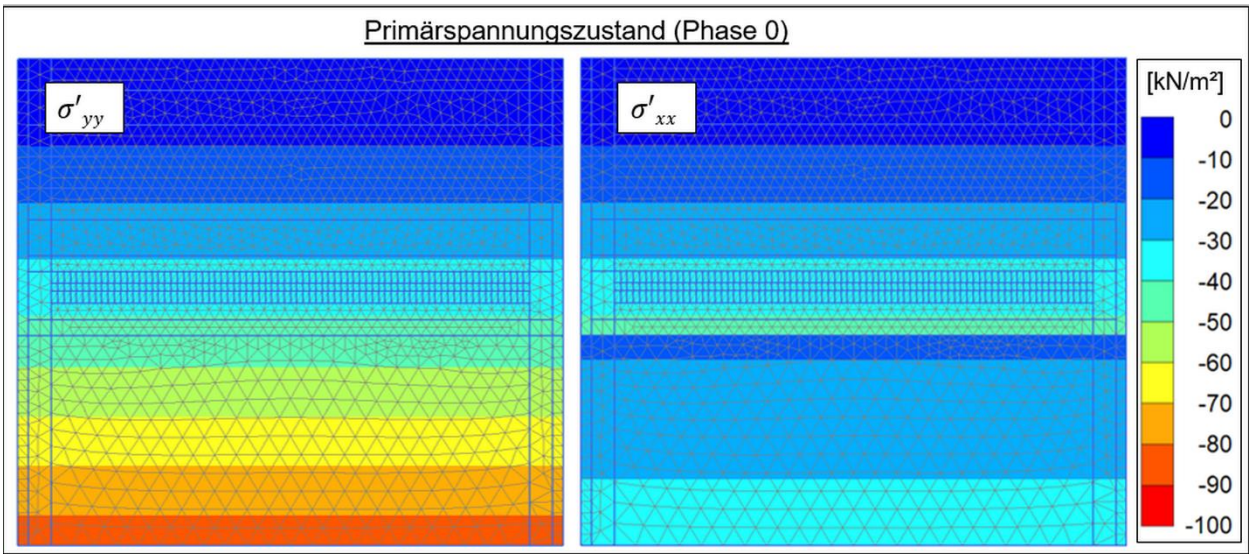


Abb. 5.10: Effektive Vertikal- und Horizontalspannungen

5.4.5 Durchgeführte Berechnungen

Für die Nachrechnung des 2. Großversuchs wurde der Einfluss verschiedener Modellannahmen auf die erreichten Hebungen untersucht (Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Übersicht der durchgeführten Berechnungsvarianten

Variante	Rissdicke t	Steifemodul E_S der Hilfselemente	Stoffmodellparameter der unteren Bodenschicht (Sand / Kies)	Netzfeinheit (Anzahl der Elemente / Knoten)
1	0,8 cm	*17 MN/m²	Hochstetten Kies	mittel (3.748 / 31.005)
2	**0,5 cm**	33 MN/m²	Hochstetten Kies	mittel (3.748 / 31.005)
3	**0,5 cm**	**99 MN/m²**	Hochstetten Kies	mittel (3.748 / 31.005)
4	**0,5 cm**	33 MN/m²	**Sand (Boden 1)**	mittel (3.748 / 31.005)
5	**0,5 cm**	33 MN/m²	Hochstetten Kies	**sehr fein (13.289 / 108.419)**
* Aufgrund von Konvergenzproblemen in der letzten Berechnungsphase, konnten diese Berechnungsvariante anstatt mit E_S=33 MN/m² nur mit einer geringeren Steifigkeit (E_S =17 MN/m²) durchgeführt werden.				

Gemäß dem in Kapitel 5.2 vorgestellten Modellierungskonzept für Hebungsinjektionen erfolgt die Ermittlung der Volumendehnung an den Injektionselementen auf Basis der im Großversuch entstandenen Dicke der Injektionsrisse (t = 0,5–1 cm). In der Berechnungsvariante 1 wurde als Eingangsgröße von einer Rissdicke t = 0,8 cm ausgegangen. Die ermittelten Hebungen lagen jedoch deutlich über den Ergebnissen der Verformungsmessungen. Daher wurde auf eine zusätzliche Berechnungsvariante mit einer Rissdicke t = 1 cm verzichtet. Eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Verformungsmessungen konnte in der Berechnungsvariante 2, mit der Rissdicke t = 0,5 cm, erreicht werden. Folglich wurde diese Annahme auch für die nachfolgenden

Berechnungen beibehalten. In weiteren Berechnungsvarianten wurde die Steifigkeit der Hilfselemente, die verwendeten Parameter zur Abbildung des Verformungsverhaltens der unteren Bodenschicht sowie die Netzfeinheit variiert.

5.4.6 Auswertung der Berechnungsergebnisse

In Abb. 5.11 sind die Vertikal- und Horizontalspannungen σ'_{yy} bzw. σ'_{xx} vor Injektionsbeginn (= Ende Lastaufbringung) und nach Abschluss der modellierten Hebungsinjektion (Ende 7. Durchgang) für die Berechnungsvariante 2 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für beide Berechnungsphasen die gleiche Skalierung verwendet. Im Bereich der Injektionselemente treten infolge der Injektionen jedoch deutlich größere Spannungen auf. Eine Darstellung des gesamten Spannungsbereichs im Umfeld der Injektionselemente nach dem 7. Injektionsdurchgang zeigt Abb. 5.12.

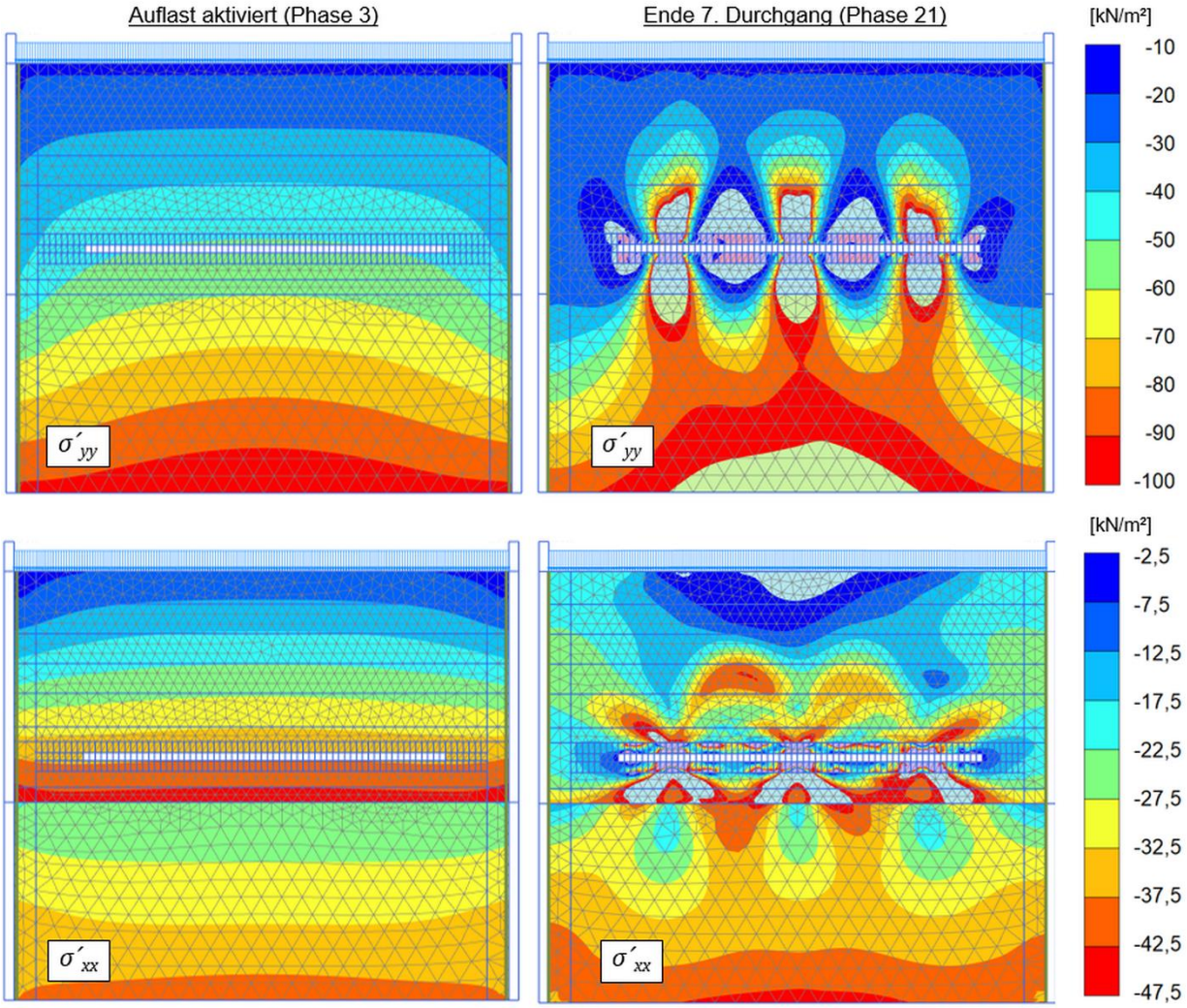


Abb. 5.11: Vertikalspannungen σ'_{yy} (oben) und Horizontalspannungen σ'_{xx} (unten)

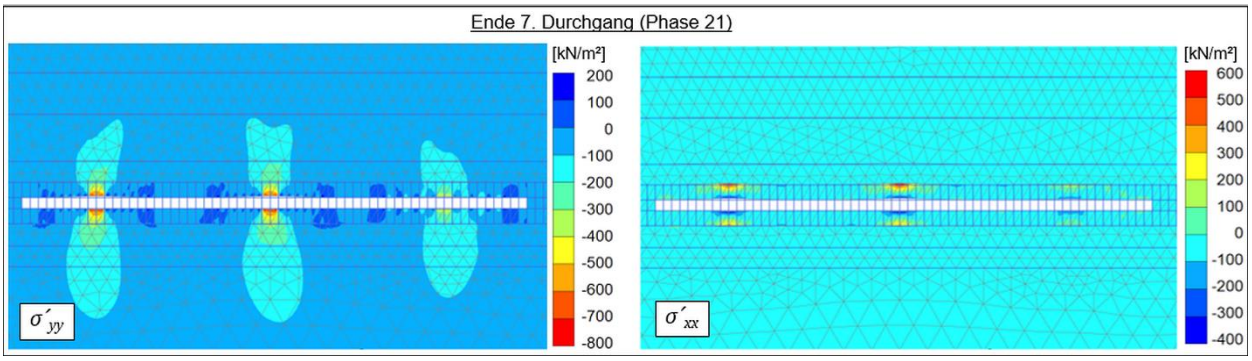


Abb. 5.12: Vertikal- und Horizontalspannungen im Injektionsbereich

Nach Aktivierung der Auflast treten entlang der Baugrubenwände Schubspannungen auf. Dadurch ergeben sich in diesem Bereich etwas geringere Horizontal- und Vertikalspannungen als in Grubenmitte (Siloeffekt). Im Injektionsbereich kann jedoch von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung ausgegangen werden.

Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen wird der Boden im Bereich über den aktiven Injektionselementen angehoben und die Vertikalspannungen erhöhen sich deutlich. Außerdem entsteht eine Gewölbewirkung zwischen den aktiven Injektionselementen (Abb. 5.13). Hingegen nehmen in den dazwischenliegenden Bereichen, in denen kaum Hebungen auftreten, die Spannungen ab. Der Boden wird in diesem Bereich entlastet und die Vertikalspannungen ergeben sich lediglich aus dem Bodeneigengewicht im Bereich unterhalb des Gewölbes.

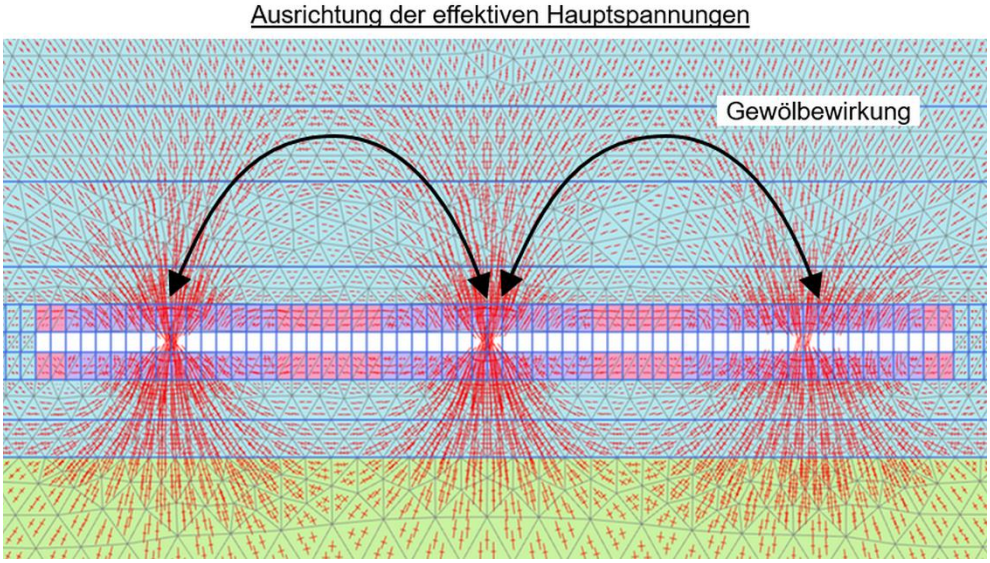


Abb. 5.13: Gewölbewirkung Hauptspannungen

In Abb. 5.14 sind die gemessenen und berechneten Hebungen an der Geländeoberfläche für die untersuchten Berechnungsvarianten (vgl. Tabelle 5.9) dargestellt.

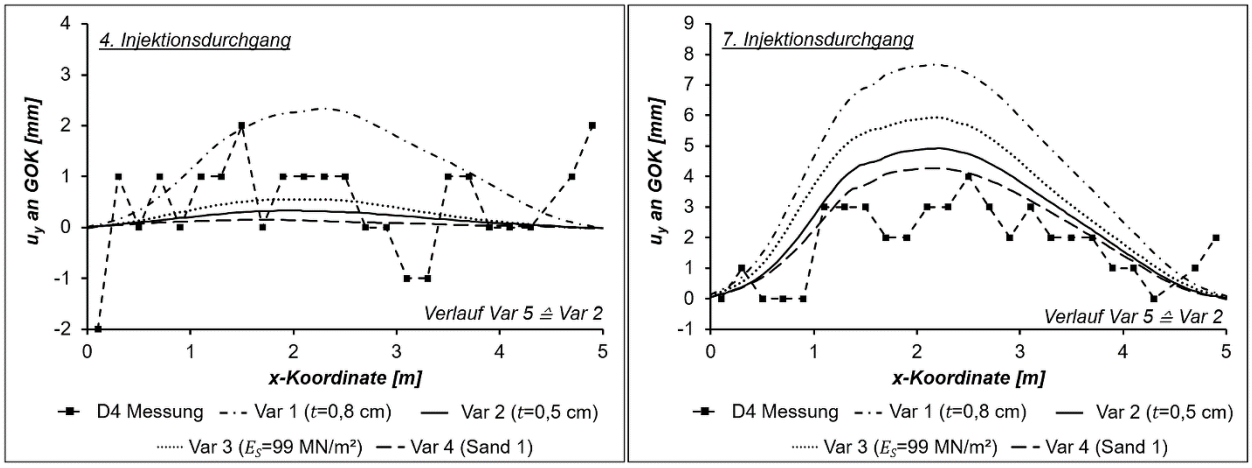


Abb. 5.14: Verformungsmessungen und Ergebnisse der FE-Berechnungen

Auch wenn die nach 4 Injektionsdurchgängen aufgetretenen Hebungen insgesamt noch relativ gering sind (Abb. 5.14-links), so zeigt sich, dass die verschiedenen Berechnungsvarianten größtenteils innerhalb der Bandbreite der Verformungsmessungen liegen. Inwiefern am Rand der Versuchsgrube tatsächlich Verformungen von bis zu 2 mm aufgetreten sind konnte auch durch den Vergleich mit benachbarten Messpunkten und anderen Injektionsdurchgängen nicht abschließend geklärt werden.

In Abb. 5.14-rechts sind die Oberflächenhebungen nach 7 Injektionsdurchgängen dargestellt. Sowohl bei der Ausführung der Hebungsinjektionen als auch in den FE-Berechnungen ist ein eindeutiges Hebungsprofil zu erkennen. Es zeigen sich jedoch teils deutliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Berechnungsvarianten. Insbesondere die Wahl der Rissdicke t (Eingangsgröße zur Ermittlung der Volumendehnung an den Injektionselementen) wirkt sich signifikant auf die ermittelten Oberflächenhebungen aus. Bei einer angenommenen Rissdicke t = 0,8 cm (Variante 1) fielen die maximalen Oberflächenhebungen etwa doppelt so groß aus, wie die gemessenen Verformungen in situ. Wurde hingegen eine Rissdicke t von 0,5 cm angenommen (Variante 2 bis 5), konnte eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Verformungsmessungen erreicht werden.

Die Erhöhung des Steifemoduls der Injektions- und Hilfselemente bewirkte, dass die Hebungen etwas überschätzt wurden. Ob in der unteren Bodenschicht die Kennwerte von Sand 1 oder Hochstetten Kies verwendet wurden, wirkte sich kaum auf die Oberflächenhebungen aus. Eine noch feinere Diskretisierung des FE-Netzes zeigte keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse (identischer Verlauf der Oberflächenhebungen von Variante 2 und Variante 5).

In Tabelle 5.10 sind die in den FE-Berechnungen erzeugten Injektionsvolumina und die im 2. Großversuch injizierten Suspensionsmengen dargestellt. Die Auswertung erfolgte ab dem 4. Injektionsdurchgang, als erste signifikante Hebungen aufgetreten sind. Im Großversuch konnte

nicht an allen Manschetten eines Rohres gleich viel Suspension injiziert werden. Je nachdem welche Manschetten eines Rohres in der Auswertung berücksichtigt werden[35], ergibt sich daraus eine gewisse Bandbreite des pro Laufmeter injizierten Suspensionsvolumens. Das Verhältnis zwischen dem Injektionsvolumen der FE-Berechnungen und des 2. Großversuchs wird durch den Verhältnisfaktor η_V beschrieben.

Tabelle 5.10: Injektionsvolumina im 2. Großversuch und in den FE-Berechnungen

Berechnungs-variante [-]	**Durchgang [-]**	**Injektionsvolumen* [l/lfm]**		η_V [%]
		Experiment	2D-FE-Berechnung	
2 (Rissdicke t = 0,5)	4	145-197	13,5	7–9
	5	210-289	19,6	7–9
	6	238-301	26,9	9–11
	7	313-431	40,6	9–13

Bei der Auswertung des Injektionsvolumens der FE-Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass das eigentliche Injektionsvolumen durch die Anpassungsfaktoren η_{2D} und η_{sukz} reduziert wurde (siehe Kapitel 5.4.3.3 bzw. Kapitel 5.4.3.4). Diese Annahmen sind im Umkehrschluss bei der Auswertung des Injektionsvolumens zu berücksichtigen (Gl. 5.3).

Ein weiterer Grund für die deutlich größeren Injektionsmengen im Experiment ist, dass der effektive Suspensionsanteil der injizierten Suspension lediglich ca. 42 % beträgt[36]. Mehr als die Hälfte des injizierten Suspensionsvolumens tragen damit nicht zu einer Verdrängung des Baugrunds bei[37]. Wie außerdem die Ergebnisse des 2. Großversuchs zeigten, entstehen nicht nur hebungswirksame horizontale Injektionskörperstrukturen, sondern auch schmale, lange Injektionsrisse, die kaum eine Anhebung des Bodens bewirken. Dieses Suspensionsvolumen wird in den FE-Berechnungen nicht berücksichtigt. Daneben wurden in den Berechnungen die Injektionskörperstrukturen in idealisierter Form als horizontale Plattenstrukturen angesehen. Jedoch traten insbesondere in den ersten Durchgängen auch geneigte Plattenstrukturen auf, die aufgrund ihrer Orientierung eine etwas geringere Hebungswirkung als horizontale Plattenstrukturen besitzen. Weitere Ursachen konnten im Rahmen des Forschungsprojekts nicht gefunden werden.

[35] In der Auswertung wurden folgende Varianten berücksichtigt: Manschetten 1+2+3+4; Manschetten 1+2+3; Manschetten 2+3+4; Manschetten 2+3

[36] siehe Kapitel 3.5.6, Abb. 3.15, Versuch K_2_01

[37] Verlust durch Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension und das (geringe) Eindringen der Suspension an der Kontaktfläche zum Boden.

5.5 Anwendungsbeispiel - Hebungsinjektionen am Probefeld Oberau

5.5.1 Allgemeine Hinweise

Die Anwendung des entwickelten Modellierungskonzepts setzt voraus, dass die in Kapitel 5.2.1 aufgelisteten Voraussetzungen eingehalten werden. Wie nachfolgend beschrieben, kann dies für die Hebungsinjektionsmaßnahme am Probefeld Oberau vorausgesetzt werden. Dass infolge der Injektionen mit Suspension gefüllte Risse im Boden erzeugt werden und diese eine Anhebung des Baugrunds bewirken, legen die Ergebnisse von Horizontalinklinometermessungen nahe. Bereits nach dem 2. Injektionsdurchgang konnten an einem Horizontalinklinometer (1 m über den Manschettenrohren) erste Hebungen festgestellt werden. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Suspension nicht wirkungslos in die Porenräume des Bodens abfließt, sondern hebungswirksame Injektionsrisse entstehen (Sailer et al., 2018).

5.5.2 Allgemeine Angaben zum Projekt Ortsumfahrung Oberau

Der Tunnel Oberau befindet sich im Süden Bayerns, ca. 8 km nördlich von Garmisch-Partenkirchen. Die Autobahn A95 von München nach Garmisch-Partenkirchen endet ca. 3 km vor der Ortschaft Oberau und führt ab hier weiter auf der Bundesstraße B2. Aufgrund des zunehmenden Verkehrsaufkommens wurde zur Entlastung der Gemeinde Oberau eine Ortsumfahrung gebaut. Der Bau der Ortsumfahrung erfolgte als bergmännischer Tunnelvortrieb in Spritzbetonbauweise. Neben zwei Vortriebsabschnitten im Festgestein durchqueren die beiden Tunnelröhren die Lockergesteinsablagerungen des Gießenbachtals. In diesem Bereich werden zwei Bestandsbauwerke im Gewerbegebiet der Gemeinde Oberau, bei nur geringer Überdeckung (kleiner 1D), unterquert.

Aufgrund der zu erwartenden vortriebsbedingten Setzungen von mehreren Zentimetern war es erforderlich, die beiden zu unterfahrenden Bauwerke zu schützen. Vorab der Ausführung der Hebungsinjektionen unter den Bauwerken wurde im Rahmen eines Probefelds die Erreichbarkeit von Oberflächenhebungen im Zentimeterbereich mit dem geplanten Injektionskonzept und der vorgesehenen Suspensionsmischung überprüft.

5.5.3 Geologische Verhältnisse

Abb. 5.15 zeigt die geologischen Verhältnisse des Vortriebsabschnitts im Bereich des Gießenbachtals.

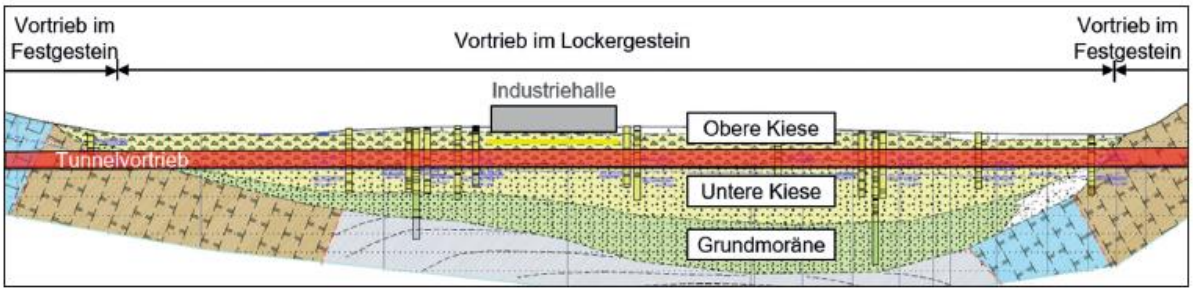


Abb. 5.15: Geologischer Längsschnitt im Gießenbachtal

Bis in eine Tiefe von ca. 50 m wurden alluviale Kiesablagerungen angetroffen (normalkonsolidiert). Diese unterteilen sich in die Oberen und Unteren Kiese. Deren Schichtgrenze wurde in Tiefen zwischen 15–22 m unter GOK erkundet. Die Hebungsinjektionen wurden in den Oberen Kiesen, in einer Tiefe von ca. 7 m unter GOK ausgeführt. Diese weisen im Vergleich zu den Unteren Kiesen einen höheren Stein- und Feinkornanteil auf. Außerdem können die Oberen Kiese stark mit Steinen und Blöcken durchsetzt sein. Anhand der durchgeführten Bohrlochrammsondierungen konnte in beiden Kiesschichten auf eine überwiegend mitteldichte bis sehr dichte Lagerung geschlossen werden. Die Oberen Kiese können mit einem k_f-Wert von ca. 2,0 × 10^{-4} m/s als sehr durchlässig eingestuft werden. Der Grundwasserstand kann im Zuge der Schneeschmelze bis auf Höhe der Tunnelachse ansteigen.

5.5.4 Angaben zum Probefeld

Die Versuchsanordnung des Probefelds ist in Abb. 5.16 dargestellt. Zur Herstellung des Injektionsfächers, in einer Tiefe von ca. 7 m unter GOK, wurden von einem Schacht aus sechs Bohrungen mit einem Gefälle von 3 % zur Horizontalen abgeteuft. Der maximale Abstand zwischen den Bohrungen betrug ca. 2,15 m. Je Bohrung wurde eine Reihe an Stahlmanschettenrohre (Ø 60,3 × 3,60 mm × 3 m, Manschettenabstand 50 cm) über eine Länge von 15 m installiert. Da in der Nähe des Schachts keine Injektionen ausgeführt werden sollten, wurden in diesem Bereich geschlossene Stahlrohre mit einer Länge von 3 m verbaut. Die Hebungen an der Geländeoberfläche wurden kontinuierlich mit Hilfe eines Schlauchwaagenmesssystems überwacht. Hierzu wurden in drei Reihen insgesamt 15 Messstellen installiert.

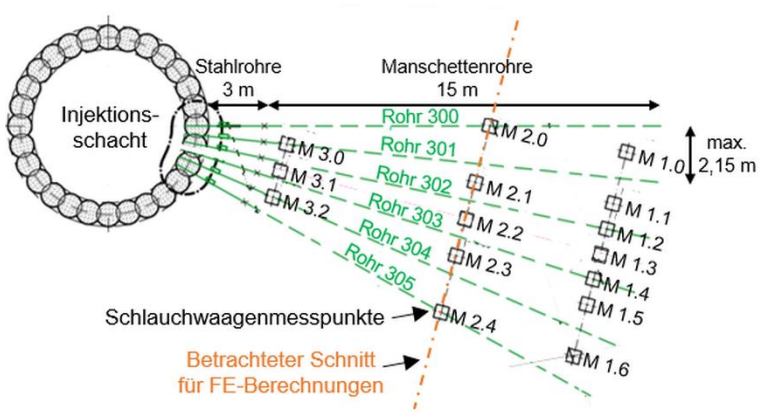


Abb. 5.16: Übersicht Probefeld

Im Zuge der Hebungsinjektionen am Probefeld wurden insgesamt 13 Injektionsdurchgänge ausgeführt. Jeder Injektionsdurchgang bestand aus zwei Injektionsdurchläufen, in denen jeweils nur jede zweite Manschette injiziert wurde. Insgesamt konnten an jeder Manschettenrohrreihe 30 Manschetten injiziert werden. Mit Ausnahme von fünf Injektionsdurchgängen, in denen nur eine Teilfläche des Injektionsfächers genutzt wurde (5. bis 9. Injektionsdurchgang), wurden in den anderen Injektionsdurchgängen alle Manschetten injiziert. Die Reihenfolge der injizierten Manschettenrohrreihe erfolgte dabei stets von „außen nach innen“ (vgl. Abb. 5.16 Injektionsreihenfolge der Rohre: 300+305, 301+304, 302+303). Üblicherweise betrug die Injektionsmenge pro Manschette 30 l. Lediglich im 1. Injektionsdurchgang wurde jede zweite Manschette mit 45 l beaufschlagt und in den Injektionsdurchgängen 9, 12 und 13 wurde die Injektionsmenge auf 60 l pro Manschette erhöht. Als Injektionsmaterial wurde fast ausschließlich das Fertigprodukt 2 (vgl. Kapitel 2.2) mit einem *w/f*-Wert von 0,7 verwendet. Die Verpressrate betrug 10 l/min.

Eine Zusammenfassung der im Rahmen des Probefelds durchgeführten Injektionen und der dabei injizierten Suspensionsmengen ist in Tabelle 5.11 dargestellt.

Tabelle 5.11: Durchgeführte Injektionen und injizierte Suspensionsmengen

Injektions-durchgang	Injizierter Bereich des Probefelds	Injektionsmenge (Soll-Werte)		Injektionsmenge (Ist-Werte)	
		Manschette	Gesamt	Manschette (Mittelwert)	Gesamt
[-]	[-]	[l]		[l]	
1	komplettes Feld	30* / 45*	6750	35.2	6330
2	komplettes Feld	30	5400	29.0	5214
3	komplettes Feld	30	5400	28.3	5101
4	komplettes Feld	30	5400	28.4	5114
5**	nur „Ecke Probefeld“ (Rohre: 300 – 302 Manschetten: 1 - 5)	30	450	29.3	439
6	nur „Feldmitte“ (Rohre: 301 - 304 Manschetten: 8 - 18)	30	1320	28.7	1263

Injektions-durchgang	Injizierter Bereich des Probefelds	Injektionsmenge (Soll-Werte)		Injektionsmenge (Ist-Werte)	
		Manschette	Gesamt	Manschette (Mittelwert)	Gesamt
[-]	[-]	[l]		[l]	
7	nur „Feldmitte“ (Rohre: 301 - 304 Manschetten: 8 - 18)	30	1320	28.1	1236
8**	nur „am Schacht“ (Rohre: 300 - 305 Manschetten: 22 - 30)	30	1620	24.4	1319
9	nur „Feldmitte“ (Rohre: 301 - 304 Manschetten: 8 - 18)	60	2640	28.7	1263
10	komplettes Feld	30	5400	28.9	5193
11	komplettes Feld	30	5400	27.8	5007
12**	komplettes Feld	60	10800	55.6	10007
13**	komplettes Feld	60	10800	54.0	9711
*Injektionsmenge an jeder zweiten Manschette					
**Injektionsdurchgang nicht in FE-Berechnungen berücksichtigt					

Nicht alle der in Tabelle 5.11 dargestellten Injektionsdurchgänge wurden in den im folgenden vorgestellten FE-Berechnungen miteinbezogen. Die Injektionen des 5. und 8. Injektionsdurchgangs wurden nicht berücksichtigt, da hier nur Manschetten am Rand des Injektionsfächers beaufschlagt wurden. Die Injektionsmenge von 60 l pro Manschette im 12. und 13. Injektionsdurchgang lag deutlich über den Erfahrungen des 2. Großversuchs. Daher wurden auch diese beiden Durchgänge nicht modelliert. Der 9. Injektionsdurchgang wurde trotz einer Sollmenge von 60 l pro Manschette miteinbezogen, da die angestrebte Injektionsmenge oftmals nicht injiziert werden konnte. Im Durchschnitt wurden in diesem Durchgang 27,8 l pro Manschette injiziert.

Abb. 5.17 zeigt eine Übersicht der Anzahl an Injektionen pro Manschette bis zum Ende des 11. Injektionsdurchgangs.

	Anzahl der Injektionen pro Manschette (Stand Ende 11. Injektionsdurchgang)					
Rohr	300	301	302	303	304	305
Manschette						
1	9	9	9	6	6	6
2	9	9	9	6	6	6
3	9	9	9	6	6	6
4	9	9	9	7	6	6
5	9	9	9	6	6	6
6	8	8	8	6	7	6
7	8	8	8	6	6	7
8	8	11	11	9	10	6
9	9	11	11	9	9	6
10	8	11	11	9	9	6
11	6	9	9	9	9	6
12	6	9	9	9	9	7
13	6	9	9	9	9	6
14	6	9	9	9	9	6
15	6	9	9	9	10	6
16	6	9	9	9	9	6
17	6	9	9	9	9	6
18	6	9	9	9	9	6
19	6	6	7	6	6	6
20	6	6	6	6	6	6
21	6	6	6	6	6	6
22	8	7	7	7	7	8
23	8	8	7	7	7	8
24	8	7	7	8	7	8
25	8	7	7	7	7	8
26	8	7	7	7	7	8
27	8	9	7	7	7	8
28	8	8	7	7	7	8
29	8	7	7	7	7	8
30	8	7	7	7	7	8

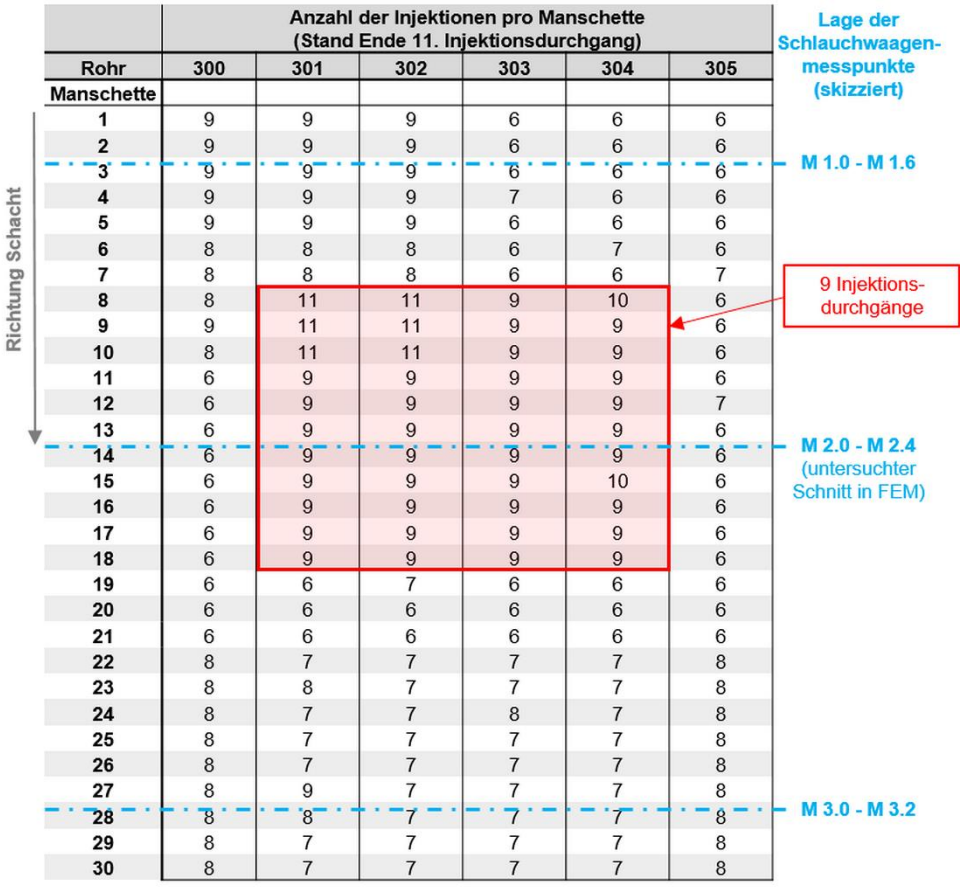


Abb. 5.17: Anzahl der Beaufschlagungen pro Manschette bis zum 11. Injektionsdurchgang und ungefähre Lage der Schlauchwaagenmessstellen

5.5.5 Finite-Elemente-Berechnungen zum Probefeld Oberau

5.5.5.1 Modellgeometrie

In Abb. 5.18 ist die Geometrie des verwendeten 2D-FE-Modells dargestellt. Das FE-Modell besteht aus 8.725 Elementen und 70.239 Knoten. In den FE-Berechnungen wird ein Schnitt entlang der mittleren Reihe der Schlauchwaagenmessstellen betrachtet (vgl. Abb. 5.16, Messstellen M 2.0 bis M 2.4). Die seitlichen Modellränder werden in horizontaler Richtung, der untere Modellrand in horizontaler und vertikaler Richtung festgehalten. Es wird von einem ebenen Verformungszustand ausgegangen.

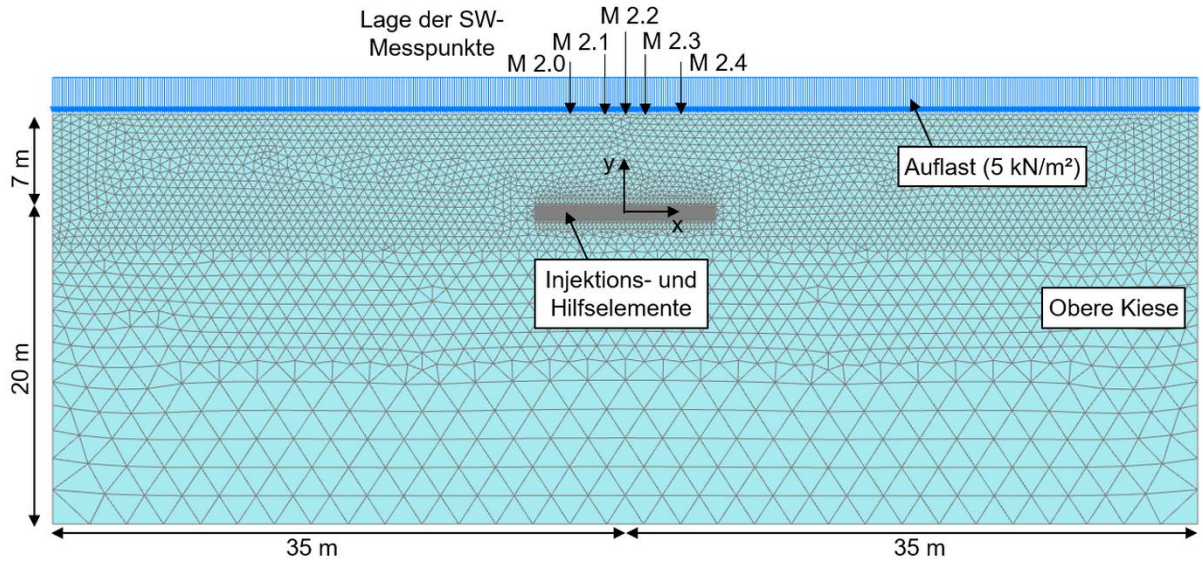


Abb. 5.18: FE-Modell zum Probefeld Oberau

Gemäß der Lage des Injektionsfächers im Probefeld wurden die Injektionselemente ca. 7 m unterhalb des oberen Modellrands (≙ GOK) angeordnet. Um Konvergenzprobleme aufgrund eines spannungsfreien oberen Modellrands (freie Geländeoberfläche am Probefeld) zu vermeiden, wurde eine geringe Auflast von 5 kN/m² angesetzt. Im Bereich des Probefelds wurde die Schichtgrenze zwischen den Oberen und Unteren Kiesen bei ca. 21,5 m unter GOK erkundet. In dem verwendeten FE-Modell wurde hingegen nicht zwischen den Oberen und Unteren Kiesen differenziert, da ihre mechanischen Eigenschaften ähnlich sind und diese Vereinfachung nur unwesentlich auf die Berechnungsergebnisse auswirkt.

Um mehrere Injektionsdurchgänge berechnen zu können, war es erforderlich, dass der Bereich der Injektionselemente und das nähere Umfeld durch ein strukturiertes FE-Netz diskretisiert wird (Abb. 5.19).

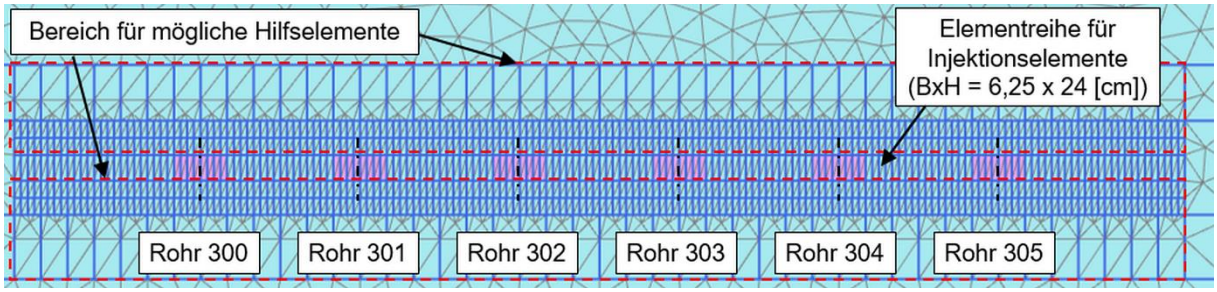


Abb. 5.19: Modellausschnitt im Bereich der Injektionselemente (nach 1. Injektionsdurchgang an allen Rohren)

5.5.5.2 Modellierung der Hebungsinjektionen

Zur Modellierung der Hebungsinjektionen wurde analog zu den Beschreibungen in Kapitel 5.2.2 vorgegangen.

Hinsichtlich der erforderlichen Anzahl an aktiven Injektionselementen pro Durchgang wurde davon ausgegangen, dass sich die horizontalen Injektionskörperstrukturen in ähnlicher Weise vergrößern, wie im 2. Großversuch bei der Injektion von 20 l pro Manschette.
Wie die Freilegung der Injektionskörperstrukturen des 2. Großversuchs zeigte, führte das Injizieren einer größeren Suspensionsmenge pro Manschette zwar zu etwas größeren plattenartigen Strukturen, jedoch bildeten sich vorwiegend deutlich längere, schmale Injektionsrisse aus, die kaum zur Anhebung des Bodens beitragen. Aus diesem Grund wurde auch für die Berechnungen am Probefeld davon ausgegangen, dass sich bei einer Injektionsmenge von 30 l pro Manschette ähnliche horizontale Injektionskörperstrukturen ausbilden, wie im 2. Großversuch bei einer Injektion von 20 l pro Manschette.

Die Länge der modellierten Injektionselemente (6,25 cm) ergab sich aus einem Kompromiss zwischen dem Abstand der Manschettenrohre und der benötigten Anzahl an Injektionselementen.

Eine Übersicht der in den jeweiligen Injektionsdurchgängen angesetzten Anzahl an aktiven Injektionselementen ist in Tabelle 5.12 dargestellt.

Tabelle 5.12: Aktive Injektionselemente

Durchgang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7***	**7***	**8**	**9**
Rohr 300 und 305										
Anzahl aktiver* Injektionselemente pro Rohrseite [-]	3	5	7	9	0	0	0	0	11	13
Länge d. aktiven Injektionselemente pro Rohrseite [m]	0,19	0,31	0,44	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,69	0,81
Rohr 301										
Anzahl aktiver Injektionselemente pro Rohrseite [-]	3	5	7	9	11	13	15	0	17	19
Länge d. aktiven Injektionselemente pro Rohrseite [m]	0,19	0,31	0,44	0,56	0,69	0,81	0,94	0,94	1,06	1,19
Rohr 302, 303 und 304										
Anzahl aktiver Injektionselemente pro Rohrseite [-]	3	5	7	9	11	13	0	15	17	19
Länge d. Injektionselemente pro Rohrseite [m]	0,19	0,31	0,44	0,56	0,69	0,81	0,81	0,94	1,06	1,19
* 7. Injektionsdurchgang wurde in zwei Phasen modelliert, da in situ ein größerer zeitlicher Abstand (1 Tag) zwischen den Injektionen am Rohr 301 und den Rohren 302–304 lag.										

Der für die Vergleichsberechnungen betrachtete Berechnungsquerschnitt befindet sich in der Mitte des Probefelds. Aufgrund der großen Anzahl an injizierbaren Manschetten entlang der Rohre, kann für den betrachteten Berechnungsquerschnitt von einem ebenen Verformungszustand ausgegangen werden. Damit kann für den Anpassungsfaktors η_{2D} ein Wert von 1,0 angenommen werden.

Der Anpassungsfaktor η_{sukz} wurde analog zu den Berechnungen des 2. Großversuchs ermittelt (siehe Kapitel 5.4.3.4). Hierzu wurden fünf Injektionsdurchgänge an einem einzelnen Rohr des Probefelds modelliert und die Oberflächenhebungen bei einer sukzessiven und einer unmittelbaren Modellierung der Hebungsinjektionen ausgewertet. Die daraus ermittelten Anpassungsfaktoren sind in Tabelle 5.13 dargestellt.

Tabelle 5.13: Gewählter Anpassungsfaktor η_{sukz} für die FE-Berechnungen am Probefeld Oberau

Injektionsdurchgang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Anpassungsfaktor η_{sukz} [-]	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2

In den ersten beiden Durchgängen zeigte sich kaum ein Unterschied zwischen der sukzessiven und der unmittelbaren Modellierungsvariante. Bei der vorliegenden Überlagerung von 7 m ergaben sich vermutlich aufgrund der noch kurzen „*Rissläng*en“ keine signifikanten Unterschiede in den Berechnungen. Erst ab dem dritten Injektionsdurchgang war ein Anpassungsfaktor von 1,2 erforderlich, um eine bessere Übereinstimmung zwischen den beiden Modellierungsvarianten zu erreichen.

In Abb. 5.23 sind die in den jeweiligen Berechnungen erreichten vertikalen Oberflächenverformungen für die Injektionsdurchgänge D4 und D5 dargestellt.

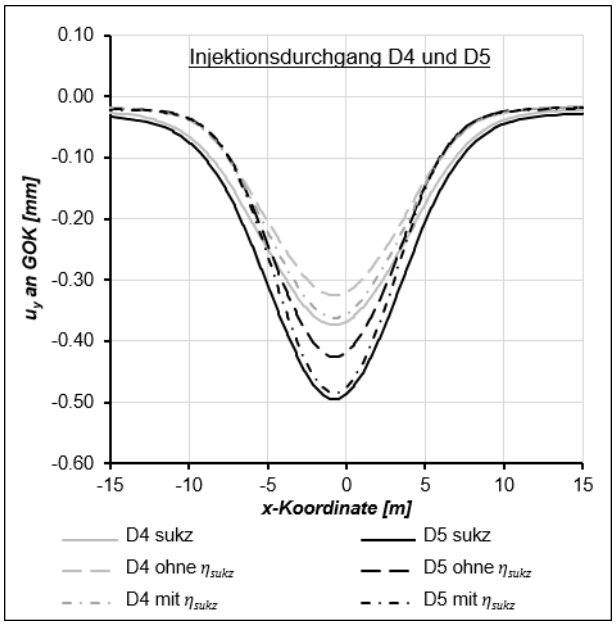


Abb. 5.20: Vertikale Oberflächenverformungen bei „sukzessiver“ und „unmittelbarer“ Modellierung der entstehenden Injektionskörper

Eine Übersicht der schlussendlich für die Vergleichsberechnungen zum Probefeld Oberau verwendeten Anpassungsfaktoren sowie die daraus abgeleitete Volumendehnungen an den Injektionselementen zur Modellierung der Hebungsinjektion sind in Tabelle 5.14 dargestellt. Die Volumendehnung wurde gemäß Gl. 5.1 bzw. Gl. 5.2 ermittelt.

Tabelle 5.14: Eingangsgrößen und daraus ermittelte vertikale Volumendehnung der Injektionselemente

Rissdicke	**Anpassungs-faktor „2D-Modell“**	**Anpassungs-faktor „sukzessive Rissbildung“**	**Höhe der Injektions-elemente**	**Volumendehnung am Injektionselement**
t	η_{2D}	η_{sukz}	h_{IE}	$\varepsilon_{yy,Rohrachse}$ $(\varepsilon_{yy,Rissspitze})$
[cm]	[-]	[-]	[cm]	[%]
0,5	1,0	1,0 (D1 und D2) und 1,2 (D3 bis D9)	24,0	2,08 (1,67) für D1 und D2 2,50 (2,00) für D3 bis D9
0,8				3,33 (1,67) für D1 und D2 4,00 (2,00) für D3 bis D9

5.5.5.3 Materialparameter

Zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der Oberen Kiese wurde das hypoplastische Stoffmodell mit Intergranularer Dehnung verwendet. Die hierzu angesetzten Stoffmodellparameter sind in Tabelle 5.15 dargestellt.

Tabelle 5.15: Hypoplastische Stoffmodellparameter für die Oberen Kiese

Boden	$\varphi_c´$ [°]	h_s [MPa]	n	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β
Obere Kiese	32,5	35	0,48	0,233	0,640	0,768	0,20	1,0

Zur Ermittlung der Parameter e_{d0}, e_{c0} und e_{i0} wurde die lockerste und dichteste Lagerung des Bodens bestimmt (siehe Kapitel 5.3.2). Die Granularhärte h_s und der Exponent n wurden anhand des Spannungs-Verformungsverlauf eines Großödometerversuchs[38] ermittelt. Für die Parameter α und β wurden Werte innerhalb der üblichen Bandbreite gewählt. Der kritische Reibungswinkel wurde mit $\varphi_c´=32,5°$ angesetzt[39]. Die Anfangsporenzahl e_0 und die Wichten des Bodens $\gamma´$ und γ wurden entsprechend der jeweils untersuchten Lagerungsdichte D des Bodens gewählt (Tabelle 5.16)

Tabelle 5.16: Anfangsporenzahl und Wichten der Oberen Kiese

D [-]	e_0 [-]	$\gamma´/\gamma$ [kN/m³]
0,5	0,4066	12,73 / 19,83
0,7	0,3321	13,45 / 20,55
0,9	0,2644	14,17 / 21,65

Wie auch für die FE-Berechnungen zum 2. Großversuch, wurden zur Berücksichtigung des Konzepts der Intergranularen Dehnung, vereinfachend die Parameter für Karlsruher Sand verwendet (Tabelle 5.2, Kapitel 5.4.2).

Ein Vergleich zwischen dem zur Kalibrierung der Stoffmodellparameter verwendeten Großödometerversuch und dem entsprechenden Elementversuch[40] ist in Anhang A.4.2 dargestellt.

In den Bereichen der Injektions- und Hilfselemente wurde ein linear elastisches Materialverhalten angesetzt. Je nach Berechnungsvariante (vgl. Kapitel 5.5.5.5) wurden die in Tabelle 5.17 dargestellten Parameter verwendet.

Tabelle 5.17: Parameter für Injektions- und Hilfselemente

Variante	E (E_s) [MN/m²]	ν [-]
A	25,2 (28,0)	0,2
B	75,6 (84,0)	

[38] Probendurchmesser 30 cm, Probenhöhe 8 cm
[39] Tunnel Oberau, Geologie und Hydrologie - Geologischer Bericht, 21.10.2014
[40] PLAXIS „*SoilTest*“

Wie im Rahmen der numerischen Untersuchungen zum 2. Großversuch, wurde die Steifigkeit anhand der Versuchsergebnisse eines Ödometerversuchs bestimmt (vgl. Kapitel 5.4.2).

5.5.5.4 Berechnungsablauf

Gemäß der geologischen Erkundung wurde zur Ermittlung des Primärspannungszustands von normalkonsolidierten Bodenverhältnissen ausgegangen. Analog zu den FE-Berechnungen des 2. Großversuchs wurde in allen Phasen die Funktion „*Arc-Length Control*“ deaktiviert sowie in den Phasen der Hebungsinjektionen die Option „*updated mesh*“ aktiviert (vgl. Kapitel 5.4.4).

Aufgrund des zeitlich geringen Abstands zwischen der Beaufschlagung unterschiedlicher Rohre wurden die jeweiligen Injektionen vereinfachend in einer Berechnungsphase zusammengefasst. Insgesamt wurden neun Injektionsdurchgänge modelliert (vgl. Kapitel 5.5.4). Eine Übersicht der hierzu erstellten Berechnungsphasen ist in Tabelle 5.18 dargestellt.

Tabelle 5.18: Berechnungsphasen

Phase	Name / Beschreibung		Injektionsdurchgang in situ*
0	Initial Phase / Ermittlung des Primärspannungszustands		
1	Auflast aktivieren		
2	1. Durchgang	1. Injektion an den Rohren 300 und 305	1. Durchgang
3		1. Injektion an den Rohren 301 und 304	
4		1. Injektion an den Rohren 302 und 303	
5	2. Durchgang	2. Injektion an den Rohren 300 und 305	2. Durchgang
6		2. Injektion an den Rohren 301 und 304	
7		2. Injektion an den Rohren 302 und 303	
8	3. Durchgang	3. Injektion an den Rohren 300 und 305	3. Durchgang
9		3. Injektion an den Rohren 301 und 304	
10		3. Injektion an den Rohren 302 und 303	
11	4. Durchgang	4. Injektion an den Rohren 300 und 305	4. Durchgang
12		4. Injektion an den Rohren 301 und 304	
13		4. Injektion an den Rohren 302 und 303	
14	5. Durchgang	5. Injektion an den Rohren 301 und 304	6. Durchgang
15		5. Injektion an den Rohren 302 und 303	
16	6. Durchgang	6. Injektion an den Rohren 301 und 304	7. Durchgang
17		6. Injektion an den Rohren 302 und 303	
18	7. Durchgang	7. Injektion am Rohr 301	9. Durchgang
19		7. Injektion am Rohr 304	
20		7. Injektion an den Rohren 302 und 303	
21	8. Durchgang	5. Injektion an den Rohren 300 und 305	10. Durchgang
22		8. Injektion an den Rohren 301 und 304	
23		8. Injektion an den Rohren 302 und 303	
24	9. Durchgang	6. Injektion an den Rohren 300 und 305	11. Durchgang
25		9. Injektion an den Rohren 301 und 304	
26		9. Injektion an den Rohren 302 und 303	
*vgl. Tabelle 5.11			

5.5.5.5 Durchgeführte Berechnungen

Um beurteilen zu können, inwiefern sich gewisse Annahmen auf die ermittelten Oberflächenhebungen auswirken, wurden verschiedene Berechnungsvarianten untersucht. Eine Übersicht der betrachteten Berechnungsannahmen ist in Tabelle 5.19 dargestellt.

Tabelle 5.19: Übersicht der Berechnungsvarianten

Variante	Rissdicke t	Steifemodul E_S der Hilfs- und Injektionselemente	Lagerungsdichte D
1	0,5 cm	28 MN/m²	0,7
2	0,5 cm	28 MN/m²	**0,5**
3	0,5 cm	28 MN/m²	**0,9**
4	**0,8 cm**	28 MN/m²	0,7
5	0,5 cm	**84 MN/m²**	0,7

Da die FE-Berechnungen zum 2. Großversuch unter der Annahme einer „Rissdicke“ von t=0,5 cm eine gute Übereinstimmung mit den Verformungsmessungen zeigten, wurde diese Annahme zunächst auch für die FE-Berechnungen zum Probefeld Oberau übernommen.

Gemäß der geologischen Erkundung kann von einer mitteldichten bis sehr dichten Lagerung der Oberen Kiese ausgegangen werden. Der Einfluss einer Variation der Lagerungsdichte auf die Hebungen wurde im Rahmen der FE-Berechnungen berücksichtigt.

In weiteren Variationsberechnungen wurden die Berechnungsannahmen hinsichtlich der gewählten „Rissdicke“ t und der Steifigkeit der Hilfs- und Injektionselemente variiert.

5.5.5.6 Auswertung der Berechnungsergebnisse

In Abb. 5.21 sind die effektiven Hauptspannungen in der Phase vor dem Beginn der Hebungsinjektion und nach Abschluss aller Injektionsdurchgänge dargestellt. In der Berechnungsphase „Auflast aktivieren“ entspricht σ'_{11} den Vertikalspannungen und σ'_{33} den Horizontalspannungen im Boden.

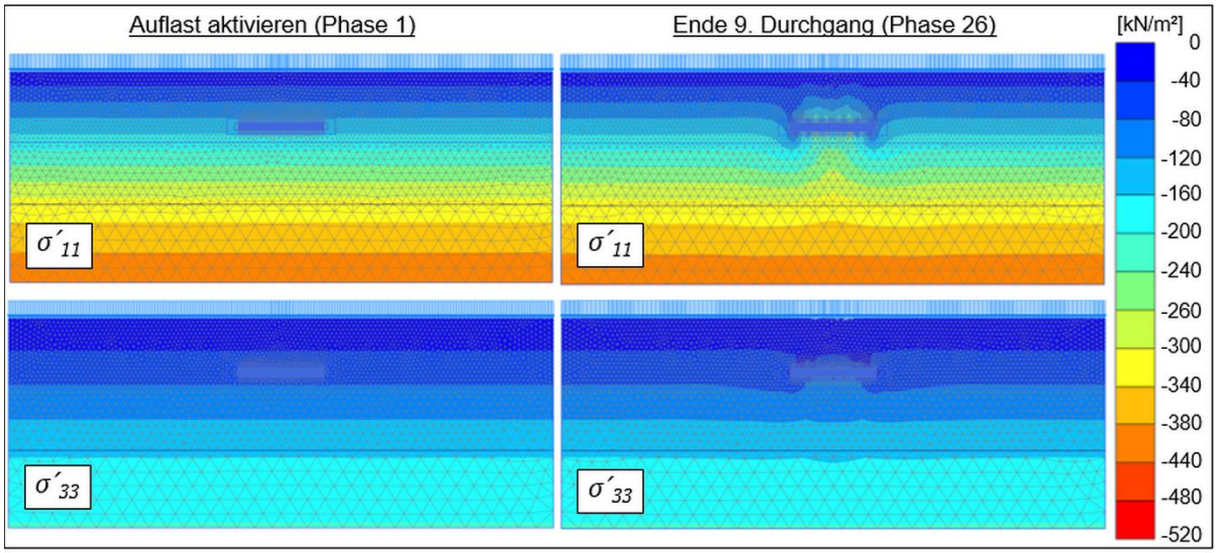


Abb. 5.21: Effektive Hauptspannungen

Da an den Modellrändern die Spannungsänderungen vernachlässigbar klein sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Modellabmessungen ausreichend groß sind. Wesentliche Spannungsänderungen treten vorwiegend im Bereich um die Injektionselemente auf. In Abb. 5.24 ist der mittlere Druck im Bereich der Injektionselemente über verschiedene Berechnungsphasen hinweg dargestellt.

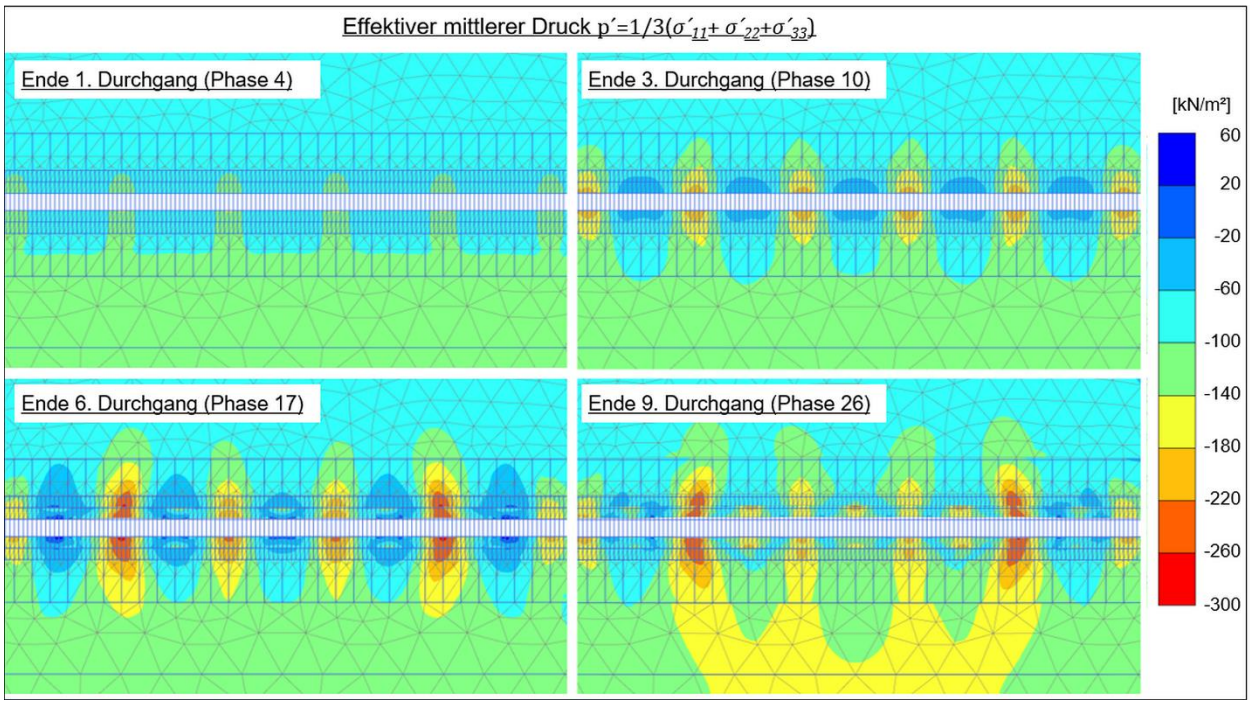


Abb. 5.22: Effektiver mittlerer Druck $p´$ (Injektionselemente sind in der Darstellung ausgeblendet)

Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen erhöht sich der mittlere Druck im Bereich um die aktiven Injektionselemente. Im Bereich zwischen den aktiven Injektionselementen nimmt der

mittlere Druck hingegen ab, da hier der Boden aufgrund der umliegenden Hebungen lokal entlastet wird. Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen erhöht sich die Anzahl an aktiven Injektionselementen und es kommt zu einer gleichmäßigeren Belastung des Bodens. Die maximalen Spannungen im Bereich der Injektionselemente bleiben ab dem sechsten Injektionsdurchgang praktisch unverändert.

In Abb. 5.23 ist der Vergleich zwischen den Verformungsmessungen des Schlauchwaagenmesssystems am Probefeld und den in der Berechnungsvariante 1 ermittelten Vertikalverformungen dargestellt.

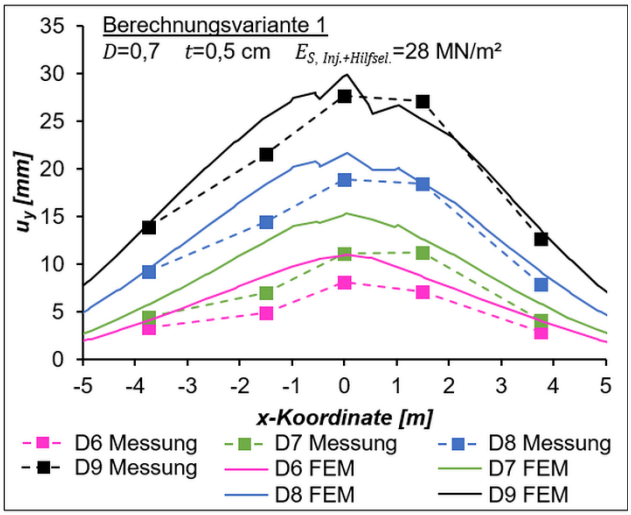


Abb. 5.23: Vergleich zwischen Verformungsmessungen und FE-Berechnungen

Für die Berechnungsvariante 1 zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Verformungsmessungen in situ. Sowohl die maximal ermittelte Hebung als auch die Form der Oberflächenhebungen, stimmen sehr gut mit den Verformungsmessungen überein. Lediglich an der Messstelle M 2.1[41] treten Abweichungen von bis zu ca. 7 mm auf.

In der Berechnung wurde von einer dichten Lagerung der Oberen Kiese ausgegangen (D = 0,7). Im Zuge der geologischen Erkundung wurden die Oberen Kiese mit einer mittleren bis sehr dichten Lagerung angetroffen. Eine genauere Eingrenzung ist für den Bereich des Probefelds anhand der Erkundungsergebnisse nicht möglich. In Abb. 5.24-links sind die maximalen Vertikalverformungen am Injektionselement für unterschiedliche Lagerungsdichten ausgewertet. Die entsprechenden Hebungen an der Geländeoberfläche sowie die Schlauchwaagenmessungen des Probefelds sind in Abb. 5.24-rechts für den sechsten und neunten Durchgang dargestellt.

[41] Lage der Messstelle M 2.1 bei x-Koordinate = –1,5 m

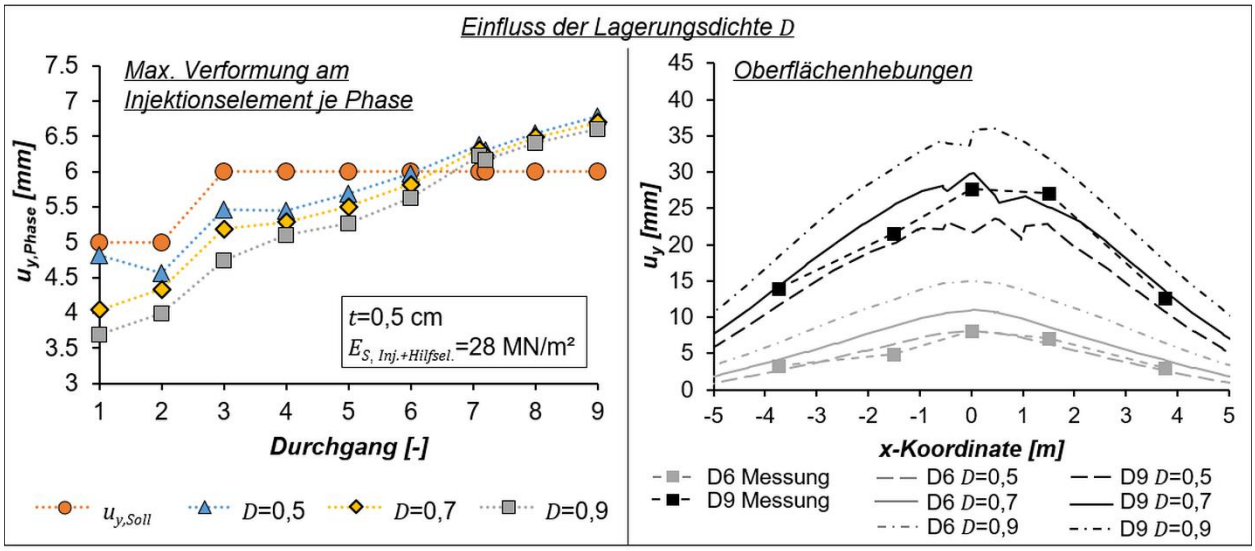


Abb. 5.24: Vertikalverformungen an den Injektionselementen (links) und an der Geländeoberfläche (rechts) bei unterschiedlichen Lagerungsdichten

Die Auswertung in Abb. 5.24-links zeigt, dass in den ersten Injektionsdurchgängen, je nach Lagerungsdichte des Bodens, unterschiedlich große Vertikalverformungen am Injektionselement erreicht werden. Je geringer die Lagerungsdichte und damit die Steifigkeit und des Bodens ist, umso größer ist die erreichte Vertikalverformung am Injektionselement. Mit zunehmender Anzahl an Injektionsdurchgängen wirkt sich die Lagerungsdichte jedoch kaum noch auf die am Injektionselement erreichten Vertikalverformungen aus.

In Abb. 5.24-rechts sind die in den jeweiligen Berechnungen ermittelten Hebungen an der Geländeoberfläche dargestellt. Die Berechnungen mit einer Lagerungsdichte D = 0,7 stimmen nahezu mit den Messungen in situ überein. Mit zunehmender Lagerungsdichte vergrößern bzw. mit abnehmender Lagerungsdichte verringern sich die prognostizierten Oberflächenhebungen um jeweils ca. 2–6 mm. Damit ergibt sich bereits durch die mögliche Bandbreite der geologischen Bedingungen eine gewisse Streuung mit der die Oberflächenhebungen ermittelt werden können.

Für den Fall, dass durch die Annahme einer Lagerungsdichte von D = 0,7 die tatsächlichen Bodenverhältnisse zutreffend wiedergegeben werden, liefert das entwickelte Modellierungskonzept eine sehr gute Verformungsprognose. Die Ergebnisse der Berechnungen mit den Lagerungsdichten D = 0,5 und D = 0,9 liegen ebenfalls im Bereich der gemessenen Oberflächenhebungen.

In der Berechnungsvariante 4 wurde untersucht, welchen Einfluss eine Erhöhung des Steifemoduls der Injektions- und Hilfselemente auf die Berechnungsergebnisse hat. In Abb. 5.25-links sind die erreichten Vertikalverformungen am Injektionselement und in Abb. 5.25-rechts die Hebungen an der Geländeoberfläche dargestellt.

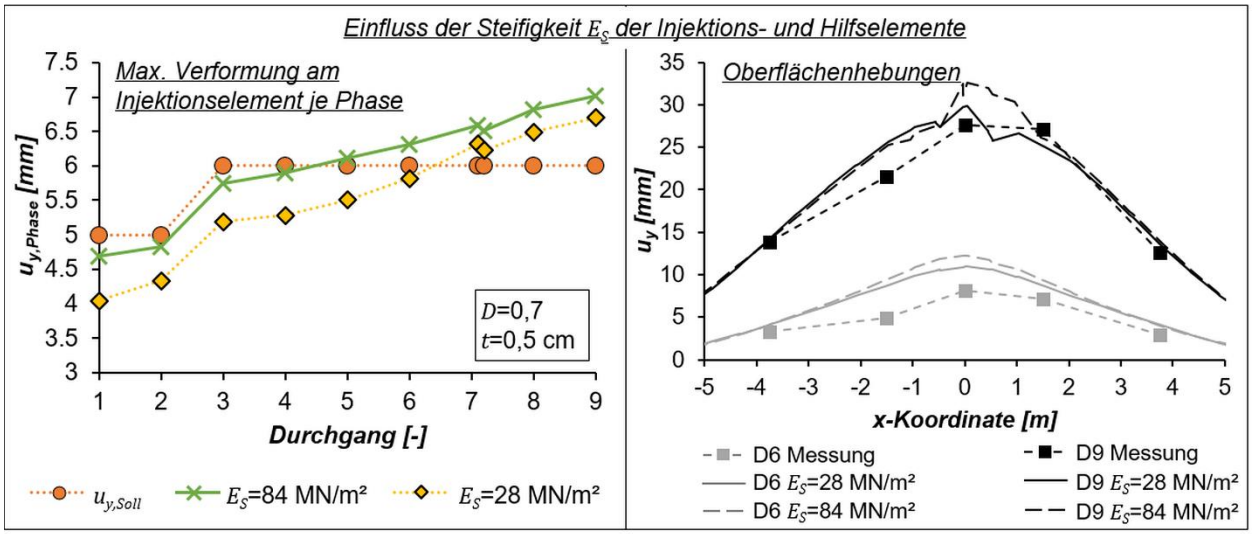


Abb. 5.25: Vertikalverformungen an den Injektionselementen (links) und an der Geländeoberfläche (rechts) bei unterschiedlichem Steifemodul E_S der Injektions- und Hilfselemente

Für ein Steifemodul der Injektions- und Hilfselemente von E_S = 28 MN/m², lässt sich in den ersten Injektionsdurchgängen die an den Injektionselementen angestrebte Vertikalverformung nicht erreichen. Wenn stattdessen ein deutlich größerer Steifemodul verwendet wird, können die angestrebten Vertikalverformungen am Injektionselement bereits in den ersten Injektionsdurchgängen erzeugt werden. Die unterschiedlichen Verformungen an den Injektionselementen wirkten sich jedoch nur unwesentlich auf die resultierenden Hebungen an der Geländeoberfläche aus. In beiden Berechnungsvarianten wurden nahezu die gleichen Oberflächenhebungen erreicht.

In den Berechnungsvarianten 1 bis 4 wurde zur Ermittlung der Volumendehnung an den Injektionselementen von einer „Rissdicke“ t = 0,5 cm ausgegangen. Mit dieser Annahme konnte bereits bei der Nachrechnung des 2. Großversuchs eine gute Übereinstimmung zwischen FE-Berechnungen und Verformungsmessungen erreicht werden. Vergleichend wurde in der Berechnungsvariante 5 untersucht, wie sich die Wahl der „Rissdicke“ auf die Oberflächenhebungen auswirkt. In Abb. 5.26 sind die ermittelten Oberflächenhebungen bei einer „Rissdicke“ von t = 0,5 cm und t = 0,8 cm dargestellt.

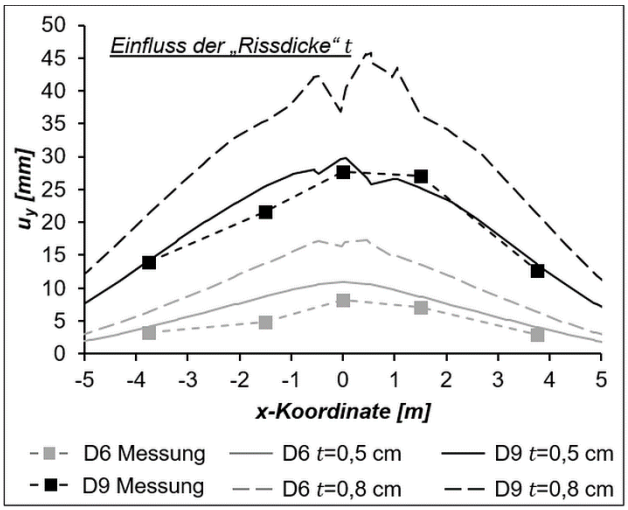


Abb. 5.26: Vergleich zwischen Verformungs-messungen und FE-Berechnungen

In der Berechnungsvariante mit einer „Rissdicke“ von t = 0,8 cm werden die Hebungen an der Geländeoberfläche überschätzt. Je nach Injektionsdurchgang liegen die Hebungen ca. 7–15 mm über den Verformungsmessungen am Probefeld. Wie auch in den Berechnungen zum 2. Großversuch, zeigt sich auch in diesem Fall, dass die ermittelte Oberflächenhebung erwartungsgemäß signifikant von der Wahl der Rissdicke t abhängt.

In Tabelle 5.20 sind die Injektionsvolumina der FE-Berechnungen und das in situ verbrauchte Suspensionsvolumen angegeben. Das Verhältnis zwischen dem Injektionsvolumen der FE-Berechnungen und des Probefelds wird durch den Verhältnisfaktor η_V beschrieben.

Tabelle 5.20: Injektionsvolumen in FE-Berechnungen und Verbrauch in situ

Berechnungs-variante [-]	**Durchgang [-]**	**Injektionsvolumen* [l/lfm]**		**η_V [%]**
		in situ	FE-Berechnung	
1 (Rissdicke t=0,5)	6	1909	135	7
	7	2192	171	8
	8	2538	226	9
	9	2871	292	10

Wie bereits in den numerischen Untersuchungen zum 2. Großversuch, wurde bei der Ausführung der Hebungsinjektionen im Probefeld deutlich mehr Injektionsvolumen benötigt als in den FE-Berechnungen. Ähnlich zum 2. Großversuch waren in den FE-Berechnungen, je nach Injektionsdurchgang, nur 7–10 % des in situ injizierten Suspensionsvolumens erforderlich, um eine vergleichbare Anhebung der Geländeoberfläche zu erreichen.

5.6 Zusammenfassung und Bewertung der FE-Berechnungen

Das entwickelte Konzept zur Modellierung von Hebungsinjektionen basiert auf den Erkenntnissen der vorab durchgeführten Großversuche. Wie die Freilegung der erzeugten Injektionskörperstrukturen zeigte, entstanden überwiegend horizontale, plattenförmige Injektionsrisse mit einer Dicke von ca. 0,5–1 cm (siehe Kapitel 4.5). Nach drei Injektionsdurchgängen (Injektionsvolumen 20 l pro Manschette) bzw. sechs bis sieben Injektionsdurchgängen (10 l pro Manschette) erreichten die Injektionskörperstrukturen eine Ausdehnung in den Boden von ca. 30 cm entlang der Manschettenrohrachse. In der Folge konnten die wesentlichen Berechnungsannahmen zur Modellierung der Hebungsinjektionen, wie Form, Länge und Dicke der Injektionsrisse, fundiert bestimmt werden.

Die im Bereich der Injektionskörperstrukturen aufgetretenen Verformungen wurden in den FE-Berechnungen durch das Aufbringen einer vertikalen Dehnung modelliert. Die Größe der Dehnungen richtet sich nach der im Großversuch angetroffenen Dicke der entstandenen Injektionsrisse. Über welchen Bereich hinweg die vertikale Dehnung in den FE-Berechnungen anzusetzen ist, konnte in Abhängigkeit des injizierten Suspensionsvolumens und der Anzahl an durchgeführten Injektionsdurchgängen festgelegt werden.

Im Zuge der Nachrechnung des 2. Großversuchs zeigte sich, dass die ermittelten Oberflächenhebungen wesentlich von der Größe der angenommen Dicke der Injektionsrisse abhängen. Bei einer angenommenen Rissdicke von t = 0,8 cm wurden die in situ aufgetretenen Hebungen deutlich überschätzt. Hingegen ergab sich unter der Annahme einer Rissdicke t =0,5 cm eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den ermittelten Oberflächenhebungen und den Verformungsmessungen in situ.

Im Weiteren wurde das entwickelte Modellierungskonzept verwendet, um die Hebungen an der Geländeoberfläche für eine Baumaßnahme zu prognostizieren. Als Ausführungsbeispiel dienten hierzu die im Rahmen der Tunnelbaumaßnahme Oberau durchgeführten Hebungsinjektionen an einem Probefeld. Auch in diesem Anwendungsfall zeigte sich, dass mit einer angenommenen Rissdicke von t = 0,5 cm die gemessenen Oberflächenhebungen realistisch prognostiziert werden.

Darüber hinaus wurde in den FE-Berechnungen der Einfluss weiterer Berechnungsannahmen auf die ermittelten Oberflächenhebungen untersucht. Für die Vergleichsberechnungen am Probefeld wurde die Lagerungsdichte des Bodens entsprechend der Bandbreite der geologischen Erkundungsergebnisse variiert (D = 0,5 bis D = 0,9). Bei einer Lagerungsdichte von D = 0,7 stimmten die ermittelten Oberflächenhebungen sehr gut mit den Verformungsmessungen in situ überein. Demgegenüber fielen bei einer geringeren Lagerungsdichte (D = 0,5) die berechneten Oberflächenhebungen ca. 20 % geringer bzw. bei einer höheren Lagerungsdichte (D = 0,9) ca. 25 % größer aus, als die gemessenen Hebungen. Außerdem wurde die Steifigkeit der linear-elastischen Injektions- und Hilfselemente variiert. Als „unterer Grenzwert“ wurde der Steifemodul

E_S annähernd gemäß der Steifigkeit des Bodens bei Erstbelastung angesetzt. Für den „oberen Grenzwert“ wurde E_S entsprechend der Steifigkeit für Ent- und Wiederbelastungsvorgänge des Bodens gewählt. Die Variation des Steifemoduls wirkte sich jedoch nur unwesentlich auf die ermittelten Oberflächenhebungen aus.

Es sei darauf hingewiesen, dass durch das entwickelte Modellierungskonzept der reale Injektionsvorgang und die Ausbildung der Injektionskörperstrukturen vereinfacht abgebildet werden. Der Boden und die Injektionsstrukturen werden dabei als Kontinuum betrachtet. Eine tatsächliche Rissausbildung und die daraus resultierenden Verformungen, in Abhängigkeit der Suspensions- und Bodeneigenschaften sowie der Injektionsparameter, wird damit nicht simuliert. Stattdessen werden in den FE-Berechnungen der Injektionsbereich und die hier auftretenden Verformungen (mittels einer vorgegebenen vertikalen Dehnung) als Eingangsgrößen vorgegeben. Diese wesentlichen Berechnungsannahmen konnten jedoch anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen bestimmt werden. Wie die FE-Berechnungen zum Großversuch und dem Probefeld Oberau zeigten, kann mit dem entwickelten Modellierungskonzept eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen der prognostizierten und der gemessenen Oberflächenhebung erreicht werden.

Das Injektionsvolumen in der FE-Berechnung beträgt ca. 7–13 % von der tatsächlichen Injektionsmenge. Unsere Ursachenforschung zeigt, diese deutlichen Unterschiede im Wesentlichen auf das Ausfiltern der Wasserphase aus der Suspension, die bei der numerischen Berechnung nicht betrachtet wird, und die stark vereinfachte Modellierung der Ausbildung der Injektionskörperstrukturen zurückzuführen sind.

In den durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde die Anhebung der freien bzw. einer gleichmäßig belasteten Oberfläche untersucht. Vorab der Ausführung von Hebungsinjektionen kann von einer homogenen Spannungsverteilung im Injektionsbereich ausgegangen werden. Damit lassen sich die Untersuchungen auch auf die Anhebung von Bauwerken unter der Voraussetzung übertragen, dass die Zusatzspannungen infolge der Gründungslasten in der Tiefe der Injektionen eine näherungsweise gleichmäßige Verteilung zeigen. Für gleichmäßig belastete statisch wirksame Bodenplatten ist diese Bedingung unmittelbar unter der Gründungssohle gegeben. Für Einzel-, Streifenfundamente und Pfahlgruppen ist diese Voraussetzung nur bei einem ausreichend großen Tiefenabstand von der Fundamentsohle bzw. den Pfahlspitzen zum Injektionsbereich erfüllt. Eine individuelle Betrachtung der Gründung ist daher erforderlich, um die für die gleichmäßige Anhebung eines Bauwerks erforderliche Injektionstiefe zu ermitteln (siehe Kapitel 5.7, Abb. 5.27).

5.7 Empfehlungen für die projektspezifische Modellierung von Hebungsinjektionsmaßnahmen

Zur Modellierung von Hebungsinjektionsmaßnahmen in grobkörnigen Böden mittels FE-Berechnungen wird empfohlen:

1. Die in Kapitel 5.2.1 genannten Voraussetzungen zur Anwendung des entwickelten Modellierungskonzepts sollten erfüllt sein.
2. Ein strukturiertes Netz für Injektions- und Hilfselemente wird auf Höhe der Manschettenrohre erstellt. Hinsichtlich der Abmessungen der einzelnen Injektions- und Hilfselemente kann zunächst von ca. 6 cm × 24 cm (B × H) großen Elementen ausgegangen werden. Der Einfluss davon abweichender Elementabmessungen auf die Berechnungsergebnisse sollte überprüft werden.
3. An den Injektions- und Hilfselementen ist ein linear-elastisches Materialverhalten anzusetzen. Deren Steifigkeit sollte entsprechend dem Verformungsverhalten des umliegenden Bodens variiert werden (Steifigkeit für Erstbelastung sowie Ent- und Wiederbelastung bei einaxialer Kompression, Kapitel 5.4.2)
4. Zur Modellierung der Hebungsinjektionen wird eine vertikale Dehnung an den Injektionselementen aufgebracht. Es ist von einer linearen Verteilung der Dehnung von der „Manschettenrohrachse zur Rissspitze“ auszugehen. Die Größe der Vertikaldehnung kann anhand Gl. 5.11 bestimmt werden.

$$\varepsilon_{yy} = t_{Riss} \cdot \frac{\eta_{2D} \cdot \eta_{sukz}}{h_{IE}} \cdot 100 \qquad [\%] \qquad \text{(Gl. 5.11)}$$

   An der Manschettenrohrachse sollte die Rissdicke t zwischen 0,5–1 cm variiert werden. Am Injektionselement im Bereich der Rissspitze kann die Rissdicke t zu ca. 0,4 cm angenommen werden. Die jeweilige Vertikaldehnung an den Injektionselementen zwischen Rissspitze und Injektionspunkt kann durch Interpolation bestimmt werden.
5. Da im Zuge der baupraktischen Ausführung, üblicherweise in einem Injektionsdurchgang mehrere Manschetten entlang eines Manschettenrohrs beaufschlagt werden, kann für die Modellierung der Hebungsinjektionen von einem ebenen Verformungszustand ausgegangen werden (η_{2D} = 1,0). Sollte dies nicht zutreffen, kann η_{2D} anhand einfacher 3D-FE-Berechnungen abgeschätzt werden (siehe Kapitel 5.4.3.3).
6. Der Anpassungsfaktor η_{sukz} kann anhand von Vergleichsberechnungen zwischen einer annähernd sukzessiven und einer unmittelbaren Modellierung der „Rissbildung“ ermittelt werden (siehe Kapitel 5.4.3.4).
7. Die im jeweiligen Injektionsdurchgang erforderliche Anzahl an aktiven Injektionselementen sollte sich nach dem jeweils injizierten Suspensionsvolumen richten (siehe Tabelle 5.21).

Tabelle 5.21: Aktive Injektionselemente jeweils links und rechts des Manschettenrohrs

Injektionsvolumen pro Manschette	Anzahl aktiver Injektionselemente* im 1. Injektionsdurchgang	Zusätzliche aktive Injektionselemente* je weiteren Injektionsdurchgang
[l]	[-]	[-]
5–15	1–2	1
16–30	3–4	2

*Annahme: Breite der Injektionselemente ca. 6 cm

8. Der Verhältnisfaktor η_V und das voraussichtlich erforderliche Injektionsvolumen in situ $V_{Inj,in\ situ}$ können anhand Gl. 5.12 abgeschätzt werden.

$$V_{Inj,in\ situ} = \frac{V_{Inj,FEM}}{\eta_V} \qquad [m^3/lfm] \qquad \text{(Gl. 5.12)}$$

   Solange keine weiteren Erkenntnisse aus Vergleichsberechnungen anderer Hebungsinjektionsmaßnahmen vorliegen, kann basiernd auf den Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen $\eta_V \approx$ 7–13 % angesetzt werden.
9. Bis durch weitere Vergleichsberechnungen anderer Hebungsinjektionsmaßnahmen eine noch breitere Datengrundlage vorliegt, sollte im Rahmen neuer Projekte das entwickelte Modellierungskonzept zunächst mit den Ergebnissen der Hebungsinjektionen an einem durchzuführenden Probefeld abgeglichen werden. Falls erforderlich, können damit die für das Modellierungskonzept notwendigen Eingangsgrößen auf die projektspezifischen Bedingungen angepasst werden.
10. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der experimentellen und numerischen Untersuchungen auf die baupraktische Ausführung von Hebungsinjektionen unter Bauwerken wird vorausgesetzt, dass vor Injektionsbeginn im Bereich der späteren Injektionskörperstrukturen eine annähernd homogene Spannungsverteilung vorliegt. Dieser Spannungszustand wird bei einer gleichmäßig belasteten Plattengründung bereits nahe unterhalb der Bodenplatte erreicht. Im Fall von Gründungen mit Einzel- oder Streifenfundamten sowie bei Einzelpfählen oder Pfahlgruppen sollten die in Abb. 5.27 dargestellten Mindestabstände zwischen der Bauwerksgründung und der Injektionsebene eingehalten werden.

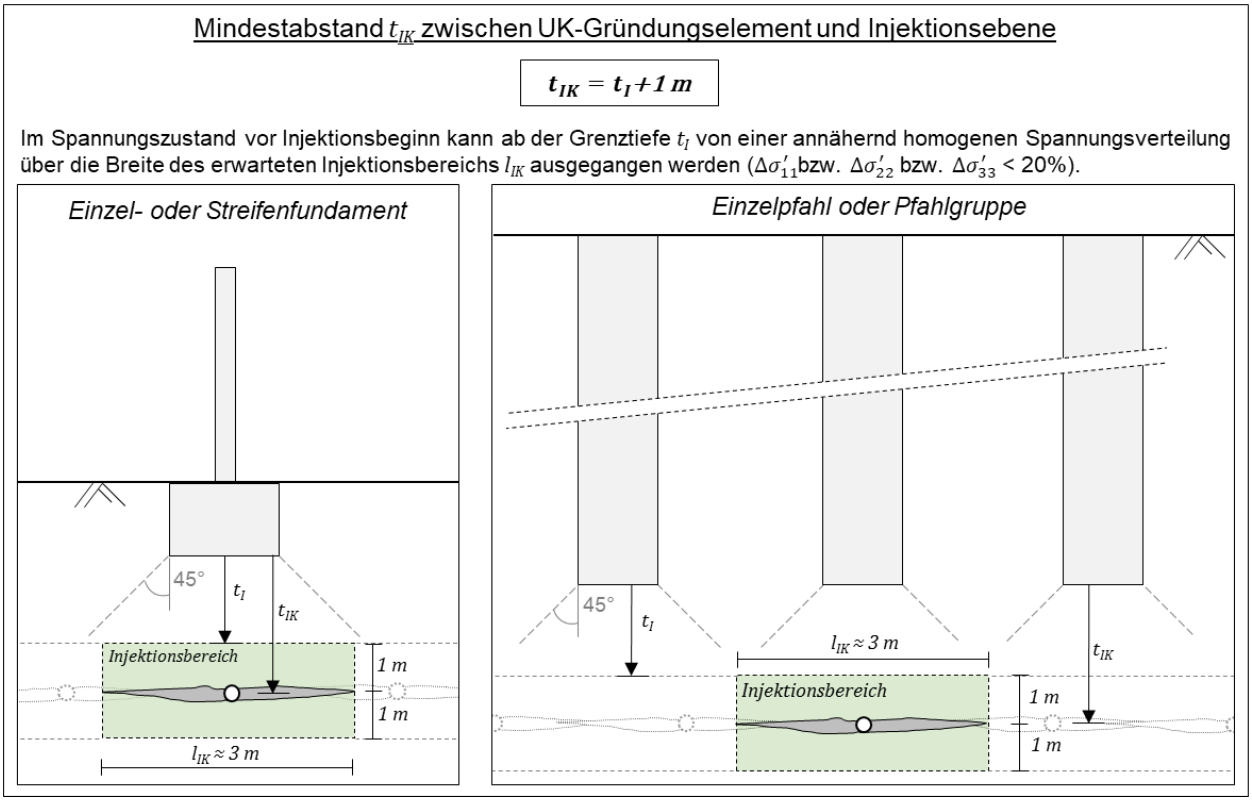


Abb. 5.27: Anordnung der Injektionsebene bei verschiedenen Gründungsarten

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Verbesserung der Planbarkeit und der Ausführung von Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt.

Bei Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden besteht aufgrund deren hoher Durchlässigkeit das Risiko, dass durch das Abfließen der injizierten Suspension in die Porenräume des Bodens und Ausfiltern des Wassers aus der Suspension, eine in Bezug auf die Injektionsmengen nur geringe Verdrängung des Bodens und damit eine geringfügige Effizienz erreicht werden. Die Erhöhung der Effizienz, die gedanklich als das Verhältnis zwischen Injektionsvolumen und erzeugten Hebungsvolumen angesehen werden kann, erfordert eine Anpassung der Suspensionseigenschaften an die Baugrundverhältnisse.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde für die Baupraxis ein einfacher Laborversuch, die sogenannte Bodenfilterpresse, entwickelt, anhand dessen projektspezifisch die Eignung einer Suspension für den vorliegenden Baugrund beurteilt werden kann. Aus dem Versuch mit der Bodenfilterpresse wird der effektive Suspensionsanteil $\eta_{S,eff}$ der untersuchten Boden-Suspensions-Kombinationen ermittelt. Je größer $\eta_{S,eff}$, desto größer ist der Anteil des injizierten Suspensionsvolumen das zur Verdrängung des Baugrunds genutzt werden kann. Die Versuche an der entwickelten Bodenfilterpresse zeigten, dass der effektive Suspensionsanteil insbesondere durch eine Reduzierung des *w/f*-Werts erhöht werden kann. Bei einer Suspension mit w/f = 1,0 betrug $\eta_{S,eff}$ ca. 38 %, wobei beispielsweise bei einem *w/f*-Wert von 0,7 ein effektiver Suspensionsanteil von $\eta_{S,eff}$ = 51 % erreicht werden konnte. Eine Variation der Feststoffzusammensetzung der Suspension oder die Zugabe von Bentonit wirkten sich hingegen bei gleichem *w/f*-Wert der Suspension nur unwesentlich auf $\eta_{S,eff}$ aus.

Um die Erkenntnisse auf noch durchlässigere Böden zu erweitern, sollten in zukünftigen Versuchsreihen Kiesböden mit unterschiedlicher Lagerungsdichte und Feinkornanteil untersucht werden.

Neben dem Eindringverhalten der Suspension in den Boden hängt die Wirksamkeit der Hebungsinjektionen auch von der Gestalt der entstehenden Injektionskörperstrukturen ab. In bisherigen Untersuchungen (Bezuijen, 2010, El-Ashaal et al., 2009, Wang et al., 2016) wurden vorwiegend kleinmaßstäbliche Injektionsversuche durchgeführt. Die tatsächlichen Einbaubedingungen mit einer Dämmerschicht um das Manschettenrohr wurde zumeist nicht berücksichtigt. Wie einzelne Versuche nahelegen, wirkt sich die Dämmerschicht jedoch maßgeblich auf die resultierenden Injektionskörperstrukturen aus (Bezuijen, 2010). Darüber hinaus wurden in bisherigen Untersuchungen maximal zwei Injektionsdurchgänge durchgeführt. Das mehrfache Injizieren, wie es in der Praxis üblich ist, wurde nicht untersucht.

Um die räumliche Ausbildung der nach mehreren Injektionsdurchgängen entstehenden Injektionskörperstrukturen zu untersuchen, wurden in diesem Forschungsprojekt bislang weltweit einmalige Großversuche durchgeführt. In der Versuchsgrube am Zentrum Geotechnik wurden Hebungsinjektionen mit bis zu 15 Injektionsdurchgängen ausgeführt und im Anschluss die ausgehärteten Injektionskörperstrukturen vollständig freigelegt. Wesentliche Erkenntnisse sind:

- Durch die Injektion entstehen im Boden ca. 0,5–1 cm dicke Injektionsrisse.
- Im Zuge der Injektion reißt die Dämmerschicht entlang des Manschettenrohrs auf. Die Suspension kann damit flächig in den Boden eindringen und es entstehen in der Nähe des Manschettenrohrs plattenartige Injektionsrisse.
- Bei Injektionen an einem Manschettenrohr ohne umhüllende Dämmerschicht dringt die Suspension vorwiegend an der Manschette in den Boden ein. Dadurch bilden sich überwiegend astförmige Injektionsrisse aus.
- Das weniger häufige Injizieren verhältnismäßig großer Injektionsmengen führte zu vergleichsweise längeren und schmäleren Injektionsrissen, als das häufigere Injizieren entsprechend kleinerer Injektionsmengen.
- Das häufige Injizieren kleinerer Injektionsmengen führte zu großflächigen, plattenartigen Injektionskörperstrukturen.
- Durch das häufigere Injizieren kleiner Suspensionsmengen konnten größere Hebungen erreicht werden, als durch das weniger häufige Injizieren entsprechend größerer Injektionsmengen.
- Nach mehreren Injektionsdurchgängen bildeten sich im Bereich zwischen den Manschettenrohren eine durchgängige Injektionskörperstruktur aus mehreren Lagen plattenförmiger Injektionsrisse aus.

Basierend auf den Erkenntnissen der Großversuche wurde ein Konzept zur Modellierung von Hebungsinjektionen zur Anwendung in FE-Berechnungen erarbeitet. Auf Grundlage der in den Großversuchen erzeugten Injektionskörperstrukturen wurden die zur Modellierung notwendigen Eingangsgrößen abgeleitet (Größe des Injektionsbereichs und der dort entstehenden Verformungen). Einflüsse aus der räumlich begrenzten Anordnung des 2. Großversuchs und der vereinfachten Modellierung der Injektionsrisse während des Injektionsvorgangs wurden durch die Anpassungsfaktoren η_{2D} bzw. η_{sukz} berücksichtig. Diese Anpassungsfaktoren wurden im Rahmen zusätzlicher 2D- und 3D-Berechnungen ermittelt.

Die FE-Berechnungen zum 2. Großversuch zeigten, dass die ermittelte Oberflächenhebung wesentlich von der angenommenen Dicke der Injektionsrisse abhängt. Unter der Annahme einer Rissdicke t = 0,5 cm konnte eine gute Übereinstimmung mit den Verformungsmessungen in situ erreicht werden.

Darauf aufbauend wurde untersucht, ob mit Hilfe des entwickelten Modellierungskonzepts auch die durch Hebungsinjektionen erzeugten Oberflächenhebungen im Rahmen einer Baumaßnahme nachgerechnet werden können. Als Anwendungsbeispiel dienten die Hebungsinjektionen am Probefeld Oberau. Auch in diesem Fall zeigte sich bei einer

angenommenen Rissdicke von t = 0,5 cm eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Oberflächenhebungen.

Die Auswertung der Injektionsvolumina zeigte, dass die in den FE-Berechnungen erforderlichen Injektionsmengen deutlich geringer waren, als die in der Bauausführung injizierten Suspensionsmengen. Sowohl im 2. Großversuch als auch beim Probefeld Oberau ergab sich ein ähnliches Verhältnis zwischen den Injektionsvolumina der FE-Berechnungen und denen der Bauausführung ($\eta_V \approx$ 7–13 %). Um zu untersuchen weshalb sich die Injektionsmengen derart unterscheiden, sind in Zukunft noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Für die Ausführung von Hebungsinjektionsmaßnahmen in grobkörnigen Böden wird empfohlen, Suspensionen mit einem möglichst geringen w/f-Verhältnis zu verwenden (w/f < 1,0). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Suspension dennoch eine ausreichende Pumpbarkeit aufweist.

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Hebungsinjektionen ist das häufigere Injizieren kleiner Suspensionsmengen dem Injizieren großer Injektionsmengen zu bevorzugen (z.B. zweimal 30 l anstatt einmal 60 l). Das häufigere Injizieren verhältnismäßig kleiner Injektionsmengen, insbesondere in den ersten Injektionsdurchgängen im noch „unverbesserten Boden“, wirkt sich günstig auf die Ausbildung von horizontalen (hebungswirksamen) Injektionskörperstrukturen aus. Die Ausbildung vertikaler (nicht hebungswirksamer) Injektionskörperstrukturen wird minimiert. Dadurch lässt sich auch die Gefahr von Suspensionseintritten in entsprechend vorgeschädigte oder sensible Gebäude reduzieren. Wie die Großversuche zeigten, entstehen bereits in den ersten Injektionsdurchgängen auch bei kleinen Injektionsvolumina (5–10 l pro Injektion) Injektionsrisse mit einer Länge von über 1 m. Demzufolge sollte auch bei diesen kleinen Injektionsmengen ein entsprechender Tiefenabstand von mindestens 1 m zur Bodenplatte des Gebäudes eingehalten werden.

Bei der Anordnung der Tiefenlage der Injektionsebene unter Bauwerken mit Einzelfundamenten, Streifenfundamenten oder Pfahlgründungen sollte ein Mindestabstand t_{IK} zur Fundamentsohle bzw. Pfahlspitze eingehalten werden, so dass vor Injektionsbeginn von homogenen Spannungsverhältnissen ausgegangen werden kann.

Die im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten experimentellen und numerischen Werkzeuge leisten einen wichtigen Beitrag, um die Planung und Ausführung von Hebungsinjektionen in grobkörnigen Böden zu verbessern.

Literaturverzeichnis

Amann, N. (2019). *Untersuchungen zum Filtrationsverhalten von Zementsuspensionen bei der Injektion grobkörniger Böden* (unveröffentlichte Masterarbeit). Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München.

Arwanitaki, A. (2009). *Über das Kontaktverhalten zwischen einer Zweiphasenschlitzwand und nichtbindigen Böden* (Dissertation, Uni Bochum). Ruhr-Universität Bochum, https://www.bgu.ruhr-uni-bochum.de/bgu/mam/dissertationarwanitaki2009.pdf

Bauer, E. 1996. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils and Foundations, 36*(1), 13–26. http://dx.doi.org/10.3208/sandf.36.13

Bezuijen, A. (2010). *Compensation Grouting in Sand – Experiments, Field Experiences and Mechanisms*. (Dissertation, TU Delft). Repository TU Delft, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5c19254c-6a3f-49da-845d-329fae1a3ca8/datastream/OBJ/download

Bezuijen, A. & van Tol, A.F. (2012). Compensation grouting: Mechanisms determining the shape of the grout body. In G. Viggiani (Hrsg.), *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground* (S. 861–868). CRC Press.

Cambefort, H. (1969). *Bodeninjektionstechnik - Einpressungen in Untergrund und Bauwerke*. Bauverlag Wiesbaden.

Domes, X.A.L. (2015). *Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive Soil* (Dissertation, NTNU Trondheim). Hydraulic Engineering Repository, https://hdl.handle.net/20.500.11970/104590

El-Ashaal, A.A., Abdel-Fattah, A., Fayes, A.L. & Younes, M.F. (2009). Investigation of the performance and limitations of fracture grouting in sand. In M. Hamza et al. (Hrsg.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (S. 2188–2191). IOS Press. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-2188

Falk, E. (1998). *Bodenverbesserung durch Feststoffeinpressung mittels hydraulischer Energie* (Dissertation, TU Wien). Technische Universität Wien

Fillibeck, J. (2012). *Oberflächensetzungen beim Tunnelvortrieb im Lockergestein – Prognose, Messung und Beeinflussung* (Habilitation, TU München). mediaTUM, http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20121221-1128094-0-2

Gabener, H.G., Raabe, E.W. & Wilms, J. (1989). Einsatz von Soilfracturing zur Setzungsminderung beim Tunnelvortrieb. In DGEG (Hrsg.) *Taschenbuch für den Tunnelbau*. Verlag Glückauf.

Gafar, K., Soga, K., Bezuijen, A., Sanders, M.P.M. & van Tol, A.F. (2008). Fracturing of sand in compensation grouting. In C.W.W. Ng, H.W. Huang & G.B. Liu (Hrsg.), *Geotechnical*

Aspects of Underground Construction in Soft Ground (S. 281–286). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203879986

Gasper, H. (1990). *Handbuch der industriellen fest/flüssig-Filtration*. Huthig Verlag.

Geil, M. (1989). *Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand* (Dissertation, TU Braunschweig). Mitteilungen des Instituts Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 28

Grotenhuis, R. (2004). *Fracture Grouting in Theory – Modelling of Fracture Grouting in Sand* (Masterthesis, TU Delft). Repository TU Delft, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f870118d-94d0-45ca-8bfd-f84aef8e003b/datastream/OBJ/download

Gustin, E.J.G., Karim, U.F.A. & Brouwers H.J.H. (2007). Bleeding characteristics for viscous cement and cementbentonite grouts. *Géotechnique, 52*(4), 391-395.

Gudehus, G., Amorosi, A., Gens, A., Herle, I., Kolymbas, D., Mašín, D., Muir Wood, D., Nova, R., Niemunis, A., Pastor, M., Tamagnini, C. & Viggiani, G. (2008). The soilmodels.info project. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32*(12), 1571-1572.

Henzinger, C. 2017. *Bodenverbesserung mit Recyclingmaterial aus Bauschutt* (Dissertation, TU München). mediaTUM, http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170621-1325464-1-3

Herle, I. & Gudehus, G. (1999). Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 4*(5), 461–486. http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199909)4:5%3C461::AID-CFM71%3E3.0.CO;2-P

Kellner, F. (2020). *Untersuchungen zur Injizierbarkeit grobkörniger Böden* (unveröffentlichte Bachelorarbeit). Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München

Kuk, M. (2004). *Untersuchungen zur Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung im Lockergestein durch Filtrationsmechanismen* (Dissertation, Uni Hannover). Repositorium Uni Hannover, https://doi.org/10.15488/6395

Kummerer, C. (2003). *Numerical modelling of displacement grouting and application to case histories* (Dissertation, TU Graz). Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technische Universität Graz, Heft 19

Lesemann, H. (2010). *Anwendung polymerer Stützflüssigkeiten bei der Herstellung von Bohrpfählen und Schlitzwänden* (Dissertation, TU München). mediaTUM, http://mediatum.ub.tum.de/1592626

Mašín, D. (2017). PLAXIS implementation of HYPOPLASTICITY. Report. https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/plaxumat/download/Hypo-Plaxis.pdf

Mašín, D. (2019). *Modelling of Soil Behaviour with Hypoplasticity – Another Approach to Soil Constitutive Modelling* (1. Aufl.). Springer International Publishing.

McKinley, J.D. & Bolton, M.D. (1999). A geotechnical description of fresh cement grout – Filtration and consolidation behaviour. *Magazine of Concrete Research, 51*(5), 295-307. https://doi.org/10.1680/macr.1999.51.5.295

Moseley, M. P. & Kirsch, K. (2004). *Ground improvement* (2.Aufl.). Spon press.

Mück-Thum, O. (2018). *Untersuchungen zur Ausbildung von Injektionskörpern bei der Ausführung von Hebungsinjektionen* (unveröffentlichte Masterarbeit). Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München

Müller-Kirchenbauer, H. 1972. Einflüsse der Filtratbildung auf die Stabilität von Schlitzwänden. In DGEG (Hrsg.), *Vorträge der Baugrundtagung 1972 in Stuttgart* (S. 843–860). Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau e.V.

Niemunis, A. & Herle, I. 1997. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 2*(4), 297–299. http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4%3C279::AID-CFM29%3E3.0.CO;2-8

PLAXIS (2019). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Bentley Systems International Limited.

Raabe, E.W. & Esters, K. (1986). Injektionstechniken zur Stillsetzung und zum Rückstellen von Bauwerkssetzungen. In DGEG (Hrsg.), *Vorträge der Baugrundtagung 1986 in Nürnberg* (S. 337-366). Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau e.V.

Raabe, E.W. & Stockhammer, P. (1995). Einsatz von Soilcrete und Soilfrac im Tiefbau – Möglichkeiten und Grenzen beider Injektionstechniken. In Semprich (Hrsg.), *Innovationen in der Geotechnik – Entwicklungen der letzten Jahre. Beiträge zum 10. Christian Veder Kolloquium* (S. 127–144). TU Graz.

Rebstock, D. 2011. Verspannung und Entspannung von Sand entlang von Baukörpern (Dissertation, Uni Karlsruhe). Repository KITopen, http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000023891

Sailer, M., Fillibeck, J., Geuder, S. 2018. Ausführung einer Hebungsinjektion in stark durchlässigen Kiesen – Konzept und Erfolg. In STUVA (Hrsg.), *Forschung + Praxis 52. Sicher abdichten und ertüchtigen. Vorträge zum Forum Injektionstechnik 2018* (S. 9–15). Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e.V..

Schlötzer, C. (1995*). Filtrationsverhalten von Dichtwandsuspensionen an flüssigkeitsgestützten Erdwänden* (Dissertation, Uni Hannover). Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover, Heft 42

Schulze, B. (2002). Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. *Bautechnik, 79*(8), 499–508 und (9), 589–597.

Soga, K., Bolton, M.D., Au, S.K.A., Komiya, K., Hmelin, J.P., Van Cotthem, A., Buchet, G. & Michel, J.P. (1999). Development of compensation grouting modelling and control system. In O. Kusakabe, K. Fujita & Y. Miyazaki (Hrsg.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (S. 425–430). Balkema.

Thomas, A. (2018). *Untersuchungen zum Eindringverhalten von Zementsupsensionen in grobkörnige Böden* (unveröffentlichte Masterarbeit). Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München.

von Wolffersdorff, P.-A. 1996. A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, *1*(3), 251–271, https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199607)1:3%3C251::AID-CFM13%3E3.0.CO;2-3

Wang, Q., Wang, S., Sloan, S.W., Sheng, D. & Pakzad, R. (2016). Experimental investigation of pressure grouting in sand. *Soils and Foundations, 56*(2), 161–173. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.001

Wittmann, L. (1980). *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien* (Dissertation, Uni Karlsruhe). Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 86

Wawryzniak, C. (2002). *Simulation von Hebungsinjektionen durch numerische Berechnungen* (Dissertation, RWTH Aachen). WBI Print 12, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

Wisser, C., Augarde, C.E. & Burd, H.J. (2005). Numerical modelling of compensation grouting above shallow tunnels. *International Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics, 29*(5), 443–471. http://dx.doi.org/10.1002/nag.421

verwendete Normen

DIN 4127:2014, Erd- und Grundbau – Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangstoffe

DIN EN 12715:2000, Injektionen

DIN 18126:1996-11, Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung

Abbildungsverzeichnis

Bildnachweis
Alle Abbildungen und Fotos – Martin Sailer, mit Ausnahme von:

- Abb. 3.1 – Fotos: Anna Thomas
- Abb. 3.3, links – Foto: Anna Thomas
- Abb. 4.5 – Foto: Oliver Mück-Thum

Abb. 1.1: links: Vorwiegend vertikale Rissstrukturen falls $\sigma'_h < \sigma'_v$ 13
Abb. 2.1: Kornverteilung der verwendeten Böden 15
Abb. 2.2: Kornverteilung der Feststoffe 18
Abb. 2.3: links: Labormischer 19
Abb. 3.1: links: Versuchsaufbau 23
Abb. 3.2: Gemessene Filtratmassen bei Versuchen der ersten Testreihe 27
Abb. 3.3: links: Entnommene Probe eines Filterkuchens 28
Abb. 3.4: Ermittelter Suspensionsrückstand bei unterschiedlichen Lagerungsdichten 31
Abb. 3.5: Ermittelter Suspensionsrückstand bei Versuchen mit dem Prototyp der Bodenfilterpresse 32
Abb. 3.6: links: Versuchsstand der Bodenfilterpresse 34
Abb. 3.7: Injektionsstempel 34
Abb. 3.8: Montagezustände während der Versuchsvorbereitung: A-Bodeneinbau, B-Montage der Grundplatte, C-Wenden und positionieren auf der Unterkonstruktion, D-Versuchsbeginn 36
Abb. 3.9: Relative Filtratmasse mit und ohne Korrektur durch Kontrollmessung 39
Abb. 3.10: Differenz des effektiven Suspensionsanteils zwischen Erst- und Wiederholungsversuch 41
Abb. 3.11: Einfluss des Injektionsdrucks auf die Versuchsdauer 42
Abb. 3.12: links: Entwicklung der relativen Filtratmasse 43
Abb. 3.13: Einfluss der Suspensionsmischung auf die relative Filtratmasse und den effektiven Suspensionsanteil 44
Abb. 3.14: Einfluss des Bentonitgehalts auf die relative Filtratmasse und den effektiven Suspensionsanteil 45
Abb. 3.15: Einfluss des *w/f*-Werts auf den effektiven Suspensionsanteil 46
Abb. 3.16: Gemessene Feststoffmasse im Filtrat 47
Abb. 4.1: Übersicht des Versuchsaufbaus 51
Abb. 4.2: Schema des Versuchsaufbaus im Schnitt (an den Manschetten M0 und M5 wurde nicht injiziert) 51
Abb. 4.3: Schematischer Grundriss des Versuchsaufbaus 52
Abb. 4.4: Verbundkörper aus Manschettenrohr und umhüllender Dämmerschicht (2. Großversuch) 53
Abb. 4.5: Eingefärbte Suspensionen (1. Großversuch) (Mück-Thum, 2018) 54
Abb. 4.6: Injektionsgeräte (2. Großversuch) 55
Abb. 4.7: Seilzug-Wegaufnehmer zur lokalen Verformungsmessung (1.Großversuch) 56

Abb. 4.8: Anordnung der Seilzug-Wegaufnehmer und Manschettenrohre im Schnitt 56
Abb. 4.9: Funktionsprinzip des Schlauchwaagenmesssystems (Fillibeck, 2012) 57
Abb. 4.10: Einbau des Schlauchwaagenmesssystems 58
Abb. 4.11: Position der Schlauchwaagensensoren (Skizze nicht maßstäblich) 59
Abb. 4.12: Einbau des Messschlauchs der hydrostatischen Linienvermessung 60
Abb. 4.13: Einbauplan des Messschlauchs der hydrostatischen Linienvermessung 61
Abb. 4.14: Saugbaggerarbeiten zum Bodenausbau (oben). Freilegen und Zerlegen der Injektionskörper (unten) 62
Abb. 4.15: Aufnahme der Injektionskörperstrukturen. Links die Originalaufnahme, rechts die Aufnahme nach der Bildbearbeitung (hier mittels PowerPoint: Schärfe +10 %, Helligkeit+5 %, Kontrast +15 %,Farbsättigung 130 %, Temperatur 7.500) 63
Abb. 4.16: Austritt von Suspension im Bereich der Durchführung des Manschettenrohrs an der Vorderwand des Versuchsaufbaus 66
Abb. 4.17: Injiziertes Suspensionsvolumen 67
Abb. 4.18: Injizierten Suspensionsmengen in den Durchgängen 1 bis 3 67
Abb. 4.19: Gemessene Aufsprengdrücke 68
Abb. 4.20: Gemessene Hebungen im 1. Großversuch 69
Abb. 4.21: Gemessene Hebungen im 1. Großversuch 70
Abb. 4.22: Übersicht der Injektionskörper des 1. Großversuchs 71
Abb. 4.23: Seitenansicht der Injektionskörper des 1. Großversuchs 72
Abb. 4.24: Austritt von geringen Suspensionsmengen an der Geländeoberfläche 73
Abb. 4.25: Injektionskörper am Manschettenrohr 1 74
Abb. 4.26: Großflächige Plattenstrukturen im hinteren Bereich von Rohr 1 75
Abb. 4.27: Mittlerer und vorderer Rohrabschnitt mit horizontalen und vertikalen Plattenstrukturen 76
Abb. 4.28: Injektionskörper am Manschettenrohr 2 77
Abb. 4.29: links: Schräg geneigte Anordnung der Plattenstrukturen (je nach Platte $\beta \approx 45–70°$). rechts: Injizierte Suspensionsmengen an Manschettenrohr 2 77
Abb. 4.30: Seitenansichten des Injektionskörpers an Rohr 3 78
Abb. 4.31: Vorderansicht des Injektionskörpers an Rohr 3 78
Abb. 4.32: links: Austritt der Suspension im Winkel von ca. 45° im Bereich der Manschette 1 (rechte Rohrseite) 80
Abb. 4.33: links: Auskragungen zwischen Manschette 1 und 2 (1r) sowie zwischen Manschette 2 und 3 (2g) auf der linken Rohrseite 80
Abb. 4.34: links: Aufreißen der Dämmerschicht entlang der Rohrachse (hier am Bsp. von Rohr 1) 81
Abb. 4.35: links und rechts: Radiales Aufreißen der Dämmerschicht entlang der Rohrachse sowie Suspension zwischen Dämmer und Manschettenrohr 82
Abb. 4.36: Verbund aus mehreren Schichten an Injektionsrissen/ Plattenlagen 82
Abb. 4.37: Detailaufnahme eines Injektionsrisses 83
Abb. 4.38: Verstopfte Manschette (hier Rohr 1, Manschette 3) 83
Abb. 4.39: Übersicht der injizierten Suspensionsmengen [l] 86

Abb. 4.40: Injizierte Suspensionsmengen je Rohr und Durchgang 87
Abb. 4.41: links: Aufsprengdrücke an Manschette 1 der Rohre 1, 2 und 3. 88
Abb. 4.42: Verformungsmessungen der hydrostatischen Linienvermessung am Ende des 2. Großversuchs (nach 15. Durchgängen) 88
Abb. 4.43: Verformungsmessungen der Schlauchwaage 89
Abb. 4.44: Entwicklung von Effizienz, Hebungs- und Injektionsvolumen 90
Abb. 4.45: Freigelegte Injektionskörper des 2. Großversuchs 91
Abb. 4.46: links: Verteilung ausgeprägter horizontaler und vertikaler Strukturen. 92
Abb. 4.47: Injektionskörper am Rohr 1 92
Abb. 4.48: Injektionskörper am Rohr 2 93
Abb. 4.49: Injektionskörper am Rohr 3 94
Abb. 4.50: Schrittweise Zerteilung der Injektionskörper 95
Abb. 4.51: links: Aufgetrennte horizontale Plattenstruktur (Rohr 1, 1h) 95
Abb. 4.52: links und rechts: Verbund aus mehreren Platten mit einer Dicke von insgesamt ca. 10 cm 96
Abb. 4.53: Horizontale Plattenstruktur am Rohr 1: Neue Injektionsrisse folgen bestehenden Strukturen und führen damit zu einer Vergrößerung der Plattenstruktur 96
Abb. 4.54: Injektionskörperstrukturen am Rohr 2 und 3 98
Abb. 5.1: Schema zur Modellierung der Hebungsinjektionen (Betrachtung quer zur Manschettenrohrachse) 102
Abb. 5.2: Entwicklung der Grenzporenzahlen nach Gleichung von Bauer (1996) 106
Abb. 5.3: Kalibrierung des Parameters α (links) und des Parameters β (rechts) anhand der Spannungs-Dehnungsverläufe eines triaxialen Scherversuchs (Mašín, 2019) 107
Abb. 5.4: 2D-FE-Modell zum 2. Großversuch 108
Abb. 5.5: Injektions- und Hilfselemente 109
Abb. 5.6: 3D-FE-Modelle zur Ermittlung von η_{2D} 112
Abb. 5.7: Kontur der Vertikalverformungen der 3D-FE-Berechnungen (Draufsicht) 113
Abb. 5.8: Sukzessive und vereinfachte Modellierung der „Rissbildung“ 114
Abb. 5.9: Vertikalverformungen bei sukzessiver „Rissbildung“ und unmittelbarer „Rissbildung“ mit und ohne Berücksichtigung des Anpassungsfaktors η_{sukz} 115
Abb. 5.10: Effektive Vertikal- und Horizontalspannungen 118
Abb. 5.11: Vertikalspannungen σ'_{yy} (oben) und Horizontalspannungen σ'_{xx} (unten) 119
Abb. 5.12: Vertikal- und Horizontalspannungen im Injektionsbereich 120
Abb. 5.13: Gewölbewirkung Hauptspannungen 120
Abb. 5.14: Verformungsmessungen und Ergebnisse der FE-Berechnungen 121
Abb. 5.15: Geologischer Längsschnitt im Gießenbachtal 124
Abb. 5.16: Übersicht Probefeld 125
Abb. 5.17: Anzahl der Beaufschlagungen pro Manschette bis zum 11. Injektionsdurchgang und ungefähre Lage der Schlauchwaagenmessstellen 127
Abb. 5.18: FE-Modell zum Probefeld Oberau 128
Abb. 5.19: Modellausschnitt im Bereich der Injektionselemente (nach 1. Injektionsdurchgang an allen Rohren) 128

Abb. 5.20: Vertikale Oberflächenverformungen bei „sukzessiver“ und „unmittelbarer“ Modellierung der entstehenden Injektionskörper 131
Abb. 5.21: Effektive Hauptspannungen 135
Abb. 5.22: Effektiver mittlerer Druck $p´$ (Injektionselemente sind in der Darstellung ausgeblendet) 135
Abb. 5.23: Vergleich zwischen Verformungsmessungen und FE-Berechnungen..... 136
Abb. 5.24: Vertikalverformungen an den Injektionselementen (links) und an der Geländeoberfläche (rechts) bei unterschiedlichen Lagerungsdichten 137
Abb. 5.25: Vertikalverformungen an den Injektionselementen (links) und an der Geländeoberfläche (rechts) bei unterschiedlichem Steifemodul E_S der Injektions- und Hilfselemente 138
Abb. 5.26: Vergleich zwischen Verformungs-messungen und FE-Berechnungen..... 139
Abb. 5.27: Anordnung der Injektionsebene bei verschiedenen Gründungsarten..... 144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Kennwerte der verwendeten Böden 15
Tabelle 2.2: Feststoffe für Suspensionen 16
Tabelle 2.3: Kennwerte der verwendeten Suspensionen 19
Tabelle 3.1: Komponenten des Prototyps 24
Tabelle 3.2: Ausgeführte Varianten des Bodeneinbaus 24
Tabelle 3.3: Versuchsrandbedingungen für die erste Testreihe mit dem Prototyp. 26
Tabelle 3.4: Variation der Versuchsbedingungen bei Untersuchungen mit dem Prototyp 28
Tabelle 3.5: Bauteile der Bodenfilterpresse 35
Tabelle 3.6: Übersicht der Voruntersuchungen 39
Tabelle 3.7: Versuchsrandbedingungen für die Versuche mit der Bodenfilterpresse 40
Tabelle 3.8: Verwendete Suspensionen 40
Tabelle 3.9: Boden-Suspension-Kombinationen der Erst- und Wiederholungsversuche 41
Tabelle 4.1: Ergebnisse der Einbaukontrolle 53
Tabelle 4.2: Zeitliche Abfolge der Injektionen des 1. Großversuchs 64
Tabelle 4.3: Injektionsparameter der durchgeführten Injektionen des 1. Großversuchs 65
Tabelle 4.4: Injektionsmengen am Rohr 1 74
Tabelle 4.5: Injektionsmengen am Rohr 2 76
Tabelle 4.6: Injektionsmengen am Rohr 3 79
Tabelle 4.7: Ablauf des 2. Großversuchs 85
Tabelle 5.1: Hypoplastische Stoffmodellparameter 109
Tabelle 5.2: Parameter der Intergranularen Dehnung 110
Tabelle 5.3: Parameter der Injektions- und Hilfselemente 110
Tabelle 5.4: Aktive Injektionselemente 111
Tabelle 5.5: Aktive Injektionselemente je Injektionsdurchgang je Rohrseite 115
Tabelle 5.6: Gewählter Anpassungsfaktor η_{sukz} 115
Tabelle 5.7: Eingangsgrößen und daraus ermittelte vertikale Volumendehnung der Injektionselemente 116
Tabelle 5.8: Berechnungsphasen 117
Tabelle 5.9: Übersicht der durchgeführten Berechnungsvarianten 118
Tabelle 5.10: Injektionsvolumina im 2. Großversuch und in den FE-Berechnungen 122
Tabelle 5.11: Durchgeführte Injektionen und injizierte Suspensionsmengen 125
Tabelle 5.12: Aktive Injektionselemente 129
Tabelle 5.13: Gewählter Anpassungsfaktor η_{sukz} für die FE-Berechnungen am Probefeld Oberau 130
Tabelle 5.14: Eingangsgrößen und daraus ermittelte vertikale Volumendehnung der Injektionselemente 131
Tabelle 5.15: Hypoplastische Stoffmodellparameter für die Oberen Kiese 132
Tabelle 5.16: Anfangsporenzahl und Wichten der Oberen Kiese 132
Tabelle 5.17: Parameter für Injektions- und Hilfselemente 132
Tabelle 5.18: Berechnungsphasen 133

Tabelle 5.19: Übersicht der Berechnungsvarianten 134
Tabelle 5.20: Injektionsvolumen in FE-Berechnungen und Verbrauch in situ..... 139
Tabelle 5.21: Aktive Injektionselemente jeweils links und rechts des Manschettenrohrs..... 143

Anhang

A.1 Übersicht der Versuche am finalen Versuchsstand der Bodenfilterpresse

	Boden			Suspension			Versuchsparameter		Ergebnis
Versuchs-bezeich-nung	**Boden-typ**	**Wasser-gehalt**	**Trocken-dichte**	***w/f*-Wert**	**Feststoffe**	**Bentonit-anteil**	**Injektions-druck**	**Versuchs-dauer**	**effektiver Suspensions-anteil $\eta S,eff$**
		[%]	[g/cm³]	[-]	[-]	[%]	[bar]	[mm:ss]	[%]
A_5_06	Boden 1	9,57	1,80	1,0	FP 1	k. A.	2,0	35:00	**45,29**
A_5_07	Boden 1	9,57	1,80	1,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	40,92
A_5_14	Boden 1	9,57	1,80	1,0	CEM I	0	7,0	07:30	41,01
A_5_22	Boden 1	9,57	1,80	2,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	20,31
A_5_24	Boden 1	9,57	1,80	1,0	FP 1	k. A.	7,0	12:30	**40,98**
K_2_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	42,57
K_2_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	42,40
K_3_01	Boden 2	3,5	1,85	1,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	2,82
K_3_02	Boden 2	3,5	1,85	1,0	FP 1	k. A.	7,0	07:30	2,66
K_4_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1(50%)	0	7,0	07:30	40,05
K_4_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1(50%)	0	7,0	07:30	41,10
K_5_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1(70%)	0	7,0	07:30	38,78
K_5_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1(70%)	0	7,0	07:30	38,32
K_5_03	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1(70%)	0	7,0	07:30	39,51
K_6_01	Boden 1	9,57	1,8	0,8	FP 1	k. A.	7,0	07:30	50,42
K_6_02	Boden 1	9,57	1,8	0,8	FP 1	k. A.	7,0	07:30	53,93
K_7_01	Boden 1	9,57	1,8	1,2	FP 1	k. A.	7,0	07:30	36,52
K_7_02	Boden 1	9,57	1,8	1,2	FP 1	k. A.	7,0	07:30	34,12
K_8_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%)	0	7,0	07:30	38,96
K_8_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%)	0	7,0	07:30	38,35
K_9_01	Boden 1	9,57	1,8	0,8	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%)	0	7,0	07:30	46,34
K_9_02	Boden 1	9,57	1,8	0,8	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%)	0	7,0	07:30	46,38
K_11_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	1	7,0	07:30	39,69
K_11_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	1	7,0	07:30	40,16
K_12_01	Boden 2	3,5	1,85	0,6	CEM I	0	7,0	07:30	13,73

	Boden			Suspension			Versuchsparameter		Ergebnis
Versuchs-bezeich-nung	**Boden-typ**	**Wasser-gehalt**	**Trocken-dichte**	***w/f*-Wert**	**Feststoffe**	**Bentonit-anteil**	**Injektions-druck**	**Versuchs-dauer**	**effektiver Suspensions-anteil $\eta S,eff$**
		[%]	[g/cm³]	[-]	[-]	[%]	[bar]	[mm:ss]	[%]
K_13_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	2	7,0	07:30	38,62
K_13_02	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	2	7,0	07:30	39,07
K_14_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	FP 2	k. A.	7,0	07:30	37,84
K_14_03	Boden 1	9,57	1,8	1,0	FP 2	k. A.	7,0	07:30	38,18
K_15_01	Boden 1	9,57	1,8	0,7	FP 2	k. A.	7,0	07:30	51,33
K_15_02	Boden 1	9,57	1,8	0,7	FP 2	k. A.	7,0	07:30	50,25
K_16_01	Boden 1	9,57	1,8	0,8	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	2	7,0	07:30	46,81
K_17_01	Boden 1	9,57	1,8	1,0	CEM I + TL1 (50%) + KS (20%) + B	4	7,0	07:30	39,41

A.2 1. Großversuch

A.2.1 Verwendete Farbpigmente

Tabelle A. 1: Übersicht der im 1. Großversuch verwendeten Farbpigmente

Injektionsdurchgang	Pigmenttyp	Beschreibung
1	Klinkerrot	Pulver, Eisenoxid Klinkerrot
2	Marineblau	Pulver, Natrium-Aluminium-Sulfo-Silikat.
3	Grün	Pulver, Chromoxid Grün

A.2.2 Suspensionsmischungen

Tabelle A. 2: Zugabe an Farbpigmenten und Dichte der Suspension (*w/f*-Wert = 1,0)

Durchgang (verwendetes Farbpigment)	Injektionen an Manschette Nr.	Zugabe Farbpigment	Dichte der Suspension
	[-]	[M.%]*	[g/cm³]
1 (rot)	1	4	1,480
	2	2	1,472
	3	4	1,480
2 (blau)	1	4	1,479
	2	2	1,470
	3	4	1,479
3 (grün)	1	6	1,498
	2	2	1,482
	3	6	1,498

*Bezug: Feststoffmasse der Suspension

A.2.3 Suspensionsprüfung 1. Großversuch

Tabelle A. 3: Ergebnisse der Suspensionsprüfung

Verwendeter Feststoff	*w/f*-Wert	Pigment-zugabe	Dichte	Marsh-Zeit		Fließ-grenze	Absetz-maß	Filtrat-menge
		[%]	[kg/m³]	[s]		[N/m²]	[ml]	[ml]
				$t_{M,1000}$	$t_{M,1500}$			
FP 1	0,8	-	1,556	118	195	64,0	2	100,3
	1,0	-	1,473	44	79	54,6	8	129,0
	1,0	4 (rot)	1,495	56	118	54,4	7	123,2
	1,0	4 (blau)	1,485	59	126	54,5	6	118,1
	1,0	6 (grün)	1,505	56	104	54,3	8	119,3

A.2.4 Freigelegte Injektionskörper

A.2.5 Arbeitsfortschritt im Zuge der Saugbaggerarbeiten

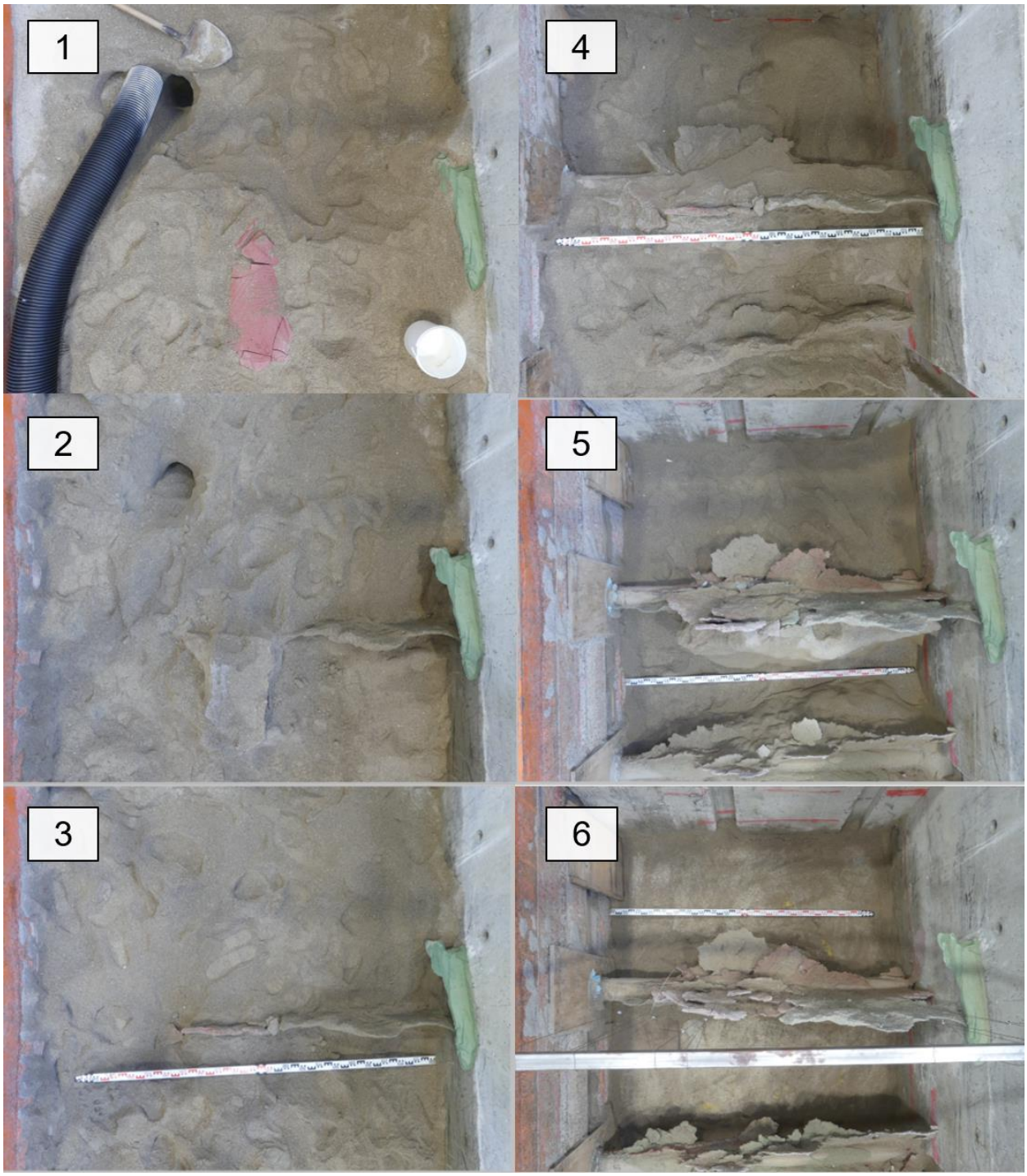


Abb. A 1: Schrittweises Freilegen der Injektionskörper (hier beispielhaft 1. Großversuch, Rohr 1)

A.2.6 Suspensionsaustritte an der Geländeoberfläche (1. Großversuch)

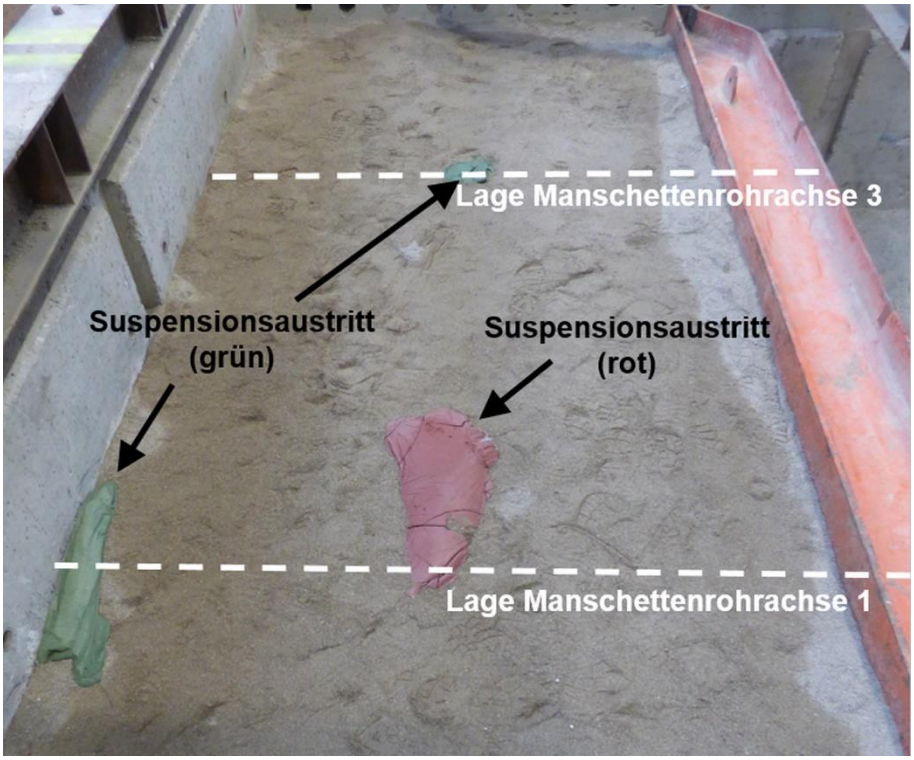


Abb. A 2: Übersicht der Suspensionsaustritte an der Geländeoberfläche (1. Großversuch)

Abb. A 3: Detailansicht der Suspensionsaustritte an der Geländeoberfläche (1. Großversuch)

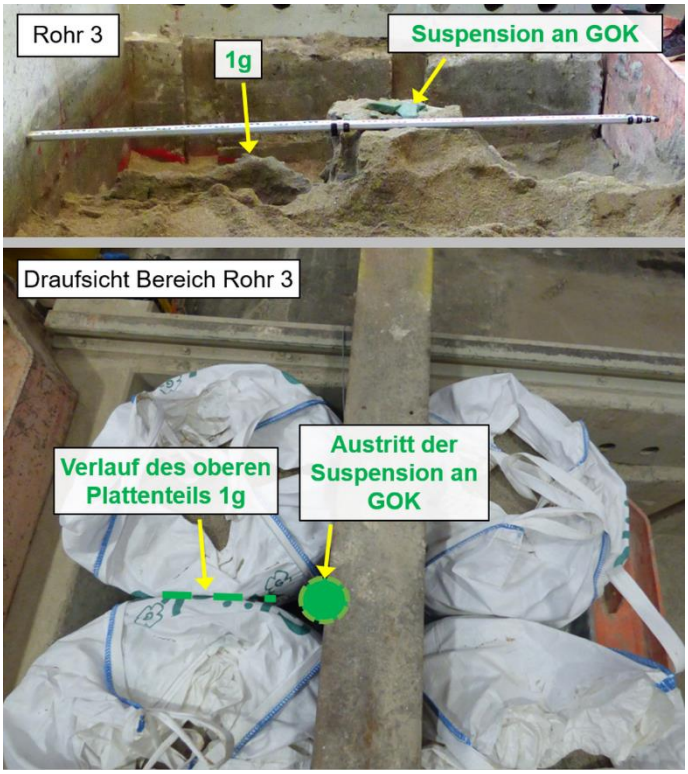


Abb. A 4: Suspensionsaustritte an der Geländeoberfläche bei Rohr 3 (1. Großversuch)

Zwischen dem in Abb. A 4 dargestellten Injektionskörper 1g und dem Suspensionsaustritt an GOK bestand eine filigrane Injektionskörperstruktur, die im Zuge der Freilegung entfernt werden musste.

A.2.7 Ansicht der Versuchsanordnung im 1. Großversuch

In Abb. A 5: Ansicht der VersuchsanordnungAbb. A 5 ist eine Ansicht des 1. Großversuchs dargestellt. Während Rohr 2 mittig unter den Big Bags positioniert ist (Zone mit voller Lasteinleitung durch die Big Bags), verlaufen die Rohre 1 und 3 im Bereich zwischen zwei angrenzenden Big Bags (Zone mit reduzierter Lasteinleitung aufgrund nicht vollflächiger Aufstandsfläche der Big Bags).

Abb. A 5: Ansicht der Versuchsanordnung

A.3 2. Großversuch

A.3.1 Bodeneinbau – Ergebnisse der Verdichtungskontrolle

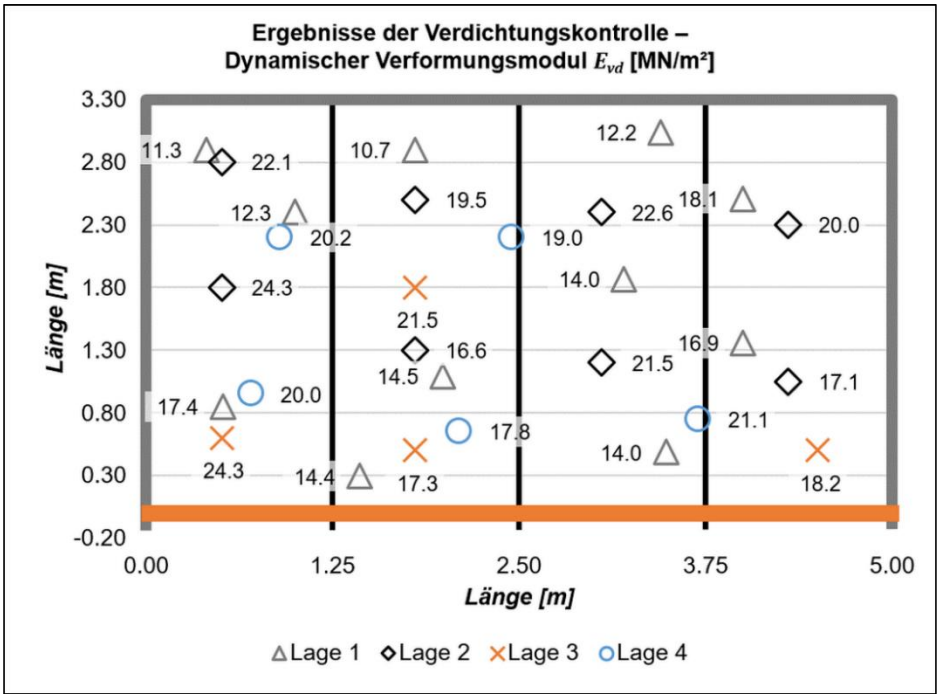


Abb. A 6: Ergebnisse aus den dynamischen Plattendruckversuchen an den eingebauten Bodenlagen 1–4

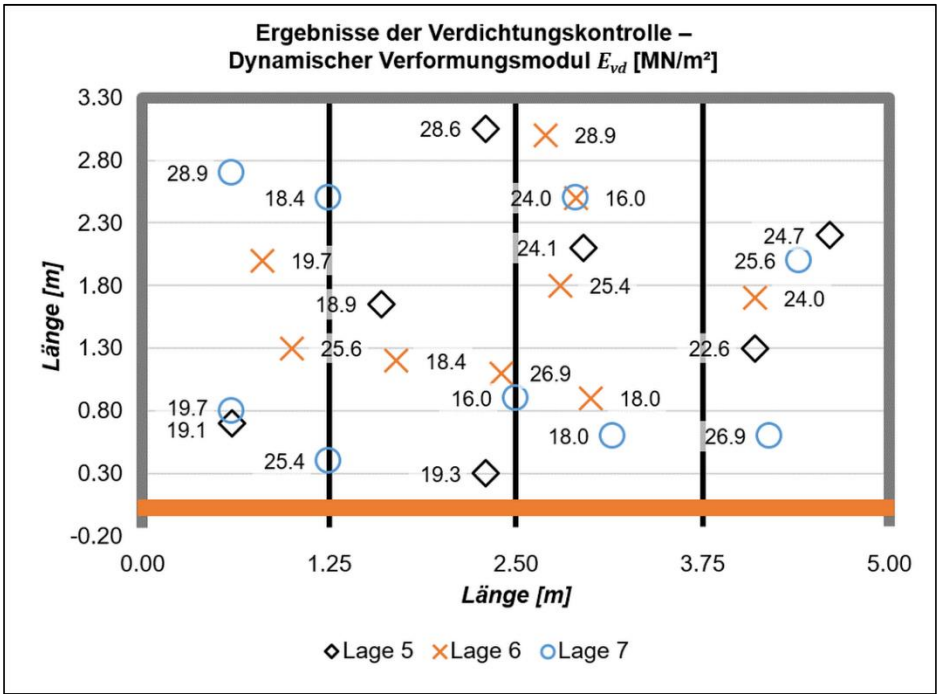


Abb. A 7: Ergebnisse aus den dynamischen Plattendruckversuchen an den eingebauten Bodenlagen 5–7

A.3.2 Verwendete Farbpigmente

Tabelle A. 4: Übersicht der im 2. Großversuch verwendeten Suspensionen (*w/f*-Wert = 1,0) und Farbpigmente.

Injektions-durchgang	**Suspensionsfarbe (Farbpigmentzugabe M-%)***	**Pigmenttyp**	**Beschreibung des Farbigments**
1	Rot (2 – 4 %)	Klinkerrot	Pulver, Eisenoxid Klinkerrot
2	Blau (4 %)	Marineblau	Pulver, Natrium-Aluminium-Sulfo-Silikat.
3	Schwarz (2 %)	Schwarz	Pulver, Eisenoxid Schwarz
4	Orange (4%)	Orange	Pulver, Eisenoxid Orange
5	Grün (2–4 %)	Grün	Pulver, Chromoxid Grün
6	Grau (0 %)	ohne	-
7	Gelb (4,75 %)	Gelb	Pulver, Eisenoxid Gelb
8 bis 13	Grau (0 %)	ohne	-
14	Braun (4 %)	Schwarz und Orange (Mischung 1:1)	Pulver, Eisenoxid Schwarz bzw. Orange
15	Dunkelgrün (4 %)	Schwarz und Grün (Mischung 1:1)	Pulver, Eisenoxid Schwarz und Chromoxid Grün

*Bezug: Feststoffmasse der Suspension

A.3.3 Zeitliche Abfolge der Injektionen im 2. Großversuch

Tabelle A. 5: Ausführungszeiten der durchgeführten Injektionen

Injektionsdurchgang			Startzeitpunkt	Dauer bis zur nächsten Injektionen
Durchgang	Rohr	Manschette	[TT.MM.YYYY hh:mm:ss]	[Tage]
1	1+2+3	1+3	10.09.2019 15:21:18	2
	1+2+3	2+4	12.09.2019 12:20:47	4
2	1+2	1+3	16.09.2019 13:23:21	3
	1+2	2+4	19.09.2019 11:15:30	4
3	1+2+3	1+3	23.09.2019 12:11:53	3
	1+2+3	2+4	26.09.2019 13:11:34	4
4	1+2	1+3	30.09.2019 11:39:00	2
	1+2	2+4	02.10.2019 11:37:34	5
5	1+2+3	1+3	07.10.2019 12:01:33	3
	1+2+3	2+4	10.10.2019 11:13:49	4
6	1+2	1+3	14.10.2019 10:59:31	3
	1+2	2+4	17.10.2019 11:16:44	4
7	1+2+3	1+3	21.10.2019 13:22:52	3
	1+2+3	2+4	24.10.2019 13:02:59	4
8	1+2	1+3	28.10.2019 11:13:06	0
	1+2	2+4	28.10.2019 11:19:22	0
9	1+2+3	1+3	28.10.2019 13:34:56	0
	1+2+3	2+4	28.10.2019 14:19:22	1
10	1+2	1+3	29.10.2019 12:10:12	0
	1+2	2+4	29.10.2019 12:22:40	0
11	3+2+1	1+3	29.10.2019 15:39:52	1
	3+2+1	2+4	30.10.2019 13:21:22	7
12	1+2	1+3	06.11.2019 11:26:26	0
	1+2	2+4	06.11.2019 11:32:09	1
13	1+2+3	1+3	07.11.2019 10:11:34	0
	1+2+3	2+4	07.11.2019 11:32:59	4
14	1+2	1+3	11.11.2019 11:24:57	0
	1+2	2+4	11.11.2019 11:36:09	1
15	1+2+3	1+3	12.11.2019 11:17:34	0
	1+2+3	2+4	12.11.2019 12:19:52	0

A.3.4 Injizierte Suspensionsmengen und erreichte Hebungen

Durchgang		Rohr	Injektionsmenge pro Durchgang [l]				Injektionsmenge kumuliert [l]				Mittelwert / maximale Hebung an der Schlauchwaage (Sensor-Nr.) [mm]
			Manschette				Manschette				
			1	2	3	4	1	2	3	4	
1	rot	1	8,3	10,2	6,4	2,4	8,3	10,2	6,4	2,4	0,15 / 0,44 (MS 7)
		2	7,7	5,5	8,2	8,1	7,7	5,5	8,2	8,1	
		3	17,7	17,9	15,5	0,0	17,7	17,9	15,5	0,0	
2	blau	1	6,7	7,0	2,4	3,7	6,7	7,0	2,4	3,7	0,38 / 0,64 (MS 2)
		2	8,5	7,6	3,8	1,9	8,5	7,6	3,8	1,9	
3	schwarz	1	8,3	7,6	2,9	3,7	16,6	17,8	9,2	6,1	0,58 / 0,99 (MS 2)
		2	8,5	10,1	8,3	3,6	16,2	15,6	16,5	11,7	
		3	17,9	18,5	16,0	4,2	35,6	36,4	31,5	4,2	
4	orange	1	10,3	7,2	10,6	3,9	17,1	14,2	13,1	7,6	0,76 / 1,23 (MS 2)
		2	9,8	10,4	3,2	7,2	18,3	18,0	7,0	9,0	
5	grün	1	9,8	10,8	6,9	7,8	26,4	28,5	16,2	13,9	0,97 / 2,13 (MS 6)
		2	10,7	8,6	10,2	1,3	26,8	24,2	26,7	13,1	
		3	20,3	16,2	16,8	18,8	56,0	52,6	48,3	23,0	
6	farblos	1	9,8	10,4	10,4	1,0	26,9	24,6	23,5	8,6	1,15 / 2,37 (MS 6)
		2	10,1	8,8	9,4	1,5	28,4	26,8	16,3	10,6	
7	gelb	1	9,9	10,5	10,2	3,3	36,3	39,0	26,4	17,2	1,38 / 2,77 (MS 6)
		2	10,6	11,4	6,2	10,0	37,4	35,7	32,9	23,0	
		3	19,7	20,2	20,1	20,4	75,7	72,8	68,4	43,4	
8	farblos	1	10,4	10,7	10,6	10,2	37,3	35,3	34,1	18,8	1,84 / 3,97 (MS 1)
		2	10,1	11,0	10,3	0,8	38,4	37,8	26,6	11,3	
9	farblos	1	10,2	9,7	10,9	10,0	46,4	48,7	37,3	27,1	2,25 / 4,68 (MS 1)
		2	10,6	1,1	1,6	0,9	48,0	36,8	34,5	24,0	
		3	20,4	20,3	21,6	3,6	96,0	93,1	90,0	47,0	
10	farblos	1	5,4	2,0	0,0	10,1	42,7	37,3	34,1	28,9	2,65 / 5,83 (MS 1)
		2	9,7	11,3	10,2	10,2	48,2	49,0	36,9	21,5	
11	farblos	1	10,3	4,0	0,0	11,3	56,8	52,8	37,3	38,5	3,06 / 7,80 (MS 1)
		2	9,8	6,9	9,8	11,2	57,8	43,7	44,3	35,1	
		3	19,5	20,2	18,7	1,3	115,5	113,3	108,7	48,3	
12	farblos	1	10,4	10,9	1,6	10,6	53,1	48,2	35,7	39,5	3,74 / 10,24 (MS 1)
		2	10,3	3,6	10,6	9,5	58,5	52,7	47,4	31,0	
13	farblos	1	6,7	9,9	3,0	10,8	63,4	62,7	40,3	49,2	4,51 / 11,85 (MS 1)
		2	10,3	2,9	5,0	10,9	68,1	46,5	49,3	46,0	
		3	20,7	21,6	20,3	3,6	136,2	134,9	129,0	51,9	
14	braun	1	10,0	2,2	5,3	10,0	63,1	50,4	41,0	49,5	5,46 / 14,94 (MS 1)
		2	10,4	3,0	9,5	8,3	68,9	55,6	56,9	39,3	
15	dunkelgrün	1	1,9	3,3	7,7	9,9	65,3	65,9	48,0	59,1	6,55 / 17,01 (MS 1)
		2	5,6	0,8	3,6	0,0	73,7	47,4	52,9	46,0	
		3	21,0	20,0	20,1	19,7	157,2	154,8	149,1	71,6	

A.3.5 Auswertung der Verformungsmessungen

A.3.5.1 Verformungsmessungen der Schlauchwaagenmessungen über die gesamte Messdauer

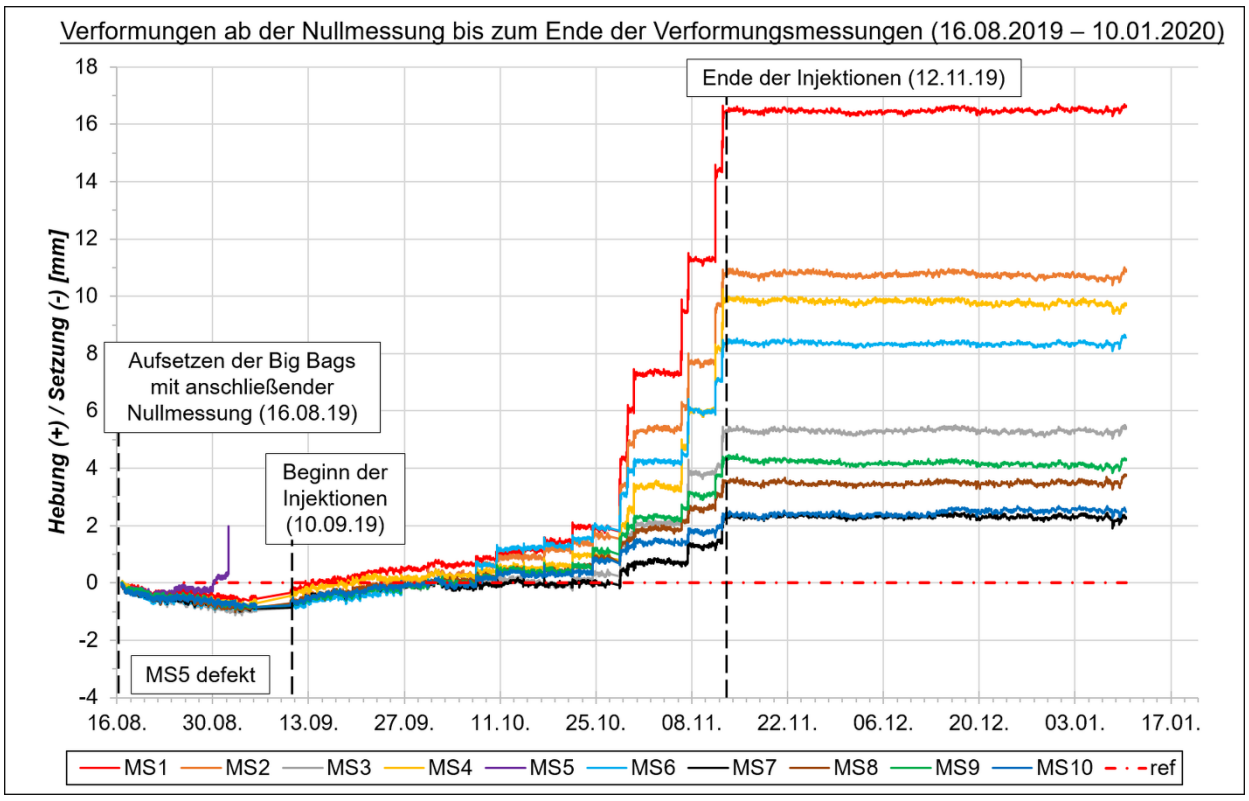


Abb. A 8: Ergebnisse der Verformungsmessungen des Schlauchwaagenmesssystems

A.3.5.2 Referenzzeitpunkt der Verformungsmessungen

Für den Vergleich zwischen den Ergebnissen der Schlauchwaagenmessungen und der hydrostatischen Linienvermessung musste ein Referenzzeitpunkt für die Schlauchwaagenmessungen festgelegt werden. Die Messdauer der Nullmessung der hydrost. LV betrug ca. 17,5 h. Die Messwerte der Schlauchwaage zeigten in diesem Zeitraum eine Schwankung innerhalb der Messgenauigkeit von ca. +/- 0,3 mm. Als Referenzzeitpunkt wurde der 22.08.2019 um 23:45:00 definiert. Zu diesem Zeitpunkt ist die Nullmessung zu ca. 50% abgeschlossen.

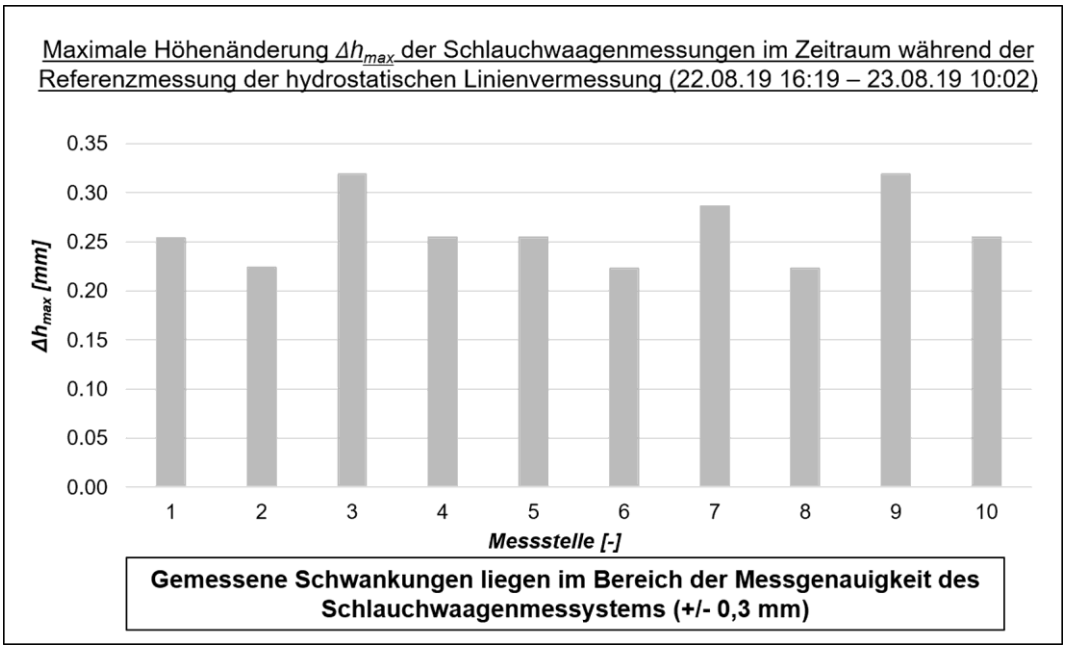


Abb. A 9: Änderungen der Schlauchwaagenmesswerte im Zeitraum der Nullmessung des hydrostatischen Linienvermessungssystems

A.3.5.3 Verformungsmessungen – Vergleich zwischen den Ergebnissen der hydrostatischen Linienvermessung und den Schlauchwaagenmessungen

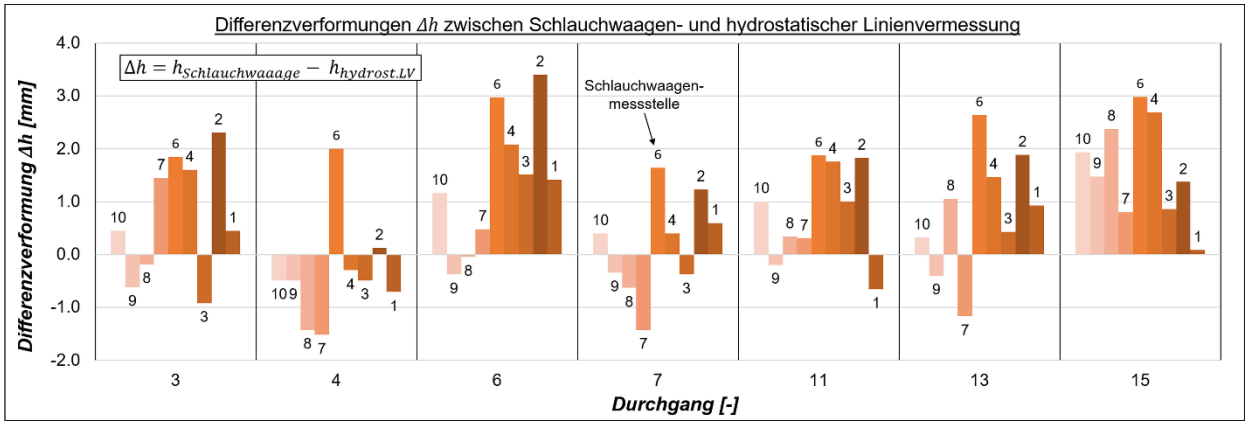


Abb. A 10: Vergleich zwischen den Verformungsmessungen (hydrostatische Linienvermessung und Schlauchwaagenmessystem)

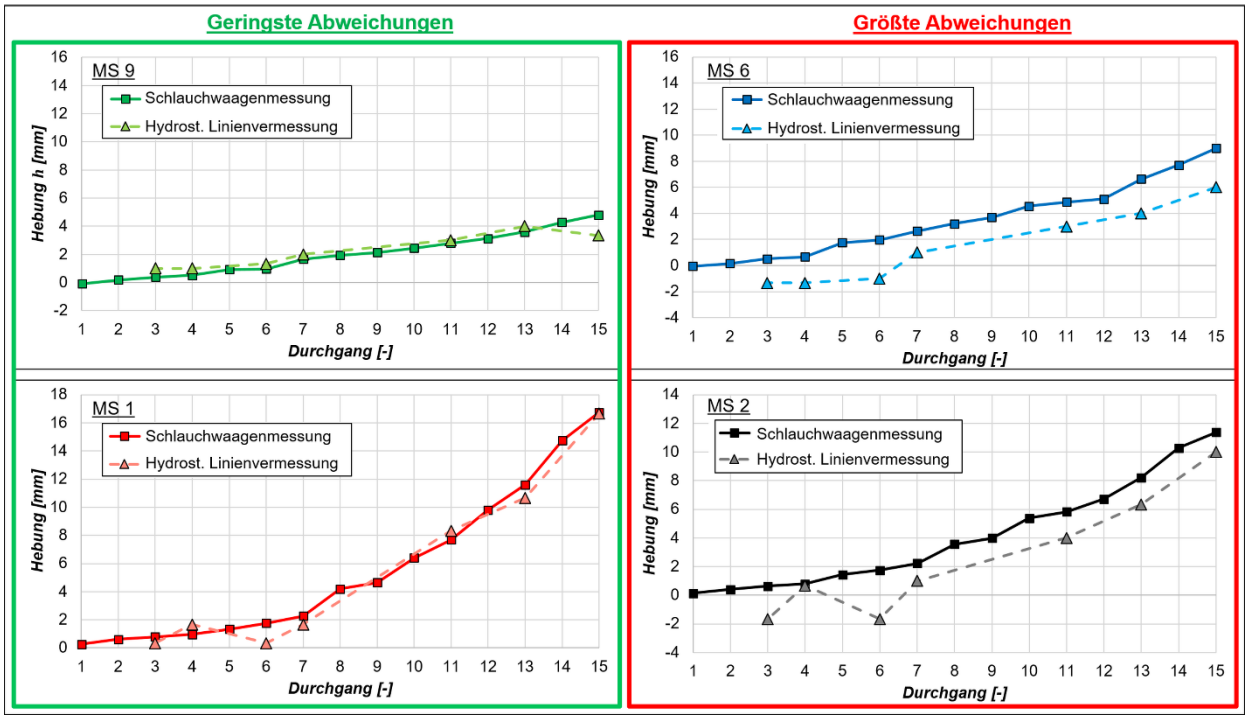


Abb. A 11 Links: Messstellen (MS 9 und MS 1) mit der geringsten Abweichung zwischen den Verformungsmessungen beider Messsysteme

Rechts: Messstellen (MS 6 und MS 2) mit der größten Abweichung zwischen den Verformungsmessungen beider Messsysteme

A.3.5.4 Setzungen infolge der Auflast durch die Big-Bags

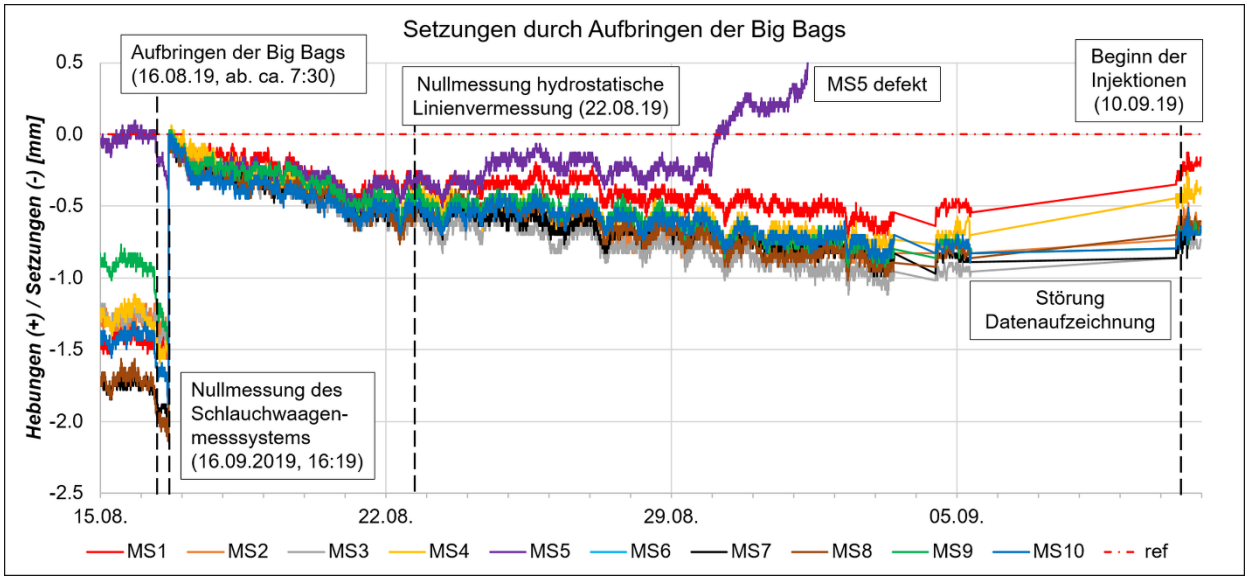


Abb. A 12: Setzungen infolge der Lastaufbringung durch die Big Bags

A.4 Ergebnisse der Labor- und Elementversuche zur Kalibrierung der Stoffmodellparameter für das hypoplastische Stoffmodell

A.4.1 Boden 1 (für die FE-Berechnungen zum 2. Großversuch)

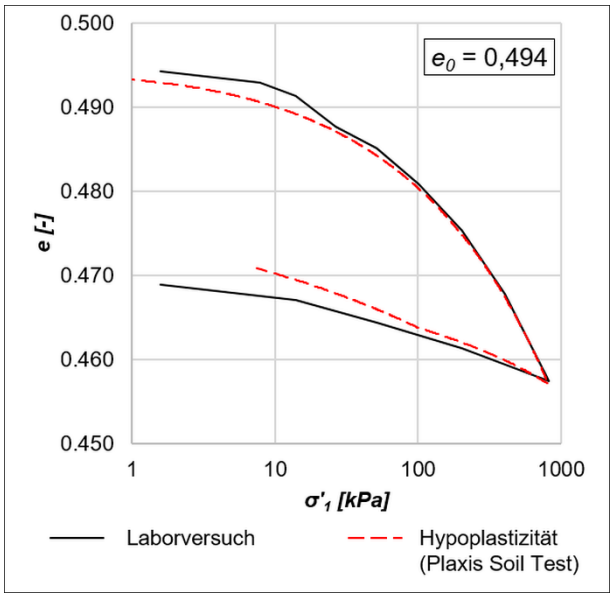


Abb. A 13: Ergebnisse aus Labor- und Elementversuch bei ödometrischer Kompression von Boden 1

A.4.2 Obere Kiese (für die FE-Berechnungen zum Probefeld Oberau)

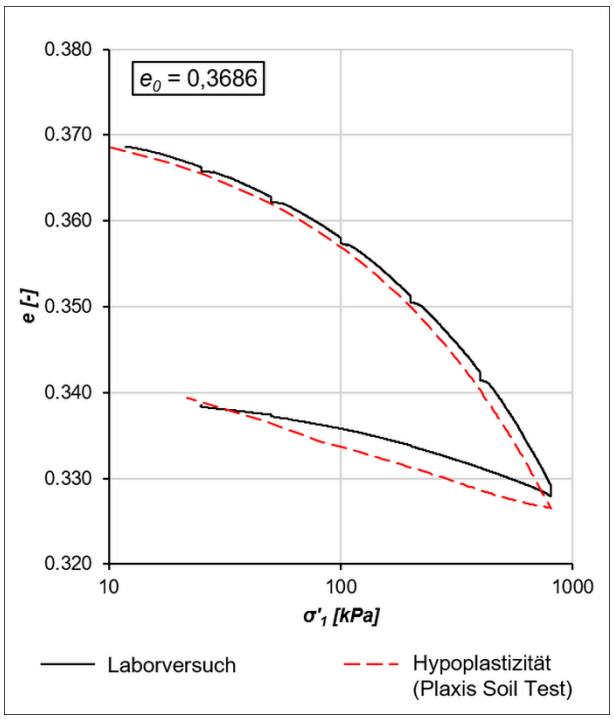


Abb. A 14: Ergebnisse aus Labor- und Elementversuch bei ödometrischer Kompression der Oberen Kiese