

Untersuchungen zur Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung im Lockergestein durch Filtrationsmechanismen

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Matthias Kuk
geboren am 17.6.1968 in Herford

2004

Referent: Prof. Dr.-Ing. W. Blümel

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. B. Walz

Tag der Promotion: 28. Juli 2004

Kurzfassung

Zur Abdichtung oder Verfestigung rolliger Böden kann die Injektionstechnik angewendet werden. Dabei wird das Porensystem des Bodens durch ein Injektionsmittel aufgefüllt, ohne das Bodengefüge planmäßig aufzubrechen. Zur Injektion in feine Korngerüste wie Mittel- und Feinsande können aufgrund ihrer hohen Mahlfeinheit Feinstbindemittel eingesetzt werden. Diese hydraulischen Bindemittel ähneln hinsichtlich ihrer stoffliche Zusammensetzung herkömmlichen Zementen.

Während des Injektionsvorgangs werden als Folge von Tiefenfiltrationsvorgängen fortlaufend Feinstbindemittelpartikel aus der Suspension abgetrennt und im Korngerüst angelagert. Die Folge sind erhöhte Bindemittelgehalte im Kern sowie reduzierte Bindemittelgehalte in den Randbereichen der Injektionskörper. Diese inhomogene Verteilung der Feststoffe im Injektionskörper kann neben örtlich schwankenden Festigkeits- und Abdichtungseigenschaften auch zu einer Verringerung der prognostizierten Injektionsreichweite führen, wenn die Bindemittelkonzentration unter die für eine Verkittung der Bodenkörner erforderliche Grenze sinkt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung und mathematische Beschreibung der Auswirkungen von Tiefenfiltrationsvorgängen auf die Ausbreitung von Feinstbindemittelsuspensionen in Lockergesteinen. Hierzu wurden großmaßstäbliche Injektionsversuche unter praxisüblichen Randbedingungen in einem Injektionstrichter, der einen Ausschnitt einer Injektionskugel repräsentiert, durchgeführt und ausgewertet.

Anhand der Ergebnisse der Trichterversuche konnten Reichweitenverkürzungen sowie die Ausbildung von bindemittelärmeren und damit in Bezug auf die Abdichtungswirksamkeit kritischen Randbereiche der Injektionskörper erfasst und hinsichtlich der Auswirkungen der variierten Injektionsrandbedingungen diskutiert werden. Während des Injektionsvorgangs kam es zu einem räumlich begrenzten und teilweise auch großräumigen Aufsprengen des durch abgeschiedene Partikel verengten Porensystems. Letzteres birgt die Gefahr eines unkontrollierten Abfließens des Feinstbindemittels.

Ergänzend wurden auch eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, wie sie zum Nachweis der Injizierfähigkeit üblich sind. Ein Ergebnisvergleich der verschiedenen Versuche zeigte jedoch, dass die Feinstbindemittelausbreitung und damit die Partikelabscheidung im dreidimensionalen Fall nicht durch diesen einfach durchzuführenden Versuchstyp abgebildet werden kann.

Da die verschiedenen auf die Partikelabscheidung einwirkenden physikalisch/chemischen Mechanismen i.d.R. nicht detailliert erfasst werden können, wurde auf eine makroskopische Betrachtungsweise der Filtration zurückgegriffen, bei der die Gesamtwirksamkeit eines Tiefenfilters durch einen Filterkoeffizienten und eine Korrekturfunktion abgebildet werden kann. Für eine konstante sowie eine linear mit seiner Beladung abnehmende Filterwirksamkeit konnten so geschlossene Lösungen für die Partikelkonzentration und die Beladung eines Filters hergeleitet werden. Während eine gute Annäherung der theoretischen Lösungen an die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche gelang, ergaben sich insbesondere bei einer starken Beeinflussung der Suspensionsausbreitung durch Injektionscracks größere Abweichungen bei der Auswertung der Trichterversuche. Auf der Basis von Probeinjektionen eignen sich die vorgestellten Lösungen jedoch gut, die erforderliche Injektionsreichweite und Bindemittelkonzentration im Anwendungsfall zu optimieren.

Schlagworte: Injektionstechnik, Feinstbindemittel, Tiefenfiltration

Abstract

Grouting is a technique used for sealing or stabilising non-plastic soil. The grouting medium fills the soil's pore system without deliberate fracturing of the soil lattice. When grouting in fine grained lattices, e.g. medium and fine grade sands, micro fine binding agents are utilised. These hydraulic binding agents are similar in material composition to conventional cements.

During the injection procedure micro-fine binding agent particles separate from the suspension as a result of subsurface filtration processes and are deposited in the grain lattice. This results in a higher binder content in the core and a reduced content at the margins of the grouting block. The inhomogenic distribution of the solids in the injection block can lead to a reduction in the predicted grouting range as well as local fluctuations in strength and seal properties if the concentration of the binding agent falls below the level necessary to bind the soil grains.

This paper presents the experimental testing and mathematical description of the effects of subsurface filtration processes on the propagation of micro-fine binding agent suspensions in soil. The tests include the execution and evaluation of large-scale grouting tests under standard boundary conditions in an injection funnel representing one section of an injection cone.

The results of the funnel tests provide a basis for discussions of the assessment of range loss and the formation of marginal zones around the injection block having low levels of binding agent, and so critical in relation to sealing efficiency, and also of the influence of the grouting boundary conditions. During grouting there was a spatially limited and also in part large-area fracturing of the pore system due to narrowing as a result of particle deposition. This latter represents a risk of uncontrolled outflow of the micro-fine binding agent. Standard single-dimension grouting tests were also performed to verify injectability. A comparison of the various results did however indicate that the micro-fine binding agent propagation and hence the particle deposition in a three-dimensional situation is not adequately simulated by such a simple test arrangement.

Bearing in mind that the various physical/chemical mechanisms influencing the deposition of particles cannot generally be described in detail, a macroscopic approach was assumed to describe the filtration in which the overall efficiency of a subsurface filter is represented by a filter coefficient and a correcting function. This enabled closed solutions to be derived for a constant and a linear fall in efficiency of a filter as a function of particle concentration and filter loading. While a good approximation of the theoretical solutions proved possible based on the results of the single dimensional injection tests, when evaluating the funnel tests there were large deviations in particular relating to the strong influence on the suspension propagation caused by grouting cracks. Based on trial injections, the solutions as described are well suited to optimising the required injection range and the concentration of the binding agent on a case-by-case basis.

Key words: grouting, micro-fine binding agent, micro fine cement, subsurface filtration

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Kriterien zum Nachweis der Injektionsfähigkeit von Suspensionen	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Empirische Injektionskriterien	4
3	Theorie der Filtration	9
3.1	Allgemeines	9
3.2	Mikroskopische Betrachtungsweise der Filtration	10
3.2.1	Strömungsmodelle für körnige Filterschichten	10
3.2.2	Elementarer Abscheidegrad	12
3.2.3	Transport- und Haftmechanismen	13
3.2.3.1	Allgemeines	13
3.2.3.2	Trägheit (Inertia)	14
3.2.3.3	Sedimentation	14
3.2.3.4	Interception	15
3.2.3.5	Siebeffekt	16
3.2.3.6	Diffusion	16
3.2.3.7	Hydrodynamische Einflüsse auf den Partikeltransport	17
3.2.3.8	Van der Waals-Kräfte	17
3.2.3.9	Elektrische Doppelschichtkräfte	18
3.3	Beschreibung der Tiefenfiltration bei makroskopischer Betrachtungsweise	18
3.3.1	Allgemeines	18
3.3.2	Massenbilanz und kinetischer Ansatz	18
3.3.3	Eindimensionale Filterströmung	20
3.3.3.1	Konstante Wirksamkeit des Filters	20
3.3.3.2	Linear veränderliche Wirksamkeit des Filters	21
3.3.4	Kugelsymmetrische Filterströmung	22
3.3.4.1	Allgemeines	22
3.3.4.2	Konstante Wirksamkeit des Filters	23
3.3.4.3	Linear mit der Filterbeladung veränderliche Wirksamkeit des Filters	24
3.3.5	Diskussion der makroskopischen Betrachtungsweise der Filtration	24
4	Verwendete Versuchsmaterialien	27
4.1	Feinstbindemittel	27
4.1.1	Allgemeines	27

4.1.2	Verwendete Feinstbindemittelsorten	28
4.2	Sande	30
5	Experimentelle Untersuchungen	32
5.1	Allgemeines	32
5.2	Eindimensionale Injektionsversuche	32
5.3	Dreidimensionale Trichterinjektionsversuche	34
5.4	Nachgeordnete Untersuchungen an abgebundenen Injektionsproben	37
5.4.1	Bestimmung der Durchlässigkeit	37
5.4.2	Bestimmung des Glühverlustes	38
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	39
6.1	Allgemeines	39
6.2	Untersuchungen zur Abschätzung des Bindemittelgehalts abgebundener Injektionsproben	39
6.3	Großmaßstäbliche Injektionsversuche im Injektionstrichter	41
6.3.1	Allgemeines und Versuchsrandbedingungen	41
6.3.2	Einfluss der Feinstbindemittelsorte und der Korngerüstes auf den Injektionsverlauf	42
6.3.2.1	Allgemeines und Versuchsrandbedingungen	42
6.3.2.2	Druckverläufe	42
6.3.2.3	Reichweite der Injektion	45
6.3.2.4	Injektionscracks	47
6.3.2.5	Verteilung des Bindemittelgehaltes in den abgebundenen Injektionskörpern	48
6.3.3	Untersuchungen zum Einfluss der Verpressrate	50
6.3.3.1	Allgemeines und Versuchsrandbedingungen	50
6.3.3.2	Druckverläufe	51
6.3.3.3	Reichweite der Injektion und Beurteilung hinsichtlich geometrischer Injektionskriterien	53
6.3.3.4	Verteilung des Bindemittels in den abgebundenen Injektionskörpern	53
6.3.4	Untersuchungen zum Einfluss des Bindemittelgehalts der Suspension	55
6.3.4.1	Allgemeines und Versuchsrandbedingungen	55
6.3.4.2	Druckverläufe	56
6.3.4.3	Reichweite der Injektion	58
6.3.4.4	Verteilung des Bindemittels in den abgebundenen Injektionskörpern	59
6.3.5	Trichterversuch mit geringerer Reichweite	61
6.3.6	Diskussion der Verläufe des Einpressdrucks und der rechnerischen Suspensionsdichten der Trichterversuche	64
6.3.7	Bewertung und Diskussion der Volumenverluste der Injektionskörper	67

6.3.8	Abschätzung der erzielbaren Abdichtungswirkung durch Feinstbindemittelinjektionen	70
6.3.8.1	Allgemeines	70
6.3.8.2	Durchlässigkeiten von Bohrkernen aus Trichterversuchen	71
6.3.8.3	Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Durchlässigkeit von Injektionsproben	72
6.3.8.4	Rechnerische Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte über den Querschnitt der Injektionskörper	73
6.3.8.5	Bewertung und Diskussion der erzielten Durchlässigkeiten von Injektionskörpern	76
6.4	Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche	80
6.4.1	Allgemeines	80
6.4.2	Reduktion des Feststoffgehaltes von Feinstbindemittelsuspensionen bei eindimensionalen Injektionsvorgängen	81
6.4.3	Beeinflussung der Partikelgrößenverteilung in Feinstbindemittelsuspensionen durch Filtrationsmechanismen	89
6.4.4	Injizierfähigkeit von mit geringen Bindemittelanteilen beladenen Korngerüsten	93
6.4.5	Übertragbarkeit der Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche auf den dreidimensionalen Fall	94
6.5	Bewertung der Ergebnisse des experimentellen Versuchsprogramms	97
6.5.1	Einflussfaktoren auf das Abfiltrieren von Feinstbindemittelpartikeln beim Durchströmen des Porensystems	97
6.5.2	Hinweise und Empfehlungen für die Ausführung von Injektionssohlen mit Feinstbindemitteln	99
6.5.3	Gegenüberstellung der eigenen Versuchsergebnisse und der Ergebnisse anderer Autoren	101
7	Theoretische Beschreibung der Versuchsergebnisse	105
7.1	Allgemeines	105
7.2	Eindimensionale Injektionsversuche	106
7.2.1	Filtergesetz mit konstantem Filterfaktor	106
7.2.2	Filtergesetz mit linear veränderlichem Filterfaktor	108
7.3	Dreidimensionale Trichterversuche	110
7.3.1	Allgemeines	110
7.3.2	Filtergesetz mit konstantem Filterfaktor	111
7.3.2	Filtergesetz mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten	112
7.4	Iteratives Lösungsverfahren	114
7.5	Diskussion und Bewertung der Anwendbarkeit von Filterfunktionen	117
8	Fazit und Ausblick	125
9	Zusammenfassung	128
10	Literaturverzeichnis	131

Anhang A Definitionen verwendeter Begriffe und Formelzeichen

A.1 Definitionen verwendeter Begriffe

A.2 Formelzeichen, Dimensionen und Bedeutung

Anhang B Versuchsrandbedingungen und Ergebnisdiagramme der durchgeführten Trichterinjektionsversuche

1 Einleitung

Die fortschreitende Verknappung und Verteuerung des Baugrundes in den Innenstädten hat dazu geführt, vorhandene Grundstücke in möglichst effizienter Weise zu nutzen. Stellplätze, Lager- und evtl. auch Verkaufsflächen werden daher in zunehmendem Maße unterirdisch angeordnet. Der hierzu erforderliche Bau von Tiefgeschossen erfordert jedoch einen erhöhten technischen und wirtschaftlichen Aufwand, da diese in der Regel unterhalb des Grundwasserspiegels erstellt werden müssen. Während in der Vergangenheit die Baugruben durch großflächige Grundwasserabsenkungen trocken gehalten wurden, wird heutzutage i.d.R. eine im technischen Sinn wasserdichte Ausführung der Baugrube gefordert, um eine Absenkung des Grundwasserspiegels zu vermeiden. Hierzu ist es neben der Wahl einer entsprechenden Verbauart erforderlich, eine künstliche Dichtungssohle herzustellen (Bild 1.1), sofern kein natürlicher Grundwasserstauer ansteht, in den die Baugrubenwände einbinden könnten. Bei den künstlich hergestellten Dichtungssohlen wird zwischen so genannten hoch- und tiefliegenden Sohlen unterschieden. Bei den tiefliegenden Sohlen wird die Auftriebssicherheit im Aushubzustand über das Gewicht der Dichtungssohle und des darauf lastenden Bodenpakets sichergestellt. Bei hochliegenden Sohlen ist hingegen eine Rückverankerung der Sohle erforderlich.

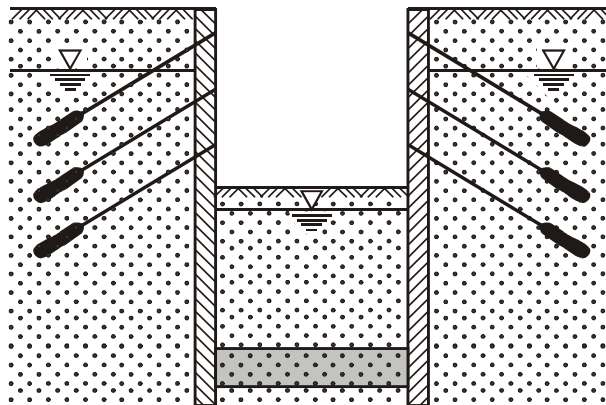


Bild 1.1: Schematische Darstellung einer tiefliegenden Dichtungssohle

Ein spezialtiefbauliches Verfahren zur Herstellung von Dichtungssohlen in nichtbindigen Böden ist die Injektionstechnik. Hierbei wird über in regelmäßigen Abständen angeordnete Injektionslanzen ein zunächst flüssiges Injektionsmittel in das Porensystem des abzudichtenden Bodens eingepresst, ohne dass dabei das Bodengefüge planmäßig aufgebrochen wird. Das Injektionsmittel bindet anschließend im Porensystem des Bodens ab und bewirkt so eine Reduktion des Durchlässigkeitsbeiwertes der injizierten Bodenschichten. Neben der Abdichtung kann die Anwendung der Injektionstechnik auch die Verfestigung des Untergrundes oder die Immobilisierung von Schadstoffen zum Ziel haben.

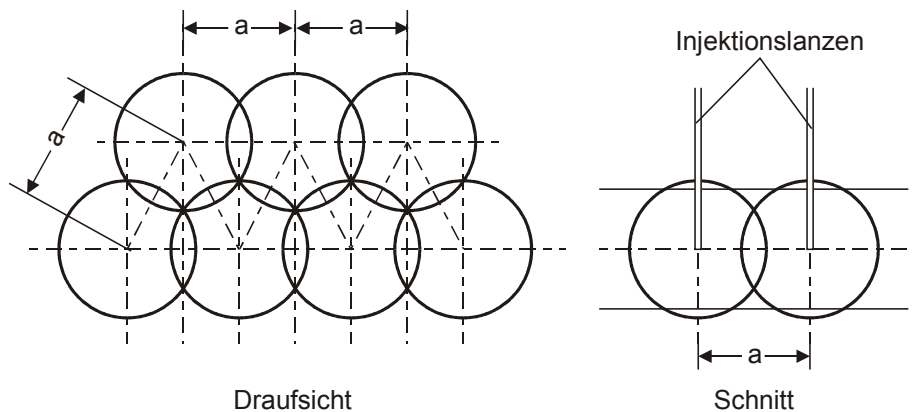


Bild 1.2: Injektionsraster in der Draufsicht und Schnitt durch eine Injektionssohle

In Abhängigkeit des Injektionszieles und der Feinheit des zu injizierenden Korngerüstes kommen unterschiedliche Injektionsmittel zum Einsatz. Für Abdichtungsinjektionen in Fein- und Mittelsanden haben sich so genannte Weichgellösungen bewährt, bei denen es sich üblicherweise um wässrige Natriumsilikatlösungen mit Natriumaluminat als Reaktiv zur Steuerung der Gelbildung handelt. Aufgrund von Bedenken hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Grundwasserqualität werden diese Weichgellösungen jedoch nur noch sehr zurückhaltend eingesetzt. Zur Injektion in den genannten vergleichsweise feinen Korngerüsten eignen sich weiterhin so genannte Feinstbindemittel, die in ihrer stofflichen Zusammensetzung herkömmlichen Zementen ähneln jedoch eine sehr viel höhere Mahlfineinheit aufweisen.

Nach BORCHERT (1999) erwiesen sich die in Berlin mit Feinstbindemitteln ausgeführten Injektionssohlen jedoch als erheblich durchlässiger, als die mit alternativen Bauverfahren, wie Weichgelinjektionen oder Unterwasserbetonsohlen, hergestellten. Diese Ausführungsrisiken bei Abdichtungsinjektionen mit Feinstbindemitteln können in der Hauptsache auf den Einfluss von Tiefenfiltrationsmechanismen zurückgeführt werden. Durch diese werden beim Durchströmen des Porensystems mit der Injektionssuspension fortlaufend Suspensionsfeststoffe abgetrennt und im Porensystem angelagert. Die Folge ist eine inhomogene Verteilung der Feststoffe entlang der Injektionsreichweite mit einer Bindemittelanreicherung im Kern sowie reduzierten Bindemittelgehalten in den Randbereichen der Injektionskörper. Wird im Extremfall der Bindemittelgehalt unter die für eine stabile Verkittung der Bodenkörner erforderliche Grenze abgesenkt, stellt sich eine Verkürzung der tatsächlichen Injektionsreichweite gegenüber der prognostizierten Reichweite ein. Experimentell nachgewiesen wurden solche Reichweitenverkürzungen u.a. von MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998), MBONIMPA (1998) und YONEDA (1996). Zur Vermeidung von Fehlstellen in einer Dichtungssohle ist es daher erforderlich die filtrationsbedingten Volumenverluste durch eine entsprechende Mehrmenge an Suspension auszugleichen. Die Dimensionierung dieser Mehrmenge bereitete jedoch bislang Schwierigkeiten, da hierzu nur die Ergebnisse einzelner Injektionsversuche und keine Praxiserfahrungen vorlagen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der Einfluss von Tiefenfiltrationsmechanismen auf die Ausbreitung von Feinstbindemittelsuspensionen im Untergrund und die diesbezüglichen Folgen für die Dichtigkeit von Injektionssohlen. Neben der Erweiterung des Kenntnisstandes hinsichtlich der Größenordnung der in situ zu erwartenden Reichweitenverkürzungen galt es zu untersuchen, in welcher Weise sich die Injektionsrandbedingungen, wie z.B. die Verpressrate oder die Bindemittelkonzentration der Injektionssuspension, auf die Filtrationsintensität und damit die Verteilung des Feinstbindemittel innerhalb der Injektionskörper auswirken.

Durchgeführt wurden hierzu großmaßstäbliche dreidimensionale Injektionsversuche mit praxisüblichen Einpressraten in einem Trichter, der ein Segment einer Injektionskugel repräsentiert. Während des Injektionsvorgangs wurden der Einpressdruck und die Verpressrate kontinuierlich aufgezeichnet. Nach dem Freilegen der abgebundenen Injektionskörper konnten die tatsächliche Injektionsreichweite und die Verteilung des Feinstbindemittels entlang der Injektionsreichweite erfasst werden. Ergänzt wurden die Trichterinjektionsversuche durch eindimensionale Injektionsversuche und Durchlässigkeitsversuche an abgebundenen Injektionsproben. Weiterhin erfolgte eine Auswertung der Injektionsversuche mit filtertheoretischen Lösungen.

2 Theoretische Kriterien zum Nachweis der Injektionsfähigkeit von Suspensionen

2.1 Allgemeines

Die Injektionsfähigkeit von Suspensionen in Lockergesteine ist zumindest theoretisch nur dann gegeben, wenn ein hinreichend großer Anteil der Porenkanäle für die Feststoffpartikel passierbar ist bzw. einzelne durch abgeschiedene Partikel blockierte Engstellen über Porenkanäle günstigeren Querschnitts umströmt werden können. Werden jedoch Wechselwirkungen zwischen den Partikeln selbst sowie mit den Oberflächen der Bodenkörner bedeutsam, reichen die geometrischen Kriterien allein nicht aus, die Injektionsfähigkeit einer Suspension sicherzustellen. Durch solche Wechselwirkungen können sowohl die effektiven Partikelgrößen infolge von Agglomerationen wie auch die effektiven Porenquerschnitte durch Partikel, die an den Kornoberflächen anhaften, verändert werden.

Die in der Literatur wiedergegebenen theoretischen Kriterien zum Nachweis der Injektionsfähigkeit basieren auf Erfahrungswerten, experimentellen Untersuchungen oder theoretischen Überlegungen zum Verhältnis von Partikel- und Porengrößen. Sie können daher auch zu unterschiedlichen Einschätzungen der Injizierfähigkeit führen. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden, sollte der Nachweis der Injizierfähigkeit nicht allein auf theoretischem Wege erfolgen, sondern Einpressversuche in situ oder auch im Labor durchgeführt werden. Die Durchführung solcher Laborversuche zum Nachweis der Injizierfähigkeit ist u.a. im MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITEMELN IM LOCKERGESTEIN (2002) beschrieben. Die Injizierfähigkeit der im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendeten Korngerüste mit verschiedenen Feinstbindemittelsuspensionen wurde jeweils vorab entsprechend den Empfehlungen des Merkblattes nachgewiesen.

Wie voranstehend erläutert spiegeln theoretische Injektionskriterien in unterschiedlicher Weise das Verhältnis von Poren- zu Partikelgrößen wider, welches sich, neben anderen Einflussgrößen, auf den Anteil der beim Durchströmen des Porensystems zurückgehaltenen Suspensionspartikel auswirkt. Es galt daher am Beispiel von Feinstbindemitteln zu überprüfen, inwieweit diese Kriterien bei gegebener Injektionsfähigkeit eine Einschätzung eines Filtrationseinflusses auf die Suspensionsausbreitung im Untergrund ermöglichen. Somit stand bei der folgenden Darstellung verschiedener ausgewählter Injektionskriterien nicht im Vordergrund, ihre Anwendbarkeit hinsichtlich der unteren Einsatzgrenzen verschiedener Injektionsmittel abzuschätzen.

2.2 Empirische Injektionskriterien

Die unteren Einsatzgrenzen verschiedener Injektionsmittel werden in der Literatur häufig in Form von Grenzkornverteilungen dargestellt. Solche Grenzkornverteilungen, wie sie

beispielsweise bei CAMBEFORT (1969), TAUSCH und TEICHERT (1990) oder KUTZNER (1991) zu finden sind, basieren in der Regel auf Laborversuchen mit unterschiedlichen Korngerüsten. Die Kornverteilung des feinsten noch injizierfähigen Korngerüsts wird hierbei als untere Einsatzgrenze eines Injektionsmittels dargestellt. So abgeleitete Grenzkornverteilungen gelten jedoch nur unter Berücksichtigung der Versuchsrandbedingungen. Bei veränderter Lagerungsdichte und Ungleichförmigkeit des Korngerüsts oder veränderten Eigenschaften des Injektionsmittels kann sich seine Injektionsfähigkeit auch anders als in den Diagrammen dargestellt ergeben.

Die untere Anwendungsgrenze von Feinstbindemitteln wurde im Laufe der Jahre durch die Entwicklung von Feinstbindemittelsorten mit zunehmend höherer Mahlfeinheit immer weiter ins Feinere verschoben. So unterscheidet sich die in Bild 2.1 dargestellte Kornverteilung der gerade noch injizierbaren Sande aus dem MERKBLATT (2002) von den in den oben genannten, älteren Quellen dargestellten Grenzkornverteilungen.

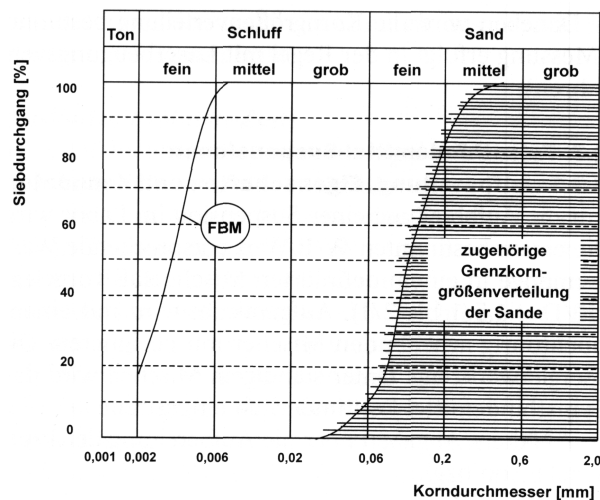


Bild 2.1: Kornverteilung eines Feinstbindemittels mit $d_{95} = 6 \mu\text{m}$ und zugehörige Grenzkornverteilung von damit noch injizierbaren Sanden (MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITTELN IN LOCKERGESTEIN 2002)

Zur Einschätzung der Injizierfähigkeit wird verschiedentlich der Durchlässigkeitsbeiwert eines Korngerüsts gegenüber Wasser herangezogen, welcher eine direkt von der Porenstruktur abhängige Größe darstellt (u.a. CAMBEFORT 1969). Die Bestimmung der i.d.R. in horizontaler und vertikaler Richtung unterschiedlichen Durchlässigkeit von Bodenschichten im Feld erweist sich jedoch als schwierig. Zudem bleiben die Eigenschaften des Injektionsmittels sowie eventuell auftretende Wechselwirkungen zwischen Injektionsmittel und Kornoberflächen unberücksichtigt.

Weiterhin werden von verschiedenen Autoren auf Suspensionen anwendbare Injektionskriterien formuliert, die sich an gebräuchliche Kriterien zur Filterstabilität anlehnen. Die Injizierfähigkeit gilt hierbei als gegeben, wenn der Quotient repräsentativer Bodenkorn-

und Partikeldurchmesser einen bestimmten Wert übersteigt. Ein vielfach in der Praxis angewendetes Injektionskriterium, bei dem der Korndurchmesser des Sandes d_{15} bei 15% Siebdurchgang ins Verhältnis zum Partikeldurchmesser der Injektionssuspension d_{85} bei 85% Siebdurchgang gesetzt wird, beruht auf amerikanischen Erfahrungswerten:

$$N = \frac{d_{15}}{d_{85}} \quad (2.1)$$

Bei dieser ebenfalls auf Laborversuchen und Erfahrungswerten basierenden Beurteilung der Injizierfähigkeit kommen verschiedene Autoren jedoch zu unterschiedlichen Einschätzungen. Nach MITCHELL (1982) hat es sich bewährt, bei $N > 24$ von einer gegebenen und bei $N < 11$ von einer nicht gegebenen Injizierfähigkeit auszugehen. Von NONVEILLER (1989) werden hingegen, mit Verweis auf experimentelle Untersuchungen von SHERARD und DUNNINGAN (1984), diese Grenzen der Injizierfähigkeit bei $N > 20$ bei gegebener sowie bei $N < 9$ bei nicht gegebener Injizierfähigkeit gesetzt. KUTZNER (1991) sieht die Injizierfähigkeit sogar erst bei $N > 40$ als gegeben an. Alternativ zu der Verwendung der Korn- und Partikeldurchmesser d_{15} bzw. d_{85} können, wie von DONEL (1990) oder MITCHELL (1982) vorgeschlagen, auch andere repräsentative Korn- und Partikeldurchmesser zur Beurteilung der Injizierfähigkeit herangezogen werden.

Bei der Anwendung dieser Injektionskriterien kann jedoch vielfach keine eindeutige Aussage bezüglich des zu erwartenden Injektionserfolges getroffen werden. Darüber hinaus bleiben die Auswirkungen der Ungleichförmigkeit und der Lagerungsdichte auf die Porenstruktur ebenso unberücksichtigt, wie die Auswirkungen der aus Oberflächenladungsphänomen resultierenden Wechselwirkungen zwischen den Feststoffpartikeln der Suspension einerseits und mit den Kornoberflächen andererseits.

Die Penetrierfähigkeit eines Korngerüstes kann in jedem Fall nur dann gegeben sein, wenn ein hinreichend großer Anteil der Porenquerschnitte für die Suspensionspartikel passierbar ist. Ausgehend von dieser geometrischen Grundbedingung der Injizierfähigkeit wurde von SCHULZE (1992) sowie SCHULER und BRAUNS (2000) vorgeschlagen, sogenannte Porenengstellenverteilungen (PEV) für die Beurteilung der Injizierfähigkeit von Injektionssuspensionen heranzuziehen. Da die direkte Messung der Porenengstellen mit einem im Praxisfall unrealistisch hohen Aufwand verbunden ist, erfolgt die Berechnung der Größe der Engstellen üblicherweise mit mathematisch-statistischen Methoden ausgehend von der Korngrößenverteilung und der bezogenen Lagerungsdichte.

Zur Abschätzung der Porenengstellenverteilung (PEV) wurde von SILVEIRA (1965) ein statistisches Berechnungsverfahren vorgeschlagen. Hierbei wird angenommen, dass die Bodenkörner sowohl kugelförmig wie auch dichtest gelagert vorliegen und eine Porenengstelle durch drei sich berührende Körner begrenzt wird. Über geometrische Beziehungen kann nun der Durchmesser einer Porenengstelle errechnet werden. Die Körner werden hierbei zur Begrenzung des Rechenaufwandes fünf Kornklassen zugeordnet. Die

Wahrscheinlichkeit mit der einzelne Kornklassen an der Begrenzung der Porenquerschnitte beteiligt sind und damit die Häufigkeit verschiedener Engstellendurchmesser wird anschließend anhand des Massenanteils der Kornklassen abgeschätzt.

Da diese Vorgehensweise jedoch zu einer Unterschätzung des Einflusses kleinerer Körner und damit der Häufigkeit kleinerer Porendurchmesser führt, wurde von ZIEMS (1968) vorgeschlagen, anstelle der Massenverteilung auf die Anzahlverteilung der Körner zurückzugreifen. Von SCHULZE (1992) wurde das Verfahren dahingehend erweitert, dass zur Bildung der Kornklassen anstelle des arithmetischen Mittels das geometrische Mittel der Klassengrenzen verwendet wird.

Zur Berechnung der effektiven Porenöffnungen wurde von SCHULER (1997) ein Modellansatz vorgeschlagen, der den natürlichen Gegebenheiten näher kommt, indem eine Porenengstelle als von vier Bodenkörnern begrenzt angenommen wird. Auch die Lagerungsdichte des Korngerüsts kann hierbei berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Porenengstellenverteilung greift SCHULER (1997) anstelle der Massen- oder Anzahlverteilung auf die Oberflächenverteilung zurück, die den Anteil der Kornklassen an der inneren Oberfläche des Korngerüsts beschreibt.

Ausgehend von der Überlegung, dass ein Korngerüst dann injizierbar sein müsste, wenn die größten Partikel der Injektionssuspension mit dem Durchmesser $d_{100,Sus}$ kleiner als die kleinsten Porenquerschnitte mit dem Durchmesser $d_{0,P}$ ausfallen, wird von SCHULZE (1992) folgendes Injektionskriterium formuliert

$$N_i = \frac{d_{0,P}}{d_{100,Sus}} . \quad (2.2)$$

Die Injizierfähigkeit gilt als gegeben, wenn $N_i \geq 1$ ist. Der kleinste Porenquerschnitt mit dem Durchmesser $d_{0,P}$ wird durch drei Körner der kleinsten auftretenden Kornklasse mit dem Durchmesser d_i begrenzt und kann auf der Basis geometrischer Überlegungen wie folgt aus der vergleichsweise einfach zu bestimmenden Massenverteilungskurve abgeschätzt werden:

$$d_{0,P} = 0,155 \cdot d_i . \quad (2.3)$$

Mit diesem von SCHULZE (1992) formulierten Injektionskriterium wird jedoch die Eindringfähigkeit von Injektionssuspensionen unterschätzt, da hier die nur theoretisch denkbare dichteste Lagerung der Körner vorausgesetzt wird. Experimentelle Untersuchungen von SCHULZE (1992) zeigten, dass eine Penetration erwartet werden kann, wenn mindestens 50 bis 60% der Porenengstellen bei dichtester Lagerung größer sind als die größten Partikel der Injektionssuspension.

Aufgrund der vielfältigen Verzweigungsmöglichkeiten der Porenkanäle in körnigen Erdstoffen ist es für den Injektionserfolg jedoch nicht zwingend erforderlich, dass alle Porenquerschnitte für die Suspensionspartikel passierbar sind. Dies setzt jedoch voraus, dass bereits blockierte Engstellen im Porensystem umflossen werden können und auf diese Weise durchgehende Penetrationspfade erhalten bleiben. Simulationsrechnungen von SCHULER (1997) auf der Basis der Perkolationstheorie ergaben, dass die Eindringtiefe in einen Filter dann unbegrenzt ist, wenn 36% der Porenengstellen für eine vorgegebene Partikelgröße passierbar sind. Weiterhin wurde von SCHULER festgestellt, dass, unter Berücksichtigung der bezogenen Lagerungsdichte D , eine Korrelation zwischen dem für die Penetrierbarkeit maßgebenden Fraktilwert der Porenengstellenverteilung p_{64} und dem Fraktilwert der Oberflächenverteilung o_{64} in der Form

$$p_{64} = 0,31 \cdot o_{64} \cdot e^{-0,9 \cdot D^{0,83}} \quad (2.4)$$

existiert.

Dieser Zusammenhang wird von SCHULER und BRAUNS (2000) zur Formulierung eines Injektionskriteriums aufgegriffen, bei dem die Injizierfähigkeit als gegeben gilt, wenn der Porenengstellendurchmesser p_{64} mindestens dem doppelten Betrag des Größtkorns der Suspension $d_{100,Sus}$ entspricht:

$$p_{64} \geq 2 \cdot d_{100,Sus} \quad (2.5)$$

Das zulässige Größtkorn der Suspension wird hier erheblich geringer angesetzt als der Porenengstellendurchmesser p_{64} , der den minimalen Engstellendurchmesser durchgängiger Penetrationspfade beschreibt, da zusätzliche Einflussgrößen, wie z.B. die Unregelmäßigkeit der Partikel- oder Kornform, zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist, wie von BUSCH und LUCKNER (1974) beschrieben, die geometrische Äquivalenz von Poren- und Partikelgrößen nicht für einen Partikeltransport ausreichend, sondern vielmehr ein gewisser „Schlupf“ erforderlich.

3 Theorie der Filtration

3.1 Allgemeines

Beim Verpressen von Injektionssuspensionen kann es zu einem Abtrennen von Suspensionsfeststoffen von der flüssigen Phase kommen, das als Filtration bezeichnet wird. Diese Phasentrennung kann in Abhängigkeit der Eigenschaften der Suspensionspartikel und der Eigenschaften des Poren- und Kluftsystems des anstehenden Bodens sowohl an der Eintrittsfläche in den Boden als auch beim Durchströmen des Porensystems stattfinden. Wird der Ort des Abtrennens als Unterscheidungskriterium für verschiedene Filtrationsarten herangezogen, so kann zwischen einer Oberflächen- und einer Tiefenfiltration unterschieden werden. Bei der Oberflächenfiltration ist aufgrund der Größe und Form der Suspensionspartikel im Verhältnis zur Geometrie der Porenöffnungen des anstehenden Bodens ein Eindringen auch kleinster Partikel in den Filter nicht möglich. Ist gleichzeitig ein Abfließen der als Filtrat bezeichneten flüssigen Suspensionsphase ohne einen größeren hydraulischen Widerstand in das Porensystem des Filters möglich, kommt es zu einem Anwachsen eines so genannten Filterkuchens auf der Oberfläche des Filters. Im Filterkuchen werden die abgetrennten Suspensionsfeststoffe verdichtet angelagert. Aufgrund der geringen Porendurchmesser des Filterkuchens und seiner damit verbundenen vergleichsweise geringen Durchlässigkeit, stellt er einen zusätzlichen hydraulischen Widerstand für die abzapressende flüssige Phase dar. Daher verlangsamt sich das weitere Anwachsen des Filterkuchens mit zunehmender Mächtigkeit. Ist hingegen ein Abfließen des Filtrats in das Porensystem des anstehenden Bodens nur sehr eingeschränkt möglich, unterbleibt ein ausgeprägtes Anwachsen des Filterkuchens und es bildet sich lediglich eine geringmächtige membranartige Filterkuchenschicht. Eine Oberflächenfiltration in der dargestellten Form ist jedoch nur dann zu erwarten, wenn die Injektionsfähigkeit der Injektionssuspension nicht gegeben ist.

Bei prinzipiell gegebener Injizierfähigkeit werden hingegen die dispergierten Feststoffe der Injektionssuspension in das Porensystem eines Filters eingetragen. Kommt es beim Durchströmen des Filters zu einem Abscheiden von Feststoffpartikeln, so wird dieser Vorgang als Tiefenfiltration bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Abdichtung von Gewässersohlen bzw. der künstlich herbeigeführten Dichtung von Dämmen wird dieser Mechanismus auch als Kolmation (BUSCH et. al. 1993) oder Kolmatation (ALBIKER 1972) bezeichnet.

Je nach Größe und Form benachbarter Filterkörner ergeben sich unterschiedliche Querschnitte der Porenengstellen zwischen den Filterkörnern. Treffen nun während des Injektionsvorgangs Suspensionspartikel auf Porenengstellen, deren Querschnitt einen Weitertransport der Partikel nicht erlauben, so werden diese blockiert und sind nicht mehr am weiteren Transport der Injektionssuspension beteiligt. Bleibt jedoch eine ausreichende Anzahl von Fließkanälen im Filter geöffnet, kann der Injektionsvorgang fortlaufen. Weiterhin können chemisch/physikalische Vorgänge, die nachfolgend genauer erläutert werden sollen, zu einem Anhaften von Partikeln auf den Oberflächen der Filterkörner führen. Dies geschieht, obwohl die Partikel von ihrer Geometrie her durch das Porensystem transportiert werden könnten. Durch die auf den Kornoberflächen anhaftenden Partikel wird die Ober-

flächenbeschaffenheit der Filterkörner verändert. Gleichzeitig können auch die Porenquerschnitte soweit verengt werden, dass suspensionstransportwirksame Fließwege blockiert werden (TIEN und PAYATAKES 1979). Verbleibt eine ausreichende Durchlässigkeit des auf diese Weise verengten Porensystems, so dass das Filtrat ohne größeren hydraulischen Widerstand abgepresst werden kann, kann sich an die Tiefenfiltration eine Oberflächenfiltration mit Filterkuchenbildung anschließen.

Für eine detaillierte Beschreibung der Partikelabscheidung in einem Tiefenfilter müssen die wesentlichen auf die Partikelabscheidung einwirkenden chemisch/physikalischen Vorgänge bekannt sein und theoretisch beschrieben werden können. Aufgrund der Vielzahl der sich gegenseitig beeinflussenden und teilweise nur in Ansätzen erforschten Wirkungsmechanismen erweist sich jedoch eine solche mikroskopische Betrachtungsweise als schwierig und kann derzeit nur in Einzelfällen gelingen. Für die Auswertung experimenteller Ergebnisse wird daher in den meisten Fällen auf eine makroskopische Betrachtungsweise der Tiefenfiltration zurückgegriffen, bei der die Wirksamkeit eines Tiefenfilters durch einen Filterkoeffizienten und eine Korrekturfunktion ausgedrückt wird, in dem die verschiedenen bei der Partikelabscheidung wirksamen Vorgänge zusammengefasst sind.

3.2 Mikroskopische Betrachtungsweise der Filtration

3.2.1 Strömungsmodelle für körnige Filterschichten

Für die Beschreibung der Strömung in körnigen Filterschichten existieren in der Literatur nach GIMBEL (1984) zwei prinzipiell unterschiedliche Modellarten (siehe Bild 3.1), die so genannten internen und externen Strömungsmodelle. Bei den internen Strömungsmodellen werden die Filterschichten durch Kapillaren, die unterschiedliche Geometrien aufweisen können, idealisiert. Bei den externen Strömungsmodellen werden hingegen die Filterschichten durch unterschiedlich angeströmte Kugelkollektoren ersetzt. Bei allen Modellen werden jeweils laminare axialsymmetrische Strömungsverhältnisse zugrunde gelegt, was die Beschreibung des Strömungsfeldes über eine Stromfunktion ermöglicht.

Beim einfachsten internen Strömungsmodell wird eine Filterschicht durch Kapillaren mit konstantem kreisförmigem Querschnitt idealisiert. Die Durchströmung dieser Kapillaren kann nach SCHEIDEGGER (1974) mit dem HAGEN-POISEUILLE-Gesetz beschrieben werden. Die fortlaufende Verengung und Aufweitung der Porenkanäle bleibt jedoch bei dieser Lösung unberücksichtigt. Ein erweitertes Modell mit einer periodischen Verengung und Aufweitung der Porenquerschnitte wurde von PAYATAKES et. al. (1973) beschrieben.

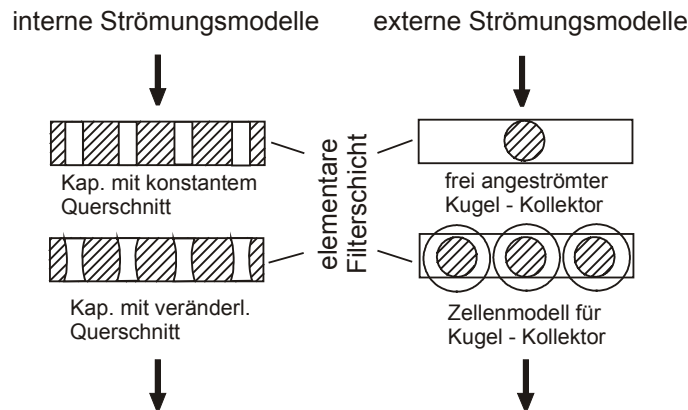


Bild 3.1: Schematische Darstellung verschiedener Modelle elementarer Filterschichten (GIMBEL 1984)

Bei den externen Strömungsmodellen kann im einfachsten Fall eine frei angeströmte Kugel angenommen werden. Eine Lösung für die Stromfunktion wird für diesen Fall von RAJAGOPALAN und TIEN (1979) angegeben. Die gegenseitige Beeinflussung der benachbarten Filterkörner kann jedoch bei diesem Modell ebenso wenig wie der Einfluss von Druckänderungen im Filter mit zunehmender Filterbeladung erfasst werden. Beides kann jedoch näherungsweise mit einem Zellenmodell, wie dem von HAPPEL (1958) vorgeschlagenen, berücksichtigt werden. Anstelle einer Filterschicht wird hier eine regelmäßig angeordnete Folge von kugelförmigen Einzelkollektoren betrachtet. Da ausschließlich Kugelkollektoren gleicher Größe betrachtet werden, kann jedem Kollektor ein gleich großer Porenanteil zugeordnet werden, welcher aufsummiert für alle Einzelkollektoren dem Porenvolumen der Filterschicht entspricht. Die innere Kugelfläche eines in Bild 3.2 dargestellten Kugelkollektors nach HAPPEL beschreibt die Oberfläche des Filterfeststoffes, die von einer zweiten äußeren Kugelfläche umgeben ist. Das Volumen dieser von der inneren und äußeren Kugelfläche begrenzten Kugelschale entspricht dem durchströmbaren Porenraum der einem Einzelkugelkollektor zugeordneten wurde.

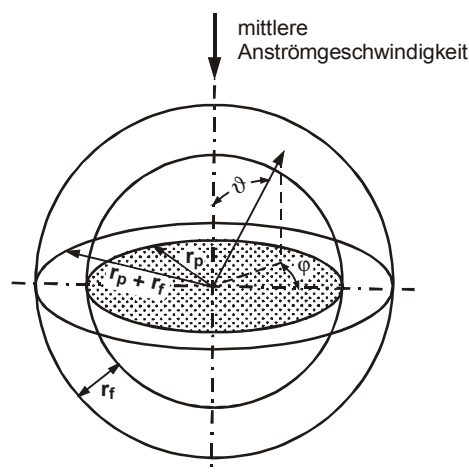


Bild 3.2: Kugelmodell nach HAPPEL (1958) aus SCHLÖTZER (1995)

3.2.2 Elementarer Abscheidegrad

Wird angenommen, dass der Filter aus einer Vielzahl von Elementarschichten aufgebaut ist, so kann nach GIMBEL (1978) und (1984) sowie NEUMANN (1983) und BEDBUR (1989) der so genannte elementare Abscheidegrad γ_0 in der Anfangsphase der Filtration näherungsweise errechnet werden. Dieser Faktor beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Partikel in einer elementaren Filterschicht der Höhe $\Delta z = d_k$ zurückgehalten wird. In die Berechnung des elementaren Abscheidegrads geht der Filterkoeffizient λ_0 ein, der eine Kenngröße für die Wirksamkeit eines Filters darstellt.

$$\gamma_0 = \lambda_0 \cdot d_k \quad \text{für } \gamma_0 \ll 1 \quad (3.1)$$

Mit $\lambda_0 =$ Filterkoeffizient in der Anfangsphase der Filtration

$d_k =$ mittlerer Korndurchmesser des Filters

Die innere Struktur einer solchen elementaren Filterschicht kann mit einem Kugelkollektormodell beschrieben werden, indem die elementare Filterschicht als eine Summe von Einzelkollektoren angenommen wird. Wird hierbei der Abscheidegrad eines Einzelkollektors mit γ_0^* bezeichnet, so gilt nach GIMBEL (1978 und 1984) sowie NEUMANN (1983)

$$\gamma_0 = \frac{3}{2} \cdot (1 - n) \cdot \gamma_0^* \quad (3.2)$$

Der Abscheidegrad hängt sowohl von den Eigenschaften des durchströmten Porensystems wie dem Porenanteil n , der Größe und Form der Poren, der Oberflächenbeschaffenheit der Kollektoren und dem bereits abgelagerten Feststoffvolumen als auch von den Porengeschwindigkeiten und suspensionsspezifischen Eigenschaften wie der Konzentration, Größe und Oberflächenbeschaffenheit der Partikel aber auch der Dichte und Viskosität des Dispergierungsmittels ab.

Um den Abscheidegrad eines Einzelkollektors γ_0^* und damit den elementaren Abscheidegrad γ_0 in Abhängigkeit verschiedener physikalisch-chemischer Einflussgrößen zu beschreiben, wurde erstmals von IVES und GREGORY (1967) vorgeschlagen, den Abscheidvorgang in zwei Schritte zu unterteilen:

1. Der Transport der Partikel an die Oberfläche der Filterkörner. Die Wahrscheinlichkeit, mit der es zu einem Kontakt der Partikel mit der inneren Oberfläche des Filters kommt, wird hierbei durch die so genannte Transportwirksamkeit $\gamma_{0,T}$ beschrieben.
2. Die Haftung der Partikel nach erfolgtem Kontakt. Die Haftwahrscheinlichkeit $\gamma_{0,H}$ beschreibt hierbei die Einflüsse der auf die Partikelhaftung einwirkenden Vorgänge.

Voraussetzung für das Anhaften eines Partikels ist jedoch der zuvor erfolgte Transport an die innere Filteroberfläche, so dass sich der elementare Abscheidegrad aus der Multiplikation der Transportwirksamkeit und der Haftwahrscheinlichkeit ergibt:

$$\gamma_0 = \gamma_{0,T} \cdot \gamma_{0,H} \quad (3.3)$$

3.2.3 Transport- und Haftmechanismen

3.2.3.1 Allgemeines

Beim Durchströmen eines Porensystems werden die Feststoffpartikel der Suspension in Kontakt mit den potentiellen Ablagerungsorten gebracht, an denen eine Arretierung der Partikel durch Haftmechanismen erfolgen kann. Bereits abgelagerte Partikel können gleichzeitig durch veränderte Randbedingungen wieder gelöst werden. Die Ablagerung kann nach HERZIG et. al. (1970) durch Anhaften an der Filteroberfläche, durch Einkeilen der Partikel im Kontaktbereich der Filter bzw. Bodenkörner, durch Sedimentation in Toträumen oder durch Absieben in Poren, deren Querschnitt eine Passage der Partikel nicht erlauben, erfolgen.

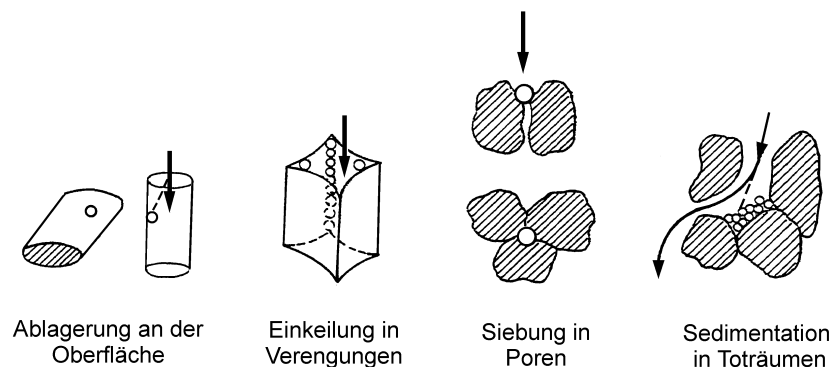


Bild 3.3: Ablagerungsorte von Partikeln in einem Tiefenfilter nach HERZIG et. al. (1970)

Einen Überblick über die wesentlichen bei der Filtration wirksamen Transport- und Haftmechanismen, die im folgenden beschrieben werden sollen, geben u.a. GIMBEL (1978), HERZIG et. al. (1970), IVES (1967, 1970, 1975a, 1980), IVES und GREGORY (1967), NEUMANN (1983) und ROLKE (1973). Wesentlich für die Unterscheidung eines Transport- von einem Haftmechanismus ist der erfolgte Kontakt eines Partikels mit der Oberfläche eines Kollektors. In der Definition des Kontaktes und damit der Einordnung verschiedener Mechanismen liegt jedoch eine gewisse Willkür und wird in der Literatur unterschiedlich gehandhabt. Die meisten Autoren, wie beispielsweise IVES und GREGORY (1967), IVES (1980) oder HILL (1983), beschränken sich bei der Darstellung von Haftmechanismen auf eine qualitative Diskussion der Van der Waals- und elektrischen Doppelschichtkräfte. NEUMANN (1983) und GIMBEL (1984) ordnen diese Kräfte hingegen den Transportmechanismen zu. Nach Auffassung von GIMBEL (1984) sollte der Kontakt eines Partikels mit der Oberfläche

des Kollektors dann als gegeben angenommen werden, wenn ausgesprochene Nahbereichskräfte, die über Oberflächenabstände von maximal einigen nm wirksam sind, nicht mehr vernachlässigt werden können. Auf eine Unterscheidung zwischen Transport- und Haftmechanismen soll daher im folgenden verzichtet werden.

3.2.3.2 Trägheit (Inertia)

Bei der Umströmung von Filterkörnern kommt es zwangsläufig zu einer Umlenkung der Stromlinien. Aufgrund ihrer Trägheit können einzelne Partikel dem Verlauf der Stromfäden nicht mehr folgen und kollidieren mit der Oberfläche des Filterkorns. Von IVES (1975a und 1980) und NEUMANN (1983) wird der Einfluss von Trägheitskräften auf die Partikelabscheidung über den dimensionslosen Trägheitsparameter E

$$E = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_f}{18 \cdot \eta \cdot d_K} \quad (3.4)$$

mit ρ_p - Partikeldichte

d_p - Partikeldurchmesser

v_f - Filtergeschwindigkeit

η - dynamische Viskosität des Fluids

d_K - Filterkorndurchmesser

ausgedrückt, aus dem, bei bekanntem Strömungsfeld, ein Einzelkollektorabscheidegrad errechnet werden kann (NEUMANN 1983). Nach HERZIG et. al. (1970) ist jedoch bei der Filtration von Fluiden der Einfluss der Trägheit im Verhältnis zum Einfluss der Sedimentation zu vernachlässigen. IVES (1975a und 1980) spricht der Trägheit bei der Filtration von Aerosolen eine hohe Bedeutung zu, bestätigt aber auch die vernachlässigbare Bedeutung dieses Transportmechanismus bei der Flüssigkeitsfiltration.

3.2.3.3 Sedimentation

Die beim Absinken eines kugelförmigen Partikels in einer Flüssigkeit erzielbare maximale Sinkgeschwindigkeit, bei der der hydrodynamische Widerstand und die Gewichtskraft im Gleichgewicht stehen, kann mit dem Gesetz von STOKES abgeschätzt werden. Die Sinkgeschwindigkeit erweist sich hierbei als abhängig vom Durchmesser sowie der Dichte eines Partikels und ist im Verhältnis zu den üblicherweise in Tiefenfiltern vorliegenden und über dem Porenquerschnitt gemittelten Fließgeschwindigkeiten eher gering. Bei der Umströmung eines Filterkorns kann jedoch in der Nähe der Kollektoroberfläche die lokale Fließgeschwindigkeit derart gering werden, dass, wie Beispielrechnungen von IVES (1975a) und NEUMANN (1983) zeigen, die annähernd konstante Sinkgeschwindigkeit eines Partikels von Bedeutung wird und zu einem Kontakt des Partikels mit der Kornoberfläche führt. Der

Abscheidegrad des Einzelkollektors infolge Sedimentation γ_G^* wird u.a. von YAO et. al. (1971), IVES (1967, 1975a und 1980) und NEUMANN (1983) angegeben:

$$\gamma_G^* = \left(\frac{(\rho_P - \rho_W) \cdot g \cdot d_P^2}{18 \cdot \eta \cdot v_f} \right)^2 \quad (3.5)$$

mit ρ_W - Fluideichte

ρ_P - Partikeldichte

g - Erdbeschleunigung

d_P - Partikeldurchmesser

η - dynamische Viskosität des Fluids

v_f - Filtergeschwindigkeit.

3.2.3.4 Interception

Liegen laminare Strömungsverhältnisse vor, wird ein Partikel mit seinem Mittelpunkt auf einer Stromlinie mitgeführt, sofern keine weiteren äußeren Kräfte einwirken. Durch die Auslenkung der Stromlinien beim Umströmen eines Filterkorns kann der Fall eintreten, dass der Abstand der betrachteten Stromlinie zur Oberfläche des Filterkorns geringer als der Radius des mitgeführten Partikels ausfällt und das Partikel allein aufgrund seiner äußeren Abmessungen in Kontakt zur Filteroberfläche tritt. Der Abscheidegrad des Einzelkollektors durch Interception γ_I^* beträgt nach YAO et. al. (1971) und NEUMANN (1983):

$$\gamma_I^* = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{d_P}{d_K} \right)^2 \quad (3.6)$$

mit d_P - Partikeldurchmesser

d_K - Filterkorndurchmesser.

IVES (1975a und 1967) und HERZIG et. al. (1970) beschreiben hingegen den Einfluss der Interception über den dimensionslosen Koeffizienten I

$$I = \frac{d_P}{d_K} \quad (3.7)$$

3.2.3.5 Siebeffekt

Kann ein Partikel aufgrund seiner geometrischen Abmessungen einen Porenquerschnitt nicht passieren, bleibt diese Engstelle dauerhaft blockiert und steht für den weiteren Feststofftransport nicht mehr zur Verfügung. Aber auch wenn ausschließlich Partikel in den Filter eingetragen werden, die rechnerisch alle Porenquerschnitte passieren können, so kann doch der Siebeffekt Bedeutung erlangen, wenn durch das fortlaufende Anhaften von Partikeln auf der Oberfläche der Filterkörner die Porenquerschnitte allmählich verengt werden. Der Abscheidegrad des Einzelkollektors γ_S^* wird von NEUMANN (1983) wie folgt angegeben:

$$\gamma_S^* = 2,7 \cdot \left(\frac{d_P}{d_K} \right)^{3/2} \quad (3.8)$$

3.2.3.6 Diffusion

Als Folge der Wärmebewegung der Flüssigkeitsmoleküle (Brownsche Molekularbewegung) führen auch Partikel in einer Suspension eine Zitterbewegung aus, die umso stärker ausfällt, je kleiner die Partikel sind. Wird gleichzeitig durch das Abscheiden von Partikeln, z.B. auf den Filterkornoberflächen, ein Konzentrationsgradient aufrechterhalten, so stellt sich ein diffusiver Massenstrom ein.

Einen Zusammenhang zwischen dem Durchmesser kugelförmiger Partikel und dem Diffusionskoeffizient D_0 beschreibt die von EINSTEIN (1905) abgeleitete Stokes-Einstein-Beziehung:

$$D_0 = \frac{k \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_P} \quad (3.9)$$

mit k = Boltzmann-Konstante

T = absolute Temperatur

IVES (1975a und 1980) drückt den Einfluss diffusiver Transportvorgänge über das Verhältnis der diffusiven zur konvektiven Transportgeschwindigkeit aus, welches der inversen Peclet-Zahl P_e entspricht:

$$\frac{1}{P_e} = \frac{D}{v_f \cdot d_K} = \frac{k \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_P \cdot v_f \cdot d_K} \quad (3.10)$$

Von LEVICH (1962) wird hingegen eine Lösung für den Abscheidegrad eines Einzelkollektors infolge Diffusion γ_D^* angegeben, die auch von NEUMANN (1983) und YAO et. al. (1971)

aufgegriffen wird. Grundlage dieses Ansatzes ist eine analytische Lösung für den diffusiven Massenstrom an die Oberfläche einer mit konstanter Geschwindigkeit in einer ruhenden Suspension fallenden Kugel.

$$\gamma_D^* = 0,9 \left(\frac{k \cdot T}{\eta \cdot d_P \cdot v_f \cdot d_K} \right)^{2/3} \quad (3.11)$$

Während IVES und GREGORY (1967) den Diffusionseinfluss für Partikel mit einem Durchmesser von 1 μm und geringer als bedeutsam einschätzen, bezeichnen HERZIG et. al. (1970) den Diffusionseinfluss als unter üblichen Tiefenfiltrationsbedingungen vernachlässigbar.

3.2.3.7 Hydrodynamische Einflüsse auf den Partikeltransport

Bei einer laminaren Filterströmung stellt sich ein Geschwindigkeitsgradient zwischen den Wandungen und der Mitte eines Porenkanals ein. Aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz beidseits eines mitgeführten Partikels neigen insbesondere nicht kugelförmige Partikel dazu, in Rotation versetzt zu werden. Aus der hieraus resultierenden Störung des Strömungsfeldes kann es zu einer Verschiebung der Partikel quer zur Strömungsrichtung kommen. Aufgrund der unregelmäßigen Form und Größe der Partikel sowie der wechselnden Strömungsverhältnisse in einem Porensystem lässt sich die Bewegung der Partikel nicht vorhersagen (IVES 1980). Bei experimentellen Untersuchungen von ISON und IVES (1969) mit einer Kaolinit-Suspension wurde eine Abhängigkeit des aus hydrodynamischen Einflüssen resultierenden Abscheidegrades von der Reynolds-Zahl festgestellt. Auch wenn ein Zusammenhang zwischen dem Abscheidegrad und der Reynolds-Zahl besteht, wird nach IVES (1980) die Reynolds-Zahl allein der Komplexität der Vorgänge nicht gerecht.

3.2.3.8 Van der Waals-Kräfte

Als Folge einer Elektronenbewegung um den Atomkern kann es zu einer unsymmetrischen Ladungsverteilung in der Elektronenhülle und damit zu einer temporären Dipolwirkung von Atomen und Molekülen kommen. Erfolgt nun eine Annäherung zweier Atome oder Moleküle, so richten sie sich derart aus, dass die positiv geladene Seite eines Atoms oder Moleküls an die negativ geladene Seite eines anderen Atoms oder Moleküls angrenzt. Die Folge der Ausrichtung ist eine Anziehungskraft zwischen den Atomen oder Molekülen, die als Van der Waals-Kraft bezeichnet wird. Die Van der Waals-Kräfte sind somit abhängig von der Polarisierbarkeit der Teilchen, die mit zunehmender Teilchenoberfläche anwächst.

Während nach IVES (1970) die Reichweite der Van der Waals-Kräfte gewöhnlich weniger als 50 nm, beträgt bezeichnet GIMBEL (1984) die Van der Waals-Kräfte als für das Abscheideverhalten eines Partikels von besondere Bedeutung, da diese über relativ große Oberflächenabstände von bis zu einigen 100 nm wirksam seien.

3.2.3.9 Elektrische Doppelschichtkräfte

Sowohl die körnigen Filtermaterialien wie auch die suspendierten Feststoffpartikel weisen im Allgemeinen eine Oberflächenladung auf, deren Vorzeichen sowohl vom pH-Wert wie auch von Zusammensetzung der umgebenden Flüssigkeit abhängt. Diese Oberflächenladung der Feststoffe wird durch eine entsprechende Anzahl von Ionen mit entgegengesetztem Ladungsvorzeichen kompensiert, so dass der Übergangsbereich zwischen fester und flüssiger Phase elektrisch neutral bleibt. Da die so genannten Gegenionen einerseits von den Feststoffen angezogen werden, andererseits jedoch das Bestreben haben sich möglichst homogen in der Flüssigkeit zu verteilen, kommt es zur Ausbildung der so genannten elektrischen Doppelschicht. Die Eigenschaften der Doppelschicht werden über den Verlauf des elektrischen Potentials mit der Entfernung zum Feststoff beschrieben. Kommt es zu einer Annäherung zweier Teilchen, überlagern sich die elektrischen Doppelschichten. Hieraus können, abhängig vom Vorzeichen und weiteren Eigenschaften des Potentials, sowohl abstoßende wie auch anziehende Kräfte resultieren. Weisen Suspensionsteilchen und Filterstoffe ein elektrisches Potential gleichen Vorzeichens auf, unterbleibt das Abscheiden der Partikel im Filter, sofern die abstoßenden Doppelschichtkräfte nicht durch andere anziehende Kräfte überlagert werden.

3.3 Beschreibung der Tiefenfiltration bei makroskopischer Betrachtungsweise

3.3.1 Allgemeines

Um experimentelle Ergebnisse theoretisch nachvollziehen zu können, wird i.d.R. auf eine makroskopische Betrachtungsweise der Filtration zurückgegriffen. Hierbei wird die Wirksamkeit des Tiefenfilters in der Anfangsphase der Filtration durch einen Filterkoeffizienten λ_0 beschrieben, in dem die für den Transport und das Abscheiden von Feststoffpartikeln in einem Tiefenfilter verantwortlichen Mechanismen zusammengefasst sind. Durch diese Vereinfachung ist es möglich, für verschiedene einfache Filtrationsrandbedingungen geschlossene Lösungen zu bestimmen, mit denen die Partikelkonzentration sowie die Beladung in einem Filter beschrieben werden können. Gleichzeitig können jedoch aufgrund der getroffenen Vereinfachungen die durch Auswertung experimenteller Untersuchungen ermittelten Filterkoeffizienten nur eingeschränkt auf veränderte Filtrationsrandbedingungen übertragen werden.

3.3.2 Massenbilanz und kinetischer Ansatz

Vereinfachend soll bei der makroskopischen Beschreibung der Partikelabscheidung in einem Tiefenfilter von einer homogenen Suspension, deren dispergierte Partikel die gleichen stofflichen Eigenschaften aufweisen, ausgegangen werden. Der homogene, isotrope Filter soll mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit durchströmt werden und die Wirksamkeit des

Filters bzw. der Anteil der abgeschiedenen Partikel soll proportional zur Konzentration der Partikel in der Suspension sein (IVES und GREGORY 1967).

Wird ein differentielles Filterelement betrachtet, so entspricht die zeitliche Änderung der Beladung dieses Filterelementes der Differenz des ein- und ausströmenden Partikelstromes. Werden eine konstante Filtergeschwindigkeit v_f und ein konstanter axialer Dispersionskoeffizient \bar{D} vorausgesetzt, so lautet u.a. nach HERZIG et. al. (1970) oder GIMBEL (1984) die Massenbilanzgleichung für ein differentielles Filterelement:

$$\frac{\partial(\sigma + n \cdot C)}{\partial t} + v_f \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - \bar{D} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (3.12)$$

- mit
- t - Filterlaufzeit
 - z - Filterschichttiefe
 - n - Porenanteil
 - C - Partikelkonzentration der flüssigen Phase
 - v_f - Filtergeschwindigkeit
 - σ - Filterbeladung (Abgeschiedene Partikel pro Volumeneinheit des Filters)
 - \bar{D} - axialer Dispersionskoeffizient.

Nach HERZIG et. al. (1970) und IVES (1970) kann jedoch der Dispersionsterm aufgrund der vergleichsweise geringen Dispersionskoeffizienten vernachlässigt werden. Wird gleichzeitig auch die Veränderung des Porenvolumens durch abgefilterte Partikel vernachlässigt, vereinfacht sich die Massenbilanzgleichung zu:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} = -v_f \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.13)$$

Dabei wird gleichzeitig die Zeit t durch die Zeitvariable τ ersetzt, die um den Zeitraum, den die Partikel bis zum Erreichen der Filterschicht in der Entfernung z bei eindimensionaler Filterströmung benötigen, verkürzt ist.

$$\tau = t - \frac{n \cdot z}{v_f} \quad (3.14)$$

Durch einen kinetischen Ansatz wird der Übergang der Partikel aus der flüssigen Phase zum Filtermaterial beschrieben (GIMBEL 1984).

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} = f_{\sigma}(C, \sigma, \underline{Y}) \quad (3.15)$$

Der Parametervektor \underline{Y} umfasst die sonstigen Einflussgrößen auf das Abscheiden der Partikel, die beispielsweise aus den Eigenschaften der Filterschicht, der Partikel oder auch der Filtergeschwindigkeit herrühren können. Für die Lösung der Differentialgleichungen der Massenbilanz und des kinetischen Ansatzes wird die Funktion f_σ in der von IWASAKI (1937) vorgeschlagenen Form

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau} = \lambda \cdot v_f \cdot C_0 \quad (3.16)$$

mit C_0 - Partikelkonzentration in der Ausgangssuspension

angesetzt, die eingesetzt in Gleichung 3.13 zu folgender Gleichung führt:

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda \cdot C_0. \quad (3.17)$$

Die Wirksamkeit des Filters wird hierbei über den Filterkoeffizienten λ , beschrieben. Nach IWASAKI (1937) ist somit die Beladungszunahme eines Filters direkt proportional zu der in einer Zeiteinheit eingetragenen Partikelmenge.

Mit der zunehmenden Beladung des Filters ändert sich jedoch seine Wirksamkeit. Dies kann berücksichtigt werden, indem der Filterkoeffizient λ in der Form

$$\lambda = \lambda_0 \cdot f_\lambda(C, \sigma, \underline{Y}) \quad (3.18)$$

angesetzt wird. Der Filterkoeffizient in der Anfangsphase der Filtration λ_0 wird hier mit einer Korrekturfunktion f_λ multipliziert, mit der die Änderung der Filterwirksamkeit beschrieben wird. Für die Korrekturfunktion ist eine Vielzahl von Funktionsansätzen denkbar, die es jedoch nur in einigen wenigen Fällen ermöglichen, geschlossene Lösungen für die Partikelkonzentration und die Beladung in einem Filter zu bestimmen.

3.3.3 Eindimensionale Filterströmung

3.3.3.1 Konstante Wirksamkeit des Filters

Für den Fall $C_0 = \text{konst}$, $\lambda_0 = \text{konst}$ und $v_f = \text{konst}$ können nach HERZIG et. al. (1970) die gekoppelten partiellen Differentialgleichungen der Massenbilanz und des kinetischen Ansatzes in zwei gewöhnliche Differentialgleichungen überführt werden:

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial \tau} = C_0 \cdot v_f \cdot \lambda_0 \cdot f_\lambda(\sigma, \underline{Y}) \quad (3.19)$$

mit σ_e - Filterbeladung in der Einlaufschicht

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = -\lambda_0 \cdot \sigma \cdot f_\lambda(\sigma, \underline{Y}). \quad (3.20)$$

Wird die Korrekturfunktion im einfachsten Fall zu $f_\lambda = 1$ gesetzt, so ergibt sich ein konstanter Filterfaktor $\lambda = \lambda_0$. Die Wirksamkeit des Filters bleibt in diesem Fall auch mit zunehmender Beladung unverändert. Durch Integration der Gleichungen (3.19) und (3.20) erhält man die folgende Lösungen für die Konzentrationsverteilung $C(z)$ und die Filterbeladung $\sigma(z, \tau)$, wie sie von HERZIG et. al. (1970) und anderen angegeben werden:

$$C(z) = C_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot z} \quad (3.21)$$

$$\sigma(z, \tau) = \lambda_0 \cdot C_0 \cdot v_f \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_0 \cdot z}. \quad (3.22)$$

Die Filterbeladung σ erweist sich hier als direkt proportional zum Partikelvolumen, welches in eine Filterschicht transportiert wurde.

3.3.3.2 Linear veränderliche Wirksamkeit des Filters

Mit zunehmender Partikelbeladung nimmt jedoch üblicherweise die Wirksamkeit eines Filters von der Anfangsgröße $\lambda = \lambda_0$ auf die Größe $\lambda = 0$ ab, wenn die Filterbeladung σ der maximalen oder Sättigungbeladung σ_s entspricht. Wird zunächst von einer linearen Abhängigkeit des Filterkoeffizienten von der Filterbeladung ausgegangen, so lautet die Korrekturfunktion f_λ :

$$f_\lambda = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (3.23)$$

Wird die Korrekturfunktion wiederum in die Gleichungen 3.19 und 3.20 eingesetzt und diese integriert, so ergeben sich für den Konzentrationsverlauf $C(z)$ und die Filterbeladung $\sigma(z)$ folgende Lösungen (HERZIG et. al. 1970):

$$C(z, \tau) = C_0 \cdot \frac{e^{(C_0 \cdot v_f \cdot \lambda_0 \cdot \tau) / \sigma_s}}{e^{(C_0 \cdot v_f \cdot \lambda_0 \cdot \tau) / \sigma_s} + e^{\lambda_0 \cdot z} - 1} \quad (3.24)$$

$$\sigma(z, \tau) = \sigma_S \cdot \frac{1 - e^{-(C_0 \cdot v_f \cdot \lambda_0 \cdot \tau) / \sigma_S}}{1 - e^{-(C_0 \cdot v_f \cdot \lambda_0 \cdot \tau) / \sigma_S} - e^{-\lambda_0 \cdot z}}. \quad (3.25)$$

3.3.4 Kugelsymmetrische Filterströmung

3.3.4.1 Allgemeines

Für den Fall einer kugelsymmetrischen Ausbreitung der Suspensionsfront finden sich hingegen in der Literatur keine Lösungsansätze. Vereinfachend kann von einer kugelförmigen Eintrittsfläche in den Filter mit dem Radius r_F ausgegangen werden (Bild 3.4). Die Entfernung einer Kugelschale vom Mittelpunkt der Kugel soll mit r_K bezeichnet werden. Gleichzeitig muss ein Filterkoeffizient $\lambda_{0,K}$ in der Anfangsphase der Filtration bei kugelförmiger Filterströmung neu eingeführt werden.

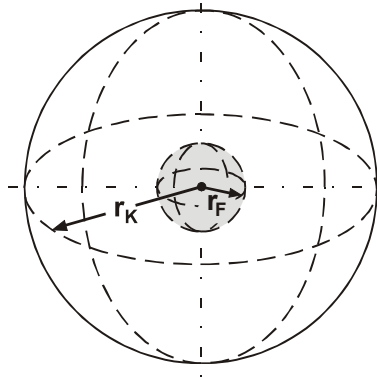


Bild 3.4: Kugelsymmetrische Filterströmung

Unter Annahme eines konstanten Durchflusses Q und unter Vernachlässigung des Dispersionsterms lautet die vereinfachte Massenbilanzgleichung für ein differentielles Kugelschalenelement:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \tau_K} = -Q \cdot \frac{\partial C}{\partial r_K}. \quad (3.26)$$

Enthalten ist hierin die Zeitvariable τ_K , mit der die Zeit t um den Zeitraum, den die Suspension bis zum Erreichen einer Kugelschale im Abstand r_K benötigt, korrigiert wird. Sie lautet:

$$\tau_K = t - \frac{n \cdot 4 \cdot \pi \cdot (r_K^3 - r_F^3)}{3 \cdot Q}. \quad (3.27)$$

Für den Fall $C_0 = \text{konst}$, $\lambda_{0,K} = \text{konst}$ und $Q = \text{konst}$ können die gekoppelten partiellen Differentialgleichungen der Massenbilanz und des kinetischen Ansatzes wiederum in zwei gewöhnliche Differentialgleichungen überführt werden

$$\frac{\partial \sigma_{e,K}}{\partial \tau_K} = C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot f_\lambda(\sigma, \underline{Y}) \quad (3.28)$$

mit $\sigma_{e,K}$ - Filterbeladung in der Einlaufschicht bei $r_K = r_F$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r_K} = -\lambda_{0,K} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_K^2 \cdot f_\lambda(\sigma, \underline{Y}) \quad (3.29)$$

3.3.4.2 Konstante Wirksamkeit des Filters

Unter Annahme einer im einfachsten Fall konstanten Filterwirksamkeit lautet die Korrekturfunktion $f_\lambda = 1$. Nach dem Einsetzen in Gleichung 3.28 und anschließender Integration (Trennung der Veränderlichen) ergibt sich mit der Randbedingung $\sigma_{e,K} = 0$ für $\tau_K = 0$ für die Filterbeladung in der Einlaufschicht folgende Lösung:

$$\sigma_{e,K}(\tau_K) = \lambda_{0,K} \cdot C_0 \cdot Q \cdot \tau_K \quad (3.30)$$

Die Integration der Gleichung 3.29 durch Trennung der Veränderlichen führt, mit der Randbedingung, dass bei $r_K = r_F$, also an der kugelförmigen Einlauffläche, die Filterbeladung $\sigma = \sigma_{e,K}$ sein muss, durch Einsetzen von Gleichung 3.30 zu folgender Lösung für die Filterbeladung $\sigma(r_K, \tau_K)$

$$\sigma(r_K, \tau_K) = \lambda_{0,K} \cdot C_0 \cdot Q \cdot \tau_K \cdot e^{-\lambda_{0,K} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_K^3 - r_F^3)} \quad (3.31)$$

Nach Herzig et. al. (1970) gilt:

$$C = C_0 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_e} \quad (3.32)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 3.30 und 3.32 in Gleichung 3.31 ergibt sich für die Konzentrationsverteilung $C(r_K)$

$$C(r_K) = C_0 \cdot e^{-\lambda_{0,K} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_K^3 - r_F^3)} \quad (3.33)$$

3.3.4.3 Linear mit der Filterbeladung veränderliche Wirksamkeit des Filters

Soll hingegen anstelle eines konstanten Filterkoeffizienten von einem linear mit der Beladung veränderlichen Filterkoeffizienten ausgegangen werden, so lautet auch hier die Korrekturfunktion (Gl. 3.23):

$$f_\lambda = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}$$

Durch Einsetzen in Gleichung 3.28 und anschließender Integration ergibt sich mit den Randbedingungen $\sigma_e = 0$ für $\tau_K = 0$ und einigen Umformungen für die Filterbeladung in der Einlaufschicht:

$$\sigma_{e,K}(\tau_K) = \sigma_s \cdot \left[\frac{e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s} - 1}{e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s}} \right]. \quad (3.34)$$

Die Integration des kinetischen Ansatzes (Gleichung 3.29) mit eingesetzter Korrekturfunktion f_λ nach dem Prinzip der Trennung der Veränderlichen führt nach zahlreichen Umformungen mit der Randbedingung $\sigma = \sigma_{e,K}$ für $r_K = r_F$ unter Verwendung von Gleichung 3.30 dann zu folgender Lösung der Filterbeladung:

$$\sigma(r_K, \tau_K) = \sigma_s \cdot \frac{1 - e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s}}{1 - e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s} - e^{\lambda_{0,K} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi (r_K^3 - r_F^3)}}. \quad (3.35)$$

Aus Gleichung 3.35 kann nun durch Einsetzen der Gleichungen 3.32 und 3.34 die Partikelkonzentration $C(r_K, \tau_K)$ errechnet werden

$$C(r_K, \tau_K) = C_0 \cdot \frac{e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s}}{e^{(C_0 \cdot Q \cdot \lambda_{0,K} \cdot \tau_K) / \sigma_s} + e^{\lambda_{0,K} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi (r_K^3 - r_F^3)} - 1}. \quad (3.36)$$

3.3.5 Diskussion der makroskopischen Betrachtungsweise der Filtration

Bei einer makroskopischen Beschreibungsweise der Tiefenfiltration ist die Güte der Anpassung einer theoretischen Lösung im Praxisfall im Wesentlichen abhängig von der Eignung der Korrekturfunktion, die veränderliche Filterwirksamkeit abzubilden. Aufgrund der Vielzahl der auf die Partikelabscheidung einwirkenden Vorgänge und der stark vereinfachten Modell-

vorstellung weist GIMBEL (1984) darauf hin, dass mit makroskopischen Beschreibungsmethoden nur in einem relativ engen Bereich zwischen experimentell untersuchten Betriebszuständen interpoliert werden kann. Die Übertragung der Anpassungskonstanten von Filtergleichungen auf Anwendungsfälle mit veränderten Randbedingungen ist daher mit Unsicherheiten behaftet. Die meisten in der Literatur vorgeschlagenen Ansätze von Korrekturfunktionen gehen von einer vollständigen Unwirksamkeit eines Tiefenfilters aus, wenn die Beladung eines Filters eine kritische Größe bzw. Sättigungsbeladung erreicht. Hierbei wird jedoch vorausgesetzt, dass, auch wenn eine Sättigungsbeladung erreicht ist, eine Partikelabscheidung durch Siebwirkung nicht stattfindet.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der dispergierten Feststoffpartikel müssen in der Modellvorstellung durch eine repräsentative Partikelsorte mit gleichen stofflichen Eigenschaften näherungsweise abgebildet werden. Auch hierdurch können sich Einschränkungen in der Anwendbarkeit der hergeleiteten Gleichungen ergeben. Darüber hinaus werden zeitlich veränderliche Eigenschaften der Partikel, wie sie beispielsweise bei hydraulisch aktiven Suspensionsbestandteilen nicht auszuschließen sind, in der Modellvorstellung nicht berücksichtigt.

Für die Auswertung experimenteller Daten mit Hilfe der makroskopischen Beschreibungsweise kommt erschwerend hinzu, dass geschlossene Lösungen der Differentialgleichungen in der in Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehensweise nur für einige wenige einfache Ansätze der Korrekturfunktionen existieren. Ist es dagegen erforderlich, auf komplexere Ansätze der Korrekturfunktion zurückzugreifen, gestaltet sich die Auswertung experimenteller Daten erheblich aufwendiger.

Mit zunehmender Beladung eines Tiefenfilters erfolgt ein Übergang in die dynamische Phase der Filtration, bei der die Partikelabscheidvorgänge in zunehmendem Maße durch die bereits im Filter angesammelten Partikel beeinflusst werden (GIMBEL 1984). Während in der Anfangsphase der Filtration bei der Beschreibung der Abscheidvorgänge das Verhalten der Partikel in der Flüssigkeit sowie die Wechselwirkungen der Teilchen mit den Kollektoroberflächen zu berücksichtigen sind, müssen in der dynamischen Phase der Filtration zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln in der flüssigen Phase und den auf der Kollektoroberfläche bereits haftenden Partikeln einbezogen werden. Hierbei kann die Haftung weiterer abzuschheidender Teilchen durch die bereits auf der Kollektoroberfläche anhaftenden Teilchen erschwert oder auch verhindert werden. Die durch die Partikelabscheidung reduzierten Porenquerschnitte bewirken bei konstant gehaltener Filtergeschwindigkeit ein Anwachsen der an der Oberfläche der Filterkörner angreifenden hydrodynamischen Kräfte. Hierdurch wird einerseits die Anlagerung weiterer Partikel erschwert. Andererseits können auch bereits abgeschiedene Partikel, insbesondere solche mit schwacher Bindung zum Filterkorn, wieder gelöst und weitertransportiert werden (HERZIG et. al. 1970, IVES 1975a und 1980).

Wie dargestellt ist die theoretische Beschreibung der Abscheidvorgänge in einem Tiefenfilter schon in der Anfangsphase der Filtration bislang nicht umfassend gelungen. Da sich

darüber hinaus in der dynamischen Phase der Filtration zusätzliche Einflüsse ergeben, ist auch in dieser Phase eine mikroskopische Betrachtungsweise der Tiefenfiltration unter praxisnahen Randbedingungen bislang nicht ohne weiteres möglich. In der Literatur beschränken sich daher die meisten Autoren wie z.B. TIEN et. al. (1979) auf eine makroskopische Betrachtungsweise der Abscheidevorgänge in der dynamischen Phase der Filtration.

Die Anwendung filtertheoretischer Ansätze beschränkt sich i.d.R. auf Problemstellungen, bei denen die Trennung einer gering konzentrierten Suspension von ihren Feststoffpartikeln im Mittelpunkt steht. Ein Durchbruch der Feststoffe durch den Filter soll hier vermieden werden. Werden hingegen Suspensionen mit einer vergleichsweise hohen Feststoffkonzentration betrachtet, wie dies im Fall von Injektionssuspensionen der Fall ist, ist ein vergleichsweise schneller Übergang zur dynamischen Phase der Filtration zu erwarten.

4 Verwendete Versuchsmaterialien

4.1 Feinstbindemittel

4.1.1 Allgemeines

Bei Feinstbindemitteln handelt es sich um hydraulische Bindemittel, die in ihrer stofflichen Zusammensetzung zunächst den herkömmlichen Zementen ähneln. An die Korn- bzw. Partikelgrößenverteilung der Feinstbindemittel werden jedoch spezielle Anforderungen gestellt. So wird das Penetrationsvermögen einer Injektionssuspension im Wesentlichen vom Anteil und Durchmesser der enthaltenen Größtkörner bestimmt, da diese allein auf Grund ihrer geometrischen Abmessungen am ehesten in Gefahr laufen, Engstellen des Porensystems nicht passieren zu können. Damit ergibt sich die prinzipielle Injizierfähigkeit eines Feinstbindemittels aus dem Verhältnis der Korngrößen des Feinstbindemittels zu den Porengrößen, die sich wiederum in Abhängigkeit der Form und Größenverteilung der Bodenkörner sowie deren Lagerungsdichte einstellt. Nach dem MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITTELN IN LOCKERGESTEIN (2002) wird anhand des Grenzwertes der Kornverteilung d_{95} , der den maximalen Korndurchmesser von 95% der Masse des Feinstbindemittels beschreibt, zwischen

- Standardbindemitteln (Normalzement) mit $d_{95} > 40 \mu\text{m}$
- Feinstbindemittel mit $20 \mu\text{m} < d_{95} \leq 40 \mu\text{m}$
- Feinstbindemittel mit $d_{95} \leq 20 \mu\text{m}$

unterschieden.

Die Partikelgrößenverteilung des trockenen Feinstbindemittels kann jedoch von der des in Suspension befindlichen abweichen, wenn durch Agglomerationen bzw. das hydrationsbedingte Kornwachstum effektiv größere Körner gemessen werden. Einen deutlichen Einfluss kann hier nach SCHULZE et. al. (1992) der Bindemittelgehalt der Feinstbindemittelsuspension haben. TAUSCH und TEICHERT (1990) hingegen beschreiben den Einfluss des Wasser-Bindemittelverhältnisses (W/B) auf die Partikelgrößenverteilung als gering. Eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zum Größeren hin kann jedoch auch eine Folge eines ungenügenden Aufschlusses des Feinstbindemittels im Zuge der Aufbereitung (u.a. MERKBLATT 2002, TAUSCH und TEICHERT 1990) oder, wie eingangs schon erwähnt, die Folge von Hydratationsprozessen sein. SCHULZE et. al. (1992) weisen auf die Ettringitbildung an den Partikeln als Folge von Hydratationsprozessen hin, durch die die Kornverteilung in der Suspension automatisch ins Größere verschoben wird.

Feinstbindemittelsuspensionen wird daher vielfach ein Additiv beigemischt. Nach NOSKE und KÜHLING (1992) sowie SCHULZE et. al. (1992) kann so die Neigung zur Agglomeratbildung in erheblichem Umfang reduziert werden, da die Additive von der Oberfläche des Feinstbindemittels resorbiert werden und die Partikel hierdurch gleichsinnig, mit der Folge gegenseitiger Abstoßung, aufgeladen werden. Zusätzlich führe die Zugabe von Additiven auch zu einer Verbesserung der Fließeigenschaften, indem die Fließgrenze der Feinstbindemittelsuspensionen herabgesetzt wird. Die Inhaltsstoffe solcher Additive werden jedoch im Allgemeinen nicht veröffentlicht. JENKINS et. al. (1992) beschreiben die erfolgreiche Ver-

wendung von Zitronensäure als Abbindeverzögerer bei Feinstbindemitteln, während SANO et. al. (1996) und PERRET et. al. (1997) von Verflüssigern auf Naphtalinbasis berichten.

Die untere Anwendungsgrenze der Feinstbindemittel wurde im Laufe der Jahre immer weiter ins Feinere hin verschoben und reicht derzeit nach Literatur- bzw. Herstellerangaben bis in Sande mit einem Feinsandanteil von bis zu 80 Massen-%. Die obere Anwendungsgrenze der Feinstbindemittel wird hingegen dadurch gekennzeichnet, dass ein unkontrolliertes Abfließen in gröbere Lagen zu verhindern ist. Die Wahl der Feinstbindemittelsorte sowie des Bindemittelgehaltes einer Feinstbindemittelsuspension, der üblicherweise über den W/B-Wert ausgedrückt wird, erfolgt abgestimmt auf das Ziel der Injektionsmaßnahme. So sind nach MERKBLATT (2002) für Verfestigungsinjektionen W/B-Werte zwischen 0,5 und 3,0, bei Abdichtungsinjektionen W/B-Werte zwischen 3,0 und 6,0 sowie bei Immobilisierungsinjektionen W/B-Werte zwischen 1,0 und 6,0 gebräuchlich.

4.1.2 Verwendete Feinstbindemittelsorten

Für das experimentelle Versuchsprogramm wurde das Feinstbindemittel Finosol der Dyckerhoff AG verwendet. Hierbei handelt es sich um eine gebrauchsfertige Werk trockenmischung, der lediglich Wasser zugegeben werden muss. Das Anmischen erfolgt mit hochtourig arbeitenden Mischaggregaten (≥ 3000 U/min) und einer Mindestmischzeit von 5 Minuten (DYCKERHOFF 2002b). Dieses speziell für Abdichtungsinjektionen in Lockergesteinen konzipierte Feinstbindemittel wird in drei verschiedenen Mahlfineinheiten F, U und X angeboten. Nach Herstellerangaben (DYCKERHOFF 2002a) liegt das vorwiegende Anwendungsgebiet der Sorte Finosol F bei Böden mit einem Feinsandanteil von ca. 20%, der Sorte Finosol U bei Böden mit einem Feinsandanteil von ca. 50% und der Sorte Finosol X bei einem Feinsandanteil von 80% sowie bei stark geschichteten Böden. Als Bestandteile der Feinstbindemittel werden Hüttensande, Klinker, Abbindeeregler sowie Zusatzstoffe und –mittel genannt.

Die Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Feinstbindemittelsuspensionen mit Wasser-Bindemittelverhältnissen (W/B) von 4,0 und 5,0 sind in Bild 4.1, Kennwerte der Feinstbindemittelsorten in Tabelle 4.1 dargestellt. Die durch die Injektion des Feinstbindemittels zu erwartende Reduktion der Wasserdurchlässigkeit wird herstellenseits in einer Größenordnung von ca. 3 Zehnerpotenzen bei einem Probenalter von 28 Tagen angegeben.

Da die Partikelgrößenverteilungen von Feinstbindemittelsuspensionen mit unterschiedlichen W/B-Werten kaum voneinander abweichen (Bild 4.1), konnte der zu vermutende geringe Einfluss der Bindemittelkonzentration auf die Partikelgrößen durch hier nicht besonders dokumentierte Vergleichsuntersuchungen an Suspensionen mit W/B-Werten von 3, 7, 10 und 20 bestätigt werden. Dies Ergebnis deckt sich insofern mit den diesbezüglichen Erkenntnissen von MITTAG (2000). Auch eine zwischen 10 und 30°C schwankende Temperatur des Anmachwassers hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung.

Aufgrund der bei Abdichtungsinjektionen vielfach unvermeidbaren langen Injektionszeiten kann zudem die zeitliche Veränderung der Partikelgrößen für die Penetrationsfähigkeit der Feinstbindemittelsuspension bedeutsam werden. Bei den Feinstbindemittelsorten Finosol U und X sowie W/B-Werten von 4 und 5 waren auch 180 Minuten nach dem Anmischen der Suspension nur geringe Veränderungen der Partikelgrößenverteilung zu beobachten. Dies galt unabhängig davon, ob die Suspension mit Hilfe eines Rührers permanent in Bewegung gehalten oder nicht bewegt wurde. Beim Feinstbindemittel Finosol F ist jedoch, wie Bild 4.2 zeigt, dann eine erhebliche Veränderung der Partikelgrößenverteilung festzustellen, wenn die Suspension nicht in Bewegung gehalten wird. Dieses besondere Verhalten des Feinstbindemittels Finosol F wird auch von MITTAG (2000) beschrieben, wobei die Suspension dort abwechselnd einer Scherbeanspruchung bei der Durchführung von MARSH-Versuchen und anschließenden Ruhephasen ausgesetzt war.

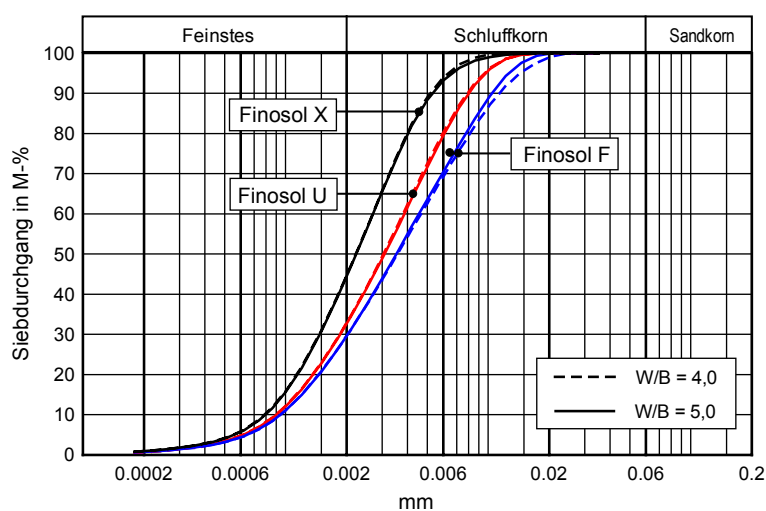


Bild 4.1: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Feinstbindemittelsorten

Feinstbindemittelsorte	Finosol F		Finosol U		Finosol X	
Dichte in g/cm ³	ca. 2,8		ca. 2,8		ca. 2,8	
Korndurchmesser	d ₉₅ in µm	≤ 16	≤ 9,5		≤ 6	
	d ₅₀ in µm	≤ 5	≤ 3,5		≤ 2	
Wasser-Bindemittelwert	4	5,5	4	5,5	4	5,5
Sedimentation in Vol.-%	nach 30 min	0	0	0	0	0
	nach 60 min.	0	0	0	0	0
Auslaufzeit (MARSH-Zeit) in s/dm ³ nach Aufbereitung		34	33	34	32	33
	nach 30 min	35	34	35	33	34
	nach 60 min	37	34	36	33	35

Tab. 4.1: Kennwerte der verwendeten Feinstbindemittel (DYCKERHOFF 2002a)

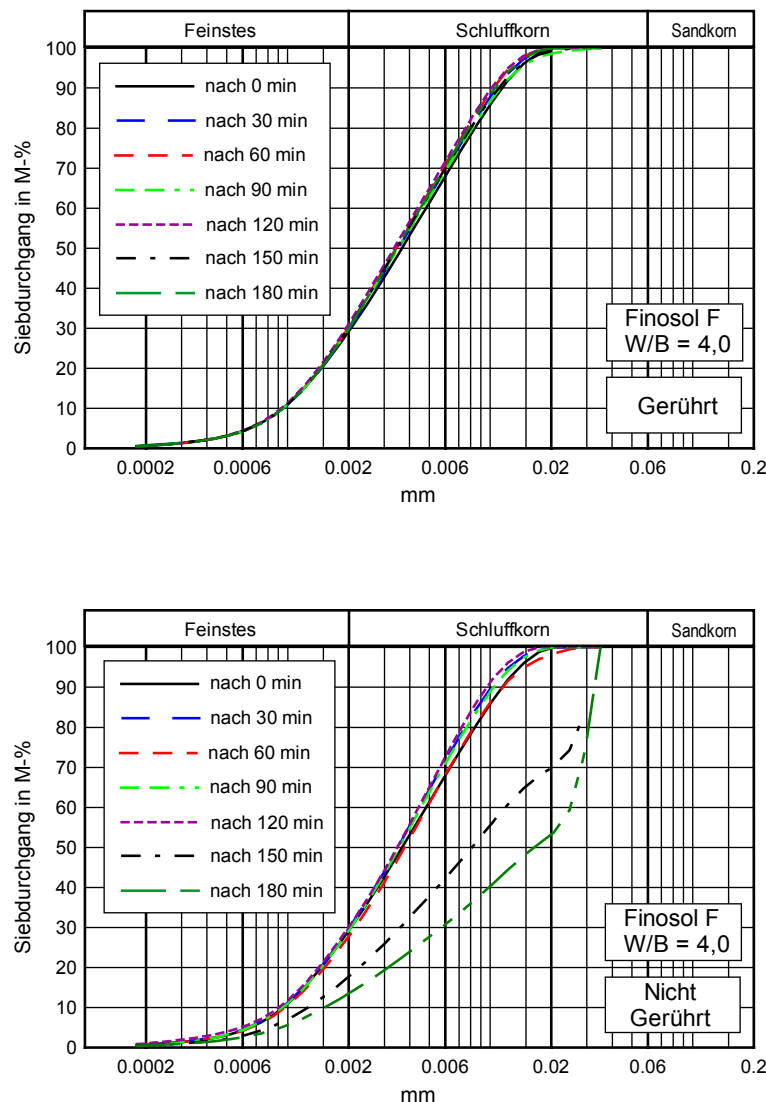
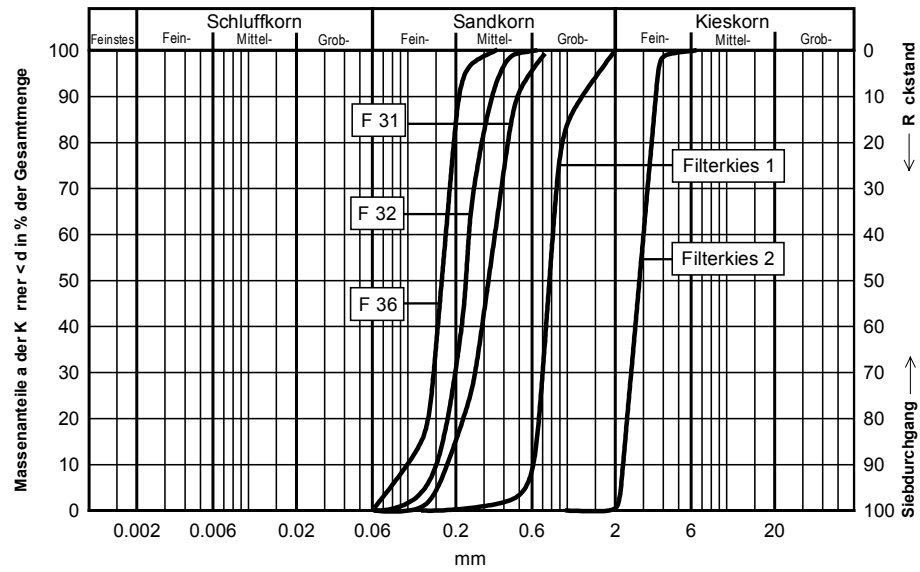


Bild 4.2: Einfluss des Suspensionsalters auf die Partikelgrößenverteilung (Finosol F, W/B = 4,0)

4.2 Sande

Für das experimentelle Versuchsprogramm wurden verschiedene Mittelsande mit Feinsandanteilen zwischen 15 und 80% verwendet, die den Grenzbereich der Anwendbarkeit der derzeit verfügbaren Feinstbindemittelsorten repräsentieren. Diese von den Quarzwerken Frechen im Tagebau gewonnenen Sande zeichnen sich durch ihre chemische Reinheit mit einem SiO_2 -Gehalt von über 99% sowie einem vernachlässigbaren Glühverlust bei 1000°C von 0.1 - 0.2% aus. Die Kornverteilungen der verwendeten Versuchssande F31, F32 und F36 sind in Bild 4.3 dargestellt. Die geringe Ungleichförmigkeit der Sande erwies sich zudem für den angestrebten homogenen Einbau der Prüfkörper mit reproduzierbaren Lagerungsdichten und ohne Feinschichtungen als vorteilhaft. Zusätzlich sind die Korngrößenverteilungen der in

den Injektionsversuchen als Filter verwendeten Kiese dargestellt. Letztere werden als Filterkies 1 und Filterkies 2 bezeichnet (Bild 4.3).



Sand	Feinsand- anteil in Gew.-%	Korn- dichte ρ_s in g/cm ³	Minimaler Poren- anteil n_{min}	Maximaler Poren- anteil n_{max}	Wasserdurchlässig- keitsbeiwert k_{10} in m/s bei dichter Lagerung
F 31	15	2,65	0,35	0,46	$1,5 \cdot 10^{-4}$
F 32	30	2,65	0,37	0,48	$1,3 \cdot 10^{-4}$
F 36	80	2,65	0,39	0,49	$7,4 \cdot 10^{-5}$

Bild 4.3: Korngrößenverteilungen und Kennwerte der verwendeten Sande und Filterkiese

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Allgemeines

Die Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung durch Filtrationsmechanismen ist aus der Praxis sowie aus Laborversuchen, wie sie u.a. von MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998), MBONIPMA (1998), MITTAG (2000), YONEDA et. al. (1996) oder FUJII et. al. (1996) beschrieben werden, bekannt. Eine systematische experimentelle Untersuchung dieser Problemstellung unter variierten Injektionsrandbedingungen fehlt jedoch bislang und soll Ziel des Versuchsprogramms sein. Die Untersuchungen sollen sich dabei auf Injektionsrandbedingungen beschränken, die für Abdichtungsinjektionen relevant sind, da hier wenige Fehlstellen in einem Dichtungsbauwerk den Erfolg einer Baumaßnahme gefährden. Dementsprechend wirken sich Filtrationen bei Verfestigungsinjektionen deutlich geringer auf die erzielbare Qualität des Injektionskörpers aus.

Als Folge von Filtrationsvorgängen kommt es zu einer inhomogenen Verteilung des Feinstbindemittels im Verpresskörper, die neben örtlich schwankenden Festigkeits- und Abdichtungseigenschaften auch zu einer Verkürzung der tatsächlichen Injektionsreichweite gegenüber der rechnerisch zu erwartenden Reichweite führen kann. Dies geschieht, wenn der Bindemittelgehalt der Injektionssuspension unter die für eine Verkittung der Sandkörner erforderliche Grenze sinkt.

Zur Untersuchung solcher Fragestellungen erwiesen sich großmaßstäbliche dreidimensionale Injektionsversuche in einem Injektionsstrichter, der ein Segment einer Injektionskugel darstellt, als geeignet, da hier praxisübliche Reichweiten und Verpressraten angewendet werden konnten. An Proben, die aus erhärteten Injektionskörpern entnommen wurden, konnten Feinstbindemittelgehalte sowie Durchlässigkeiten gegenüber Wasser bestimmt werden.

Aufgrund des hohen Aufwandes bei der Versuchsdurchführung eignen sich dreidimensionale Injektionsversuche i.d.R. nicht zur experimentellen Abschätzung der für die Planung und Dimensionierung im Praxisfall erforderlichen Kenntnisse. Üblicherweise werden hier so genannte eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, bei denen eine Sandsäule von einer Feinstbindemittelsuspension mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit durchströmt und gleichzeitig der hierzu erforderliche Verpressdruck aufgezeichnet wird. Ergänzend zu den Trichterversuchen wurden auch verschiedene eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, deren Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den dreidimensionalen Fall bewertet werden sollten.

5.2 Eindimensionale Injektionsversuche

Zum experimentellen Nachweis der Injizierfähigkeit von Feinstbindemittelsuspensionen werden üblicherweise so genannte eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, wie sie im MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITTELN IN LOCKERGE-

STEIN (2002) beschrieben sind. Bei diesem Versuchstyp wird eine Feinstbindemittelsuspension mit einer konstanten Verpressrate in das Porensystem einer zylindrischen Prüfsäule eingepresst. Eine schematische Darstellung der verwendeten Versuchsanlage zeigt Bild 5.1.

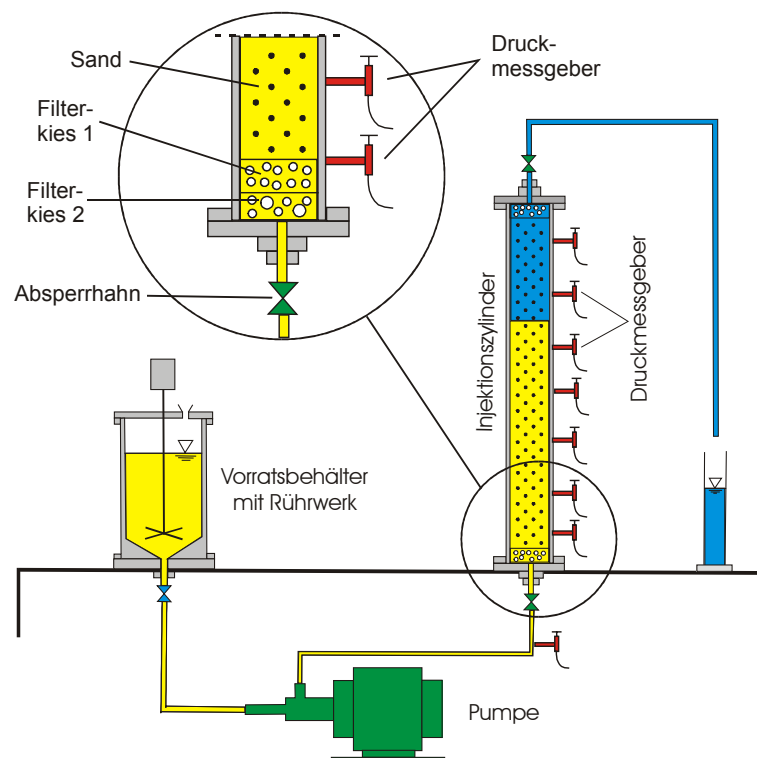


Bild 5.1: Versuchsanordnung für eindimensionale Injektionsversuche

Für die eindimensionalen Injektionsversuche wurden Messingzylinder mit einem Durchmesser von 10 cm sowie einer Länge von 32,5 cm verwendet, von denen jeweils drei gekoppelt wurden, so dass die Probenlänge 97,5 cm betrug. Der Einbau des Versuchssandes in die Messingzylinder erfolgte mit vorgegebener Lagerungsdichte durch Einrieseln in einen Wasserüberstau und gleichzeitiges Verdichten. Unter- und oberhalb der Sandprobe wurde jeweils ein zweistufiger Kiesfilter angeordnet, um die Filterstabilität und ein gleichmäßiges Anströmen des Versuchssandes zu gewährleisten. Über eine Injektionsleitung wurden die Prüfsäule mit der Pumpe sowie einem Vorratsbehälter, in den die zu verpressende Feinstbindemittelsuspension eingefüllt wurde, verbunden. Die Injektion der Feinstbindemittelsuspension erfolgte mit einer Verpressrate zwischen 0,2 und 0,8 l/min von unten nach oben. Das verdrängte Flüssigkeitsvolumen wurde zur Kontrolle der Verpressrate und des verpressten Suspensionsvolumens aufgefangen. An der Injektionsleitung sowie an max. 7 Punkten des Injektionszylinders wurden elektronische Druckmessgeber installiert und der Verpressdruck fortlaufend in Intervallen von 3 Sekunden aufgezeichnet.

Die Injizierfähigkeit einer Feinstbindemittelsuspension in eine Sandprobe gilt nach MERKBLATT (2002) als gegeben, wenn eine Suspensionsmenge verpresst werden kann, die je nach Probenlänge dem ein- bis dreifachen des Porenvolumens der Sandprobe entspricht

und gleichzeitig ein Injektionsdruck von 0,6 MPa nicht überschritten wird. Der Durchmesser der Sandsäule sollte dabei zwischen 5 und 10 cm, die Höhe zwischen 30 und 100 cm betragen. Da die im Rahmen des Untersuchungsprogramms durchgeführten eindimensionalen Injektionsversuche nicht dem Nachweis der prinzipiellen Injizierfähigkeit, sondern vielmehr der Untersuchung des Einflusses verschiedener Versuchsrandbedingungen auf das Abfiltrieren des Bindemittels dienen sollten, wurden ausschließlich Versuche mit einer vergleichsweise großen Probenlänge von 97,5 cm sowie einer Verpressmenge, die dem dreifachen des Porenvolumens entsprach, durchgeführt.

Die Dichten der nach erfolgtem Austausch des Porenvolumens durch die Injektionssuspension wieder aus dem Injektionszylinder austretenden Suspension wurden in regelmäßigen Abständen bestimmt, um so auf den Anteil des abgeschiedenen Feinstbindemittels schließen zu können. Nach einer Abbindezeit von 2-3 Tagen wurden die Injektionsproben aus dem Injektionszylinder ausgepresst und weitere 12 Tage unter Wasser gelagert. Anschließend wurden an ausgewählten Injektionsproben Durchlässigkeiten gegenüber Wasser bestimmt.

5.3 Dreidimensionale Trichterinjektionsversuche

Zur Untersuchung der Feinstbindemittelausbreitung unter praxisnahen Randbedingungen wurden großmaßstäbliche dreidimensionale Injektionsversuche durchgeführt. Injektionsversuche in einer Injektionstonne mit einem Durchmesser des Injektionskörpers von ca. 110 cm, wie sie von MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998) beschrieben werden, erwiesen sich aufgrund des übermäßig hohen Zeit- und Materialaufwandes für die hier durchgeführten Reihenuntersuchungen als weniger geeignet. Um trotzdem derartige Injektionsreichweiten experimentell untersuchen zu können, wurde ein Injektionstrichter konzipiert, der in den Bildern 5.2 und 5.3 dargestellt ist und einen Ausschnitt aus einem kugelförmigen Injektionskörper repräsentiert. Um die örtlich gleichen Filtergeschwindigkeiten wie bei einer kugelförmigen Ausbreitung des Injektionsmittels zu erzielen, ist eine Abminderung der Verpressrate im Verhältnis des Volumens der Vollkugel zum Volumen des Kugelausschnittes bei gleicher Reichweite erforderlich.

Der Injektionstrichter besteht aus vier Segmenten, die an angeschweißten Flanschen miteinander verschraubt werden. Ein Trichter mit einer Höhe von 37 cm, in dem die Injektionsquelle angeordnet ist, wird mit einem 69,5 cm hohen Trichterring verbunden, der vertikal in drei Segmente unterteilt ist. Hierdurch ist die Möglichkeit einer weitestgehend zerstörungsfreien Freilegung des abgebundenen Injektionskörpers gegeben. Die Höhe des Injektionstrichters beträgt insgesamt 106,5 cm, die max. Öffnungsweite 76 cm und der Öffnungswinkel $39,93^\circ$ (Bild 5.2). Das Volumen des Kugelausschnitts entspricht somit $1/38,8$ einer Vollkugel. Entsprechend wurden die untersuchten praxisüblichen Verpressraten für die Trichterversuche um diesen Faktor vermindert. Die Injektionsmittelförderleitung wird durch ein ca. 30 cm langes, an der Trichterspitze angeschweißtes Rohrstück in den Trichter hineingeführt. Oberhalb dieser Injektionsleitung wurde ebenfalls ein zweistufiger Kiesfilter mit

einer Gesamthöhe von ca. 3 cm angeordnet, auf den der Versuchssand folgt. Um den Injektionsdruck direkt an der Eintrittsfläche in den Versuchssand messen zu können, wurde zusätzlich ein Messrohr innerhalb der Förderleitung bis an den Kiesfilter herangeführt.

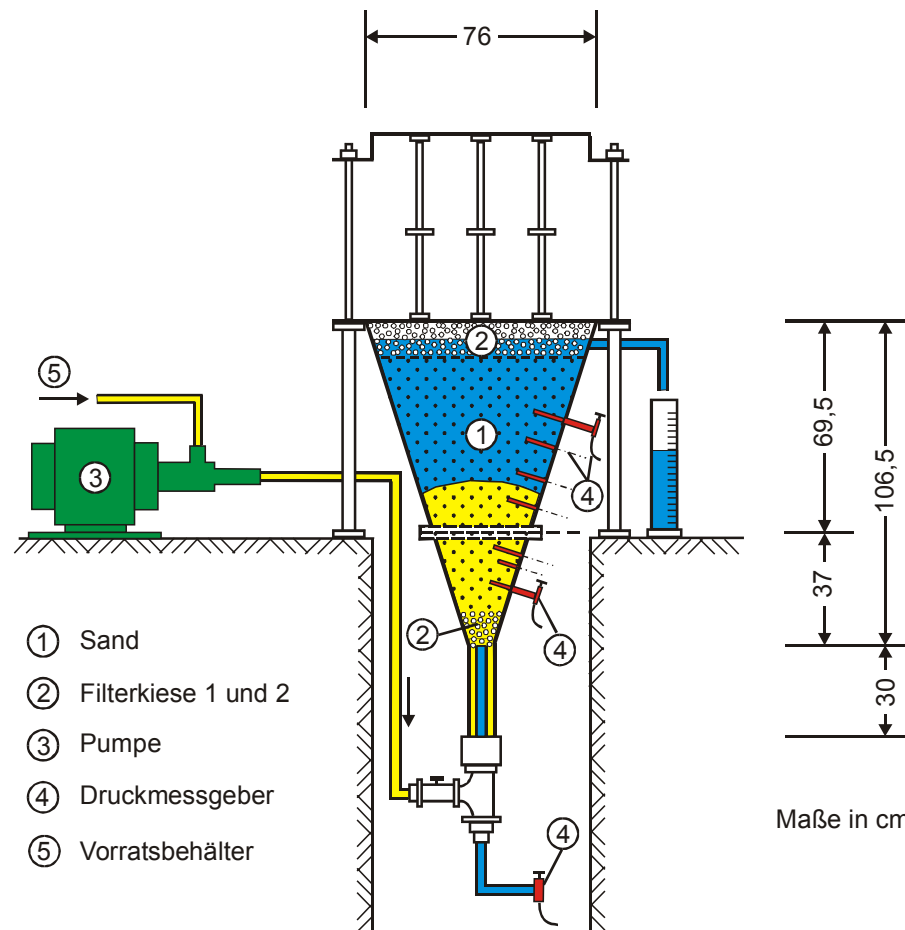


Bild 5.2: Injektionstrichter (Prinzipskizze)

Zur Vermeidung von Randumläufigkeiten während des Injektionsversuches wurde die Innenfläche des Trichters mit Hilfe eines speziellen Klebstoffes mit dem jeweils verwendeten Versuchssand beschichtet. Der Injektionssand wurde durch langsames Einrieseln in einen Wasserüberstau eingebaut und dabei fortlaufend verdichtet. Hierdurch ergab sich durchweg eine dichte Lagerung des Sandes. Oberhalb des Versuchssandes wurde wiederum ein zwei-stufiger Kiesfilter angeordnet, der mit Spindeln gegen einen Deckel verspannt wurde, um Hebungen durch den Injektionsdruck zu verhindern. Über einen in Höhe des Kiesfilters angeordneten Überlauf wurde das verdrängte Wasservolumen zur Kontrolle der Verpressrate und des verpressten Suspensionsvolumen aufgefangen und aufgezeichnet.

Zur Druckmessung in verschiedenen Entfernungen von der Injektionsquelle wurden wasser-gefüllte Messröhrchen in den Sandkörper hineingeführt, wodurch eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Randeinflüsse weitestgehend ausgeschlossen werden sollte. Die unteren drei Messröhrchen ragten 7 cm, die oberen sieben 10 cm in den Sandkörper hinein.

Die Befestigung der Messröhrchen erfolgte durch abgedichtete Schraubverbindungen an von außen auf den Injektionstrichter aufgeschweißten Rohrstutzen. An diese Messröhrchen wurden elektronische Druckmessgeber angeschlossen und in der Messleitung verbliebene Luftbläschen ausgespült. Die Öffnung der Messröhrchen im Sandkörper wurde mit einem auf die Kornverteilung der Versuchssande abgestimmten Drahtgewebe gegen das Eindringen von Sandkörnern gesichert. Die Messröhrchen wurden zudem jeweils seitlich versetzt angeordnet, um eine vergleichsweise lockerere Lagerung des Sandes im Bereich der Messröhrchen zu vermeiden. Diese könnte sich aus der in solchen Bereichen zu vermutenden Behinderung des Sandeinbaus ergeben.

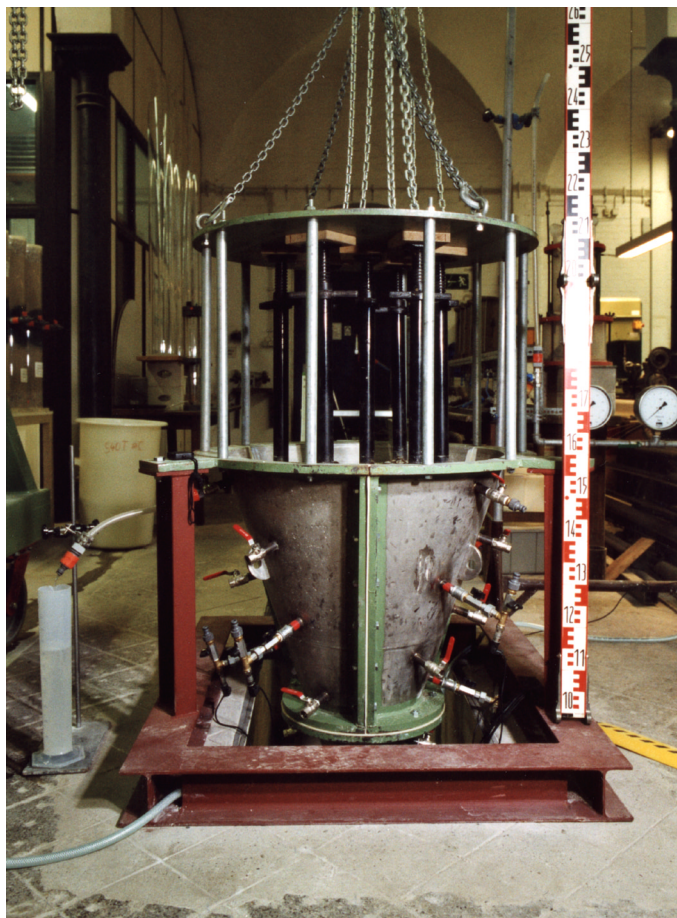


Bild 5.3: Injektionstrichter (Foto)

Nach dem Einbau und Verspannen des Sandkörpers wurde eine vorgegebene Menge einer Feinstbindemittelsuspension mit einer konstanten Einpressrate von 0,25 oder 0,4 l/min in den Versuchssand eingepresst. Auf eine Vollkugel bezogen entsprechen die versuchstechnischen Werte Verpressraten von 9,7 bzw. 15,5 l/min. Dabei wurden die Injektionsdrücke in Intervallen von drei Sekunden elektronisch aufgezeichnet. Jeweils die letzten 3 Liter der vorgegebenen Injektionsmenge wurden mit einem roten Farbstoff versetzt, um den Feinstbindemitteltransport in der Endphase der Injektion zu untersuchen. War eine rote Färbung des Injektionskörpers nur in der Nähe der Injektionsquelle aufzufinden, so kann von einer regu-

lären Penetrationsinjektion ausgegangen werden, bei der das bereits verpresste Injektionsmittel nahezu gleichförmig nach außen verdrängt wird. Waren hingegen quellenentfernere Bereiche des Injektionskörpers rot eingefärbt, so muss von einem lokalen Aufsprengen des Korngerüsts durch den Injektionsdruck und einem anschließenden erleichterten Feinstbindemitteltransport durch die entstandenen Kanäle ausgegangen werden. Auch wurden am Feststofftransport beteiligte und somit eingefärbte Crackadern auf diese Weise im abgebundenen Injektionskörper optisch erkennbar.

Der Ausbau der Injektionskörper aus dem Injektionstrichter erfolgte nach einer Abbindezeit von 14 Tagen. Hierzu wurde der Trichter horizontal gelagert und die Oberfläche des Injektionskörpers durch Ausspülen des unverfestigten Sandes mit einem schwachen Wasserstrahl freigelegt. Nach dem Vermessen des Injektionskörpers wurden Proben zur Bestimmung der Durchlässigkeit erbohrt und der Verpresskörper in Scheiben zersägt. Die einzelnen Scheiben wurden zunächst visuell auf Crackadern untersucht und anschließend Proben zur Bestimmung von Glühverlusten entnommen. Anhand der Glühverluste konnte dann, wie nachfolgend noch gezeigt wird, auf den Bindemittelgehalt der Proben rückgerechnet werden.

5.4 Nachgeordnete Untersuchungen an abgebundenen Injektionsproben

5.4.1 Bestimmung der Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit gegenüber Wasser von zylindrischen Proben aus eindimensionalen Injektionsversuchen sowie von Bohrkernen aus Trichterversuchen wurde mittels dreiaxialer Durchlässigkeitsversuche mit konstanter Druckhöhe in Anlehnung an DIN 18130, Teil 1 (1998) abgeschätzt. Der gewählte Aufbau sowie die Durchführung der Versuche, wie sie in Bild 5.4 schematisch dargestellt sind, wird ausführlich unter anderem von MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1991) beschrieben. In Anlehnung an die GDA (1997) wurden die Versuche mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von $i = 30$ durchgeführt. Bei den verwendeten Probenhöhen von 10 cm wurde somit auf der Anströmseite der Proben ein Druck von 30 kPa eingestellt, während auf der Abströmseite der Probe Atmosphärendruck herrschte.

Zur Vermeidung von Randumläufigkeiten wurden vor dem Einbau in die Dreiaxialzellen die Mantelflächen der Proben zum Ausgleich von Unebenheiten mit Silikon ummantelt und über die Empfehlungen der GDA (1997) hinausgehend ein um 100 kPa über dem Durchströmungsdruck σ_1 liegender Zelldruck σ_3 eingestellt.

Die Versuchslaufzeit betrug jeweils 14 Tage. In dieser Zeit wurde mit Hilfe eines Messzylinders in regelmäßigen Abständen der Durchfluss als Basisgröße zur rechnerischen Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes erfasst. Zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit des Wassers erfolgt anschließend die Umrechnung der experimentell ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k_f in die auf eine Vergleichstemperatur von 10°C bezogenen Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} nach DIN 18130.

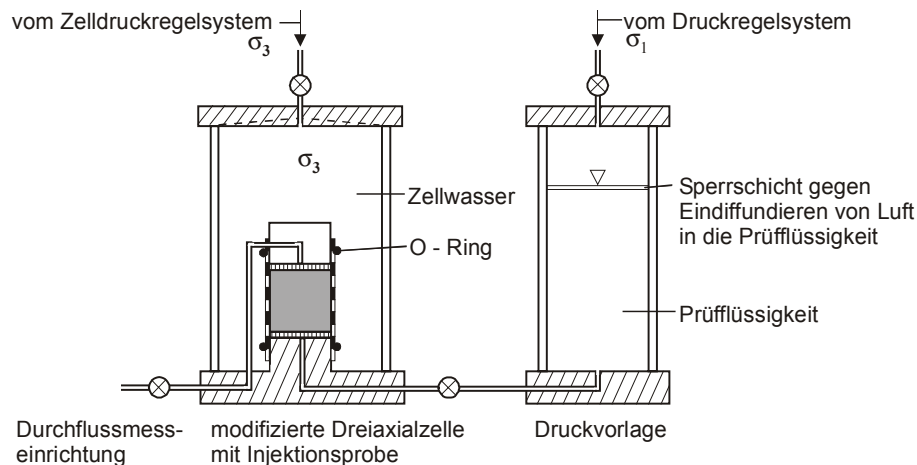


Bild 5.4: Schematische Darstellung der Versuchsanlage für dreidimensionale Durchlässigkeitsversuche mit konstanter Druckhöhe

5.4.2 Bestimmung des Glühverlustes

Die Abschätzung des Bindemittelgehalts der Injektionsproben erfolgte über die Bestimmung ihrer Glühverluste, was sich nach MITTAG (2000) als belastbares Verfahren herausgestellt hat. Hierzu wurden die Proben zunächst bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend in Anlehnung an DIN 196, Teil 2 (1995) bei 975°C bis zur Gewichtskonstanz geglüht. Der Glühverlust errechnet sich, indem die Differenz der Gewichte der geglühten und der getrockneten Probe ins Verhältnis zum Gewicht der getrockneten Probe gesetzt werden. Die verwendeten Quarzsande weisen nach Herstellerangaben bei einer Temperatur von 1000°C lediglich einen Glühverlust zwischen 0,1 und 0,2 % auf. Da die Trichterversuche jeweils mit annähernd gleicher Lagerungsdichte und somit vergleichbarem Poren- bzw. Sandkornanteil durchgeführt wurden, wird der Glühverlust der Injektionsproben nahezu ausschließlich vom Anteil des im Porenraum abgebundenen Feinstbindemittels bestimmt.

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

6.1 Allgemeines

Bei der Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen führen, wie beschrieben, Filtrationsmechanismen zu einer Verkürzung der Injektionsreichweite sowie einer inhomogenen Verteilung des Bindemittels im Injektionskörper. Mit Hilfe von ein- und dreidimensionalen Injektionsversuchen sollten daher die Auswirkungen verschiedener Injektionsrandbedingungen bzw. Einflussfaktoren auf das Abfiltern von Feinstbindemittelpartikeln untersucht werden. Die Injizierfähigkeit der verpressten Feinstbindemittelsuspensionen wurde zuvor jeweils durch theoretische Injektionskriterien und Injektionsversuche nach dem MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITELEN IN LOCKERGESTEIN (2002) nachgewiesen.

Als geeignetes Verfahren zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes einer Injektionsprobe erwies sich die Bestimmung ihres Glühverlustes. Es werden daher vorab die Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Abschätzung der Beziehung zwischen Bindemittelgehalt und Glühverlust von Proben aus abgebundenen Injektionskörpern beschrieben. Auf diese wird bei der anschließenden Darstellung und Auswertung der Ergebnisse von großmaßstäblichen Trichterversuchen mit praxisnahen Versuchsrandbedingungen zurückgegriffen. Diesen Versuchsergebnissen werden die Ergebnisse von vergleichsweise einfach durchzuführenden eindimensionalen Injektionsversuchen gegenübergestellt und die Übertragbarkeit auf den dreidimensionalen Praxisfall diskutiert.

6.2 Untersuchungen zur Abschätzung des Bindemittelgehalts abgebundener Injektionsproben

Die Durchlässigkeit gegenüber Wasser und die Druckfestigkeit von Injektionskörpern wird im wesentlichen vom Bindemittelgehalt im Porensystem bestimmt. Zur Bestimmung der Bindemittelgehalte wurden nach einer Abbindezeit von ca. 14 Tagen aus den Injektionskörpern Proben entnommen und deren Glühverluste bestimmt. Hierbei wurden wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben die Proben zunächst bei 105°C getrocknet und anschließend analog zur Bestimmung des Glühverlustes von Zement nach DIN EN 196, Teil 2 (1995) bei 975°C bis zur Gewichtskonstanz geglüht.

Zur Abschätzung des Zusammenhangs zwischen Bindemittelgehalt und Glühverlust wurden Referenzinjektionsproben untersucht. Hierbei handelt es sich um Proben aus eindimensionalen Injektionsversuchen, bei denen die Sande mit einer Lagerungsdichte D von 0,9 in die Injektionszylinder eingebaut wurden. Diese Lagerungsdichte entspricht in etwa dem Mittelwert der bei der Durchführung der ein- und dreidimensionalen Injektionsversuche erzielten Lagerungsdichten. Die hohen Lagerungsdichten des Versuchssandes erwiesen sich für die Durchführung von Injektionsversuchen als zweckmäßig, da eine Umlagerung der Sandkörner im Versuchsverlauf infolge der hydrodynamischen Belastung und des aufgetragenen Einpress-

druckes kaum mehr zu erwarten war. In die Sandsäulen wurden speziell angemischte Feinstbindemittelsuspensionen mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten eingepresst. Das verpresste Suspensionsvolumen entsprach dem Porenvolumen des Sandes, um den Einfluss der Filtration gering zu halten. Der Bindemittelgehalt der im Porensystem der Referenzinjektionsproben verbliebenen Feinstbindemittelsuspension konnte somit als bekannt angenommen werden.

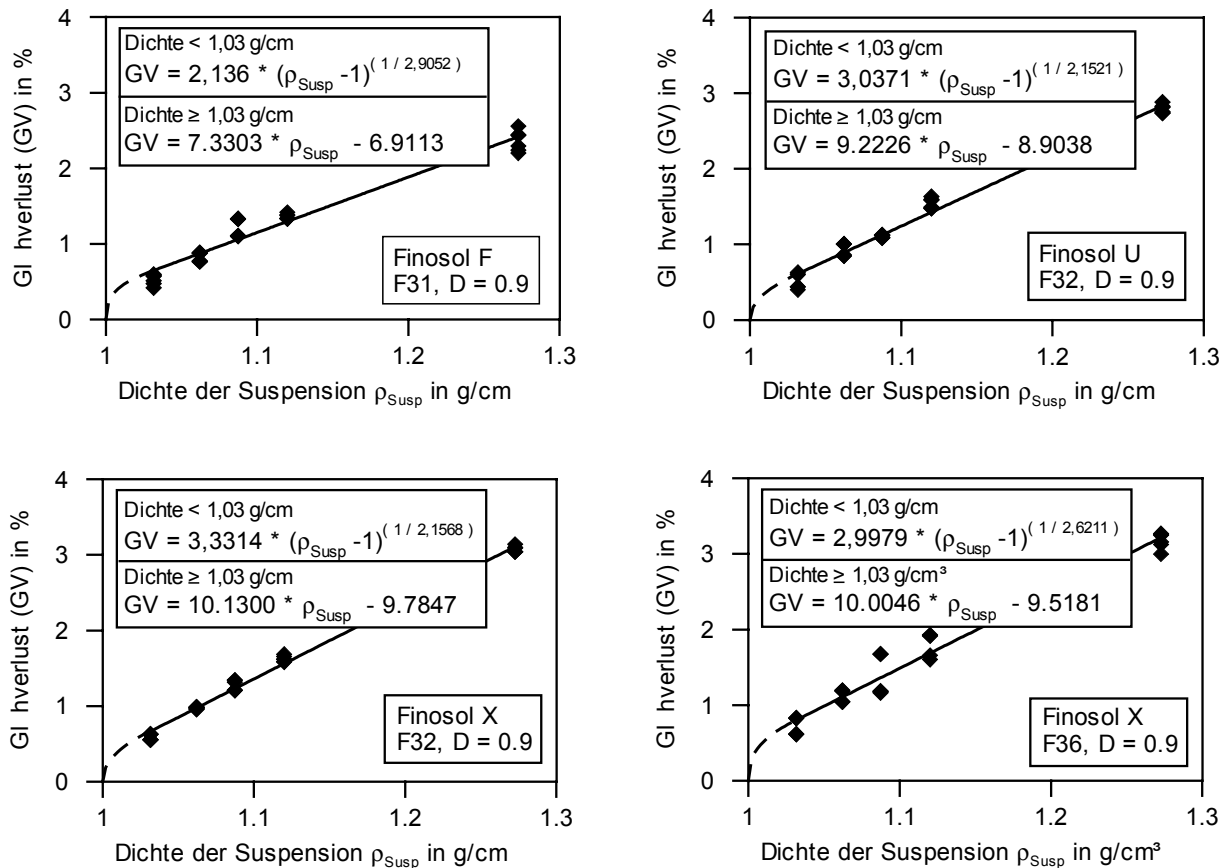


Bild 6.1: Glühverluste verschiedener Injektionsproben in Abhängigkeit der Dichte der nach Versuchsende im Porensystem verbliebenen Bindemittelsuspension

Die im Bild 6.1 dargestellten Glühverluste der Referenzinjektionsproben zeigen im Bereich der zur Untersuchung der Dichtigkeits- und Festigkeitseigenschaften von Injektionsproben relevanten Bindemittelgehalte jeweils eine annähernd lineare Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt im Porensystem, die durch eine lineare Regression hinreichend genau angenähert werden kann. Lediglich bei extrem geringen Bindemittelgehalten ergaben sich größere Abweichungen. Diese Abweichungen bleiben jedoch für die Auswertung von Injektionsversuchen ohne Bedeutung, da die in der Praxis an die Eigenschaften der Injektionskörper üblicherweise gestellten Anforderungen mit derart geringen Bindemittelgehalten nicht ansatzweise erreicht werden können. Ist kein Feinstbindemittel in einer untersuchten Probe enthalten, entspricht der Glühverlust zumindest theoretisch dem des verwendeten Quarzsandes,

der zwischen 0,1 und 0,2% liegt. Für Suspensionsdichten unter $1,03 \text{ g/cm}^3$ wurde daher zur Beschreibung der Beziehung zwischen Glühverlust und Suspensionsdichte auf eine Wurzelfunktion anstelle der Geradengleichung zurückgegriffen. Wird vorausgesetzt, dass beide Funktionen im Übergangspunkt, bei einer Suspensionsdichte von $1,03 \text{ g/cm}^3$, sowohl gleiche Glühverluste wie auch gleiche Steigungen aufweisen, können die Koeffizienten der Wurzelfunktionen mit Hilfe der Koeffizienten der Geradengleichungen berechnet werden. Mit diesen Gleichungen konnten nun die an Proben aus abgebundenen Injektionskörpern bestimmten Glühverluste in rechnerische Dichten der im Porensystem zum Zeitpunkt des Versuchsendes verbliebenen Suspension umgerechnet werden. Hiermit war eine Abschätzung möglich, in welchen Bereichen eines Injektionskörpers gegenüber der ursprünglich verpressten Injektionssuspension eine Bindemittelanreicherung bzw. ein reduzierter Bindemittelgehalt erfolgte.

6.3 Großmaßstäbliche Injektionsversuche im Injektionstrichter

6.3.1 Allgemeines und Versuchsrandbedingungen

Der Schwerpunkt des experimentellen Versuchsprogramms lag bei der Durchführung von großmaßstäblichen Injektionsversuchen im Injektionstrichter unter praxisorientierten Versuchsrandbedingungen, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben sind. Hierbei wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, mit denen der Einfluss der Feinstbindemittelsorte, der Korngrößenverteilung des Versuchssandes, des Bindemittelgehaltes der Injektionssuspension und der Verpressrate untersucht werden sollte. Eine Zusammenstellung der Randbedingungen aller durchgeführten Trichterversuche findet sich in Tabelle 6.1.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W / B	Sand	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min
1	Finosol F	5,0	F 31	0,25	9,7
2					
3		4,0			
4	Finosol U	5,0	F 32	0,25	9,7
5				0,40	15,5
6		4,0		0,25	9,7
7	Finosol X	5,0	F 32	0,25	9,7
8				0,40	15,5
9		4,0		0,25	9,7
10	5,0	F 36			

Tab. 6.1: Randbedingungen aller durchgeführten Trichterversuche

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Injektionsdruckverläufe, die erzielten Injektionsreichweiten sowie die Bindemittelverteilung innerhalb der Injektionskörper beschrieben. Die Ergebnisse von Durchlässigkeitsuntersuchungen an Bohrkernen sowie die aus diesen Versuchsergebnissen errechneten Verteilungen der Durchlässigkeitsbeiwerte in den Injektionskörpern werden nachfolgend gesondert beschrieben und bewertet.

6.3.2 Einfluss der Feinstbindemittelsorte und des Korngerüstes auf den Injektionsverlauf

6.3.2.1 Allgemeines und Versuchsrandbedingungen

Die Injizierfähigkeit einer Feinstbindemittelsuspension wird im Wesentlichen von den Eigenschaften des Korngerüstes bzw. der Geometrie der Porenkanäle und der Mahlfineinheit des Bindemittels bestimmt. In wie weit diese Einflussgrößen bei gegebener Injizierfähigkeit auch auf Filtrationsprozesse einwirken, sollte daher in einer ersten Versuchsreihe mit verschiedenen Kombinationen von Sanden und Feinstbindemitteln untersucht werden. Konstant gehalten wurde jeweils das Wasser-Bindemittelverhältnis (W/B) mit 5,0 und die Verpressrate mit 0,25 l/min. Letztere entspricht einer auf eine Vollkugel bezogenen Verpressrate von rechnerisch 9,7 l/min.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Dichte der Suspension in g/cm ³	Sand	Porenanteil	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	Verpresstes Suspensionsvolumen in l
1	Finosol F	5,0	1,12	F 31	0,36	0,25	9,7	46,5
4	Finosol U	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
7	Finosol X	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
10	Finosol X	5,0	1,12	F 36	0,39	0,25	9,7	50

Tab. 6.2: Randbedingungen von Trichterversuchen mit verschiedenen Sanden und Feinstbindemitteln bei gleicher Verpressrate und gleichem Wasser-Bindemittelverhältnis

6.3.2.2 Druckverläufe

Während der Durchführung der Versuche wurden der Verpressdruck an der Injektionsquelle und an sieben weiteren Punkten innerhalb des Sandkörpers fortlaufend aufgezeichnet. Dargestellt sind diese Druckverläufe in den Bildern 6.2, 6.3, 6.4 und 6.5.

Der Einpressdruck an der Injektionsquelle steigt zunächst mehr oder weniger stark mit der Versuchslaufzeit an. Erreicht die Injektionssuspension die einzelnen Druckmessstellen, so

steigt auch dort der Druck mit fortschreitender Injektion an. Bei allen Versuchen geht nach Verpresszeiten etwa zwischen 30 und 160 Minuten der Verlauf des Einpressdrucks an der Injektionsquelle in einen sägezahnartigen, ebenfalls ansteigenden Verlauf über. Die Amplitude der Druckschwankungen unterscheidet sich jedoch bei den Einzelversuchen stark. Diese Druckschwankungen haben nur geringe Auswirkungen auf die Drücke an den jeweils nächsten Messtellen, so dass von einem lokal begrenzten Verstopfen und Aufbrechen des Porensystems im Bereich der Injektionsquelle ausgegangen werden kann. Kommt es jedoch zu einem Absinken des Injektionsdrucks über einen längeren Zeitraum, wie es bei den Druckverläufen der Versuche 7 und 10 festzustellen ist, so ist ein großräumigeres Aufbrechen des Porensystems durch den Injektionsdruck anzunehmen. Der Feinstbindemitteltransport findet nun zumindest teilweise bevorzugt durch Crackadern bei einem gleichzeitig reduzierten Einpresswiderstand statt. Einige quellenentfernere Druckmessgeber der Versuche 7 und 10 zeigen daher plötzlich höhere Drücke als quellennähere Messgeber an, was auf eine ungleichmäßige Ausbreitung des Injektionsmittels hindeutet. Beim Versuch 1 hingegen bleibt der in der Endphase des Injektionsversuchs zu beobachtende Druckverlust auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkt und hat somit vermutlich nahezu keine Auswirkungen auf die übrigen Bereiche des Injektionskörpers.

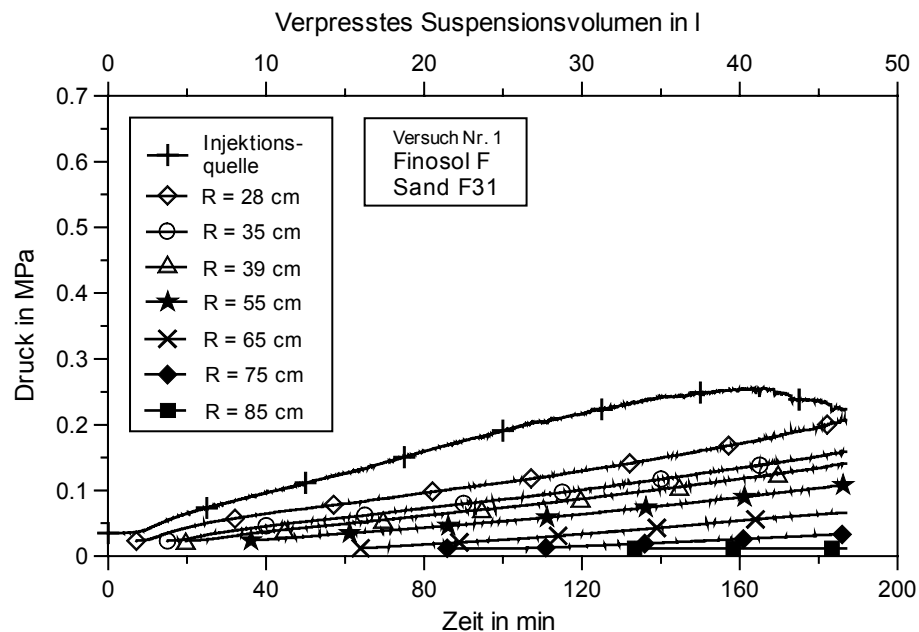


Bild 6.2: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 1 mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 (W/B = 5,0, Verpressrate 0,25 l/min)

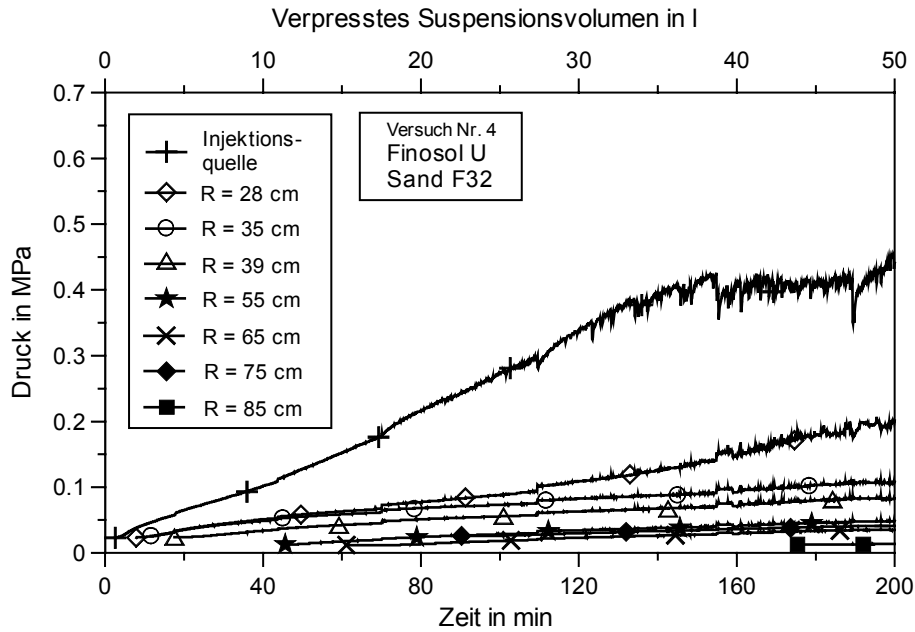


Bild 6.3: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 4 mit dem Feinstbindemittel Finosol U und dem Sand F 32 (W/B = 5,0, Verpressrate 0,25 l/min)

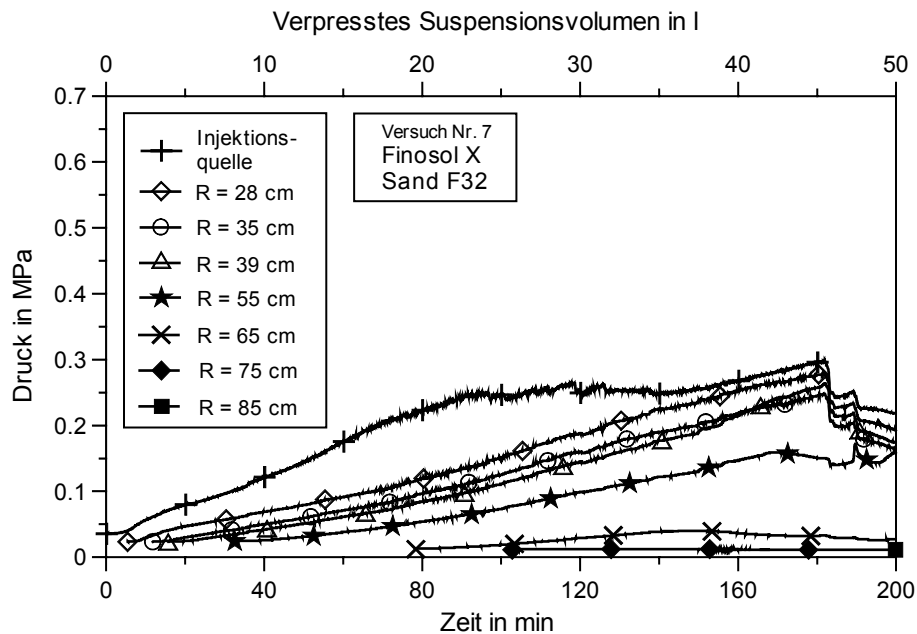


Bild 6.4: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 7 mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 32 (W/B = 5,0, Verpressrate 0,25 l/min)

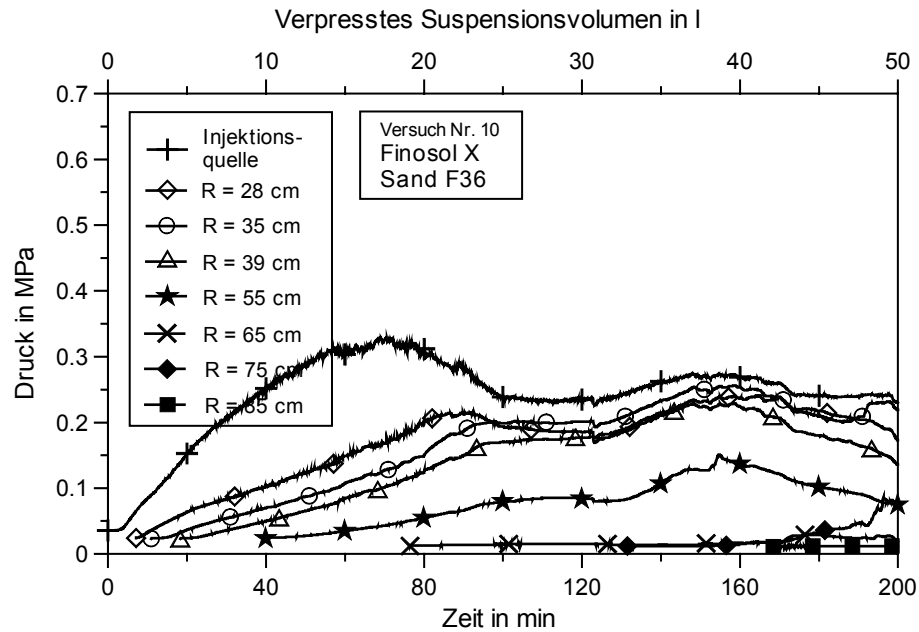


Bild 6.5: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 10 mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 36 ($W/B = 5,0$, Verpressrate $0,25 \text{ l/min}$)

Wie beschrieben deuten insbesondere bei den Versuchen 7 und 10, mit dem feinsten Feinstbindemittel Finosol X, die Druckverläufe auf Injektionscracks hin, obwohl die hohe Mahlfineinheit des Bindemittels zunächst eine gute Injizierfähigkeit prognostiziert. Besonders beim Trichter 10, bei dem in den feinsten untersuchten Sand F36 injiziert wurde, wird das Korngerüst des Sandes frühzeitig aufgebrochen und ein Großteil der verpressten Suspensionsmenge durch die Crackadern transportiert. In diesem Fall ist jedoch mit einer ungleichmäßigen, zufällig gerichteten Ausbreitung des Feinstbindemittels primär entlang der Crackadern mit der Gefahr von Fehlstellen in einer Injektionssohle zu rechnen.

6.3.2.3 Reichweite der Injektion

Nach einer Abbindezeit von 14 Tagen wurden die Verpresskörper freigelegt und zur Bestimmung der Injektionsreichweite und des Verpresskörpervolumens vermessen. Neben einer inhomogenen Verteilung des Bindemittels im Injektionskörper haben Filtrationsmechanismen zur Folge, dass zum Erreichen der angestrebten Injektionsreichweite eine über die rechnerisch erforderliche Suspensionsmenge hinausgehende Mehrmenge verpresst werden muss. Eine solche Reichweitenverkürzung stellt sich ein, wenn der Bindemittelgehalt der Feinstbindemittelsuspension durch die Partikelabscheidung derart reduziert wird, dass eine stabile Verkittung der Sandkörner nicht mehr möglich ist. Die gemessene Injektionsreichweite ist somit bei Feinstbindemitteln vielfach nicht identisch mit der Reichweite der flüssigen Phase der Injektionssuspension. Neben der Zusammenstellung der gemessenen Injektionsreichweiten werden in Tabelle 6.3 auch die über das vollständige Auffüllen des Porenvolu-

mens der Injektionskörper hinausgehenden Mehrmengen an verpresster Suspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper angegeben. Gleichzeitig ist jeweils das Verhältnis des Porenvolumens eines Verpresskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen aufgeführt, dass auch als bezogenes Verpresskörpervolumen bezeichnet werden soll.

Neben der gemessenen Reichweite und den hieraus errechneten bezogenen Verpresskörpervolumen und Mehrmengen sind in der Tabelle 6.3 die Kenngrößen von zwei theoretischen Injektionskriterien angegeben. Je höher diese Kenngrößen ausfallen, desto eher bzw. leichter sollte die Feinstbindemittelsuspension in das betrachtete Korngerüst injiziert werden können. Die mit den feineren Feinstbindemitteln durchgeführten Versuche weisen jedoch trotz theoretisch besserer Injizierfähigkeit das geringere auf das verpresste Suspensionsvolumen bezogene Injektionskörpervolumen auf. Dies wird insbesondere bei einem Vergleich der Versuch 7 und 10 deutlich.

Nr.	Feinstbindemittelsorte / Sand	Absolute Reichweite in m	Verhältnis des Porenvolumens der Verpresskörper zum verpressten Suspensionsvolumen	Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	Injektionscracks ¹⁾	$N = d_{15} / d_{85}$	$\rho_{64} / d_{100,Susp}$ ²⁾
1	Finosol F F 31	0,99	0,81	23,9	nein	26,4	2,7
4	Finosol U F 32	0,97	0,74	35,7	nein	27,3	3,3
7	Finosol X F 32	0,89	0,58	71,9	ja	41,9	5,3
10	Finosol X F 36	0,92 (0,87 - 0,97)	0,66	52,5	ja	33,2	4,3

¹⁾ Am Injektionskörper visuell erkennbare Cracks

²⁾ Nach SCHULER und BRAUNS (2000) bei einer Lagerungsdichte von $D = 0,9$

Tab. 6.3: Injektionsreichweiten der mit W/B-Werten von 5,0 und einer Verpressrate von 0,25 l/min durchgeführten Trichterversuche

Demnach wirkt sich anscheinend das beim Versuch 10 beobachtete frühzeitige Aufsprengen des Porensystems durch den Injektionsdruck und dem damit verbundenen erleichterten Feinstbindemitteltransport in die Randbereiche des Injektionskörpers nicht reichweitenfördernd aus.

Die Abfilterungsrate von Feinstbindemitteln scheint somit bei prinzipiell gegebener Injizierfähigkeit nicht allein vom Verhältnis charakteristischer Korngrößen des Feinstbindemittels und des Sandes bzw. der hieraus resultierenden Porengrößen abhängig zu sein. Zusätzlich scheint eine höhere Mahlfineinheit, verbunden mit einer großen reaktiven Oberfläche der

Feinstbindemittelpartikel, zu einer höheren Filtrationsintensität und somit zu einer Reichweitenverkürzung zu führen.



Bild 6.6: Foto eines freigelegten Verpresskörpers

6.3.2.4 Injektionscracks

Zur Untersuchung des Feinstbindemitteltransports in der Endphase der Injektion und zum Auffinden von Injektionscracks beim Zerlegen der abgebundenen Injektionskörper wurden jeweils die letzten 3 l des zu verpressenden Suspensionsvolumens mit einem roten Farbstoff eingefärbt. Anhand der Färbung verschiedener Bereiche des abgebundenen Injektionskörpers war nun gut zu erkennen, wohin dieses Material transportiert wurde. Bei den mit den Feinstbindemitteln Finosol F und U durchgeführten Versuchen 1 und 4 konnte lediglich eine Verfärbung der quellnahen Bereiche des Verpresskörpers beobachtet werden. Dies war anhand der Druckverläufe auch zu erwarten, da sie auf keine ausgeprägte Crackentwicklung hinweisen. Bei den mit dem Feinstbindemittel Finosol X durchgeführten Versuchen 7 und 10 war jedoch sowohl in unmittelbarer Nähe der Injektionsquelle wie auch in einigen quellenentfernteren Bereichen eine Rotfärbung zu erkennen, was zumindest gegen Versuchsende auf einen Transport des Feinstbindemittels durch Crackadern hinweist.

Nach dem Vermessen der Injektionskörper und dem Erbohren von Proben zur Bestimmung von Durchlässigkeiten und Druckfestigkeiten wurden die Verpresskörper in ca. 10 cm dicke Scheiben zersägt. Hierbei konnten Crackstrukturen mit einer Dicke von wenigen mm beobachtet werden, wie sie in Bild 6.7 gezeigt sind. Die rote Färbung der Crackfüllung bestätigt den vermuteten bevorzugten Feinstbindemitteltransport in der Endphase der Injektion durch diese Kanäle. Die in einzelnen Scheiben der Injektionskörper sichtbaren Crackstrukturen sind im Anhang dargestellt.

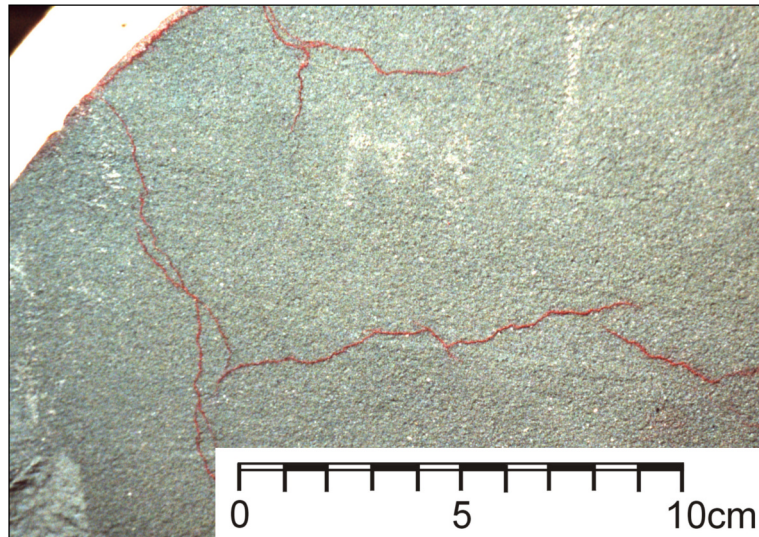


Bild 6.7: Detailaufnahme eines Schnittes durch den Injektionskörper des Trichterversuchs 7 mit Injektionscracks

6.3.2.5 Verteilung des Bindemittelgehaltes in den abgebundenen Injektionskörpern

Beim Zerlegen des Injektionskörpers wurden aus den verschiedenen Scheiben Proben entnommen und hieran Glühverluste bestimmt. Darüber hinaus wurden Glühverluste auch an Bohrkernen bestimmt. Mit den in Abschnitt 6.2 durch lineare Regression abgeleiteten Beziehungen konnten anschließend aus den Glühverlusten die rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension ermittelt werden. Die rechnerische Suspensionsdichte enthält sowohl die im Versuchsverlauf abgefilterten Bindemittelanteile wie auch den Bindemittelgehalt der beim Abbruch des Versuchs im Porensystem verbliebenen Suspension.

Neben den an Proben aus verschiedenen Scheiben der Injektionskörper bestimmten Glühverlusten sind in Bild 6.8 auch die an Bohrkernen ermittelten Glühverluste dargestellt. Letztere unterliegen jedoch weit größeren Schwankungen. Durch die gleichmäßig verteilte Probenentnahme über eine Scheibe aus dem Injektionskörper werden lokale Schwankungen des Bindemittelgehaltes, wie sie bei den Bohrkernen auftreten, weitgehend gemittelt. Deshalb werden für die weitergehende Auswertung die Glühverluste aus den Bohrkernen nicht berücksichtigt. Auf das Errechnen der Suspensionsdichten in den Randbereichen der Körper wurde teilweise verzichtet, da sich, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, bei sehr geringen Glühverlusten größere Abweichungen zu den tatsächlich vorhandenen Suspensionsdichten ergeben.

Die maximalen Glühverluste bzw. Suspensionsdichten finden sich jeweils in der Nähe der Injektionsquelle und fallen mit zunehmender Reichweite leicht ab, was auf die fortlaufende Abfilterung des Bindemittels im Injektionskörper zurückgeführt werden kann. Am Ende der Injektionsreichweite fallen die Glühverluste und damit die rechnerischen Suspensionsdichten

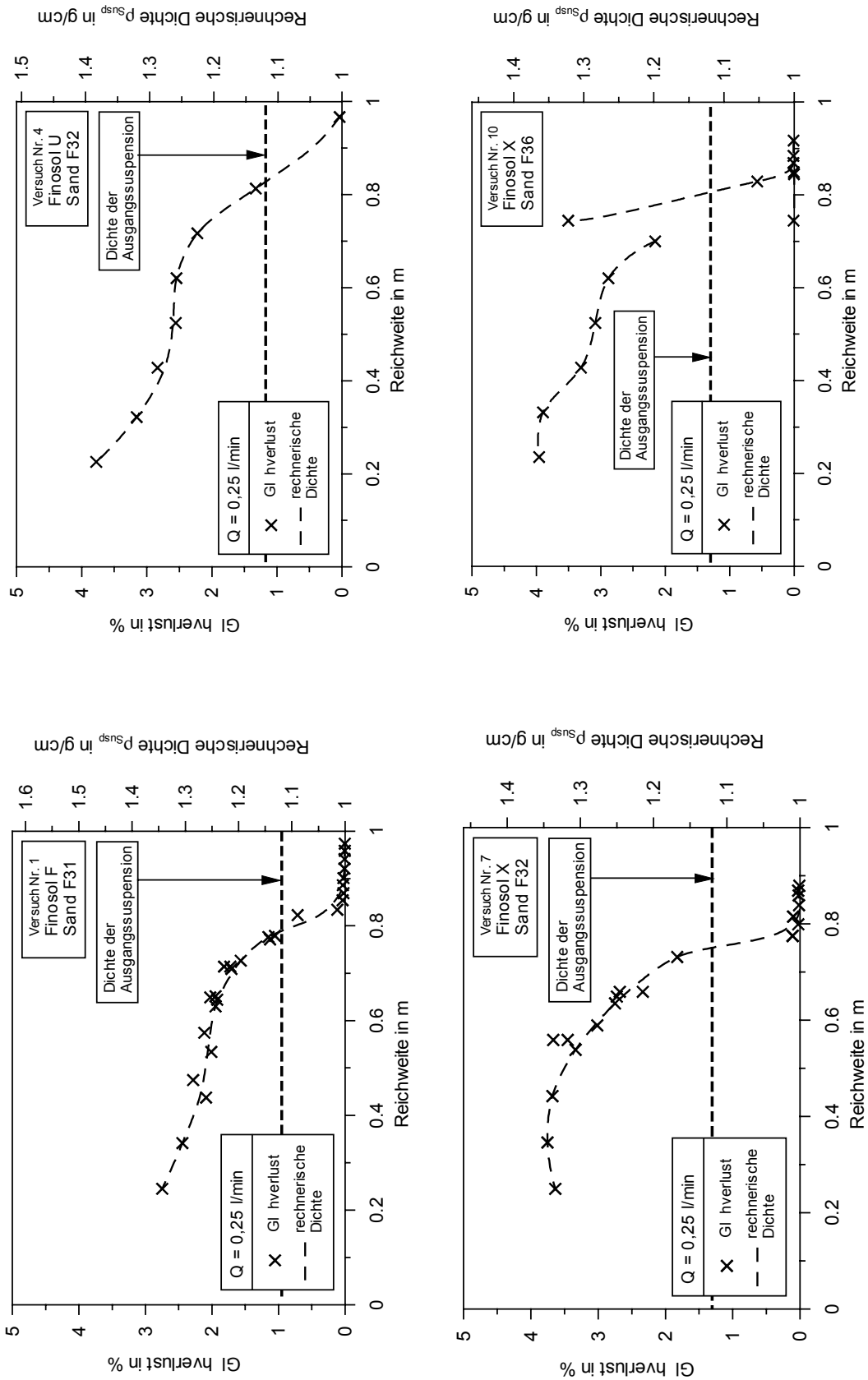


Bild 6.8: Verläufe der Glühverluste und rechnerischen Suspensionsdichten der Trichterversuche 1, 4, 7 und 10

jedoch über eine Strecke von 25 bis 30 cm deutlich ab. Zudem ist anzunehmen, dass sich auch außerhalb des verfestigten Injektionskörpers noch geringe Feinstbindemittelanteile befinden. Der Bindemittelgehalt reicht in diesen Randzonen jedoch für eine Verfestigung bzw. ausreichende Abdichtung des Sandes nicht aus. Gleichwohl kann dieser Bindemittelanteil die Injizierfähigkeit dieser Zonen, die von benachbarten Injektionspunkten aus weitergehend verpresst werden müssen, zumindest im Hinblick auf eine wirksame Abdichtung, nachteilig beeinflussen.

Bei dem mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 36 durchgeführten Versuch 10 verlaufen die Glühverluste bzw. Dichten bis zu einer Reichweite von ca. 70 cm analog zu den Verläufen der Versuche 1 und 4. In den Randbereichen finden sich jedoch stark abweichende Bindemittelgehalte. Beispielhaft sind daher im Ergebnisdiagramm die an zwei verschiedenen Punkten bestimmten Glühverluste dargestellt. Die abweichenden Glühverluste sind vermutlich auf den direkten Transport von feststoffreicher Suspension durch die Cracks in einzelne Teilbereiche des Injektionskörpers zurückzuführen.

6.3.3 Untersuchungen zum Einfluss der Verpressrate

6.3.3.1 Allgemeines und Versuchsrandbedingungen

Baupraktisch wird die Verpressrate so festgelegt, dass das Injektionsmittel innerhalb einer Zeitspanne in den Boden verpresst werden kann in der die Injizierfähigkeit nicht durch Abbinde- oder chemische Reaktionen wesentlich beeinflusst wird. Gleichzeitig darf der aus der gewählten Verpressrate resultierende Injektionsdruck nicht so groß werden, dass der Boden mit der Folge einer unkontrollierten Ausbreitung des Injektionsmittels aufgesprengt wird. Das Abfiltern von Feinstbindemittelpartikeln beim Durchströmen des Porensystems wird u.a. auch von den sich in Abhängigkeit der Porengeschwindigkeit einstellenden hydrodynamischen Schleppkräften beeinflusst. Bei der dreidimensionalen Ausbreitung einer Injektionssuspension im Boden nehmen mit zunehmendem Abstand zur Injektionsquelle die Filtergeschwindigkeit und damit verbunden auch die hydrodynamischen Schleppkräfte ab.

Bei Feinstbindemittelinjektionen stellen sich bindemittelärmere Randzonen mit einer zu erwartenden höheren Durchlässigkeit gegenüber Wasser ein. Neben einer aus wirtschaftlichen Gründen und zur Vermeidung von Fehlstellen anzustrebenden möglichst großen Injektionsreichweite ist es daher auch notwendig, dass der Bindemittelgehalt in den Randbereichen und die damit korrelierende Wasserdurchlässigkeit den jeweiligen Erfordernissen entspricht. Ziel veränderter Injektionsrandbedingungen muss es daher sein, den Bindemittelgehalt in den Randbereichen eines Injektionskörpers zu erhöhen. Zur Untersuchung der Fragestellung, in wie weit dies durch eine höhere Verpressrate und den damit verbundenen anwachsenden hydrodynamischen Schleppkräften möglich ist, wurden zwei Trichterversuche mit einer Verpressrate von 0,4 l/min durchgeführt, was einer rechnerischen auf eine Vollkugel bezogenen Verpressrate von 15,5 l/min entspricht. Die Randbedingungen der

durchgeführten Trichterversuche mit erhöhter Verpressrate sowie der bereits in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Vergleichsversuche mit einer Verpressrate von 0,25 l/min sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt. Verwendet wurde jeweils der Sand F 32 und Feinstbindemittelsuspensionen mit einem Wasser-Bindemittelverhältnis von 5,0.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Dichte der Suspension in g/cm ³	Sand	Porenanteil	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	Verpresstes Suspensionsvolumen in l
4	Finosol U	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
5	Finosol U	5,0	1,12	F 32	0,38	0,40	15,5	47
7	Finosol X	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
8	Finosol X	5,0	1,12	F 32	0,38	0,40	15,5	50

Tab. 6.4: Randbedingungen der mit verschiedenen Verpressraten durchgeführten Trichterversuche

6.3.3.2 Druckverläufe

Die Druckverläufe an der Injektionsquelle sowie an verschiedenen Punkten innerhalb des Sandkörpers der Injektionsversuche mit einer Verpressrate von 0,4 l/min sind prinzipiell ähnlich (Bilder 6.9 und 6.10). Wie zu erwarten, wurden bei der Injektion des gröberen Feinstbindemittels Finosol U höhere Drücke gemessen. Wiederum ist bei beiden Versuchen an der Quelle ein Übergang von einem gradlinig ansteigendem Injektionsdruck in einen sägezahnartigen Verlauf festzustellen, wenngleich dieser erst nach einer größeren verpressten Suspensionsmenge als bei den in den Bildern 6.3 und 6.4 dargestellten Verläufen der Vergleichsversuche mit 0,25 l/min eintritt. Ein vergleichsweise ausgeprägter Druckabfall ist lediglich an der Injektionsquelle des mit dem Feinstbindemittel Finosol X durchgeführten Versuchs zu erkennen (Bild 6.10). Da die Drücke an den Messstellen innerhalb des Injektionskörpers hiervon nicht beeinflusst werden, muss von einem unmittelbar auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkten Aufsprengen des Porensystems ausgegangen werden.

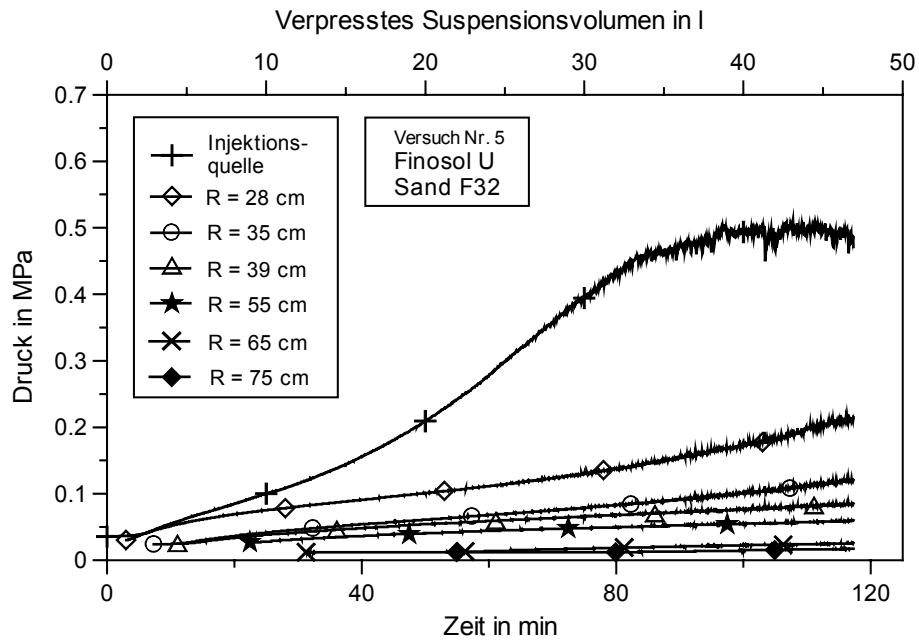


Bild 6.9: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 5 mit dem Feinstbindemittel Finosol U und einer Verpressrate von 0,4 l/min (W/B=5,0, Sand F32)

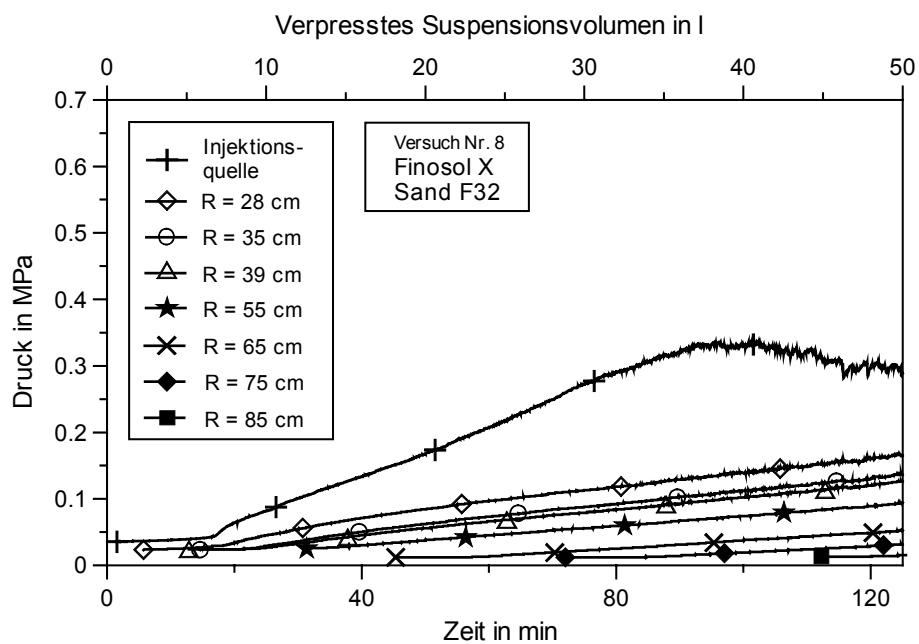


Bild 6.10: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 8 mit dem Feinstbindemittel Finosol X und einer Verpressrate von 0,4l/min (W/B=5,0, Sand F 32)

6.3.3.3 Reichweite der Injektion und Beurteilung hinsichtlich geometrischer Injektionskriterien

Die beim Ausbau der Injektionskörper gemessenen Reichweiten der mit verschiedenen Verpressraten durchgeführten Trichterversuche sind in Tabelle 6.5 zusammengestellt. Injektionscracks wurden, wie anhand der Druckverläufe zu erwarten war, beim Zerlegen der mit einer Verpressrate von 0,4 l/min hergestellten Injektionskörper nicht gefunden. Die größten bezogenen Verpresskörpervolumina bzw. geringsten erforderlichen Mehrmengen wurden jeweils bei den Versuchen bestimmt, die mit einer höheren Verpressrate durchgeführt wurden. Somit scheint durch eine Erhöhung der Verpressrate der Anteil des im Quellbereich abgefilterten Bindemittels vermindert zu werden.

Mit dem gröberen Feinstbindemittel Finosol U hat sich auch unter diesen Versuchsrandbedingungen jeweils ein höheres bezogenes Verpresskörpervolumen als mit dem feineren Feinstbindemittel Finosol X ergeben, obwohl jeweils in den gleichen Sand F 32 mit annähernd gleicher Lagerungsdichte injiziert wurde. Die zuvor festgestellten Abhängigkeiten der Filtrationsintensität bzw. der Reichweitenverkürzung von verwendeten Feinstbindemittelsorte ändern sich durch die Verpressrate nicht.

Nr.	Feinstbindemittelsorte / Sand	Verpressrate in l/min	Absolute Reichweite in m	Verhältnis des Porenvolumens der Verpresskörper zum verpressten Suspensionsvolumen	Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	Injektionscracks ¹⁾
4	Finosol U F 32	0,25	0,97	0,74	36	nein
5	Finosol U F 32	0,40	1,00	0,87	14,8	nein
7	Finosol X F 32	0,25	0,89	0,58	72	ja
8	Finosol X F 32	0,40	0,98	0,78	28,3	nein

¹⁾ Am Injektionskörper visuell erkennbare Cracks

Tab. 6.5: Ergebnisse der mit verschiedenen Verpressraten und einem Wasser-Bindemittelverhältnis von 5,0 durchgeführten Trichterversuche

6.3.3.4 Verteilung des Bindemittels in den abgebundenen Injektionskörpern

Die festgestellte Vergrößerung des bezogenen Injektionskörpervolumens infolge einer Verpressratenerhöhung spiegelt sich auch in den dargestellten Verläufen der Glühverluste bzw. der daraus abgeschätzten rechnerischen Suspensionsdichten in den Bildern 6.11 und 6.12 wider. Hier sind jeweils die Ergebnisse der Trichterversuche mit einer Verpressrate von

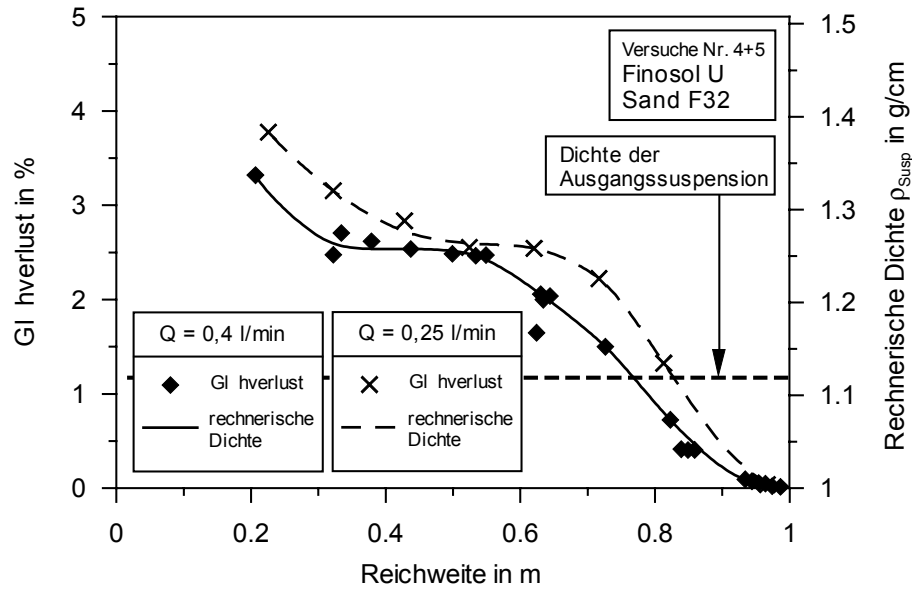


Bild 6.11: Verläufe der an den abgebundenen Injektionskörpern der Trichterversuche 4 und 5 bestimmten Glühverluste und rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension (Finosol U, W/B=5,0, Sand F32, Verpressraten 0,25 bzw. 0,4 l/min)

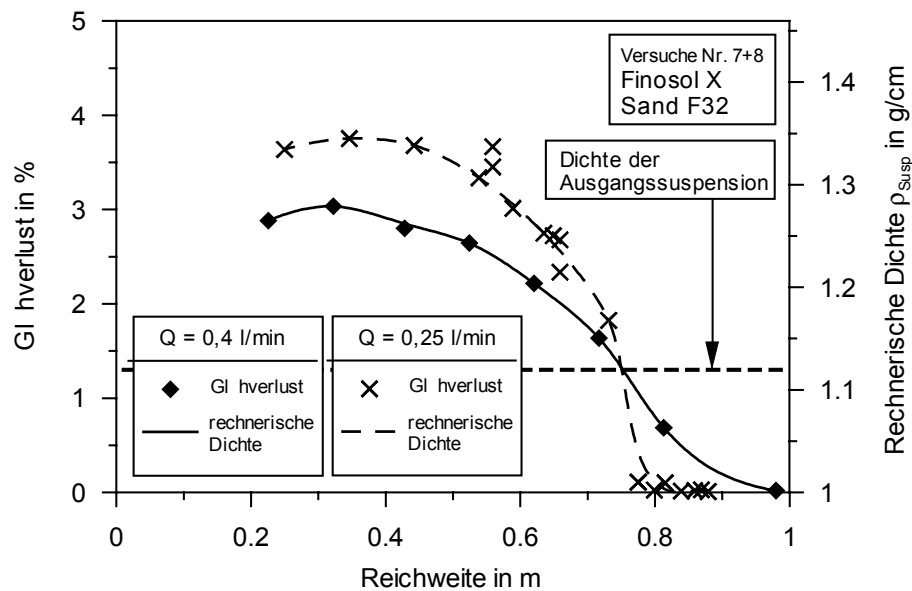


Bild 6.12: Verläufe der an den abgebundenen Injektionskörpern der Trichterversuche 7 und 8 bestimmten Glühverluste und rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension (Finosol X, W/B=5,0, Sand F32, Verpressraten 0,25 bzw. 0,4 l/min)

0,4 l/min bzw. 0,25 l/min gegenübergestellt. Die unter ansonsten gleichen Versuchsrandbedingungen durchgeführten Versuche zeigen dabei ähnliche Verläufe. Wie aufgrund des reichweitenvergrößernden Einflusses einer höheren Verpressrate zu vermuten war, wurden bei den mit einer höheren Verpressrate durchgeführten Versuchen geringere Glühverluste im Kern der Injektionskörper gemessen. Die Ausdehnung der Randzonen, in denen der Bindemittelgehalt unter dem der verpressten Ausgangssuspension liegt, nimmt hingegen zu. Während eine Verpressratenerhöhung durch größere Injektionsreichweiten zu einer aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaften Einsparung von Feinstbindemittel führt, wird gleichzeitig jedoch die Abdichtungswirksamkeit der Injektion durch die Ausdehnung bindemittelarmer Randzonen eher negativ beeinflusst. Eine detaillierte Diskussion der unter verschiedenen Randbedingungen erzielten Durchlässigkeiten der abgebundenen Verpresskörper erfolgt in Abschnitt 6.3.8.

6.3.4 Untersuchungen zum Einfluss des Bindemittelgehalts der Suspension

6.3.4.1 Allgemeines und Versuchsrandbedingungen

Wie die zuvor beschriebenen Ergebnisse verschiedener Trichterversuche zeigen, ist die Anreicherung des Feinstbindemittels im Kern des Injektionskörpers bei gleichzeitiger Ausbildung bindemittelarmerer Randzonen typisch. Es gilt daher die Ausdehnung dieser Randzonen zu begrenzen bzw. hier den Bindemittelgehalt soweit zu erhöhen, dass beispielsweise bei Abdichtungsinjektionen die im Einzelfall geforderte zulässige Sickerwassermenge eingehalten werden kann. Eine Erhöhung des Bindemittelgehalts der verpressten Feinstbindemittelsuspension lässt zunächst eine weitere Reduktion der ohnehin schon vergleichsweise geringen Durchlässigkeiten im Kern des Injektionskörpers erwarten. Gleichzeitig erscheint es möglich, den Bindemittelgehalt in den Randbereichen der Verpresskörper anzuheben und so die Systemdurchlässigkeit insgesamt wesentlich zu verringern. Durchgeführt wurden daher drei weitere Trichterversuche mit einem W/B-Wert von 4,0 statt des zuvor verwendeten W/B-Wertes von 5,0. Die Dichte der verpressten Suspension erhöht sich somit von $1,12 \text{ g/cm}^3$ auf $1,15 \text{ g/cm}^3$. Die Randbedingungen dieser Versuche einschließlich der in den Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Vergleichsversuche mit einem W/B-Wert von 5,0 sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Da bei höherem Feststoffanteil eine größere Injektionsreichweite erwartet wurde, wurde aus versuchstechnischen Gründen die Verpressmenge reduziert.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Dichte der Suspension in g/cm ³	Sand	Porenanteil	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	Verpresstes Suspensionsvolumen in l
1	Finosol F	5,0	1,12	F 31	0,36	0,25	9,7	46,5
3	Finosol F	4,0	1,15	F 31	0,35	0,25	9,7	42,4
4	Finosol U	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
6	Finosol U	4,0	1,15	F 32	0,38	0,25	9,7	42
7	Finosol X	5,0	1,12	F 32	0,38	0,25	9,7	50
9	Finosol X	4,0	1,15	F 32	0,35	0,25	9,7	40

Tab. 6.6: Randbedingungen der mit verschiedenen Wasser-Feststoffverhältnissen und einer Verpressrate von 0,25 l/min durchgeführten Trichterversuche

6.3.4.2 Druckverläufe

Mit einer Erhöhung des Feststoffgehaltes einer Feinstbindemittelsuspension nimmt die Anzahl der pro Zeiteinheit in das Korngerüst eingepressten Partikel und auch die in diesem Zeitabschnitt abgefilterte Feinstbindemittelmenge zu. Durch die hieraus resultierende beschleunigte Verengung der Porenkanäle ist bei höherem Bindemittelgehalt mit einem stärkeren Anstieg des Einpressdrucks an der Injektionsquelle zu rechnen. Erwartungsgemäß liegen daher die bei W/B-Werten von 4,0 an der Injektionsquelle gemessenen maximalen Drücke um 0,1 bis 0,2 MPa über denen der Vergleichsversuche mit einem W/B-Wert von 5,0.

Abgesehen von einem höheren absoluten Druckniveau weicht der Verlauf des mit dem Feinstbindemittel Finosol F durchgeführten Versuchs (Bild 6.13) kaum von dem des Vergleichsversuchs mit geringerem Bindemittelgehalt der Suspension ab (Bild 6.2). Hingegen setzt bei den mit dem Feinstbindemitteln Finosol U und Finosol X durchgeführten Versuchen zunächst der Übergang vom geradlinig ansteigenden zum sägezahnartigen Druckverlauf an der Injektionsquelle schon zu einem deutlich früheren Zeitpunkt ein, wird also durch einen höheren Bindemittelgehalt in der Suspension beschleunigt (Bilder 6.14 und 6.15). Bei Verwendung des Feinstbindemittels Finosol X sind jedoch in Abhängigkeit vom W/B-Wert weitere deutliche Unterschiede zu erkennen. So ist hier etwa ab der Hälfte der Verpresszeit ein Abfall des Injektionsdrucks verbunden mit vergleichsweise großen kurzfristigen Druckschwankungen festzustellen (Bild 6.15), wie er bei dem Vergleichsversuch mit einem W/B-Wert von 5,0 nicht beobachtet wurde (Bild 6.4). Hier kam es lediglich gegen Ende des Injektionsversuchs zu einem Abfall des Injektionsdrucks.

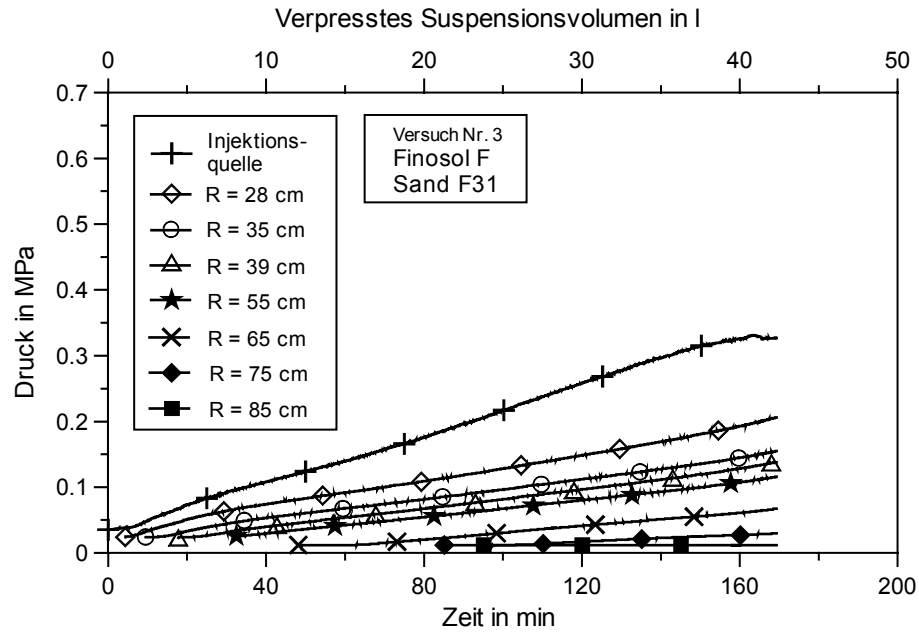


Bild 6.13: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Injektionskörpers des Trichterversuchs 3 mit dem Feinstbindemittel Finosol F und einem W/B-Wert von 4,0 (Sand F31, Verpressrate 0,25 l/min)

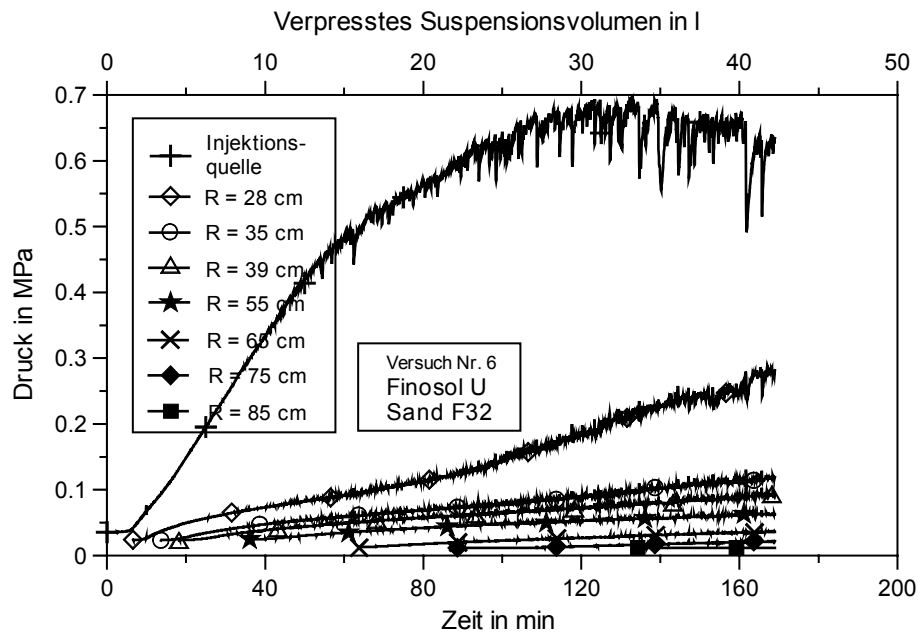


Bild 6.14: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Injektionskörpers des Trichterversuchs 6 mit dem Feinstbindemittel Finosol U und einem W/B-Wert von 4,0 (Sand F32, Verpressrate 0,25 l/min)

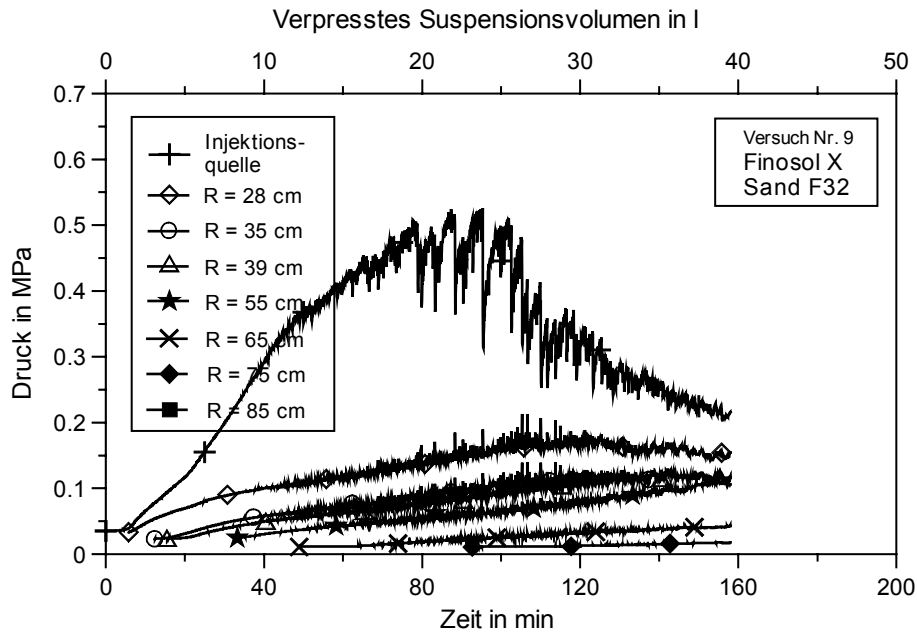


Bild 6.15: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Injektionskörpers des Trichterversuchs 9 mit dem Feinstbindemittel Finosol X und einem W/B-Wert von 4,0 (Sand F32, Verpressrate 0,25 l/min)

6.3.4.3 Reichweite der Injektion

Bei einem Vergleich der mit unterschiedlichen Wasser-Bindemittelwerten durchgeführten Trichterversuche ergeben sich, wie Tabelle 6.7 zeigt, mehr oder weniger größere bezogene Verpresskörpervolumen für die mit höherem Bindemittelgehalt durchgeführten Versuche. Dabei ist festzustellen, dass dieser reichweitenvergrößernde Einfluss mit zunehmender Mahlfineinheit des verwendeten Feinstbindemittels deutlicher ausfällt. So ist bei der Feinstbindemittelsorte Finosol F nur eine geringfügige, vernachlässigbare Vergrößerung des Verpresskörpervolumens festzustellen, während beim Feinstbindemittel Finosol U und insbesondere bei der Feinstbindemittelsorte Finosol X eine erhebliche Vergrößerung eintritt. Insgesamt fällt jedoch die Schwankungsbreite der bezogenen Verpresskörpervolumen aller mit einem W/B-Wert von 4,0 durchgeführten Trichterversuche gegenüber den mit einem W/B-Wert von 5,0 durchgeführten Versuchen erheblich geringer aus.

Wird das Gewicht des verpressten Feinstbindemittels ins Verhältnis zum bezogenen Verpresskörpervolumen gesetzt, so ist für die mit den Feinstbindemitteln Finosol U und X durchgeführten Versuche eine deutliche Steigerung des bezogenen Verpresskörpervolumens bei annähernd identischer Feinstbindemittelgesamtmenge festzustellen. Für das Feinstbindemittel Finosol F ergibt sich dagegen, trotz einer um ca. 12% erhöhten Feinstbindemittelmenge, nur eine insgesamt zu vernachlässigende Vergrößerung des bezogenen Verpresskörpervolumens.

Nr.	Feinstbindemittelsorte / Sand	W/B	Absolute Reichweite in m	Verhältnis des Porenvolumens der Verpresskörper zum verpressten Suspensionsvolumen	Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	Injektionscracks ¹⁾	Verpresste Gesamtmenge an Feinstbindemittel in kg	Verpresste Feinstbindemittelmenge in g/cm ³ Porenvolumen des Injektionskörpers
1	Finosol F	5,0	0,99	0,81	23,9	nein	8,680	0,231
3	Finosol F	4,0	0,97	0,82	21,8	nein	9,731	0,280
4	Finosol U	5,0	0,97	0,74	35,7	nein	9,333	0,253
6	Finosol U	4,0	0,96	0,86	16,1	nein	9,639	0,266
7	Finosol X	5,0	0,89	0,58	71,9	ja	9,333	0,321
9	Finosol X	4,0	0,93	0,78	28,6	nein	9,180	0,295

¹⁾ Am Injektionskörper visuell erkennbare Cracks

Tab. 6.7: Ergebnisse der mit verschiedenen W/B-Werten und einer Verpressrate von 0,25 l/min durchgeführten Trichterversuche

Bei keinem der mit einem Wasser-Bindemittelverhältnis von 4,0 durchgeführten Trichterversuche konnten beim Zerlegen der Injektionskörper Injektionscracks gefunden werden. Allerdings ließ der Druckverlauf des mit dem Finosol X durchgeführten Versuchs Nr. 9 zunächst anderes erwarten. Hier bleibt allerdings, wie die in Bild 6.15 dargestellten Druckverläufe zeigen, das Absinken des Injektionsdrucks im Wesentlichen auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkt. Plötzliche und unerwartete Druckanstiege an quellenentfernteren Messgebern, wie sie in den Bildern 6.5 und 6.6 zu erkennen sind und die auf einen Feinstbindemitteltransport durch Crackadern hindeuten, waren dort nicht feststellbar.

6.3.4.4 Verteilung des Bindemittels in den abgebundenen Injektionskörpern

In den Bildern 6.16 bis 6.18 sind wiederum die an verschiedenen Punkten der abgebundenen Injektionskörper bestimmten Glühverluste aus Trichterversuchen, die mit W/B-Werten von 4,0 oder 5,0 durchgeführt wurden, gegenübergestellt. Die dargestellten Trendlinien der Glühverluste und rechnerischen Suspensionsdichten orientieren sich auch hier ausschließlich an den in verschiedenen Schnitten durch die abgebundenen Injektionskörper bestimmten Werten, während die an Bohrkernen ermittelten Werte aufgrund der höheren Streubreite auch hier vernachlässigt wurden. Auffällig ist hierbei zunächst, dass im Kern der Injektionskörper bei den mit einem W/B-Wert von 4,0 durchgeführten Versuchen durchweg geringere Glühverluste gemessen wurden, obwohl eine größere bzw. annähernd gleich große Feinstbindemittelmenge verpresst wurde. Es ist jedoch nicht erkennbar, ob dieses Ergebnis allein

auf frühzeitig einsetzende, im wesentlichen auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkte „Miniaturcracks“ zurückgeführt werden kann.

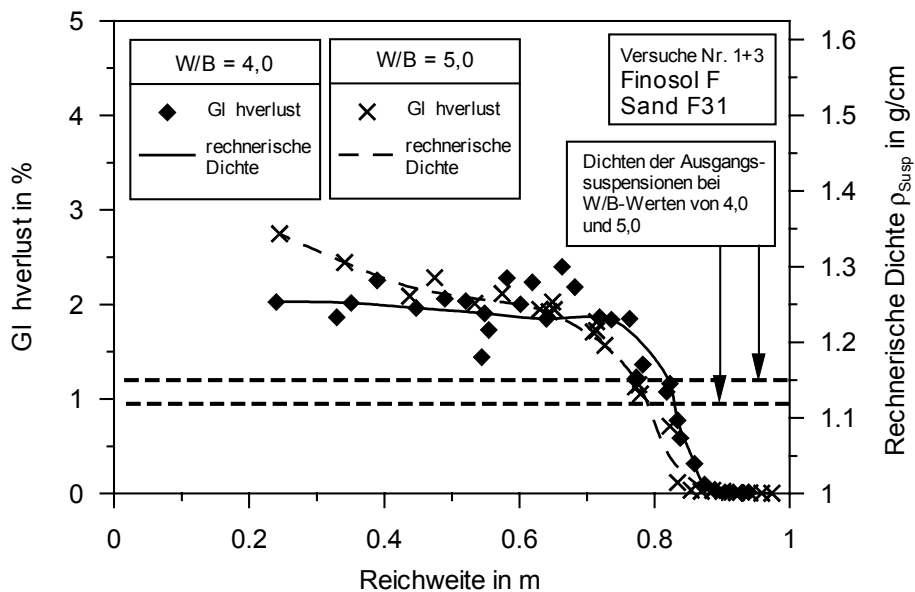


Bild 6.16: Verläufe der an den erhärteten Injektionskörpern bestimmten Glühverluste und rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension der mit unterschiedlichen W/B-Werten durchgeführten Trichterversuche 1 und 3 (Feinstbindemittel Finosol F, Sand F 31)

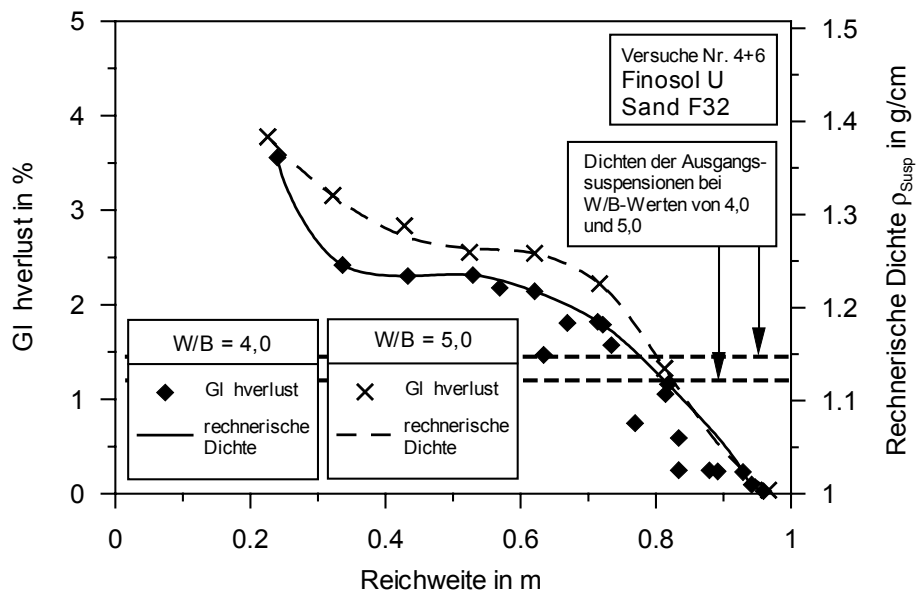


Bild 6.17: Verläufe der an den erhärteten Injektionskörpern bestimmten Glühverluste und rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension der mit unterschiedlichen W/B-Werten durchgeführten Trichterversuche 4 und 6 (Feinstbindemittel Finosol U, Sand F32)

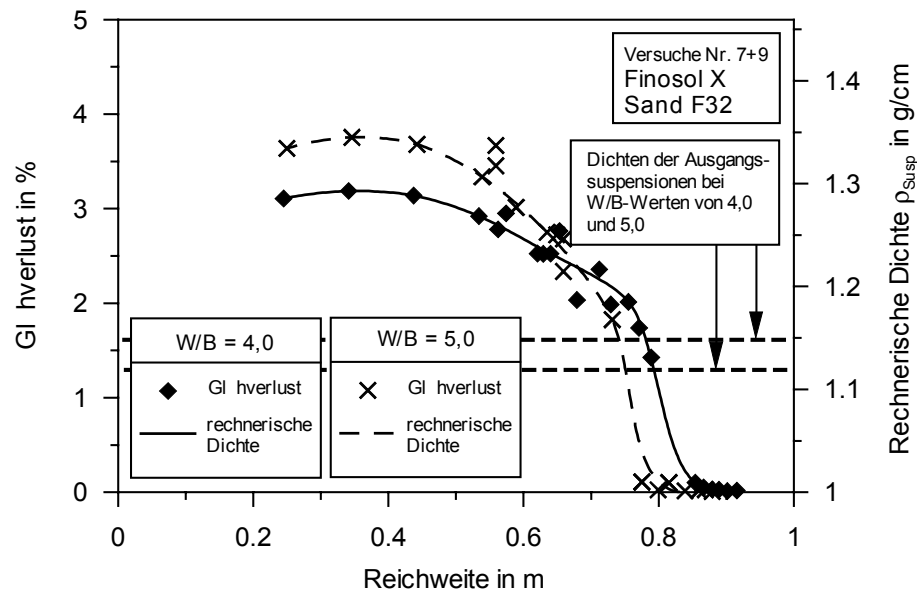


Bild 6.18: Verläufe der an den erhärteten Injektionskörpern bestimmten Glühverluste und rechnerischen Dichten der Feinstbindemittelsuspension der mit unterschiedlichen W/B-Werten durchgeführten Trichterversuche 7 und 9 (Feinstbindemittel Finosol X, Sand F 32)

Bei den mit dem Feinstbindemittel Finosol F durchgeführten Versuchen 1 und 3 ist nahezu keine Veränderung der bezogenen Injektionsreichweite festzustellen. Ein höherer Bindemittelgehalt der verpressten Suspension führte hier allein zu einer Verringerung der Ausdehnung von bindemittelarmen Randzonen. Im Gegensatz dazu wuchs bei den Feinstbindemitteln Finosol U und X das bezogene Verpresskörpervolumen bei Verwendung eines W/B-Wertes von 4,0 anstelle von 5,0 deutlich an, während die absolute Ausdehnung der bindemittelarmen Randzonen bei beiden W/B-Werten jeweils nahezu unverändert blieb. Durch eine höhere Bindemittelkonzentration kann somit nicht zwangsläufig die Ausdehnung bindemittelarmer Randzonen begrenzt werden.

6.3.5 Trichterversuch mit geringerer Reichweite

Wie die Ergebnisse der zuvor beschriebenen großmaßstäblichen Trichterversuche zeigen, ist für die Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen eine Anreicherung des Bindemittels im Kern sowie ein reduzierter Bindemittelgehalt in den Randbereichen der Injektionskörper typisch. Die Differenz zwischen den Bindemittelgehalten im Kern und den Randbereichen hängt neben den Eigenschaften des Feinstbindemittels, des Korngerüsts und der Verpressrate auch vom verpressten Suspensionsvolumen ab. Wird ein höheres Injektionsvolumen injiziert, so wird auch, sofern Injektionscracks ausbleiben, mehr Feinstbindemittel im Kern der Injektionskörper angereichert. Gleichzeitig reduziert sich der

Bindemittelgehalt der nach außen verdrängten Feinstbindemittelsuspension an der Injektionsfront weiter und es ist in verstärktem Maße mit einer Verkürzung der effektiven Injektionsreichweite zu rechnen. Werden hingegen geringere Reichweiten der Injektion angestrebt, so reduziert sich das hierfür zu injizierende Suspensionsvolumen erheblich, da bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung mit zunehmender Reichweite das zum Erzielen eines Reichweitenzuwachses erforderliche Suspensionsvolumen proportional zu r^3 anwächst. Es wurde daher ein Trichterversuch mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 durchgeführt, bei dem das verpresste Suspensionsvolumen auf 15 l gegenüber den ursprünglich verpressten 50 l reduziert wurde.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Dichte der Suspension in g/cm ³	Sand	Porenanteil	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	Verpresstes Suspensionsvolumen in l
1	Finosol F	5	1,12	F 31	0,36	0,25	9,7	46,5
2	Finosol F	5	1,12	F 31	0,35	0,25	9,7	15

Tab. 6.8: Randbedingungen der mit unterschiedlichen verpressten Suspensionsvolumen durchgeführten Trichterversuche

Die am Trichterversuch 2 mit verringerter Verpressmenge gemessenen Injektionsdrücke steigen alle nahezu linear an, wie Bild 6.19 zeigt. Druckschwankungen, die auf ein Verstopfen und anschließendes Aufsprengen des Porensystems durch den Injektionsdruck hindeuten, finden sich hingegen nicht. Das tatsächliche Volumen des Injektionskörpers entspricht nahezu dem theoretisch zu erwartenden. Die fortlaufende Ausdünnung der Feinstbindemittelsuspension beim Durchströmen des Porensystems hat hier anscheinend nahezu keine Auswirkungen auf die Injektionsreichweite.

Nr.	Feinstbindemittelsorte / Sand	Verpressrate in l/min	Absolute Reichweite in m	Verhältnis des Porenvolumens der Verpresskörper zum verpressten Suspensionsvolumen	Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	Injektionscracks ¹⁾
1	Finosol F F 31	0,25	0,99	0,81	23,9	nein
2	Finosol F F 31	0,25	0,72	0,97	3,6	nein

¹⁾ Am Injektionskörper visuell erkennbare Cracks

Tab. 6.9: Ergebnisse der mit unterschiedlichen verpressten Suspensionsvolumen durchgeführten Trichterversuche mit dem Feinstbindemittel Finosol

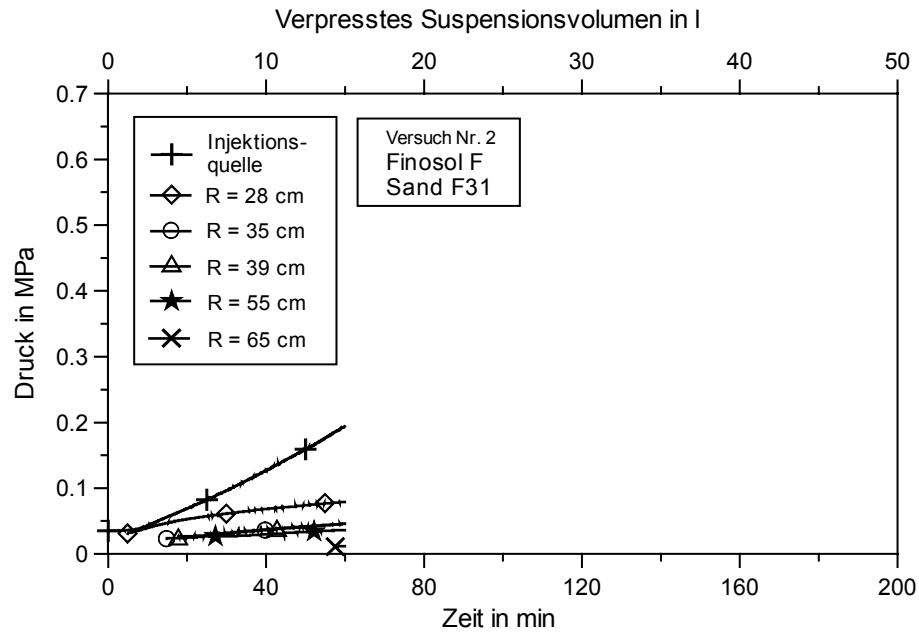


Bild 6.19: Druckverläufe an der Injektionsquelle und an verschiedenen Punkten innerhalb des Versuchssandes des Trichterversuchs 2 mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31

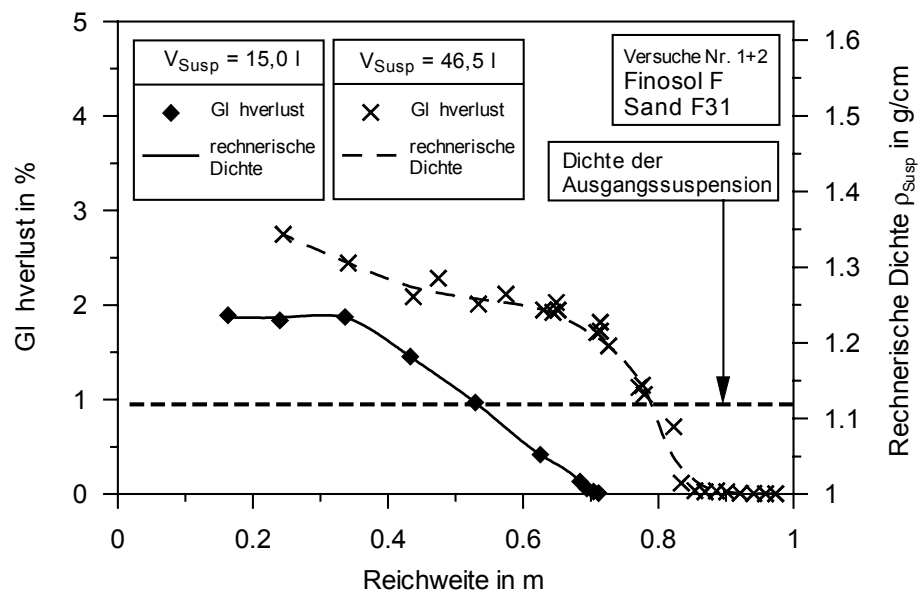


Bild 6.20: Verläufe der an erhärteten Injektionskörpern bestimmten Glühverluste und rechnerischen Suspensionsdichten der mit unterschiedlichen verpressten Suspensionsvolumen durchgeführten Trichterversuche 1 und 2 (Feinstbindemittel Finosol F, Sand F 31)

Erwartungsgemäß unterscheidet sich daher auch der Verlauf der Glühverluste von dem am Trichter Versuch 1 mit einer höheren Verpressmenge bestimmten. Der Glühverlust bleibt bis zu einer Reichweite von ca. 0,35 cm weitestgehend konstant und fällt anschließend nahezu linear ab. Hierdurch sinkt in den äußeren 20 cm des Injektionskörpers der rechnerische Bindemittelgehalt der Feinstbindemittelsuspension unter den der Ausgangssuspension. Bindemittelarme Randzonen mit einer größeren Durchlässigkeit gegenüber Wasser lassen sich somit auch bei einer erheblichen Verringerung der Verpressmenge nicht gänzlich ausschließen. Neben Filtrationsvorgängen wirkt sich hierauf auch die stetige Verdünnung der Suspension an der Injektionsfront durch das Einarbeiten von Porenwasser aus.

6.3.6 Diskussion der Verläufe des Einpressdrucks und der rechnerischen Suspensionsdichten der Trichterversuche

Anhand der Glühverluste der Injektionsproben konnten, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, Verläufe der rechnerischen Suspensionsdichten errechnet werden, in denen die Bindemittelkonzentration der flüssigen Phase sowie der abgefilterte Bindemittelanteil zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs zusammengefasst sind. Diese Verläufe der rechnerischen Suspensionsdichten können verschiedenen Kategorien, wie sie in Bild 6.21 dargestellt sind, zugeordnet werden. Beim Verlauf A bleibt die Suspensionsdichte über weite Bereiche des Injektionskörpers mehr oder weniger konstant und fällt anschließend in den Randbereichen deutlich ab. Beim Verlauf B sinkt von der Injektionsquelle ausgehend die Suspensionsdichte zunächst ab, geht in einen nahezu horizontalen Verlauf über und fällt anschließend zum Rand des Injektionskörpers hin wiederum ab. Bemerkenswerterweise liegen in den Bereichen mit nahezu konstantem Verlauf der Suspensionsdichten die bei den Verläufen A und B bestimmten Suspensionsdichten in einer ähnlichen Größenordnung. Beim Verlauf C hingegen ist ein solcher Bereich mit einem nahezu konstanten Verlauf der Suspensionsdichten nicht festzustellen. Lediglich in der Nähe der Injektionsquelle sind nahezu konstante bzw. geringfügig zur Injektionsquelle hin absinkende Suspensionsdichten zu beobachten.

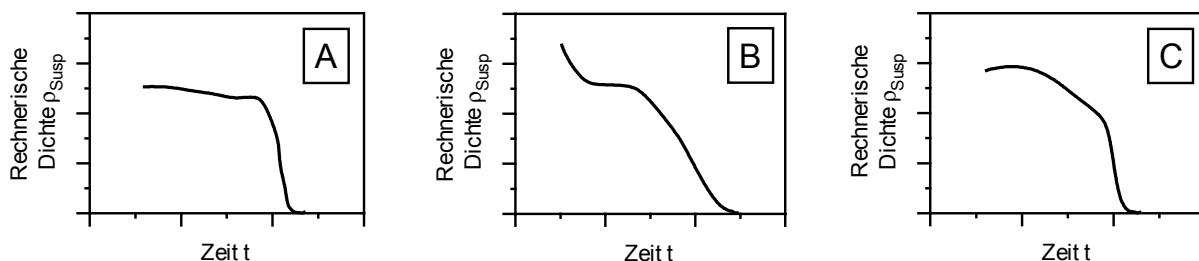


Bild 6.21: Verschiedene Verlaufsarten der rechnerischen Suspensionsdichten

In Bild 6.22 sind die Verläufe der rechnerischen Suspensionsdichten der Trichterversuche den verschiedenen Kategorien zugeordnet. Allein der mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 36 durchgeführte Versuch war von seiner Tendenz her nicht ohne weiteres

den vorgenannten Kategorien zuzuordnen, da der Verlauf eine Mischung der Kategorien B und C darstellt. Gleichzeitig wurden durch Injektionscracks bedingt in den Randzonen dieses Verpresskörpers örtlich stark abweichende Reichweiten und Suspensionsdichten bestimmt, von denen exemplarisch zwei dargestellt sind.

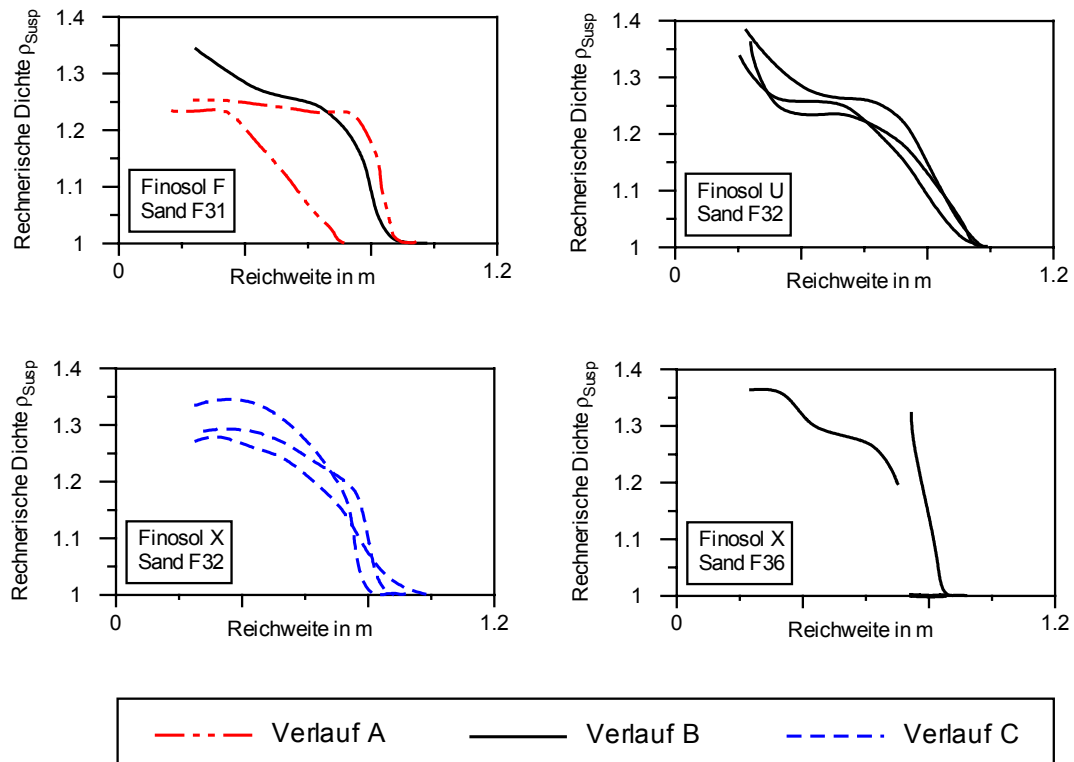


Bild 6.22: Einordnung der Verläufe der Suspensionsdichten von Trichterversuchen nach Kategorien

Auch die bei der Durchführung der Trichterversuche aufgezeichneten Einpressdrücke an der Injektionsquelle wurden ausgewertet und verschiedenen Kategorien D, E und F zugeordnet (Bild 6.23). Sägezahnartige Druckschwankungen wurden dabei aufgrund ihres lokal begrenzten Einflusses auf die Injektionsmittelausbreitung vernachlässigt. Beim Druckverlauf D steigt der Einpressdruck kontinuierlich an, während beim Druckverlauf E der anfänglich kontinuierlich ansteigende Druckverlauf in einen nahezu konstanten übergeht. Der Verlaufstyp F beschreibt einen zunächst ansteigenden aber dann über einen längeren Zeitraum plötzlich oder auch langsam wieder absinkenden Einpressdruck.

In Tabelle 6.10 sind die Kategorien der Einpressdruckverläufe und der rechnerischen Suspensionsdichten einander gegenübergestellt. Ein Druckverlauf der Kategorie D führt demnach anscheinend zu einem Verlauf der Suspensionsdichten der Kategorie A, während ein Druckverlauf der Kategorie E eher zu einem Dichteverlauf der Kategorie B und ein Druckverlauf der Kategorie F eher zu einem Dichteverlauf der Kategorie C führt. Lassen sich aus dem Verlauf des Einpressdrucks keine Hinweise auf Injektionscracks erkennen, ist nach den

erhaltenen Ergebnissen der Bindemittelgehalt im Kern eines Injektionskörpers auf eine konstante, maximale Größe begrenzt. Ein stagnierender Einpressdruck wie im Fall E ist als Hinweis auf das Entstehen begrenzter Injektionscracks in Quellennähe mit der Folge eines Dichteanstiegs bzw. einer Dichteverteilung der Kategorie B zu werten. Bei einem Druckverlauf vom Typ F sinkt der Einpresswiderstand nach einem großräumigen Aufsprengen des verengten Porensystems durch den Injektionsdruck. Die Folge ist gemäß Verteilungstyp C ein rascher Abfall der Suspensionsdichte im äußeren Bereich des Injektionskörpers.

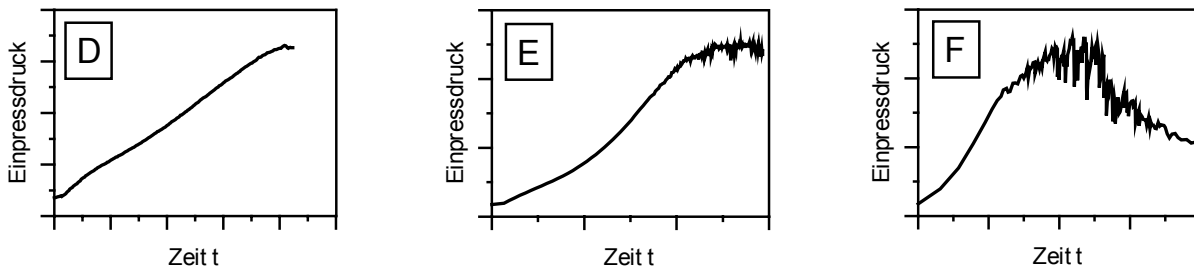


Bild 6.23: Einordnung der Verläufe des Einpressdrucks an der Injektionsquelle von Trichter- versuchen nach Kategorien

Nr.	Feinstbinde- mittelsorte	W / B	Sand	Kategorie des Einpressdrucks	Kategorie des Dichteverlaufs
1	Finosol F	5,0	F 31	E / F	B
2	Finosol F	5,0	F31	D	A
3	Finosol F	4,0	F 31	D	A
4	Finosol U	5,0	F 32	E	B
5	Finosol U	5,0	F 32	E	B
6	Finosol U	4,0	F 32	E / F	B
7	Finosol X	5,0	F 32	F	C
8	Finosol X	5,0	F 32	E / F	C
9	Finosol X	4,0	F 32	F	C
10	Finosol X	5,0	F 36	F	B

Tab. 6.10: Gegenüberstellung der Kategorien der Einpressdruck- und Suspensionsdichte- verläufe der Trichterversuche

6.3.7 Bewertung und Diskussion der Volumenverluste der Injektionskörper

Da die angestrebte Dichtigkeit einer Injektionssohle schon durch wenige Fehlstellen mit geringem Durchmesser gefährdet wird, erwächst der Kompensation der filtrationsbedingten Reichweitenverkürzung durch das Verpressen einer entsprechenden Mehrmenge an Injektionssuspension eine besondere Bedeutung. Im Praxisfall sind hierbei jedoch auch die wirtschaftlichen Randbedingungen zu beachten. Da mit zunehmender Reichweite und Verpressmenge mit verstärktem Filtrationseinfluss zu rechnen ist, wächst die erforderliche Mehrmenge an Injektionssuspension mit der Reichweite überproportional an. Es gilt daher auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse die Beziehung zwischen der Reichweite und der erforderlichen Mehrmenge an Injektionssuspension für die verschiedenen untersuchten Sand-Feinstbindemittel-Kombinationen möglichst genau abzuschätzen. Die Auswirkungen bindemittelarmer Randzonen werden in Kapitel 6.3.8 im Zusammenhang mit den erzielten Durchlässigkeiten der Injektionskörper ausführlich diskutiert und sollen daher hier zunächst nicht weiter betrachtet werden.

In Bild 6.24 sind die Verhältnisse der tatsächlichen zu den theoretisch zu erwartenden Verpresskörpervolumen aller durchgeführten Trichterversuche in Abhängigkeit der Reichweite dargestellt. Für die Einzelversuche ergibt sich dabei eine große Streubreite dieser bezogenen Verpresskörpervolumen. Jedoch ist festzustellen, dass die mit feineren Feinstbindemittelsorten durchgeführten Trichterversuche trotz guter theoretischer Injizierfähigkeit eher geringere bezogene Verpresskörpervolumen aufweisen. Wie zu erwarten ergeben sich die geringsten bezogenen Verpresskörpervolumen bei den Trichterversuchen, bei denen ausgeprägte Cracks beim Freilegen der Injektionskörper aufgefunden werden konnten. Durch die Ausbildung von Crackadern gelangt eine Feinstbindemittelsuspension mit höherem Bindemittelgehalt in Teile des Randbereichs der Injektionskörper. Trotzdem scheint durch die dem Aufsprengen vorangegangene Feststoffablagerung ein erheblicher Anteil des verpressten Feinstbindemittels im Kern des Injektionskörpers zurückgehalten zu werden.

Mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 wurden zwei Trichterversuche mit unterschiedlichen Verpressmengen aber gleicher Verpressrate sowie gleichem Bindemittelgehalt der Injektionssuspension durchgeführt. Der theoretisch zu erwartende exponentiell mit der Reichweite ansteigende Bedarf an zu verpressender Mehrmenge wird hier bestätigt. Bei einer Reichweite von ca. 0,7 m ergibt sich ein vergleichsweise großes bezogenes Verpresskörpervolumen bzw. eine geringe erforderliche Mehrmenge. Gleichzeitig steigen jedoch bei einer solchen Verkürzung der geplanten Injektionsreichweite und einer kugelförmigen Ausbreitung der Injektionssuspension die Bohrkosten an und es kommt zu einer Verringerung der mittleren Dicke der Injektionssohle.

Um der Gefahr von Fehlstellen infolge der Reichweitenverkürzung entgegenzuwirken, werden bei Feinstbindemittelinjektionen zur Herstellung von Sohldichtungen üblicherweise gegenüber Weichgelinjektionen verringerte Bohrlochabstände vorgesehen. Aus der Festlegung der Bohrpunktabstände ergibt sich die erforderliche Mindestreichweite der Injektion. Dabei ist

auch in den Zwickeln zwischen den Injektionskörpern eine gute abdichtungswirksame Verbindung zu erzielen.

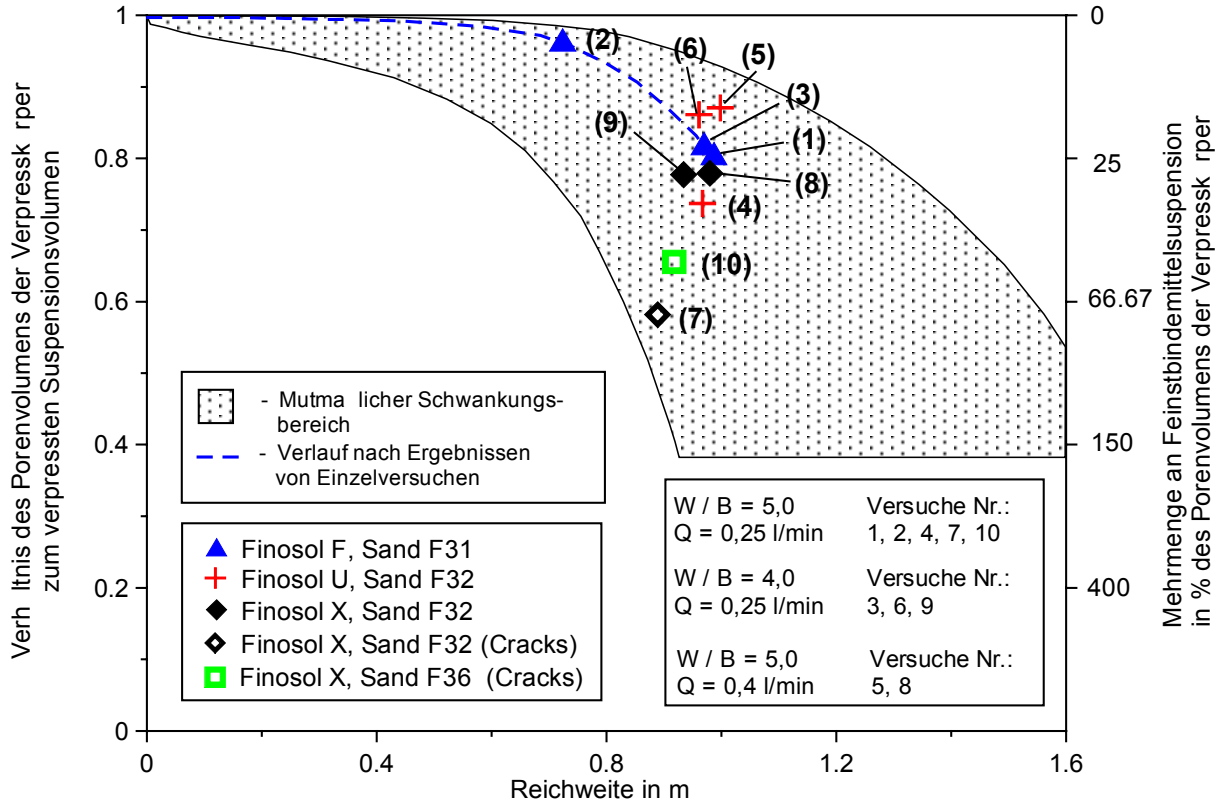


Bild 6.24: Zusammenfassung der Verhältnisse des theoretischen zum tatsächlichen Injektionskörpervolumen (bezogenes Verpresskörpervolumen) und zu verpressende Mehrmengen

Während in den Laborversuchen in einen weitestgehend homogenen Sandkörper injiziert wurde, weist der abzudichtende Baugrund oftmals eine mehr oder weniger ausgeprägte Schichtung auf, die sorgfältig zu erkunden ist. Aus der Schichtung sowie der Lagerungsdichte der Lockergesteine ergeben sich unterschiedliche Fließwiderstände, die sich insbesondere bei der Injektion von Feinstbindemitteln oder Zementsuspensionen, die eine Fließgrenze aufweisen, auswirken. Da die eingepresste Suspension dazu neigt, sich in Richtung des geringsten Fließwiderstandes auszubreiten (BRAUNS et. al. 2002), ist eine gleichmäßige Kugelform des Verpresskörpers, wie sie bei einem dreidimensionalen Injektionsversuch von MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (2000) beobachtet wurde, bei ausgeprägter Feinschichtung des Untergrundes eher nicht zu erwarten. Gleichfalls ist einem unkontrollierten Abfließen der Injektionssuspension in grobkörnige Lagen entgegenzuwirken, was ebenfalls eine hierauf besonders abgestimmte Baugrunderkundung voraussetzt. Bei der Festlegung der erforderlichen Injektionsreichweite ist ein möglicher Einfluss der Baugrundschichtung zu berücksichtigen.

Wie Bild 6.24 zeigt, ist bei einer Ausbreitung des Injektionsmittels durch Cracks vielfach mit einem reduzierten bezogenen Verpresskörpervolumen zu rechnen. Gleichzeitig wächst mit der crackbedingt zu erwartenden unregelmäßigen zufälligen Form des Injektionskörpers auch die Gefahr örtlich nicht injizierter Bereiche. Solche Cracks können durch ein filtrationsbedingtes Verstopfen des Porensystems oder durch einen hohen Injektionsdruck in Folge einer zu hohen Verpressrate entstehen. Daher sollte eine Kontrolle des Einpressdrucks an der Injektionsquelle erfolgen, um gegebenenfalls die Verpressmenge zu reduzieren oder die Verpresspunktabstände zu verkürzen.

Neben einer durch die Untergrundsichtung verursachten, von der Kugelform abweichenden Geometrie der Injektionskörper müssen bei der Festlegung der erforderlichen Mindestreichweite der Injektion mögliche Bohrabweichungen berücksichtigt werden, durch die es zu einer horizontalen Verschiebung der Injektionsquelle kommt. Zur Vermeidung von Fehlstellen muss somit die Mindestreichweite der Injektion um die Auslenkung der Injektionsquelle erhöht werden. Die unter Berücksichtigung verschiedener Bohrabweichungen und Tiefenlagen bei gegebenem Bohrlochabstand eines dreiecksförmigen Injektionsrasters erforderlichen Mindestreichweiten sind in Bild 6.25 dargestellt. Die experimentell ermittelten Injektionsreichweiten führen bei der Berücksichtigung von Bohrabweichungen von 1 % in einer Tiefe von 20 m zu Bohrlochabständen von 0,9 m bis 1,4 m, während sich bei maximalen Bohrabweichungen von 2 % in der gleichen Tiefenlage nur Bohrlochabstände zwischen 0,55 m und 1,05 m ergeben.

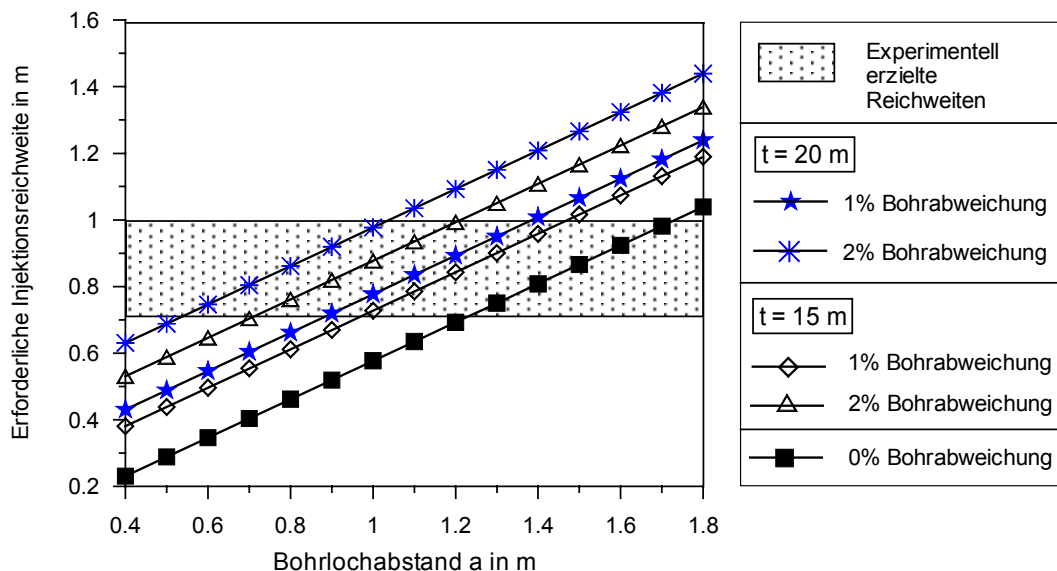


Bild 6.25: Erforderliche Injektionsreichweiten in Abhängigkeit der Bohrlochabstände und der Bohrabweichungen für ein dreiecksförmiges Injektionsraster

Wie die Ergebnisse der Trichterversuche zeigen, wird bei der Injektion von Feinstbindemitteln, sofern kein großflächiges Aufsprengen des Porensystems durch den Injektionsdruck erfolgt, die bereits in das Porensystem eingepresste Suspension jeweils von der nachfolgend verpressten nach außen verdrängt. Je größer das Verpressvolumen angesetzt wird, desto stärker wirkt sich die fortlaufende Ausdünnung der in die Randbereiche der Injektionskörper verdrängten Suspension aus und führt zu einer verstärkten Reichweitenverkürzung und evtl. einer größeren Ausdehnung bindemittelarmer Randzonen. Wie die mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 bei gleicher Verpressrate durchgeführten Versuche mit Verpressmengen von 15 l und 50 l zeigen, stellt sich bei einer verringerten Verpressmenge eine erheblich geringere Reichweitenverkürzung ein. Gleichwohl ergibt sich bei den gewählten Versuchsrandbedingungen auch bei einem auf 15 l verringerten Verpressvolumen eine deutliche Abnahme des Bindemittelgehaltes in den Randbereichen des Verpresskörpers, die sich nachteilig auf die Systemdurchlässigkeit einer Injektionssohle auswirkt.

Entscheidend für die hydraulische Abdichtungswirksamkeit einer Dichtungssohle ist neben einer anzustrebenden fehlerstellenfreien Ausführung die Durchlässigkeit der Injektionskörper. Wie die zuvor beschriebenen Verläufe der Glühverluste bzw. Bindemittelgehalte im Porensystem zeigen, ist jeweils eine größere Durchlässigkeit gegenüber Wasser in den Randbereichen der Injektionskörper zu erwarten. Mit der Erhöhung des Verpressvolumens um die angegebenen Mehrmengen lassen sich, sofern Injektionscracks unterbleiben und Bohrabweichungen sowie Inhomogenitäten des Untergrundes berücksichtigt werden, Fehlerstellen vermeiden. Das Einhalten der in der Praxis an die Dichtigkeit einer Injektionssohle gestellten Anforderungen ist damit jedoch nicht automatisch gesichert. An dieser Stelle wird daher auf die nachfolgend beschriebene Diskussion der erzielten Durchlässigkeiten der Injektionskörper und deren Auswirkungen verwiesen.

6.3.8 Abschätzung der erzielbaren Abdichtungswirkung durch Feinstbindemittelinjektionen

6.3.8.1 Allgemeines

Eine inhomogene Verteilung des Feinstbindemittels im Injektionskörper mit einer Anreicherung in der Nähe der Injektionsquelle sowie einem reduzierten Bindemittelgehalt in den Randbereichen des Injektionskörpers ist charakteristisch für die Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen. Dementsprechend variiert auch die erzielte Abdichtungswirkung in verschiedenen Bereichen des Verpresskörpers. Zur Abschätzung der erzielten Abdichtungswirkung wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte von Bohrkernen aus den abgebundenen Injektionskörpern mit Hilfe von dreiaxialen Durchlässigkeitsversuchen bestimmt. Die Gewinnung der Proben erfolgte nach einer Abbindezeit von ca. 14 Tagen.

In den bindemittelarmen und somit vergleichsweise weichen Randbereichen der Injektionskörper wurden die Bohrkernbeim Bohrvorgang nahezu vollständig aufgerieben, so dass aus diesen für die Systemdurchlässigkeit einer Injektionssohle besonders bedeutsamen

Zonen keine Proben für Durchlässigkeitsversuche gewonnen werden konnten. Zur Abschätzung der Abdichtungswirkung in den bindemittelarmen Zonen wurden daher ergänzend in eindimensionalen Injektionsversuchen hergestellte Proben verwendet. Bei diesen Proben wurde das Porenvolumen der Versuchssande durch Feinstbindemittelsuspensionen mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten aufgefüllt. Der Einfluss der filtrationsbedingten Bindemittelanreicherungen bzw. -reduktion in den Proben wurde über die Abschätzung des Bindemittelgehalts auf der Basis von Glühverlusten der untersuchten Proben berücksichtigt.

6.3.8.2 Durchlässigkeiten von Bohrkernen aus Trichterversuchen

Exemplarisch ist im Bild 6.26 die zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeitsbeiwerte von Bohrkernen des Injektionskörpers 5 dargestellt. Das Probenalter zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns betrug etwa 14 Tage. Erwartungsgemäß weisen die Proben mit zunehmender Entfernung von der Injektionsquelle höhere Durchlässigkeiten auf. Gleichzeitig ist besonders in den ersten 7 Tagen der Versuchslaufzeit ein abnehmender Durchlässigkeitsbeiwert zu beobachten, der auf den Abbau von Porenwasserdrücken sowie den fortschreitenden Hydratationsprozess zurückgeführt werden kann. Auch von MBONIMPA (1998) und MITTAG (2000) wird diese Tendenz einer Reduktion der Durchlässigkeit gegenüber Wasser mit fortschreitender Versuchslaufzeit festgestellt. Unter der Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Durchlässigkeiten der Verpresskörper ist darauf hinzuweisen, dass bei einer Durchströmung der Injektionskörper zu früheren Zeitpunkten deutlich höhere Durchlässigkeiten zu erwarten sind als die bei der Auswertung der Laborversuche ermittelten.

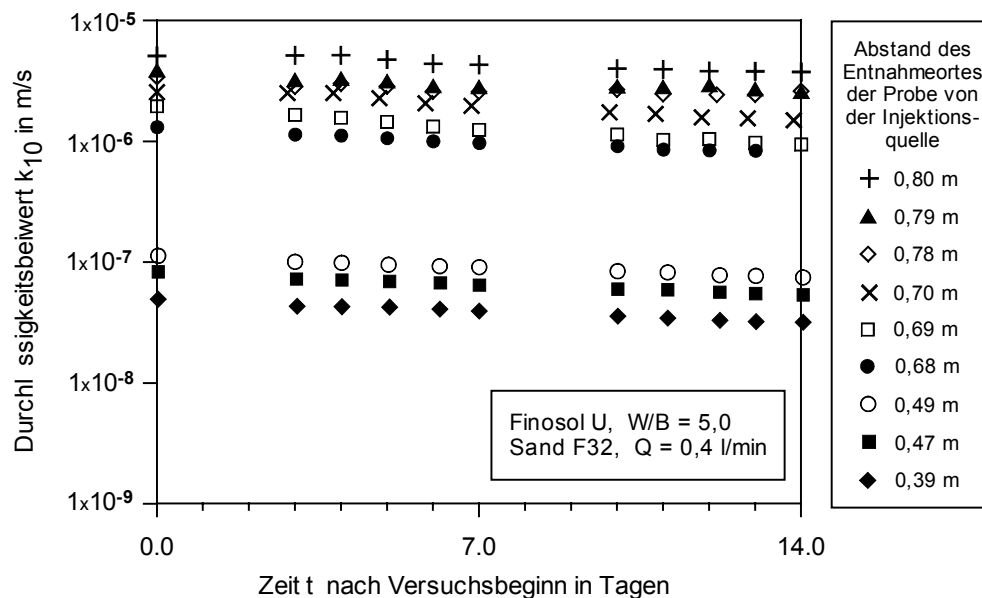


Bild 6.26: Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} in m/s von Bohrkernen aus dem Injektionskörper 5

6.3.8.3 Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Durchlässigkeit von Injektionsproben

Aufgrund des begrenzten Volumens der Verpresskörper aus Trichterversuchen war auch die Anzahl an Bohrkernen für die Bestimmung von Durchlässigkeiten begrenzt. Deshalb wurden an einer Vielzahl von entnommenen Proben Glühverluste bestimmt, aus denen auf die Verteilung des Bindemittels sowie auch der Durchlässigkeit innerhalb der Injektionskörper geschlossen werden kann. In Bild 6.27 sind die nach einer Versuchslaufzeit von 14 Tagen auf eine Vergleichstemperatur von 10°C bezogenen Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} in m/s den Glühverlusten der Proben gegenübergestellt. Hierfür wurden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte nach Sanden und Feinstbindemittelsorten zusammengefasst, da diese nahezu ausschließlich vom Bindemittelgehalt der Injektionsprobe bestimmt werden.

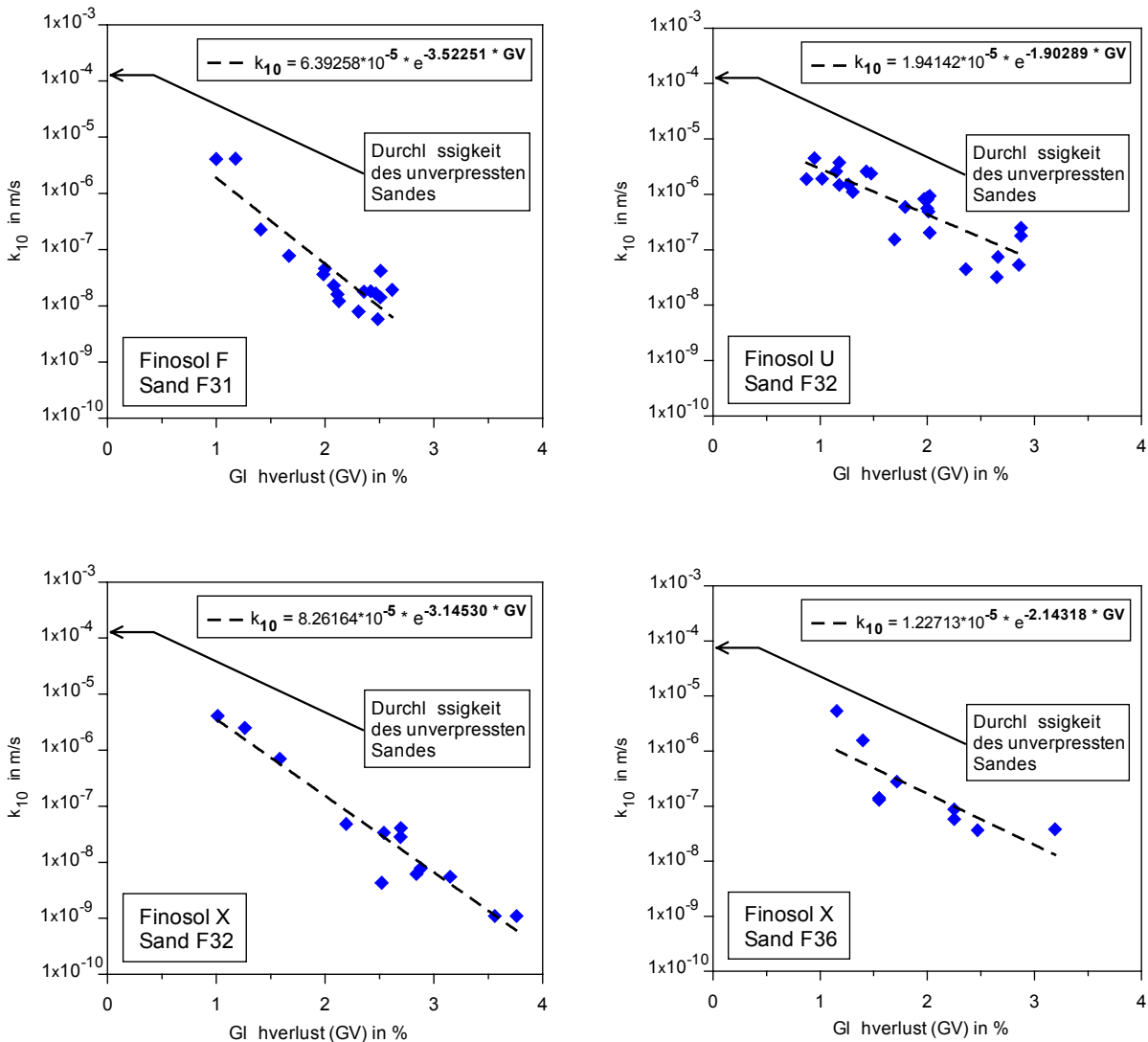


Bild 6.27: Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} in m/s verschiedener Injektionsproben in Abhängigkeit des Glühverlustes nach einem Probenalter von 28 Tagen

Zur Abschätzung der Durchlässigkeitsbeiwerte von Injektionsproben mit vergleichsweise geringen Bindemittelgehalten wurden ergänzend Ergebnisse von Untersuchungen an Proben aus eindimensionalen Injektionsversuchen hinzugefügt. Mittels linearer Regression wurde anschließend aus Ergebnissen der Einzelversuche auf das Verhältnis zwischen Glühverlusten und zu erwartenden Durchlässigkeitsbeiwerten geschlossen und jeweils in den Bildern angegeben. Unter Verwendung der so ermittelten Gleichungen war es nun möglich, die nachfolgend beschriebene Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte von Trichterversuchen auf der Basis von Glühverlusten abzuschätzen.

6.3.8.4 Rechnerische Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte über den Querschnitt der Injektionskörper

Aus den in Bild 6.27 angegebenen Beziehungen lassen sich rechnerische Verläufe der Durchlässigkeitsbeiwerte über den Querschnitt der verschiedenen Verpresskörper abschätzen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Vorgehensweise die Durchlässigkeit gegenüber Wasser von Verpresskörpern nach insgesamt 28 Tagen Abbindezeit und einer Lagerung der Probenkörper bei einer Temperatur von ca. 18°C widerspiegelt. In der Praxis muss jedoch aufgrund kühlerer Grundwassertemperaturen und der daraus folgenden Verlangsamung des Hydratationsprozesses sowie bei einer Durchströmung der Injektionssohle zu einem früheren Zeitpunkt evtl. mit höheren Durchlässigkeiten als den nachfolgend angegebenen gerechnet werden. Aufgrund des festgestellten linearen Zusammenhangs zwischen Glühverlusten bzw. Bindemittelgehalten und Durchlässigkeitsbeiwerten ergeben sich zu den Glühverlusten und Bindemittelgehalten affine Verläufe der Durchlässigkeitsbeiwerte für die verschiedenen Injektionskörper. Beim Vergleich der in den Bildern 6.28 bis 6.31 dargestellten Verläufe der Durchlässigkeitsbeiwerte der einzelnen Injektionskörper sind jedoch auch an dieser Stelle die unterschiedlichen verpressten Suspensionsmengen zu berücksichtigen. Aufgrund der stark differierenden Bindemittelgehalte im Randbereich des Trichterversuchs Nr. 10 errechnen sich hier auch abweichende Durchlässigkeitsbeiwerte in gleicher Entfernung zur Injektionsquelle. Exemplarisch sind hier die für einen Bereich mit hohem und einen mit vergleichsweise niedrigem Bindemittelgehalt errechneten Durchlässigkeitsbeiwerte dargestellt.

Vom Hersteller der verwendeten Feinstbindemittel wird nach 28 Tagen Probenalter eine Reduktion der Durchlässigkeitsbeiwerte um ca. 3 Zehnerpotenzen angegeben (DYCKERHOFF 2002a). Der Bindemittelgehalt der hierbei verpressten Injektionssuspension wird jedoch nicht genannt. Bezogen auf die in Bild 6.27 angegebenen Durchlässigkeitsbeiwerte der unverpressten Sande wären somit Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} zwischen $1,3 \times 10^{-7}$ m/s und $7,4 \times 10^{-8}$ m/s zu erwarten. Während im Kern der Injektionskörper durch die Abfilterung des Feinstbindemittels diese Durchlässigkeitsbeiwerte in jedem Fall erreicht bzw. unterschritten werden, ist in den Randbereichen der Injektionskörper teilweise nur eine Reduktion der Durchlässigkeit des unverpressten Sandes um weniger als eine Zehnerpotenz festzustellen.

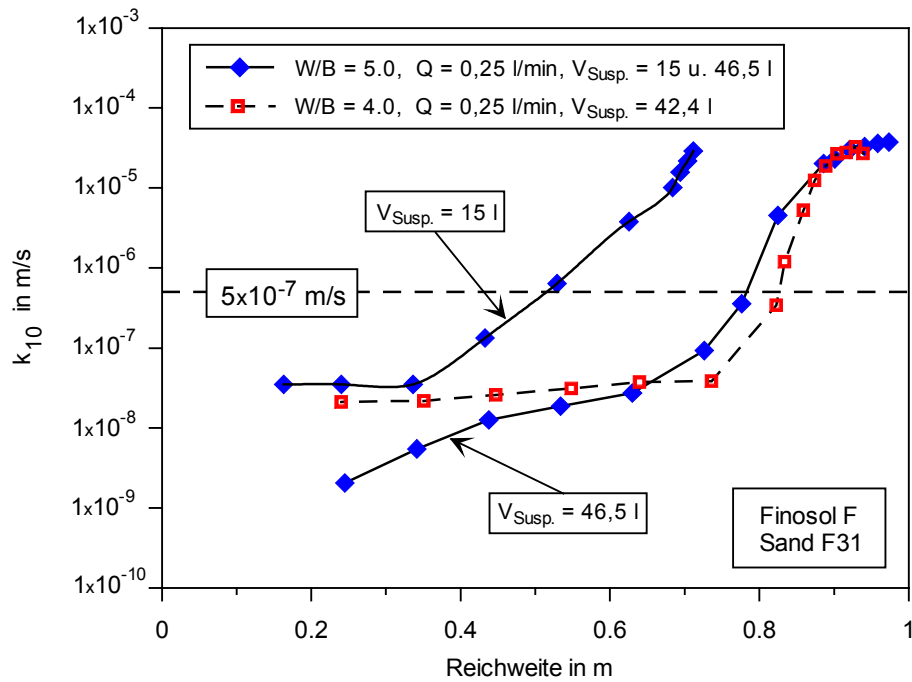


Bild 6.28: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} über den Querschnitt von Injektionskörpern aus Trichterversuchen mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31

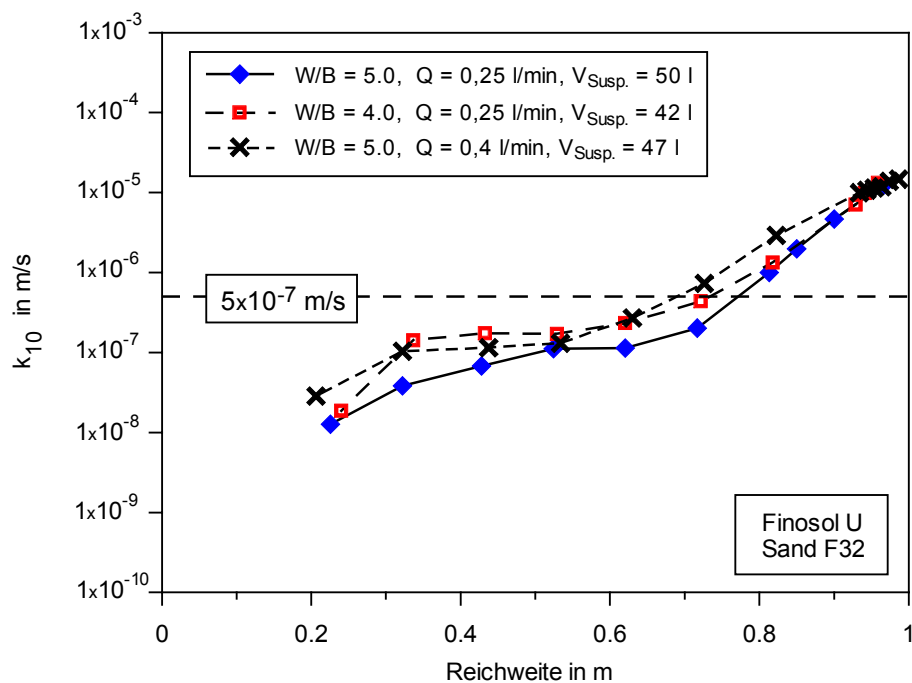


Bild 6.29: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} über den Querschnitt von Injektionskörpern aus Trichterversuchen mit dem Feinstbindemittel Finosol U und dem Sand F 32

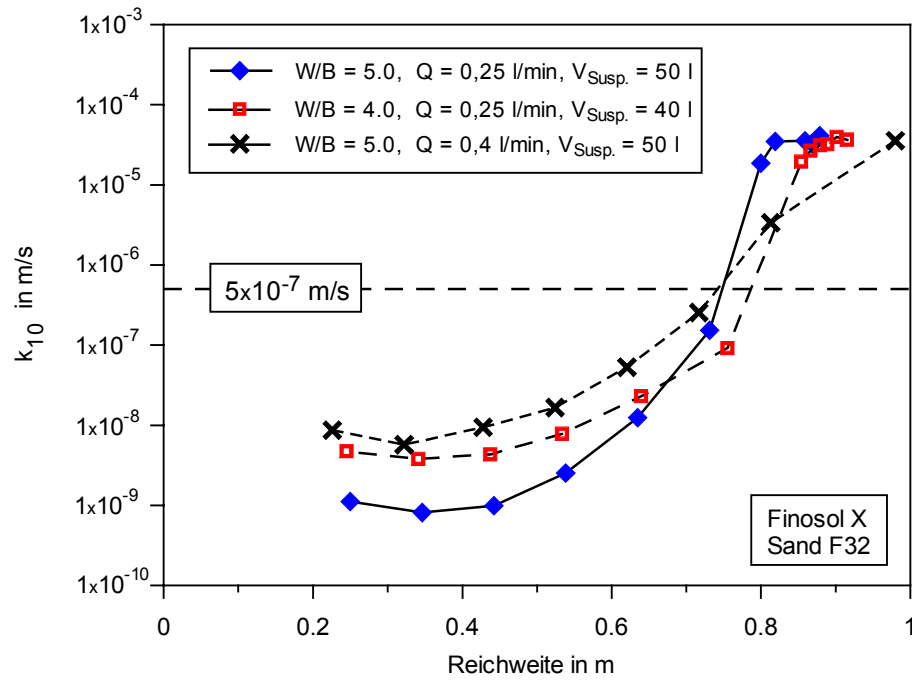


Bild 6.30: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} über den Querschnitt von Injektionskörpern aus Trichterversuchen mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 32

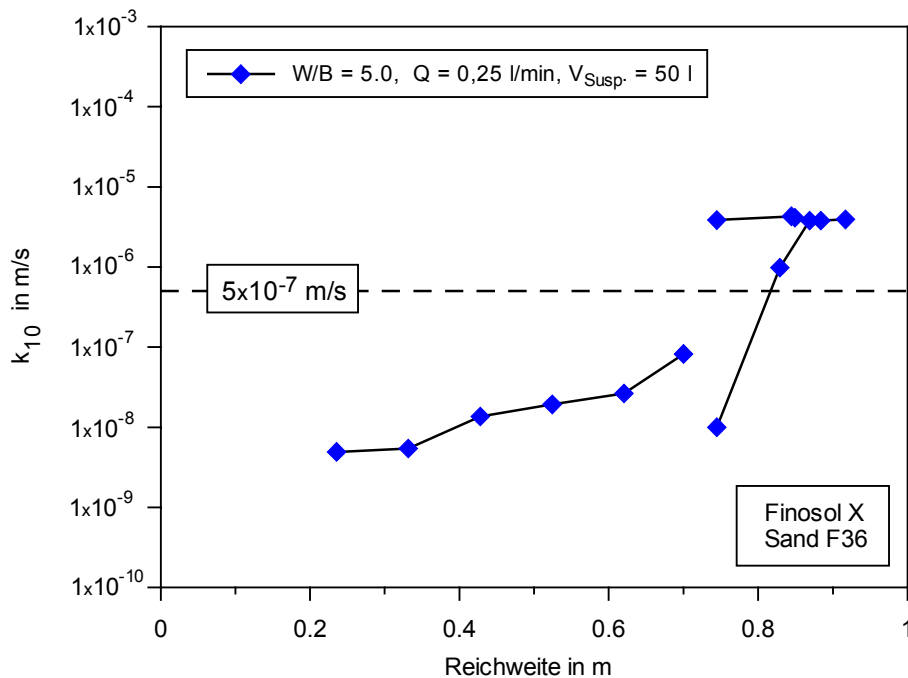


Bild 6.31: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} über den Querschnitt von Injektionskörpern aus Trichterversuchen mit dem Feinstbindemittel Finosol X und dem Sand F 36

6.3.8.5 Bewertung und Diskussion der erzielten Durchlässigkeiten von Injektionskörpern

Der rechnerische Zufluss in einen Dichtungstrog über eine homogene Baugrubensohle ohne Fehlstellen kann aus der Kenntnis des Durchlässigkeitsbeiwertes und der Dicke der Dichtungssohle sowie der Spiegeldifferenz außer- und innerhalb der Baugrube abgeschätzt werden. Nach KUTZNER (1991) gelingt es in der Regel, die Durchlässigkeit einer Injektionssohle auf $k_f = 5 \times 10^{-7}$ m/s oder weniger herabzusetzen. Als realistische zulässige Sickerwassermenge werden bei Wasserspiegeldifferenzen zwischen 5 und 10 m etwa 5 bis 10 l/s je 1000 m² Abdichtungsfläche genannt, was ungefähr einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 5 \times 10^{-7}$ m/s einer 1,5 m dicken Sohle mit etwa 1 % Fehlstellen entspricht.

Zur Vermeidung einer relevanten Beeinflussung des Grundwasserspiegels außerhalb der Baugrube mit möglichen nachteiligen Folgen für die Vegetation und Nachbarbebauung, wird derzeit in Berlin aber auch anderenorts die anfallende Restwassermenge auf 1,5 l/s bzw. 5,4 m³/h je 1000 m² benetzter Baugrubenwand und -sohlfläche begrenzt. Von BORCHERT (1999) werden die bei einer Vielzahl von Baumaßnahmen in Berlin gemessenen Restwassermengen in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens der Dichtungssohle angegeben. Die derzeit geforderten Restwassermengen wurden jedoch nur mit tiefliegenden Injektionssohlen mit Weichgelen zuverlässig erreicht. Bei allen anderen betrachteten Bauweisen zur Herstellung von Dichtungssohlen, wie Düsenstrahlsohlen oder auch Injektionssohlen mit Feinstbindemitteln, wurden hingegen i. d. R. deutlich höhere Restwassermengen gemessen.

In Bild 6.32 sind Sickerwassermengen je 1000 m² Sohlenfläche für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte und Wasserspiegeldifferenzen bei einer Dicke der Injektionssohle von 1,5 m angegeben. Dies entspricht in etwa der aus den experimentell erzielten Reichweiten errechneten mittleren Dicke \bar{d} einer Injektionssohle, die näherungsweise nach SCHULZE (1992) mit

$$\bar{d} = \frac{8}{27} \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot r$$

abgeschätzt werden kann. Es zeigt sich, dass bei Wasserspiegeldifferenzen von bis zu 10 m die u.a. in Berlin für einen Dichtungstrog geforderten, vergleichsweise geringen Restwassermengen von 5,4 m³/h je 1000 m² benetzter Baugrubenfläche, auch von einer 1,5 m mächtigen Dichtungssohle mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von maximal 2×10^{-7} m/s eingehalten werden. Dies gilt jedoch nur sofern die Dichtungssohle keinerlei Fehlstellen oder Zonen höherer Durchlässigkeit aufweist.

Wie die in den Bildern 6.28 bis 6.31 dargestellten Verläufe der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen, genügen die im Kern der Injektionskörper erzielten Durchlässigkeiten i.d.R. den gestellten Anforderungen. In den äußersten Randbereichen der Injektionskörper wurden hingegen Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} zwischen 3×10^{-5} m/s und 4×10^{-6} m/s bestimmt.

Durch diese „Kugelschalen“ mit vergleichsweise großer Durchlässigkeit kommt es zu einer Umströmung der geringer durchlässigen Kerne der Injektionskörper. Die Gesamtdurchlässigkeit einer Feinstbindemittelsohle wird somit in besonderem Maße von der Ausdehnung und der Durchlässigkeit der Randzonen bestimmt. In Bild 6.33 sind daher die Injektionsreichweite sowie die bezogenen Verpresskörpervolumen der Trichterversuche, aufgeteilt in Bereiche mit einem Durchlässigkeitsbeiwert über oder unter 5×10^{-7} m/s, wiedergegeben. Aufgrund des exponentiell mit zunehmender Reichweite anwachsenden Verpresskörpervolumens nehmen die Bereiche der Verpresskörper mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von mehr als 5×10^{-7} m/s einen Anteil zwischen 38,4 und 66,9 % des Gesamtvolumens der Verpresskörper bzw. des Volumens der Injektionssohle ein. Hieraus ist ersichtlich, dass bei großen Wasserspiegeldifferenzen die in Berlin an die Dichtigkeit von Baugruben gestellten Anforderungen möglicherweise auch bei fehlstellenfreier Ausführung der Sohle nicht eingehalten werden können, sofern die bindemittelarmen Randzonen nicht von benachbarten Injektionspunkten aus weiter abgedichtet werden.

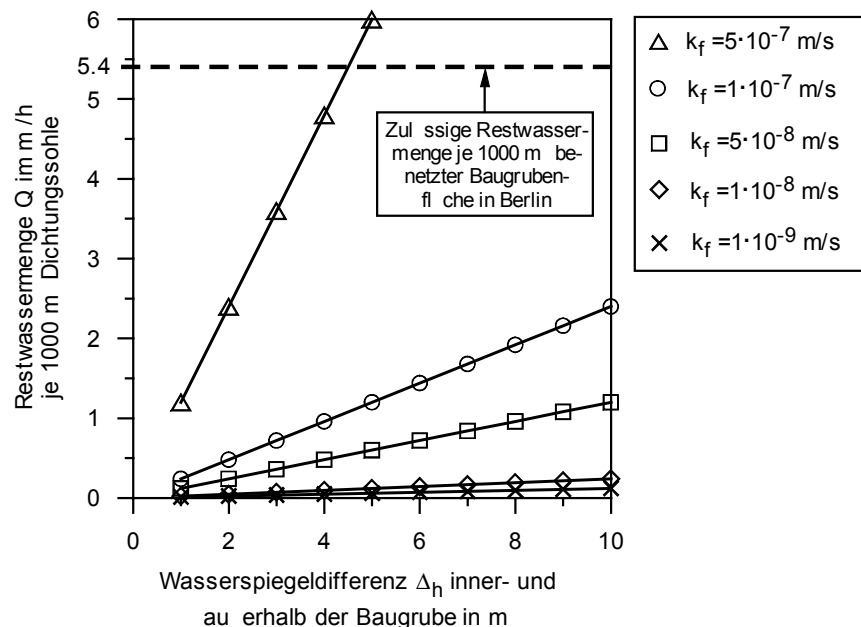
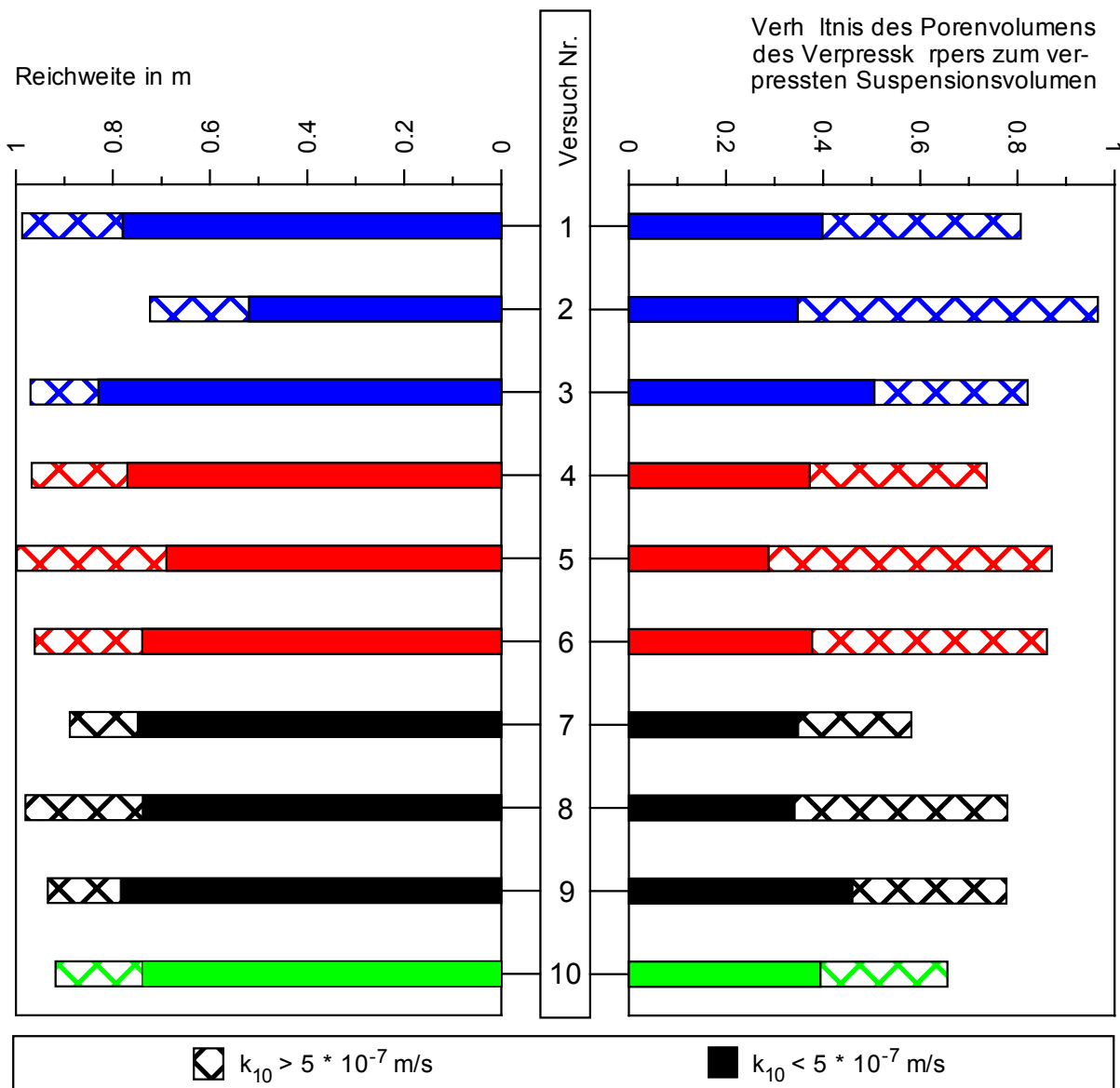


Bild 6.32: Sickerwassermengen Q in m^3/h je 1000 m^2 Dichtungssohle mit einer Dicke von $1,5 \text{ m}$ für verschiedene Wasserspiegeldifferenzen inner- und außerhalb der Baugrube und verschiedenen Durchlässigkeiten der Sohle

Eine Erhöhung der Verpressrate auf $0,4 \text{ l/min}$, was einer rechnerischen auf eine Vollkugel bezogenen Verpressrate von $15,5 \text{ l/min}$ entspricht, kann neben einer Erhöhung des bezogenen Verpresskörpervolumens bei den erzielten Injektionsreichweiten auch zu einer Ausdehnung der bindemittelarmen Randzonen führen. Durch die infolge höherer Fließgeschwindigkeiten erhöhten Schleppkräfte wird zunächst weniger Feinstbindemittel im Kern eines Injektionskörpers abgetrennt und damit das bezogene Verpresskörpervolumen erhöht. In den Randbereichen des Injektionskörpers bewirken die höheren Schleppkräfte jedoch, dass eine



Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Feinstbindemittel	Finosol F			Finosol U			Finosol X			Finosol X
W / B	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0	4,0	5,0
Sand	F 31			F 32			F 32			F 36
Verpressrate in l/min	0,25	0,4	0,25	0,25	0,4	0,25	0,25	0,4	0,25	0,25
Reichweite in m	0,99	0,72	0,97	0,97	1,00	0,96	0,89	0,98	0,93	0,87 - 0,97
Anteil der Bereiche mit $k_{10} > 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ in % des Injektionskörpervolumens	50,6	64,0	38,4	49,5	66,9	56,2	40,0	56,1	40,6	39,8

Bild 6.33: Anteil der Bereiche mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von über $5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ an der Injektionsreichweite und dem Volumen der Verpresskörper

Feinstbindemittelsuspension, deren Bindemittelgehalt bereits soweit reduziert wurde, dass die geforderte Dichtigkeit nicht mehr erreicht werden kann, langsamer ausgedünnt wird und somit bindemittelarme Randzonen ausgedehnt werden.

Wie aus den in Bild 6.33 dargestellten Versuchsergebnissen hervorgeht, kann eine Variation der Verpressraten oder des Bindemittelgehaltes der Injektionssuspension zu einer Veränderung des bezogenen Verpresskörpervolumens, einer Veränderung des Anteils der bindemittelarmen Randzonen am Verpresskörpervolumen oder Varianten aus beidem führen. Für den Erfolg einer Abdichtungsinjektion ist es neben der Vermeidung von Fehlstellen auch erforderlich, in den Randbereichen der Injektionskörper den jeweils gestellten Anforderungen gerecht zu werden. Ist nun wie im Fall des Trichterversuchs 2 aus dem Verhältnis des Porenvolumens des Verpresskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen nahezu keine Reichweitenreduktion festzustellen, muss sich eine optimierte Verpressrate oder Bindemittelkonzentration auf die Festigkeit und Dichtigkeit der Randbereiche des Injektionskörpers auswirken. Die Eigenschaften der Injektionskörper lassen sich in diesem Fall über die Festlegung der Verpressrate und der Bindemittelkonzentration gezielt steuern.

Die mit verschiedenen W/B-Werten der Injektionssuspension durchgeführten Trichterversuche zeigen hingegen ein uneinheitliches Bild, da die Versuchsergebnisse durch zufällige nicht steuerbare Verstopfungs- und Aufsprengvorgänge insbesondere an der Injektionsquelle beeinflusst werden, die sich auf die Reichweite der Injektion und die Mächtigkeit der bindemittelarmen Randzonen auswirken. Während im Kern der Injektionskörper die filtrationsbedingte Verringerung des Bindemittelgehaltes der Suspension durch einen vielfachen Austausch des Porenvolumens und der damit verbundenen fortlaufenden Abfiltration von Feinstbindemittel mehr als ausgeglichen wird, gelangt in die Randbereiche der Verpresskörper stets eine Suspension mit einem verringerten Bindemittelgehalt.

Im MERBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITELEN IN LOCKERGE-STEIN (2002) werden für die Herstellung von Injektionssohlen übliche W/B-Werte der Feinstbindemittelsuspensionen zwischen 3 und 6 genannt. Die untersuchten W/B-Werte von 4,0 und 5,0 entsprechen also den mittleren, nach derzeitigem Kenntnisstand üblicherweise verwendeten Bindemittelgehalten von Feinstbindemittelsuspensionen für die Herstellung von Injektionssohlen. Ohne das Auftreten filtrationsbedingter Feststoffverlagerungen ist davon auszugehen, dass mit diesen Bindemittelgehalten die in der Praxis gestellten Anforderungen an die Dichtigkeit einer Injektionssohle i.d.R. erreicht werden. Es ist daher insbesondere bei geforderter hoher Dichtigkeit der Injektionssohle notwendig, die Injektionsparameter Verpressrate, Bohrlochabstand, Verpressmenge und Bindemittelgehalt der Feinstbindemittelsuspension so abzustimmen, dass auch die Dichtigkeit der Randbereiche der Injektionskörper ausreicht, um die jeweils geforderte Restwassermenge für einen Dichtungstrog einzuhalten. Im Kern der Injektionskörper sind aufgrund der Feststoffabfiltration stets ausreichend geringe Durchlässigkeiten gegenüber Wasser zu erwarten. Für den Einsatz von Feinstbindemitteln zu Abdichtungszwecken in der Praxis erscheint es daher empfehlenswert, benachbarte Injektionspunkte mit möglichst geringen zeitlichen Abständen anzufahren. Wie kleinmaßstäb-

liche dreidimensionale Injektionsversuche von TAUSCH und ECKER (2002) zeigen, ergibt sich bei einer solchen Injektion „frisch-in-frisch“ ein guter Verbund zwischen den einzelnen Injektionskörpern. Erfolgt hingegen die Injektion der benachbarten Verpresspunkte mit einer zeitlichen Verzögerung, so ist ein gegenseitiges Durchdringung der Injektionskörper mit einer zu erwartenden Verbesserung der Abdichtungswirkung der Randbereiche erschwert.

6.4 Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche

6.4.1 Allgemeines

Zum Nachweis der Injizierfähigkeit einer Feinstbindemittelsuspension in ein Korngerüst werden üblicherweise so genannte eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, wie sie in Kapitel 5.2 beschrieben sind. Hierbei wird eine Sandsäule von einer Feinstbindemittelsuspension mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit durchströmt. Gelingt je nach Länge der Probesäule der ein- oder mehrfache Austausch des Porenvolumens, ohne dass dabei ein Einpressdruck von 0,6 MPa überschritten wird, so gilt nach MERKBLATT (2002) der Prüfbo-den für die untersuchte Feinstbindemittelsuspension als injizierbar. Wird ein Mehrfaches des Porenvolumens ausgetauscht, so kann die aus der Probesäule austretende Suspension aufgefangen und ihre Dichte bestimmt werden. Durch den Vergleich der Suspensionsdichten vor dem Einpressen in den Sandkörper und zu verschiedenen Zeitpunkten beim Austritt, können Anhaltspunkte für die bei der Injektion einer Feinstbindemittelsuspension in ein Korngerüst zu erwartende Intensität der Filtration gewonnen werden.

Im Rahmen eines experimentellen Programms wurden verschiedene eindimensionale Injektionsversuche mit einem Durchmesser von 10 cm sowie einer Länge der Probesäule von 97,5 cm durchgeführt. Ziel der Versuche war nicht der Nachweis der Injizierfähigkeit, für den bei der gewählten Probenlänge ein einfacher Austausch des Porensystems genügt hätte. Vielmehr sollte durch den angestrebten Austausch des dreifachen Porenvolumens auf die Intensität der Filtration unter verschiedenen Randbedingungen rückgeschlossen werden können. Um dieses zu ermöglichen, wurde die genannte Probenlänge gewählt, bei der eine deutliche, gut messbare Reduktion der Suspensionsdichte beim Durchströmen des Porensystems zu erwarten war. Um den Vergleich der Ergebnisse der eindimensionalen Injektionsversuche mit den Ergebnissen der Trichterversuche zu ermöglichen, wurden die Versuchssande jeweils mit einer Lagerungsdichte D von 0,9 in die Injektionszylinder eingebaut. Dies entspricht in etwa der in den Trichterversuchen erzielten Lagerungsdichte.

Das Maß des Abscheidens von Feinstbindemittelpartikeln beim Durchströmen des Porensystems wird, wie die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Trichterversuche zeigen, entscheidend von der Fließgeschwindigkeit, mit der sich die Feinstbindemittelsuspension im Porensystem bewegt, beeinflusst. Bei einer Verringerung der Verpressrate und der daraus folgenden reduzierten Fließgeschwindigkeit der Feinstbindemittelsuspension wird ein größerer Anteil des Feinstbindemittels zurückgehalten. Während bei dreidimensionaler, kugelförmiger

Suspensionsausbreitung die Filtergeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der Injektionsquelle abnimmt, stellt sich bei eindimensionalen Injektionsversuchen mit konstanter Einpressrate überall die gleiche Filtergeschwindigkeit ein. Wie die in Bild 6.34 dargestellten Filtergeschwindigkeiten bei kugelförmiger Suspensionsausbreitung und verschiedenen eindimensionalen Injektionsversuchen zeigen, können mit den üblicherweise bei eindimensionalen Injektionsversuchen verwendeten Verpressraten nur Filtergeschwindigkeiten erzielt werden, die denen einer Reichweite von 16 bzw. 22 cm bei kugelsymmetrischer Ausbreitung entsprechen. Geringere Verpressraten sind mit den bei der Durchführung eindimensionaler Injektionsversuche i.d.R. verwendeten Pumpen und Probezylinderdurchmessern nicht zu realisieren.

In einer zweiten Reihe eindimensionaler Injektionsversuche wurden neben der Suspensionsdichte zu verschiedenen Zeitpunkten auch die Partikelgrößenverteilungen der aus den Prüfkörpern austretenden Feinstbindemittelsuspensionen bestimmt. Durch den Vergleich mit der Partikelgrößenverteilung der Feinstbindemittelsuspension vor dem Einpressen in das Korngerüst war es möglich, Aussagen zu treffen, ob alle Partikelfractionen zu ähnlichen Anteilen oder eher bestimmte Partikelfractionen beim Durchströmen des Porensystems abgefiltert werden.

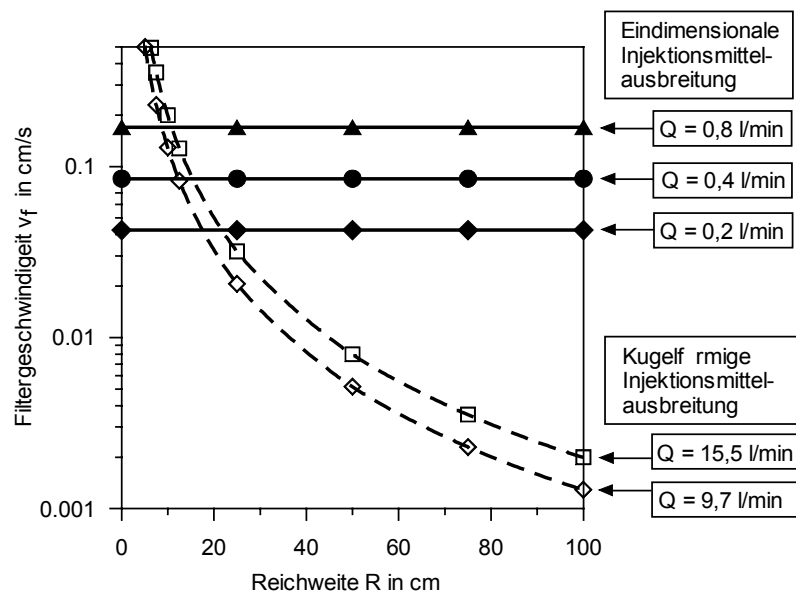


Bild 6.34: Filtergeschwindigkeiten eindimensionaler Injektionsversuche mit verschiedenen Verpressraten und bei kugelförmiger Injektionsmittelausbreitung

6.4.2 Reduktion des Feststoffgehaltes von Feinstbindemittelsuspensionen bei eindimensionalen Injektionsvorgängen

Um Hinweise auf die zu erwartende Filtrationsintensität bei dreidimensionaler Suspensionsausbreitung zu gewinnen, wurden verschiedene eindimensionale Injektionsversuche mit Verpressraten von 0,2 bis 0,8 l/min und verschiedenen Feinstbindemittelsorten, Sanden und

Bindemittelgehalten der Injektionssuspension durchgeführt. Deren Randbedingungen sind im Einzelnen in Tabelle 6.11 angegeben.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Sand	Lagerungsdichte D	Verpressrate in l/min
1	Finosol F	4,0	F 31	0,9	0,2
2					0,4
3					0,8
4		5,0			0,2
5					0,4
6					0,8
7	Finosol U	4,0	F 32	0,9	0,2
8					0,4
9					0,8
10		5,0			0,2
10 A					0,2
11					0,4
12	0,8				
13	Finosol X	5,0	F 32	0,9	0,2
14					0,4
15					0,8

Tab. 6.11: Randbedingungen eindimensionaler Injektionsversuche

Während der Durchführung der eindimensionalen Injektionsversuche wurde der Injektionsdruck an der Quelle sowie an sieben weiteren über die Höhe der Probesäule verteilten Messstellen fortlaufend aufgezeichnet. Beispielhaft sind in Bild 6.35 die Druckverläufe eines eindimensionalen Injektionsversuchs mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 in Abhängigkeit des auf das Porenvolumen der Sandsäule bezogenen verpressten Suspensionsvolumens gezeigt. Um die mit verschiedenen Verpressraten und somit unterschiedlicher Verpressdauer durchgeführten Versuche gegenüberstellen zu können, wurden die Druckverläufe in Abhängigkeit des auf das Porenvolumen der Prüfsäule (V_P) bezogenen verpressten Suspensionsvolumens (V_i) dargestellt. Bis zum Zeitpunkt des einfachen Austauschs des Porenvolumens steigt der Injektionsdruck an der Injektionsquelle nahezu linear an. Erreicht die Injektionssuspension die entfernteren Druckmessgeber, so steigt an diesen der Druck ebenfalls zunächst nahezu linear an. Auch nach dem Austausch des einfachen Porenvolumens steigt der Druck insbesondere in der Nähe der Injektionsquelle weiter kontinuierlich, wenn auch mit einer geringeren Steigerungsrate, an, was auf die weiterhin fortlaufende

Verengung der Porenquerschnitte durch das Abfiltern des Feinstbindemittels hindeutet. Bei einigen Injektionsversuchen mit hoher Intensität der Filtration kam es zu einem, im Verhältnis zu den übrigen Messstellen, überproportionalen Anstieg des Drucks an der Injektionsquelle, der zu einem vorzeitigen Abbruch der Injektionsversuche führte. Da ein solcher Druckanstieg nur im Bereich der Eintrittsfläche der Feinstbindemittelsuspension in den Sandkörper beobachtet wurde, reicht somit zur Beurteilung der Injizierfähigkeit und der Intensität der Filtration das Erfassen des Verpressdrucks an der Injektionsquelle aus. Für die Darstellung der Auswirkungen verschiedener Verpressraten auf den Verlauf der Injektionsdrücke werden daher im Folgenden jeweils nur die an der Injektionsquelle gemessenen Druckverläufe dargestellt.

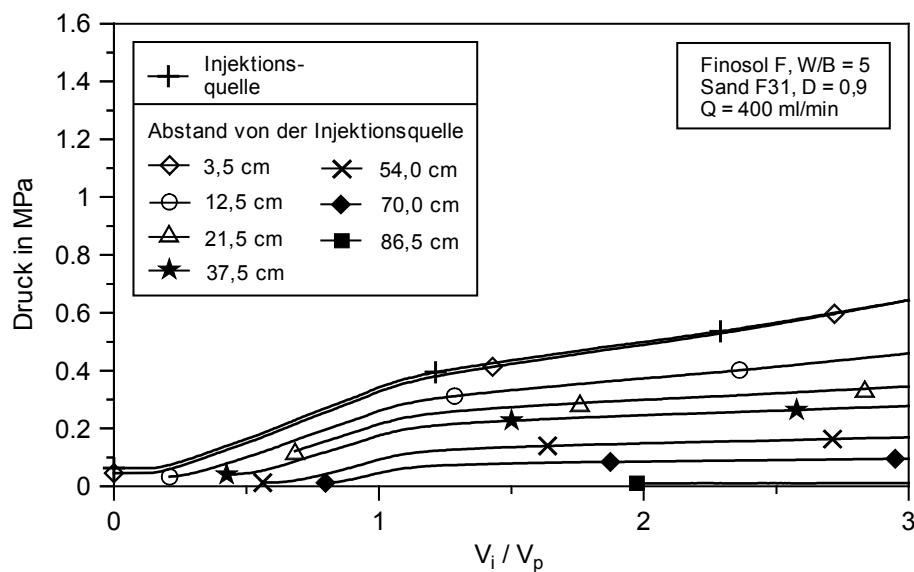


Bild 6.35: Druckverläufe eines eindimensionalen Injektionsversuchs an der sowie in verschiedenen Abstände zur Injektionsquelle in Abhängigkeit des auf das Porenvolumen der Prüfsäule bezogenen verpressten Suspensionsvolumens

Wird die Verpressrate erhöht, so stellen sich erwartungsgemäß höhere Einpressdrücke ein, wie Bild 6.36 zeigt. Ansonsten verlaufen die Einpressdrücke bei der Injektion des Feinstbindemittels Finosol F mit einem W/B-Wert von 5,0 in den Sand F 31 nach dem Austausch des einfachen Porenvolumens nahezu parallel. Für andere untersuchte Kombinationen von Feinstbindemitteln und Sanden wurden hingegen in Abhängigkeit der Verpressrate teilweise stark unterschiedliche Druckverläufe gemessen, wie in Bild 6.38 zu erkennen ist.

Aus der Dichte der zu verschiedenen Zeitpunkten aus einem Prüfkörper austretenden Suspension kann der Anteil des im Porensystem abgefilterten Bindemittels bestimmt werden. Die in Bild 6.37 dargestellten Dichten der austretenden Suspension bei Versuchen, die mit dem Feinstbindemittel Finosol F und einem W/B-Wert von 5,0 durchgeführt wurden, steigen zunächst steil an und nähern sich anschließend asymptotisch einem Grenzwert, der auch nach dreimaligem Austausch des Porenvolumens noch deutlich unter der Dichte der Aus-

gangssuspension liegt. Vergleichbare Versuchsergebnisse werden auch von MBONIMPA (1998) sowie TAUSCH und ECKER (2002) beschrieben. Die anfänglich sehr geringen Dichten der austretenden Suspension sind auf Vermischungsvorgänge beim Durchströmen des Porensystems mit dem dort zuvor vorhandenen Porenwasser zurückzuführen. Da ähnliche Verläufe bei allen durchgeführten eindimensionalen Injektionsversuchen, deren Ergebnisse im Anhang zusammengestellt sind, festgestellt wurden, ist davon auszugehen, dass nach einer Anfangsphase mit einer starken Ausdünnung der Injektionssuspension ein nahezu konstanter Anteil des Feinstbindemittels beim Durchströmen des Porenvolumens der Probesäule zurückgehalten wird. Dies gilt jedoch nur, solange die Filtration keinen progressiven Verlauf nimmt, bei der durch das fortlaufende Abfiltern von Bindemittelpartikeln die Porenquerschnitte soweit verengt sind, dass ein stetig zunehmender Anteil des verpressten Bindemittels diese nicht mehr passieren kann und abgefiltert wird.

Die Differenz zwischen der Dichte der aus der Prüfsäule austretenden Suspension und der Dichte der Ausgangssuspension fällt mit höherer Verpressrate geringer aus. Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Trichterversuche werden somit durch die eindimensionalen Injektionsversuche bestätigt.

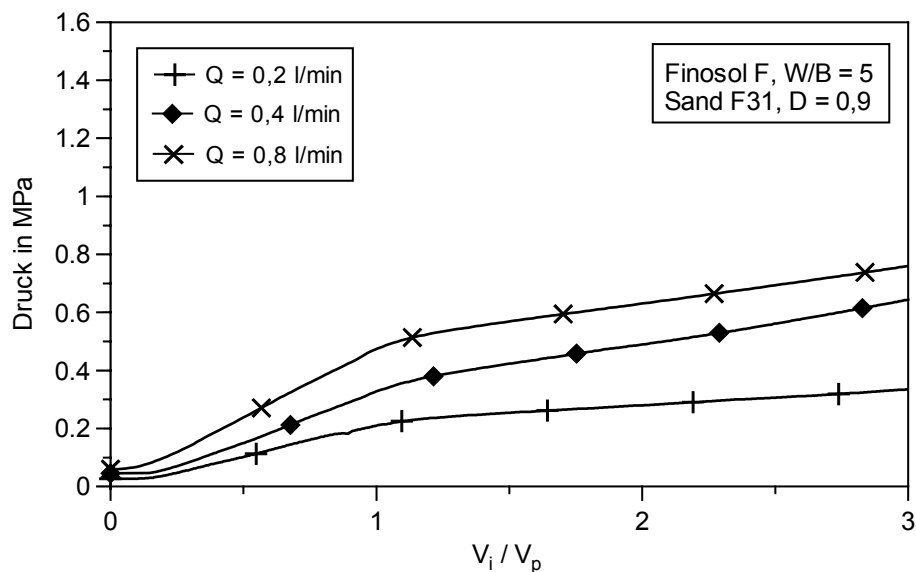


Bild 6.36: Druckverläufe an der Injektionsquelle eindimensionaler Injektionsversuche mit unterschiedlichen Verpressraten und dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31

Die in den Bildern 6.36 und 6.38 zusammengestellten Einpressdrücke der durchgeführten eindimensionalen Injektionsversuche zeigen zwei unterschiedliche Verläufe. Bei der Injektion des Feinstbindemittels Finosol F mit W/B-Werten von 4,0 und 5,0 in den Sand F 31 sowie des Feinstbindemittels Finosol U mit einem W/B-Wert von 5,0 in den Sand F 32 steigt der Injektionsdruck nach dem Austausch des einfachen Porenvolumens bis zum Ende des

Versuchs nahezu konstant an. Wird dagegen das Feinstbindemittel Finosol U mit einem W/B-Wert von 4,0 oder das nochmals feinere Feinstbindemittel Finosol X mit einem W/B-Wert von 5,0 in den Sand F 32 eingepresst, so stellt sich jeweils ein überproportionaler Anstieg des Injektionsdrucks ein, der zum vorzeitigen Abbruch der Versuche führte.

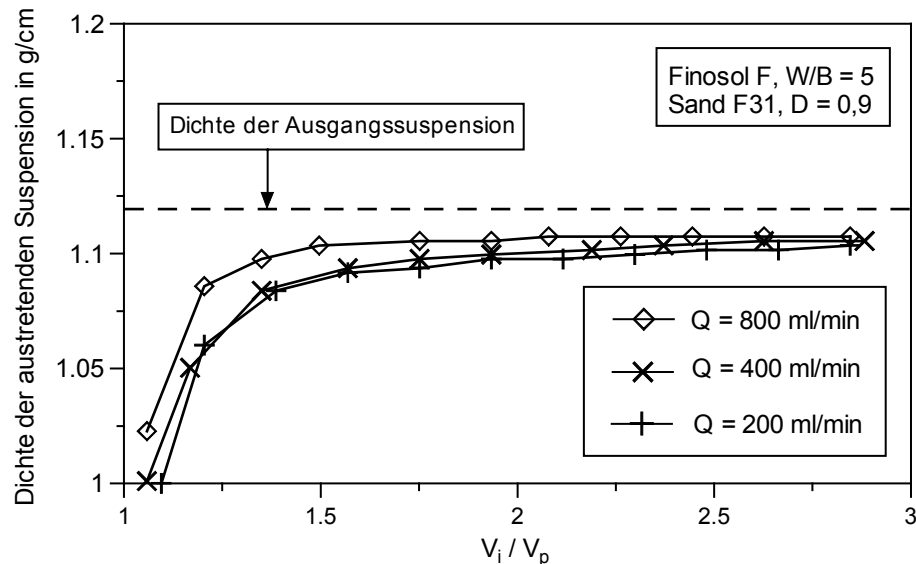


Bild 6.37: Dichte der aus der Prüfsäule austretenden Suspension im Vergleich zur Dichte der Ausgangssuspension

Während sich bei nahezu allen Versuchen stets bei höheren Verpressraten auch höhere Einpressdrücke einstellen, kommt es bei der Injektion des Feinstbindemittels Finosol U mit einem W/B-Wert von 4,0 und einer Verpressrate von 0,2 l/min zu einer stärkeren Bindemittelablagerung und dem damit verbundenen überproportionalen Druckanstieg als bei dem mit einer Verpressrate von 0,4 l/min durchgeführten Versuch. Auch ein Vergleichsversuch ergab einen nahezu identischen Druckverlauf. Wie die in Bild 6.37 dargestellten Dichteverläufe der austretenden Suspension zeigen, wird jeweils bei geringeren Verpressraten ein höherer Anteil an Feinstbindemittel abgefiltert. Bei einer Verpressrate von 0,2 l/min und einem W/B-Wert von 4,0 ist somit anscheinend die abgefilterte Feinstbindemittelmenge so groß, dass umgehend ein Übergang in eine progressive Filtrationsphase stattfindet, während bei einer Verpressrate von 0,4 l/min zunächst ein geringerer Anteil des Feinstbindemittels abgelagert wird und die Verengung der Porenräume vergleichsweise langsamer abläuft.

Anhand der Ergebnisse der Trichterversuche konnte gezeigt werden, dass die Filtrationsintensität zum einen von den Eigenschaften des Korngerüsts zum anderen aber auch von den spezifischen Eigenschaften der verpressten Feinstbindemittelsorte abhängt. Insbesondere Feinstbindemittel mit einer höheren Mahlfineinheit neigen zu einer verstärkten Abfilterung des Feinstbindemittels, obwohl die nach theoretischen Injektionskriterien abgeschätzte Injizier-

fähigkeit gegenteiliges vermuten lässt. Während bei verschiedenen großmaßstäblichen Trichterversuchen trotz der dichten Lagerung des Versuchssandes Injektionscracks beobachtet wurden, kommt es bei den eindimensionalen Injektionsversuchen weder lokal im Bereich der Eintrittsfläche noch großräumig zu einem Aufsprengen des Porensystems. Dies ist auch deshalb bemerkenswert, da bei den eindimensionalen Versuchen im Vergleich zu den Trichterversuchen erheblich höhere Drücke gemessen wurden. Das zum Aufsprengen des Sandkörpers erforderliche Verdrängen und Verdichten des Korngerüsts wird bei den eindimensionalen Injektionsversuchen anscheinend durch die hohe Lagerungsdichte, die geringe Querschnittsfläche des Versuchszylinders und der daraus resultierenden Verspannung des Sandkörpers in den nahezu dehnstarrten Injektionszylindern maßgeblich behindert. Hierdurch steigt mit zunehmender Feststoffabfilterung der Injektionsdruck kontinuierlich weiter an und der Injektionsversuch muss abgebrochen werden. Bei einem Einbau des Versuchssandes mit geringerer Lagerungsdichte ist ein Aufsprengen hingegen nicht auszuschließen.

Zur Planung und Dimensionierung von Feinstbindemittelinjektionsmaßnahmen sind Kenntnisse über die zu erwartende Beeinflussung der Suspensionsausbreitung im Untergrund durch Filtrationsmechanismen unerlässlich. Während die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche nicht unmittelbar auf den dreidimensionalen Fall übertragen werden können, kann doch eine Einschätzung verschiedener Feinstbindemittel-Sandkombinationen hinsichtlich der Filtrationsauswirkungen gelingen, wenn die Ergebnisse von eindimensionalen Injektionsversuchen verglichen werden. Hierzu wurden die Dichten der austretenden Suspension nach verschiedenen verpressten Suspensionsvolumen V_i/V_p von 1,5, 2 und 3 aller Injektionsversuche bestimmt und in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit dargestellt. Die Suspensionsdichten der Versuche mit einem W/B-Wert von 5,0 sind in Bild 6.39, die Dichten der Versuche mit einem W/B-Wert von 4,0 in Bild 6.40 zusammengestellt.

Auch bei dieser Ergebnisdarstellung von drei Injektionsversuchen mit unterschiedlichen Verpressraten lässt sich die mit höheren Filtergeschwindigkeiten bzw. Verpressraten ansteigende Dichte der austretenden Suspension jeweils gut erkennen. Von einem linearen Verhältnis der Dichte der austretenden Suspension zur Filtergeschwindigkeit kann jedoch nicht ausgegangen werden, da sich anscheinend bei geringen Verpressraten der Anteil des abgefilterten Feinstbindemittels überproportional erhöht. Auch nach dem zweifachen Austausch des Porenvolumens durch die Injektionssuspension steigt die Dichte der austretenden Suspension weiter an, so dass sich eine weitere Verringerung des abgefilterten Anteils der Bindemittelsuspension nicht ausschließen lässt, sofern die Injektionsversuche fortgeführt worden wären. Durch die mit der Ablagerung des Feinstbindemittels verbundene Verengung der Porenkanäle erhöhen sich die Fließgeschwindigkeiten und damit auch die hydrodynamischen Schleppkräfte. Hierdurch wird das weitere Abfiltern des Bindemittels behindert und bereits abgefilterte Bindemittelpartikel eventuell wieder gelöst und weitertransportiert.

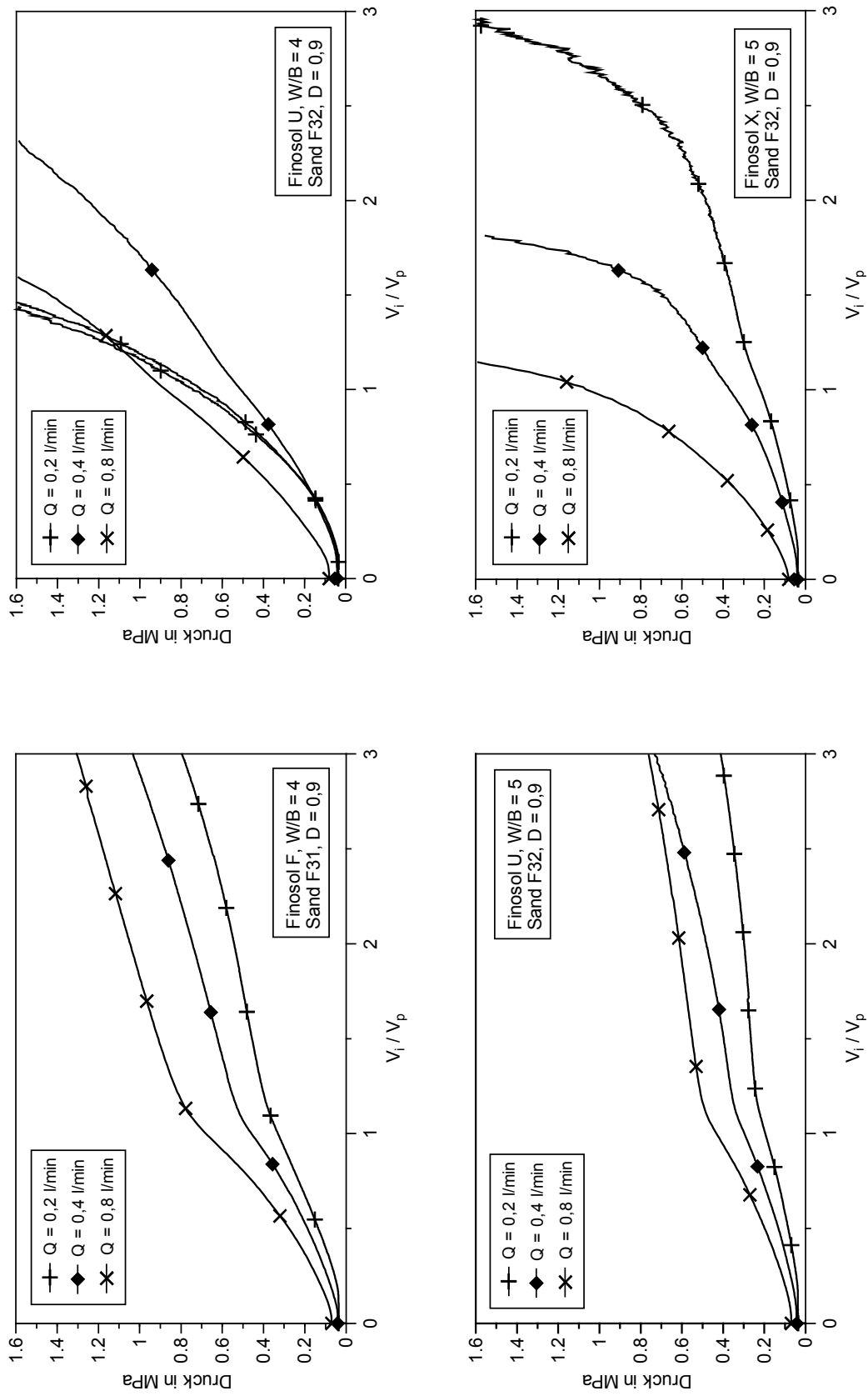


Bild 6.38: Druckverläufe an der Injektionsquelle verschiedener eindimensionaler Injektionsversuche

Zwischen den Ergebnissen der mit verschiedenen Versuchsmaterialien durchgeführten Injektionsversuche sind jedoch erhebliche Unterschiede zu erkennen. Auffällig ist hier zunächst, dass mit zunehmender Mahlfeinheit des Feinstbindemittels eine geringere Dichte der austretenden Suspension zu beobachten ist, obwohl die Injizierfähigkeit nach theoretischen Injektionskriterien eher günstiger zu bewerten ist. Wie schon anhand der Ergebnisse der Trichterversuche festgestellt werden konnte, wird die Ausbreitung einer Feinstbindemittelsuspension oftmals, insbesondere bei hoher Intensität der Filtration, durch lokale auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkte oder auch großräumige Injektionscracks erheblich beeinflusst. Während die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche zwar gut geeignet sind, Unterschiede hinsichtlich der Filtration zwischen verschiedenen Sand-Feinstbindemittelkombinationen herauszustellen, können jedoch keine Prognosen über Injektionscracks und ihre Auswirkung auf die Reichweite der Injektion und die Feinstbindemittelverteilung im Injektionskörper getroffen werden. Die mit einem W/B-Wert von 5,0 durchgeführten eindimensionalen Injektionsversuche spiegeln jedoch gut das Verhältnis der auf das Injektionsvolumen bezogenen Verpresskörpervolumen der mit gleichen Versuchsmaterialien durchgeführten Trichterversuche wider. Dieses ist hingegen für die mit einem W/B-Wert von 4,0 durchgeführten eindimensionalen Injektionsversuche nicht festzustellen. Hier weichen einerseits die Verpresskörpervolumen der Trichterversuche nur geringfügig voneinander ab. Zum anderen zeigt der Druckverlauf des mit dem Feinstbindemittel Finosol U durchgeführten Trichterversuchs einen ausgeprägten sägezahnartigen Verlauf, der auf ein stetiges reichweitenerhöhendes Aufsprengen des durch Ablagerungen verengten Porensystems hinweist. Letzteres macht die Abweichung zum Verpresskörpervolumen, wie es nach den eindimensionalen Versuchen zu erwarten war, erklärbar.

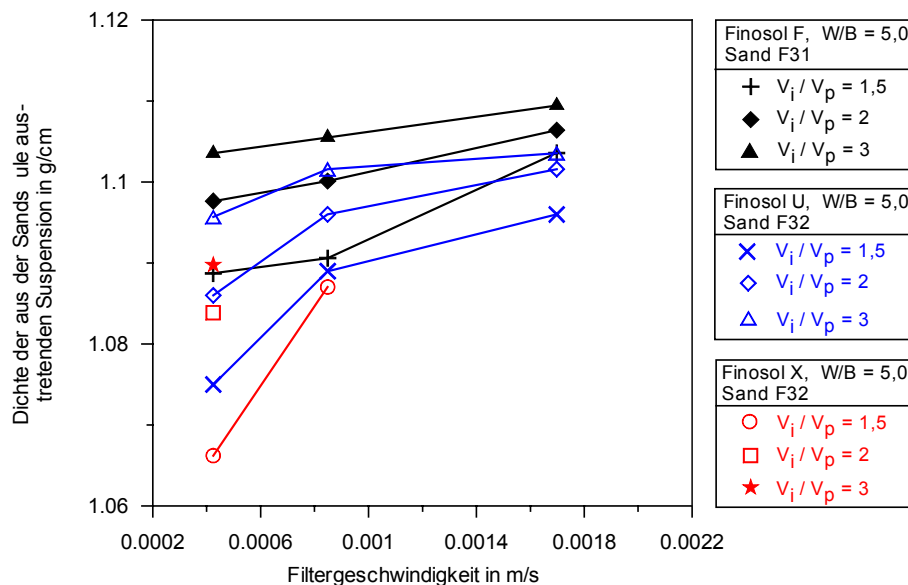


Bild 6.39: Dichten der aus eindimensionalen Prüfsäulen austretenden Suspensionen zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. zu verschiedenen Verpressmengen in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit (Injektionsversuche mit W/B = 5,0)

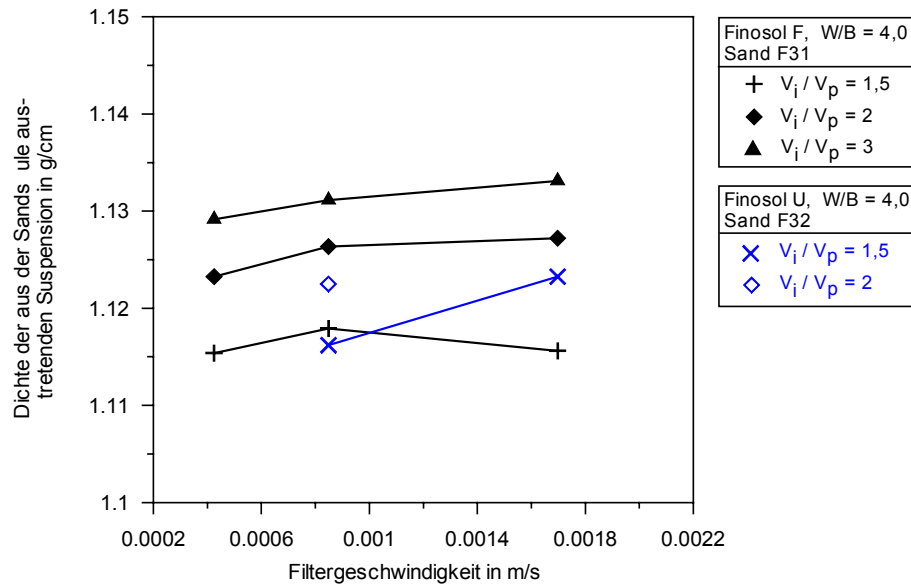


Bild 6.40: Dichten der aus eindimensionalen Prüfsäulen austretenden Suspensionen zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. zu verschiedenen Verpressmengen in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit (Injektionsversuche mit $W/B = 4,0$)

6.4.3 Beeinflussung der Partikelgrößenverteilung in Feinstbindemittelsuspensionen durch Filtrationsmechanismen

Durch die fortlaufende Reduktion des Bindemittelgehaltes beim Durchströmen des Porensystems ist auch eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung in der Feinstbindemittelsuspension nicht auszuschließen, sofern bestimmte Partikelfraktionen bevorzugt abgeschieden werden. An einer Versuchsreihe mit drei eindimensionalen Injektionsversuchen wurden daher die Dichten und Partikelgrößenverteilungen der aus den Prüfkörpern austretenden Suspensionen bestimmt. Im Folgenden sind die Ergebnisse von drei Injektionsversuchen mit einer Länge der Injektionssäule von 97,5 cm beschrieben. Es wurden hierbei die drei verschiedenen untersuchten Feinstbindemittelsorten jeweils mit einer Verpressrate von 0,2 l/min und einem W/B -Wert von 5,0 in den Sand F 31 eingepresst.

An den in Bild 6.41 dargestellten Verläufen der Einpressdrücke und Dichten der aus den Prüfsäulen austretenden Feinstbindemittelsuspensionen ist der bereits beschriebene Einfluss der Mahlfineinheit eines Feinstbindemittels auf den Anteil des abgefilterten Feinstbindemittels ersichtlich. Obwohl jeweils eine Feinstbindemittelsuspension mit gleichem Bindemittelgehalt in ein vergleichbares Korngerüst eingepresst wurde, ist mit höherer Mahlfineinheit des Feinstbindemittels auch eine geringere Dichte der austretenden Suspension festzustellen.

Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B	Sand	Lagerungsdichte D	Verpressrate in l/min
1	Finosol F	5,0	F 31	0,9	0,2
16	Finosol U				
17	Finosol X				

Tab. 6.12: Randbedingungen der eindimensionalen Injektionsversuche mit Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der aus den Prüfsäulen austretenden Feinstbindemittelsuspension

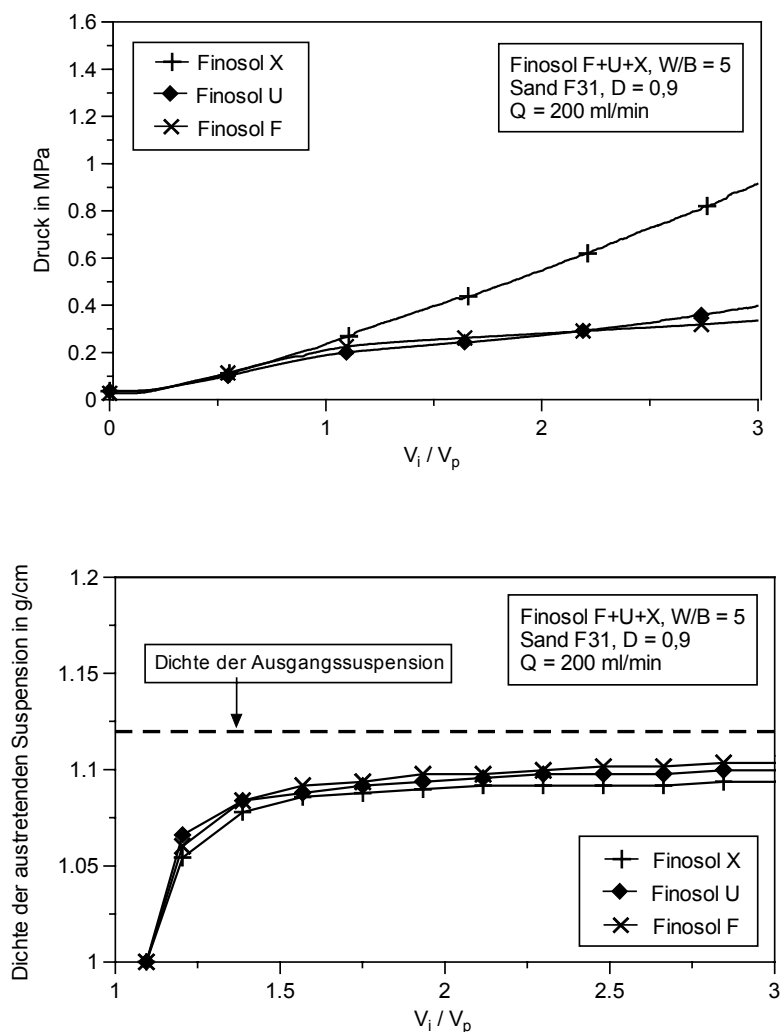


Bild 6.41: Druckverläufe an der Injektionsquelle und Dichten der aus den Prüfsäulen austretenden Suspension eindimensionaler Injektionsversuche mit verschiedenen Feinstbindemitteln, dem Sand F 31 und einer Verpressrate von 0,2 l/min

Neben der Partikelgrößenverteilung der Feinstbindemittelsuspensionen vor dem Injektionsvorgang wurden die Partikelgrößenverteilungen der aus den Prüfsäulen austretenden Suspensionen bei $V_i/V_p = 1,2$, $2,1$ und $3,0$ bestimmt und in Bild 6.42 dargestellt. Während bei $V_i/V_p = 1,2$ teilweise eine geringfügige Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zum Feineren hin zu beobachten ist, sind bei $V_i/V_p = 2,1$ und $3,0$ keine signifikanten Verschiebungen mehr festzustellen.

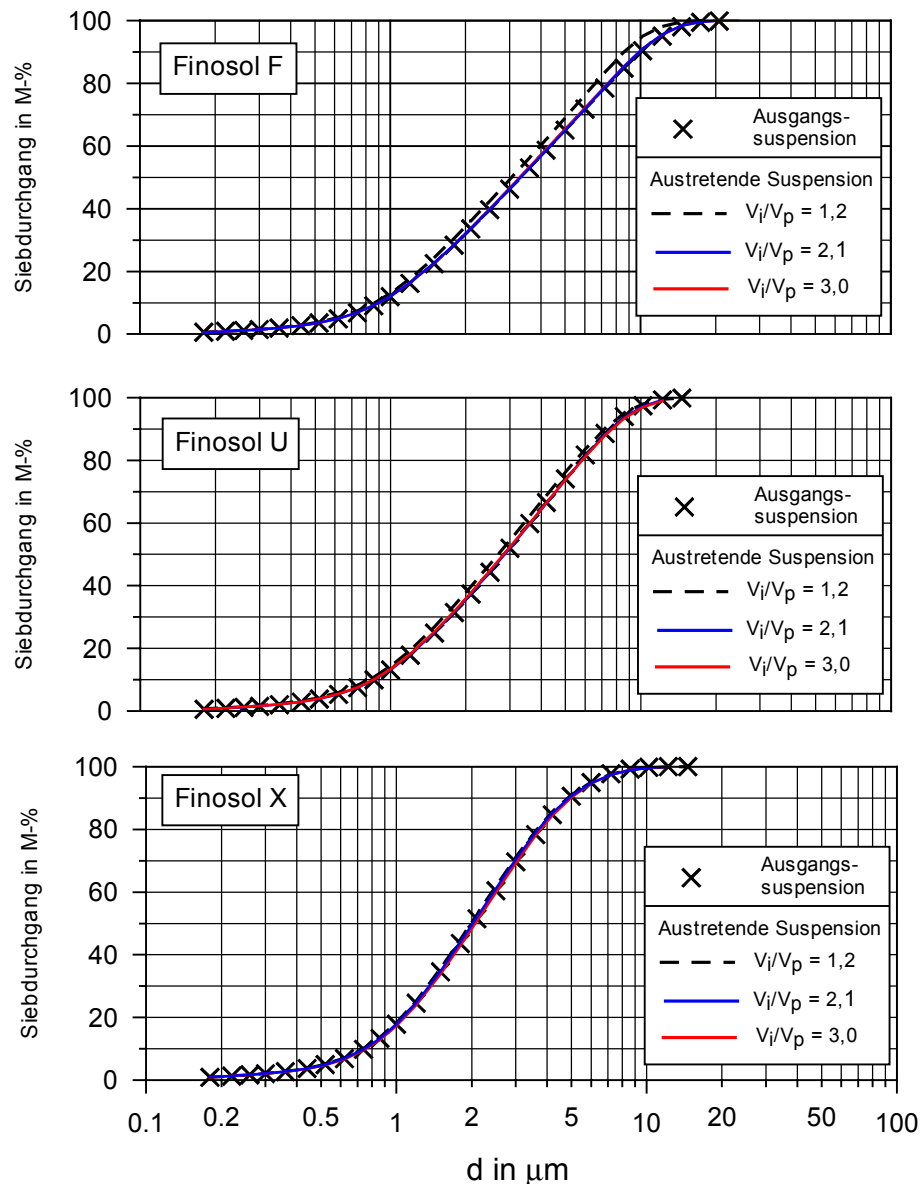


Bild 6.42: Partikelgrößenverteilungen der zu verschiedenen Zeitpunkten aus der Prüfsäule austretenden Suspensionen

Aus der Dichte einer Feinstbindemittelsuspension und ihrer Partikelgrößenverteilung können die Anteile verschiedener Kornfraktionen in g pro cm^3 Suspension errechnet werden. Diese Anteile einzelner Kornfraktionen in der Ausgangs- und der zu verschiedenen Zeitpunkten

austretenden Suspension sind in Bild 6.43 gegenübergestellt. Ein bevorzugtes Abfiltrieren bestimmter Kornfraktionen ist jedoch auch in dieser Darstellungsweise nicht festzustellen. Lediglich bei $V_i/V_p = 1,2$ wird ein etwas höherer Anteil der gröberen Fraktionen des Bindemittels abgefiltriert, während zu späteren Zeitpunkten alle Partikelfraktionen zu fast gleichen Anteilen abgefiltriert werden. Ein Absieben von gröberen Feinstbindemittelpartikeln in Poren, deren Querschnitt eine Passage dieser Partikel nicht erlauben, scheint somit nicht vorrangig für die Reduktion des Bindemittelgehaltes einer Feinstbindemittelsuspension beim Durchströmen des Porensystems verantwortlich zu sein, sofern die Injizierfähigkeit nach gängigen Kriterien gegeben ist.

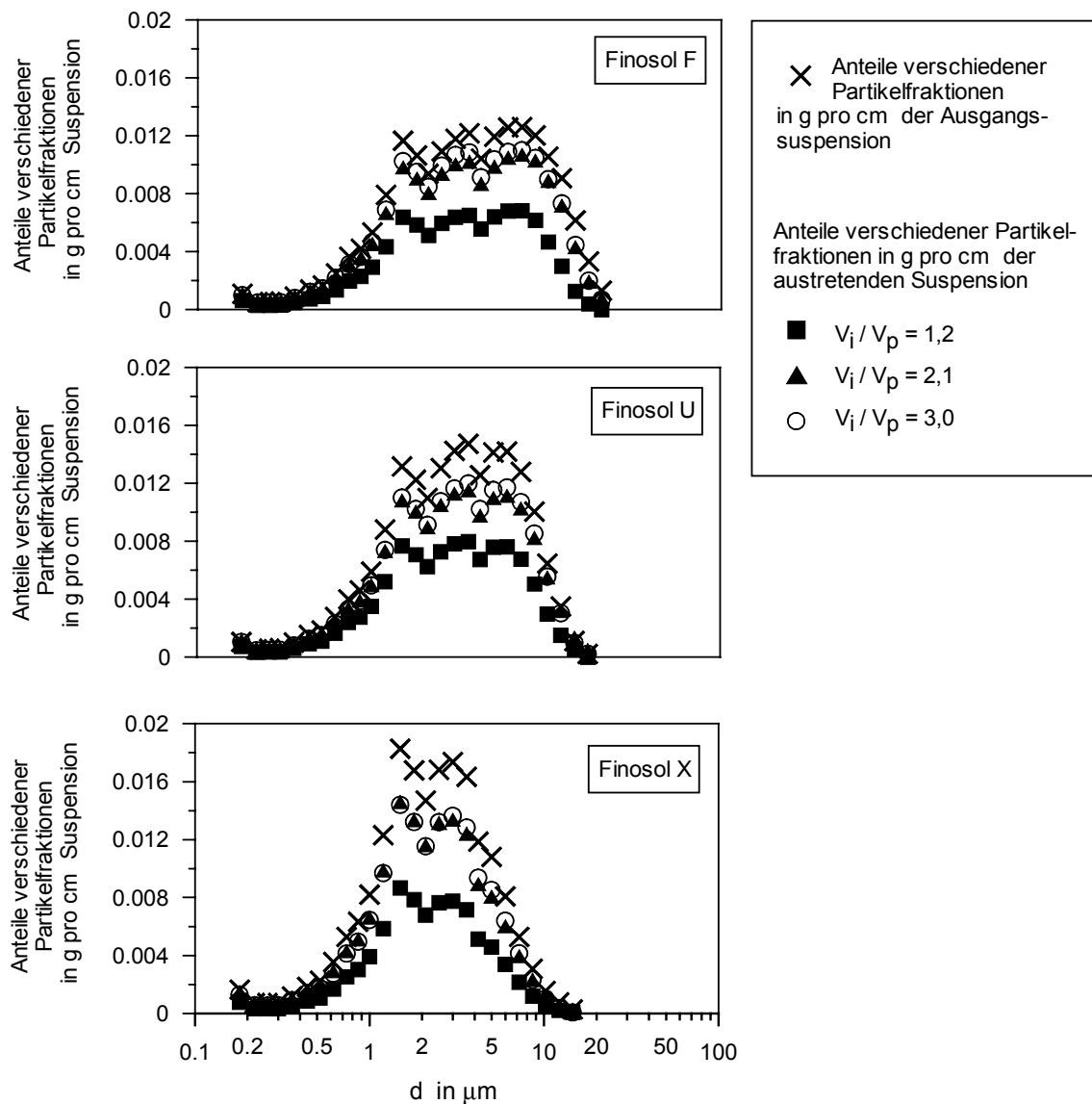


Bild 6.43: Anteile bzw. Verluste beim Durchströmen der Prüfsäule verschiedener Partikelfraktionen in g pro cm³ Suspension

6.4.4 Injizierfähigkeit von mit geringen Bindemittelanteilen beladenen Korngerüsten

Durch die fortlaufende filtrationsbedingte Reduktion des Bindemittelgehaltes der Feinstbindemittelsuspensionen ergeben sich zwangsläufig bindemittelärmere und damit durchlässigere Randzonen der Injektionskörper, die die Wirksamkeit einer Injektionssohle in Frage stellen können. Kleinmaßstäbliche dreidimensionale Injektionsversuche von TAUSCH und ECKER (2002) zeigen, dass sich bei einer Injektion „frisch-in-frisch“, d.h. einer zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgenden Injektion benachbarter Injektionspunkte, ein guter Verbund zwischen den einzelnen Injektionskörpern erzielen lässt, sofern Filtrationseinflüsse durch eine entsprechende Mehrmenge an Suspension kompensiert werden. In der Praxis hingegen ist eine zeitlich nah aufeinanderfolgende Injektion benachbarter Injektionspunkte nicht immer möglich. Mit zunehmendem zeitlichem Abstand zwischen den Injektionen behindert der auch in feststoffarmen Randbereichen einsetzende Abbindeprozess ein gegenseitiges Durchdringen der Injektionskörper. In einer Versuchsreihe mit eindimensionalen Injektionsversuchen sollte untersucht werden, in wie weit in Injektionsproben, die mit einer feststoffarmen Feinstbindemittelsuspension vorinjiziert wurden und somit einen bindemittelärmeren Randbereich repräsentieren, mit einem zeitlichen Abstand von einigen Tagen ein zweites Mal eine Feinstbindemittelsuspension eingepresst werden kann. Hierzu wurde der Sand F31 mit einer Lagerungsdichte von $D = 0,7$ in Prüfzylinder mit einer Länge von 32,5 cm eingebaut. Als Vorinjektion wurde jeweils das Porenvolumen der Sandkörper durch Feinstbindemittelsuspensionen mit einem W/B-Wert von 15, 20 und 30 sowie den Feinstbindemittelsorten Finosol F und Finosol X einfach ausgetauscht. Die Bindemittelgehalte der verpressten Feinstbindemittelsuspensionen liegen damit in der Größenordnung der in Randbereichen der Injektionskörper aus Trichterversuchen ermittelten Bindemittelgehalte. Die Nachinjektion erfolgte jeweils 5 Tage nach der Vorinjektion mit einer Verpressrate $Q = 200$ ml/min und einem W/B-Wert der Feinstbindemittelsuspensionen von 5,0. Der zeitliche Abstand von 5 Tagen zwischen der Vor- und der Nachinjektion wurde als aus baupraktischer Sicht auf der so genannten sicheren Seite liegender, zeitlicher Maximalabstand gewählt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in der Tabelle 6.13 zusammengestellt.

Während die mit dem Feinstbindemittel Finosol F durchgeführten Injektionsversuche nur eingeschränkt erneut injiziert werden können, gelingt bei den mit dem Feinstbindemittel Finosol X durchgeführten Versuchen der Austausch des dreifachen Porenvolumens, ohne dass dabei die Druckgrenze von 0,6 MPa überschritten wird. Jedoch wurde hier bei zwei von drei Versuchen ein plötzlicher starker Abfall des Injektionsdrucks festgestellt, der auf das Aufsprengen des Porensystems (Crack) hindeutet. Anschließend konnte das Feinstbindemittel nahezu drucklos verpresst werden. Insgesamt lagen die bei der Nachinjektion beobachteten Injektionsdrücke deutlich über den in den Randbereichen der Trichterversuche gemessenen. Es erscheint daher fraglich, ob in situ eine nachträgliche, nicht zeitnahe gegenseitige Durchdringung der kritischen Randbereiche zweier Injektionskörper gelingen kann. Die zeitnahe Herstellung benachbarter Injektionskörper „frisch-in-frisch“ erscheint daher in jedem Fall empfehlenswert.

Feinstbindemittelsorte	W/B-Wert der Vorinjektion	Ausgetauschtes Porenvolumen bis zum Erreichen der Druckgrenze von 0,6 MPa	Starker plötzlicher Druckabfall im Verlauf der Nachinjektion (Crack)
Finosol F	15	1,45	Nein
	20	1,1	Nein
	30	1,53	Nein
Finosol X	15	> 3,0	Ja
	20	> 3,0	Ja
	30	> 3,0	Nein

Tab. 6.13: Injizierfähigkeit von vorinjizierten Sandproben nach einer Abbindedauer von 5 Tagen

6.4.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche auf den dreidimensionalen Fall

Eindimensionale Injektionsversuche, wie sie im MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITEMELN IN LOCKERGESTEIN (2002) zur Überprüfung der Injizierbarkeit einer Feinstbindemittelsuspension in ein Korngerüst vorgeschlagen werden, eignen sich auch zur Abschätzung der zu erwartenden Intensität der Filtration, sofern ein Mehrfaches des Porenvolumens verpresst wird. Aus der Differenz der Dichte der aus den Prüfsäulen austretenden Suspension und der Suspensionsdichte vor der Injektion lassen sich Anhaltspunkte für die in der Praxis zu erwartende filtrationsbedingte Beeinflussung der dreidimensionalen Suspensionsausbreitung gewinnen. Eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche auf den dreidimensionalen Fall ist jedoch aus verschiedenen in Tab. 6.14 zusammengestellten Gründen nicht möglich.

Wie die Ergebnisse der Trichterversuche zeigen, wird insbesondere bei hoher Filtrationsintensität das Korngerüst durch den Injektionsdruck örtlich aufgesprengt. Die Injektion läuft anschließend bei reduziertem Einpresswiderstand fort. Mit eindimensionalen Injektionsversuchen sind diese Vorgänge hingegen nicht zu erfassen, da Injektionscracks durch die Verspannung des Sandkörpers in den Versuchszylindern zumindest bei dichter Lagerung des Versuchssandes nahezu vollständig unterbunden werden.

Wie die Druckverläufe der eindimensionalen Injektionsversuche sowie der Trichterversuche zeigen, ist die zunehmende Verengung der Porenquerschnitte durch die Abfilterung des Feinstbindemittels in besonderem Maße im Bereich der Injektionsquelle zu beobachten. Dieser Bereich muss vom gesamten verpressten und zudem in seinem Bindemittelgehalt noch nicht reduzierten Suspensionsvolumen durchströmt werden, so dass sich hier abgefiltertes Feinstbindemittel konzentriert. Dies wirkt sich insbesondere bei dreidimensionaler kugelförmiger Suspensionsausbreitung aus, da zum Erzielen einer gleichen Eindringlänge I

ein erheblich größeres Suspensionsvolumen als bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung verpresst werden muss. Beispielhaft sind in Bild 6.44 die zum Erzielen einer Eindringlänge von $l = 1$ m durch Kugelschalen und Säulenquerschnitte im Abstand z von der Eintrittsfläche zu transportierenden Suspensionsvolumen bei eindimensionaler und dreidimensionaler Suspensionsausbreitung gegenübergestellt. Der Radius der kugelförmigen und der Durchmesser der kreisförmigen Eintrittsflächen sind hierbei so gewählt, dass sich jeweils gleich große Eintrittsflächen für das Injektionsmittel ergeben. Bei eindimensionalen Injektionsversuchen bleibt die Querschnittsfläche der Prüfsäule konstant. Folglich nimmt das durch Querschnitte im Abstand z zu transportierende Suspensionsvolumen linear mit der Entfernung von der Injektionsquelle ab. Bei dreidimensionaler kugelförmiger Injektionsmittelausbreitung muss bei dem betrachteten Beispiel das ca. 574-fache Suspensionsvolumen verpresst werden, um ebenfalls eine Eindringlänge der Injektionssuspension von 1 m zu erzielen. Gleichzeitig ergibt sich aufgrund der mit zunehmendem Abstand von der Injektionsquelle exponentiell ansteigenden Fläche der Kugelschalen ein nichtlinearer Verlauf des durch Kugelschalen im Abstand z transportierten Suspensionsvolumen.

	Eindimensionaler Injektionsversuch	Dreidimensionaler Injektionsversuch
Filtergeschwindigkeit der Feinstbindemittelsuspension	Konstant	Veränderlich mit der Entfernung zur Injektionsquelle
Fließquerschnitt	Konstant	Aufweitung des Fließquerschnitts mit zunehmender Entfernung zur Injektionsquelle führt zu verringerter Feststoffabfilterung
Häufigkeit des Austauschs des Porensystems mit der Feinstbindemittelsuspension	Linear mit der Entfernung zur Injektionsquelle abnehmend	Nichtlinear mit der Entfernung zur Injektionsquelle abnehmend
Aufsprengen des verengten Porensystems durch den Injektionsdruck (Crack)	Wird weitestgehend unterbunden	Erleichterter Feinstbindemitteltransport durch lokales Aufsprengen des Porensystems möglich

Tab. 6.14: Unterschiedliche Einflussgrößen auf die Feinstbindemittelausbreitung bei eindimensionalen und dreidimensionalen Injektionsversuchen

Die Ergebnisse eindimensionaler und dreidimensionaler Injektionsversuche zeigen jedoch, dass bei dreidimensionaler Suspensionsausbreitung das Porenvolumen der quellnahen Bereiche um ein vielfaches häufiger ausgetauscht werden kann als bei eindimensionaler Suspensionsströmung, ohne dass es zu einem exponentiellen Anstieg des Einpressdrucks

durch eine Verengung von Porenkanäle kommt. Hier scheint die Aufweitung des Fließquerschnitts mit zunehmendem Abstand zur Injektionsquelle im dreidimensionalen Fall die Auswirkungen der fortlaufenden Ablagerung des Feinstbindemittels im Vergleich zur eindimensionalen Injektion deutlich zu reduzieren und so den Transport einer größeren Feinstbindemittelmenge zu erlauben, ohne dass es zu einer kritischen Verengung mit anschließendem Aufsprengen des Porensystems kommt.

Festgestellt wurde sowohl bei den großmaßstäblichen Trichterversuchen als auch bei eindimensionalen Injektionsversuchen eine unmittelbare Abhängigkeit der Abfiltrationsrate des Feinstbindemittels von der Filtergeschwindigkeit, mit der sich die Injektionssuspension im Boden bewegt. Wie schon in Abschnitt 6.4.1 erläutert, erlauben die örtlich unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten bei ein- oder dreidimensionaler Suspensionsausbreitung keine Abschätzung der Filtrationsintensität auf der Basis eindimensionaler Injektionsversuche.

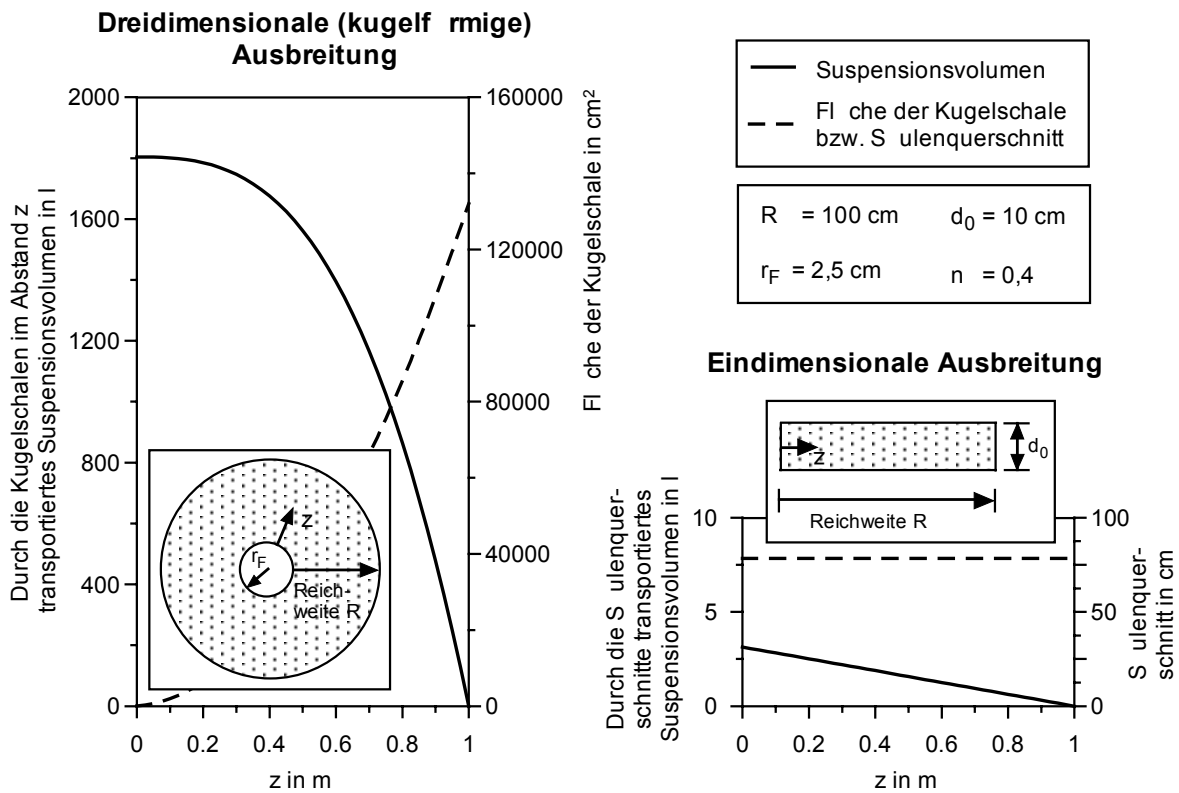


Bild 6.44: Beispiel der zum Erzielen einer Eindringlänge $l = 1$ m durch Kugelschalen bzw. Säulenquerschnitte in verschiedenen Abständen z zu transportierenden Suspensionsvolumen bei ein- und dreidimensionaler Suspensionsausbreitung

Abschließend ist festzustellen, dass aus Ergebnissen eindimensionaler Injektionsversuche nicht auf die Injektionsreichweite und Feinstbindemittelverteilung im dreidimensionalen Fall geschlossen werden kann. Es ist aber zu erwarten, dass sich die an eindimensionalen Ver-

suchen festgestellten Unterschiede hinsichtlich der Filtrationsintensität des Bindemittels in ähnlicher Weise auch bei dreidimensionaler Ausbreitung wiederfinden.

6.5 Bewertung der Ergebnisse des experimentellen Versuchsprogramms

6.5.1 Einflussfaktoren auf das Abfiltern von Feinstbindemittelpartikeln beim Durchströmen des Porensystems

Aus den experimentellen Ergebnissen lassen sich die in Bild 6.45 dargestellten Abhängigkeiten des an einem Ort und einem Zeitpunkt abgefilterten Feinstbindemittels von verschiedenen Einflussgrößen ableiten. Unmittelbare Einflussgrößen auf das Abfiltern des Feinstbindemittels sind die Eigenschaften des Porensystems und der Feinstbindemittelsuspension, die Bahngeschwindigkeit der Feinstbindemittelpartikel, die örtliche Beladung mit Feinstbindemittelpartikeln sowie Injektionscracks durch die Feinstbindemittel, ohne dass Bindemittel abgefiltert wird, transportiert werden kann. Durch die zunehmende Beladung des Porensystems mit Feinstbindemittel werden die Porenkanäle mehr oder weniger verengt, womit sich die Bahngeschwindigkeit der Feinstbindemittelpartikel in den transportwirksamen Porenkanälen erhöht. Aus den Ergebnissen der ein- und dreidimensionalen Injektionsversuche ist bekannt, dass bei erhöhten Bahngeschwindigkeiten weniger Feinstbindemittel abgeschieden wird. Hierbei kann jedoch nicht unterschieden werden, ob durch die erhöhten Bahngeschwindigkeiten der Anteil des abgefilterten Feinstbindemittels reduziert wird oder zuvor anhaftende Feinstbindemittelpartikel wieder gelöst und weitertransportiert werden. Es erscheint daher sinnvoll, bei der theoretischen Beschreibung der Filtration das Ablösen zuvor anhaftender Feinstbindemittelpartikel durch eine Verringerung des Anteils der anhaftenden Partikel in Abhängigkeit von der Beladung des Porensystems mit Feinstbindemittel zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche zeigen, dass der beim Durchströmen des Porensystems zurückgehaltene Anteil des Feinstbindemittels im Versuchsverlauf abnimmt und sich einer konstanten Größe annähert. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die zunehmende Beladung des Sandfilters nicht zu einer kritischen Verengung des Porensystems führt, bei der wiederum ein höherer Anteil des Feinstbindemittels abgefiltert wird. Für die Anwendung von Filtergesetzen erscheint daher ein mit der Beladung des Filters auf eine konstante Größe abnehmender Filterkoeffizient erforderlich. Die Anwendung von Filtergesetzen bleibt jedoch auf den Injektionsvorgang ohne Injektionscracks beschränkt.

Aufgrund der Abhängigkeit der Injektionsreichweite und der örtlichen Feinstbindemittelkonzentration von der Vielzahl der in Bild 6.45 zusammengestellten Einflussfaktoren erscheinen dreidimensionale Injektionsversuche oder Probeinjektionen zumindest in Anwendungsfällen mit hohen Anforderungen an die Dichtigkeit einer Injektionssohle angebracht. Eindimensionale Injektionsversuche eignen sich jedoch gut, um die zu erwartende Beeinflussung der

Feinstbindemittelausbreitung im Untergrund durch Filtrationsmechanismen vorab einzuschätzen, indem die Dichten der zu verschiedenen Zeitpunkten aus den Prüfsäulen austretenden Suspension erfasst werden. Insbesondere bei Eignungsprüfungen im Sinne des MERKBLATTES FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITTELN IN LOCKERGESTEIN (2002) kann hier gut zwischen Feinstbindemittelsuspensionen, die hinsichtlich der Filtrationsintensität günstiger oder weniger günstig einzustufen sind, unterschieden werden. Liegen zudem Ergebnisse von dreidimensionalen Injektionsversuchen oder Probeinjektionen sowie Ergebnisse von eindimensionalen Injektionsversuchen mit vergleichbaren Versuchsmaterialien vor, so kann auch das dreidimensionale Ausbreitungsverhalten weiterer Feinstbindemittelsuspensionen in Relation zu den vorliegenden ein- und dreidimensionalen Versuchsdaten eingeschätzt werden. Auch eindimensionale Injektionsversuche mit verschiedenen Raten können zur Abschätzung des Einflusses der Filtergeschwindigkeit auf die Filtrationsintensität empfohlen werden.

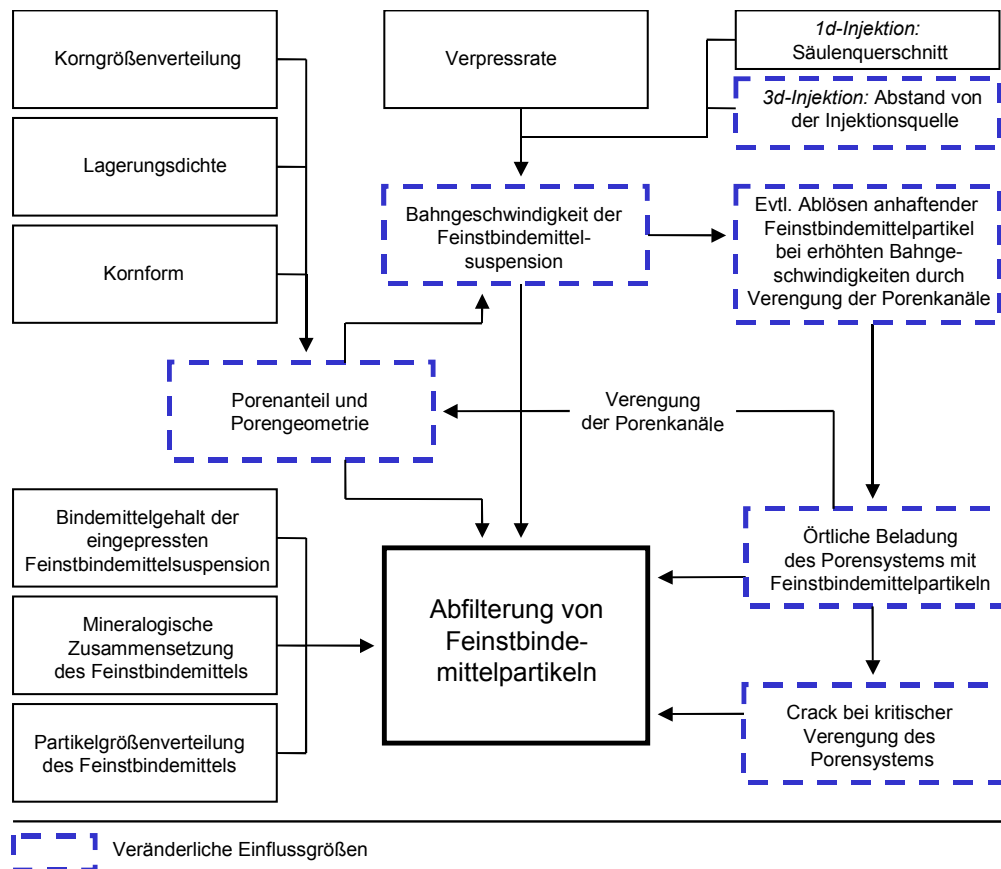


Bild 6.45: Einflussgrößen auf das Abfiltern von Feinstbindemittelpartikeln beim Durchströmen des Porensystems

Die vor und nach dem Durchströmen einer Sandsäule bestimmten Partikelgrößenverteilungen von Feinstbindemittelsuspensionen zeigten keine auffälligen Abweichungen bzw. kein bevorzugtes Abfiltern bestimmter Partikelfraktionen. Die Injizierfähigkeit der verwendeten

Feinstbindemittelsuspensionen war hierbei sowohl durch eine experimentelle Überprüfung nach MERKBLATT (2002) sowie anhand gebräuchlicher theoretischer Injektionskriterien gegeben. Bei nur eingeschränkt gegebener Injizierfähigkeit einer Feinstbindemittelsuspension ist jedoch eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zum Feineren hin nicht auszuschließen, die aber nicht untersucht wurde. Anhand der Ergebnisse von Trichter- und eindimensionalen Injektionsversuchen konnte zudem keine Abhängigkeit des beim Durchströmen des Porensystems abgefilterten Feinstbindemittels vom Verhältnis der Partikelgrößen der Feinstbindemittelsuspensionen zur Kornverteilung des Injektionssandes festgestellt werden. Folglich eignen sich theoretische Injektionskriterien zwar zur Abschätzung der prinzipiellen Injizierfähigkeit, jedoch nicht, um Filtrationseinflüsse auf die Ausbreitung der Feinstbindemittelsuspension zu prognostizieren.

6.5.2 Hinweise und Empfehlungen für die Ausführung von Injektionssohlen mit Feinstbindemitteln

Für die Ausführung von Feinstbindemittelinjektionen werden im MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITEMELN IN LOCKERGESTEIN (2002) vielfältige Hinweise zur Planung und Bemessung solcher Maßnahmen wie auch zum erforderlichen Erkundungsumfang gegeben, die hier nicht wiederholt werden sollen. Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen ergeben sich jedoch ergänzende Ausführungshinweise und Empfehlungen, die nachfolgend zusammengefasst werden.

Obwohl das Entstehen von Injektionscracks bei hoher Filtrationsintensität vermutet werden kann, lassen sich Zeitpunkt und Ort bzw. Ausdehnung der Cracks nicht prognostizieren. Hierbei muss, wie die Ergebnisse der Trichterversuche zeigen, zwischen kleinräumigen, auf die unmittelbare Nähe zur Injektionsquelle beschränkten Cracks und einem großräumigen Aufsprengen des Porensystems unterschieden werden. Während die kleinräumigen Cracks bei der Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen vielfach weder zu verhindern sind, noch sich nachteilig auf die gleichmäßige Ausbreitung des Feinstbindemittels auswirken, kann ein großräumiges Aufsprengen des Porensystems zu einer einseitig gerichteten weiteren Ausbreitung der Feinstbindemittelsuspension führen, die die Gefahr von Fehlstellen in einer Injektionssohle mit sich bringt. Die stetige Überwachung des Injektionsdrucks bzw. der Druck-Mengen-Entwicklung bei Feinstbindemittelinjektionen erscheint daher angebracht, da großräumige Injektionscracks anhand eines plötzlich stark abfallenden und dauerhaft auf niedrigerem Niveau verbleibenden Injektionsdrucks an der Injektionsquelle erkannt werden können.

Bei der Auswahl der Feinstbindemittelsorte sollte nicht allein die prinzipielle Injizierfähigkeit, sondern auch die Abfilterungsrate eines Feinstbindemittels in dem zu verpressenden Korngerüst berücksichtigt werden. Anhaltspunkte können, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, mit Hilfe einer Serie von eindimensionalen Injektionsversuchen gewonnen werden. Bei hoher Intensität der Filtration ist auch eine große Differenz zwischen den Durchlässigkeitsbeiwerten im

Kern und am Rand der Injektionskörper sowie eine erhebliche Verringerung der Injektionsreichweite zu erwarten.

Die angestrebte Reichweite, die Verpressmenge, die Verpressrate, die Bindemittelsorte und der Bindemittelgehalt der Injektionssuspension sollten so abgestimmt werden, dass sich auch in den Randbereichen der Injektionskörper möglichst geringe Durchlässigkeiten ergeben. Hierbei scheint es sinnvoll, eher mit geringeren als den experimentell zwischen 0,9 und 1 m bestimmten Reichweiten zu planen, so dass sich keine bzw. nur eine sehr geringe Reduktion des Verpresskörpervolumens infolge der Filtration einstellt und damit der Einfluss der Filtration begrenzt wird.

Eine Erhöhung des Bindemittelgehaltes der Feinstbindemittelsuspension führt zu einer Erhöhung des bezogenen Verpresskörpervolumens, aber nicht zwangsläufig zu einer Verringerung des Anteils der bindemittelarmen Randzonen. Der Bindemittelgehalt der Injektionssuspension muss jedoch in jedem Fall so groß gewählt werden, dass auch ohne Filtrationseinflüsse die erforderlichen Durchlässigkeiten der Injektionskörper erreicht werden können.

Durch höhere Verpressraten und den damit verbundenen erhöhten hydrodynamischen Schleppkräften wird weniger Feinstbindemittel im Kern des Injektionskörpers abgefiltert und die Reichweite der Injektion erhöht. Allerdings wurden hierbei in den durchgeführten Trichterexperimenten mit Injektionsreichweiten zwischen 0,9 und 1 m die bindemittelarmen Randzonen ausgedehnt. Um den Bindemittelgehalt in den Randbereichen der Injektionskörper anzuheben, erscheint es daher sinnvoll, höhere Verpressraten mit Injektionsreichweiten zu kombinieren, bei denen noch keine signifikante Reichweitenverkürzung zu beobachten ist.

Die Verwendung einer feineren Feinstbindemittelsorte führt entgegen der Darstellung im MERKBLATT (2002) nicht zwangsläufig zu einer größeren Reichweite der Injektion. Ist die Injizierfähigkeit der betrachteten Feinstbindemittelsorten in ein Korngerüst jeweils eindeutig gegeben, so können sich auch, wie Ergebnisse des experimentellen Versuchsprogramms zeigen, bei Verwendung einer Feinstbindemittelsorte mit einer höheren Mahlfineinheit bzw. einer größeren spezifischen Oberfläche geringere Verpresskörpervolumen ergeben. Verantwortlich hierfür scheint die mit der spezifischen Oberfläche anwachsende Reaktivität des Feinstbindemittels zu sein.

Die Injektion benachbarter Verpresspunkte sollte in geringem zeitlichem Abstand („frisch-in-frisch“), jedoch nicht zeitgleich erfolgen, um einem guten Verbund zwischen den Injektionskörpern bzw. eine Verringerung der Durchlässigkeiten der Randbereiche durch die gegenseitige Durchdringung der Injektionskörper zu ermöglichen. Hierbei ist das pro Injektionspunkt verpresste Suspensionsvolumen derart groß zu wählen, dass das erforderliche gegenseitige Durchdringen der Injektionskörper auch stattfinden kann.

6.5.3 Gegenüberstellung der eigenen Versuchsergebnisse und der Ergebnisse anderer Autoren

In der Literatur ist eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen mit Feinstbindemitteln zu finden, die sich jedoch überwiegend mit dem Nachweis der Injizierfähigkeit dieser Bindemittel befassen und hier von nachgeordnetem Interesse sind. Deshalb sind nachfolgend nur solche Ansätze beschrieben, denen Hinweise zur Beeinflussung der Ausbreitung von Feinstbindemittelsuspensionen durch Filtrationsmechanismen entnommen werden können.

Von YONEDA et. al. (1996) werden dreidimensionale großmaßstäbliche Injektionsversuche mit verschiedenen Feinst- und Feinbindemittelsorten sowie Injektionsmitteln auf Wasserglasbasis beschrieben. Hierbei entsprach die Mahlfeinheit des feinsten verwendeten Feinstbindemittels in etwa der Mahlfeinheit des größten in den eigenen Versuchen verwendeten Feinstbindemittels. Die beobachteten Injektionsdruckverläufe wurden drei verschiedenen Kategorien, wie sie in Bild 6.46 dargestellt sind, zugeordnet. Verlauf A ist durch einen kontinuierlich ansteigenden, von periodischen Schwankungen begleiteten Injektionsdruck gekennzeichnet und wurde bei der Injektion von Feinstbindemitteln festgestellt, die nach „Amerikanischem Kriterium“ injizierfähig sind. Die Druckschwankungen werden hierbei als Anhaften und Lösen von Bindemittelpartikeln sowie Miniaturcracks gedeutet. Der zunächst schnell und anschließend langsam ansteigende Injektionsdruckverlauf vom Typ B wurde hingegen überwiegend beim Verpressen von Injektionsmitteln auf Wasserglasbasis festgestellt. Hier kann ebenso wie beim Verlaufstyp A von einer Permeationsinjektion ausgegangen werden. Bei Injektionsversuchen mit Feinst- bzw. Feinbindemitteln, die nach „Amerikanischem Kriterium“ nicht injizierfähig sind, ergab sich ein Druckverlauf vom Typ C. Hier steigt der Injektionsdruck zunächst steil an und sinkt nach dem Aufsprengen des Porensystems während der anschließenden aderförmigen Ausbreitung des Injektionsmittels kontinuierlich ab. Damit decken sich die von YONEDA et. al. (1996) festgestellten Kategorien von Einpressdruckverläufen gut mit den eigenen Versuchsergebnissen, bei denen zunächst aufgrund der anscheinend guten Injizierfähigkeit der verwendeten Feinstbindemittelsuspensionen ein dem Typ B entsprechender Druckverlauf festzustellen war. Mit zunehmender Beladung des Sandes mit abgefilterten Feinstbindemittelpartikeln erfolgte dann ein Übergang zum Druckverlauf vom Typ A. Erreichte die Beladung des Sandkörpers eine kritische Größe, bei der großräumige Injektionscracks auftraten, so ähnelt der anschließend zu beobachtende kontinuierlich abfallende Einpressdruck dem von YONEDA et. al. (1996) festgestellten Druckverlauf vom Typ C bei nicht gegebener Injizierfähigkeit. Das Auftreten von Miniaturcracks bei zunehmender Beladung des Sandkörpers mit abgefiltertem Feinstbindemittel scheint somit für die Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen charakteristisch zu sein.

Desweiteren wird von YONEDA et. al. (1996) entgegen den eigenen Versuchsergebnissen eine Zunahme des Injektionskörpervolumens bei Verwendung eines Feinstbindemittels mit höherer Mahlfeinheit bzw. größerer spezifischer Oberfläche festgestellt. Zu beachten ist jedoch, dass dort Versuchsergebnisse verglichen werden, die mit Suspensionen ermittelt wurden, die nach theoretischen Kriterien nicht, eventuell oder injizierfähig sein sollten. Somit wird das Verpresskörpervolumen vermutlich in erster Linie durch den Grad der Injizierfähig-

keit und weniger durch die aus der Mahlfineinheit des verwendeten Bindemittels resultierenden spezifischen Eigenschaften bestimmt.

Auch von MITTAG (2000) werden die Ergebnisse von eindimensionalen Injektionsversuchen sowie von Halbkugel- und Trichterversuchen mit dem Feinstbindemittel Finosol U beschrieben. Die Reichweite der Injektionen lag zwischen 0,45 und 0,63 m und damit deutlich unter der Mehrzahl der in den eigenen Versuchen erzielten Reichweiten. Statt eines sägezahnartigen Druckverlaufs mit geringen Druckschwankungen wurden bei den meisten der von MITTAG durchgeführten Trichterversuche ausgeprägte Injektionscracks beobachtet, die beim Freilegen der erhärteten Injektionskörper ausschließlich entlang der in der Versuchstrichterwandung eingelassenen Druckmessgebern aufgefunden wurden. Als Ursache der Injektionscracks wurden von MITTAG (2000) Auflockerungen im Bereich der Druckmessgeber vermutet. Deutlich reduzierte Bindemittelgehalte in den Randbereichen der Injektionskörper wurden analog zu den eigenen Trichterversuchen gemessen. Die Größenordnung der filtrationsbedingten Injektionskörpervolumenverringering entspricht in etwa den in den eigenen Versuchen bestimmten.

Dreidimensionale Kugel- und Trichterinjektionsversuche werden von MBONIMPA (1998) und MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998) beschrieben. Der Einpressdruck an der Injektionsquelle ist hier jeweils im ersten Drittel der Versuchslaufzeit durch einen Wechsel von stetigem Druckanstieg und plötzlichem starkem Druckabfall gekennzeichnet. Anschließend sinkt jeweils der Einpressdruck an der Injektionsquelle entsprechend dem Druckverlauf C kontinuierlich ab. Injektionscracks konnten jeweils beim Freilegen des erhärteten Verpresskörpers gefunden werden.

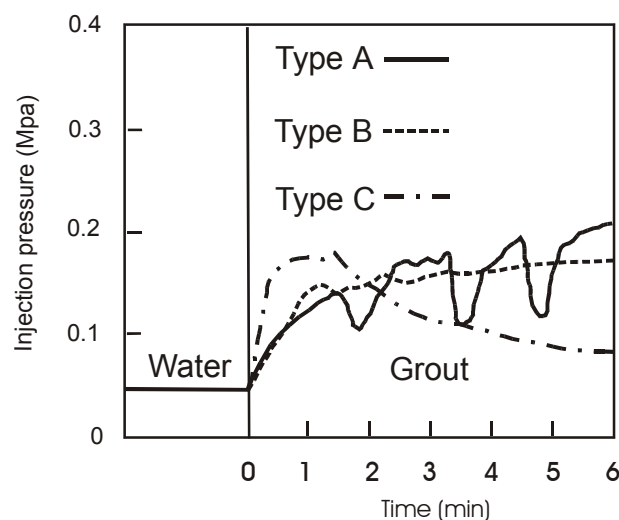


Bild 6.46: Einpressdruckverläufe (YONEDA et. al. 1996)

Der Verlauf des Einpressdrucks unterscheidet sich somit erheblich von den in den eigenen Trichterversuchen gemessenen Injektionsdrücken, obwohl vergleichbare Versuchsmateria-

lien verwendet wurden. Allerdings wurde von MBONIMPA (1998) und MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998) ein Drahtkorb gegenüber der in den eigenen Versuchen und von MITTAG (2000) verwendeten Injektionsquelle in Form eines Kiesfilters verwendet. Es wurden daher Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Injektionsquellentypen und ansonsten gleichen Versuchsrandbedingungen durchgeführt. Die in Bild 6.47 dargestellten, an der Injektionsquelle gemessenen Druckverläufe zeigen deutlich die Auswirkungen der unterschiedlichen Quellentypen auf den Versuchsverlauf. Bei Verwendung eines Kiesfilters steigt der Injektionsdruck nahezu über die gesamte Versuchslaufzeit langsam und ohne größere Schwankungen an. Wird hingegen ein Drahtkorb als Injektionsquelle verwendet, so stellt sich analog zu den Ergebnissen von MBONIMPA (1998) und MÜLLER-KIRCHENBAUER et. al. (1998) ein Wechsel von starkem Druckanstieg und plötzlichem Druckabfall sowie ein gegen Ende des Versuchs absinkender Druck ein. Die maximal gemessenen Einpressdrücke an der Injektionsquelle entsprechen hierbei ungefähr den dreifachen der bei der Verwendung einer Kiesfilterinjektionsquelle gemessenen Werten. Diese maximalen Einpressdrücke an der Injektionsquelle von nahezu 10 bar legen auch unter der Berücksichtigung der bei Verwendung eines Kiesfilters bei erheblich geringeren Einpressdrücken beobachteten Injektionscracks den Verdacht nahe, dass die Durchgängigkeit des verwendeten Drahtkorbs zumindest zeitweise eingeschränkt war oder auch der Eintritt der verpressten Feinstbindemittelsuspension in das Porensystem durch eine Filterkuchenbildung im Grenzbereich zwischen Drahtkorb und Sand behindert wurde.

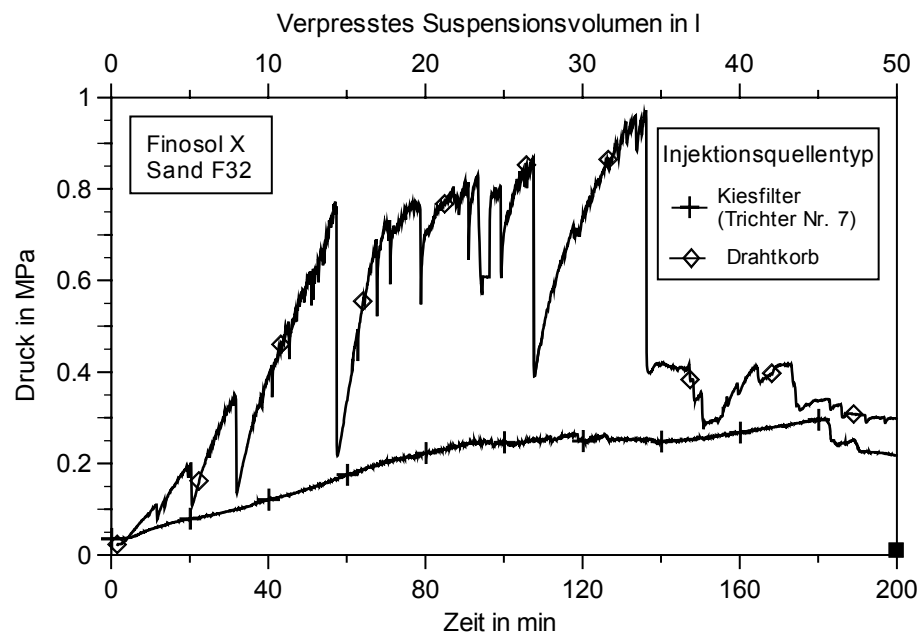


Bild 6.47: Einpressdrücke an der Injektionsquelle von Trichterversuchen mit unterschiedlichen Injektionsquellentypen und einem Wasser-Bindemittelverhältnis von 5,0 sowie einer Verpressrate von 0,25 l/min

Basierend auf einer Reihe von eindimensionalen Injektionsversuchen werden zudem von MBONIMPA (1998) verschiedene Einflussfaktoren auf die Filtrationsrate wie die Verteilung der Porengrößen, die Filtergeschwindigkeit der Feinstbindemittelsuspension und die Beladung des Sandkörpers mit Feinstbindemittel genannt und bestätigen damit die eigenen Ergebnisse.

TAUSCH und ECKER (2002) beschreiben ebenfalls die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche, bei denen jeweils das zweifache Porenvolumen des Versuchssandes durch die Feinstbindemittelsuspension ausgetauscht wurde. Die gemessenen Dichten der austretenden Suspension zeigen wie die eigenen Untersuchungen sowie die Versuche von MBONIMPA (1998) eine Verringerung der Filtrationsintensität bei einer Erhöhung der Verpressrate. Auch der Einfluss der Verteilung der Porengrößen auf das Abfiltern von Feinstbindemitteln wird bestätigt.

Auch FUJII et. al. (1996) beobachten bei eindimensionalen Injektionsversuchen sowie einem dreidimensionalen Injektionsversuch in einem Versuchstank filtrationsbedingte Reichweitenverkürzungen bei der Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen. Die eindimensionalen Injektionsversuche wurden mit konstanten Einpressdrücken und W/B-Werten der Feinstbindemittelsuspensionen zwischen 2,5 und 50 durchgeführt. Während bei einem W/B-Wert von 2,5 das Porenvolumen des Injektionskörpers annähernd dem verpressten Suspensionsvolumen entspricht, wird mit abnehmendem Bindemittelgehalt der Feinstbindemittelsuspensionen ein ansteigender Quotient aus verpresstem Suspensionsvolumen und dem Porenvolumen des erhärteten Verpresskörpers festgestellt.

In einem Versuchstank mit den Abmessungen von 4,0 m x 3,55 m x 4,2 m wurde eine Feinstbindemittelsuspension mit einem W/B-Wert von 10 mit einer Verpressrate von 10 l/min über einen Zeitraum von nahezu 9 Stunden in einen Sandkörper eingepresst. Das Verhältnis des Porenvolumen des erhärteten Verpresskörpers zum verpressten Suspensionsvolumens betrug nach Freilegung des erhärteten Injektionskörpers lediglich 0,25 und liegt damit erheblich unter der in den eigenen Versuchen bestimmten Größenordnung. Das geringe Verpresskörpervolumen kann jedoch auf den vergleichsweise geringen Bindemittelgehalt der Injektionssuspension und die mit der Injektionsreichweite exponentiell ansteigenden Volumenverluste zurückgeführt werden.

7 Theoretische Beschreibung der Versuchsergebnisse

7.1 Allgemeines

Für das Abscheiden von Trübstoffen bzw. Partikeln aus einer Suspension beim Durchströmen eines porösen Mediums können verschiedene Abscheide- bzw. Haftmechanismen verantwortlich gemacht werden, wie bereits in Kapitel 3 erläutert wurde. Mit der Dichte der nach dem Durchströmen des Porenvolumens austretenden Suspension bei eindimensionalen Injektionsversuchen sowie der Bindemittelverteilung in den abgebundenen Trichterinjektionskörpern liegen Informationen über die Wirksamkeit des Sandfilters bei eindimensionaler und kugelsymmetrischer Feinstbindemittelausbreitung vor. Jedoch lassen diese experimentellen Ergebnisse keine direkten Rückschlüsse auf den örtlich und zeitlich veränderlichen Einfluss einzelner Abscheidemechanismen zu. Bei makroskopischer Betrachtung der Tiefenfiltration auf der Basis des von IWASAKI (1937) vorgeschlagenen Ansatzes wird hingegen die Filterwirksamkeit summarisch durch einen Filterkoeffizienten und entsprechende Korrekturfunktionen beschrieben, ohne dass dabei zwischen den einzelnen Abscheidemechanismen unterschieden werden muss. Für konstante und linear veränderliche Filterwirksamkeiten konnten geschlossene Lösungen für die Konzentration C der strömenden Suspension und die Filterbeladung σ aufgestellt werden. Die Eignung solcher Filterfunktionen, die Feinstbindemittelverteilung innerhalb eines Injektionskörpers zu beschreiben, soll im Folgenden untersucht werden. Die Auswertung der eindimensionalen Injektionsversuche wurde dabei auf die Versuche beschränkt, bei denen das Porenvolumen dreifach durch das Verpressmittel ausgetauscht werden konnte.

Die Festlegung der Eingangsparameter der Filterfunktionen erfolgte durch die Auswertung der experimentellen Daten unter Anwendung statistischer Methoden. Regressionsanalysen liegt das Gauß'sche Prinzip der Minimierung der Abstandsquadrate zu Grunde. Mit Hilfe einer eigens programmierten Auswertungssoftware wurden die Eingangsparameter der Filterfunktionen solange variiert bis ein Minimum der Abstandsquadrate zwischen Mess- und Funktionswerten gefunden wurde. Auf die Abschätzung der Güte der mathematischen Annäherung wurde verzichtet, da zum einen nur eine begrenzte Anzahl von Messwerten vorlag, die darüber hinaus durch die indirekten Bestimmungen der Suspensionsdichten über Glühverluste einer gewissen Streuung unterliegen. Zum anderen wurden bei nahezu allen dreidimensionalen Injektionsversuchen Injektionscracks beobachtet, deren Auswirkungen auf die Bindemittelverteilung innerhalb der Injektionskörper durch die untersuchten Filterfunktionen nicht beschrieben werden können. Eine hohe Güte der statistischen Annäherung war also auch bei prinzipiell gegebener Eignung einer Filterfunktion, die Versuchsergebnisse abzubilden, von vornherein nicht zu erwarten.

7.2 Eindimensionale Injektionsversuche

7.2.1 Filtergesetz mit konstantem Filterfaktor

Bei der mathematischen Beschreibung der Tiefenfiltration wird zwischen der Konzentration bzw. dem Bindemittelgehalt der strömenden Suspension im Porensystem und dem örtlich abgetrennten Bindemittel unterschieden. Bei eindimensionaler Filterströmung unter Annahme eines konstanten Filterkoeffizienten $\lambda = \lambda_0$ beschreiben die Gleichungen 3.21 und 3.22 die Bindemittelkonzentration der strömenden Suspension $C(z)$ und die Filterbeladung $\sigma(z, \tau)$

$$C(z) = C_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot z}$$

$$\sigma(z, \tau) = \lambda_0 \cdot C_0 \cdot v_f \cdot \tau \cdot e^{-\lambda_0 \cdot z} .$$

Beispielhaft sind in Bild 7.1 die Verläufe der Bindemittelkonzentration und der Filterbeladung zu verschiedenen Zeitpunkten t dargestellt. Hierbei wurde der Filterkoeffizient zu $\lambda_0 = 0,1405 \text{ 1/m}$ gesetzt und ein W/B-Wert der Feinstbindemittelsuspension von 5,0 angenommen, aus dem sich eine Suspensionsdichte von $1,12 \text{ g/cm}^3$ sowie eine Bindemittelkonzentration von $C_0 = 0,18\bar{6} \text{ g/cm}^3$ ergibt. Aufgrund der stets gleichbleibenden Wirksamkeit des Filters ist die Bindemittelkonzentration $C(z)$ eine von der Zeit unabhängige Größe, während zumindest theoretisch die Filterbeladung mit fortlaufender Zeit anwächst.

Die Bindemittelkonzentration am Probenende $C(z=l=0,915\text{m})$ entspricht der Bindemittelkonzentration der aus der Prüfsäule austretenden Suspension, die mit

$$\rho_{\text{Susp}} = C(l) + \rho_w \cdot \left(1 - \frac{C(l)}{\rho_{\text{FBM}}} \right) \quad (7.1)$$

in die Suspensionsdichte ρ_{Susp} umgerechnet werden kann. Werden diese errechneten Suspensionsdichten über die Zeit aufgetragen, so können die Ergebnisse der theoretischen Lösungen gut den Ergebnissen der eindimensionalen Injektionsversuche gegenübergestellt werden, wie dies in Bild 7.2 gezeigt ist. Alle experimentell bestimmten Verläufe der Dichten der austretenden Suspension zeigen einen ähnlichen konvexen Verlauf, der sich einem Grenzwert unterhalb der Dichte der Ausgangssuspension annähert, wohingegen die Anwendung der Filterfunktion zu einem konstanten Verlauf der Dichte der austretenden Suspension führt. Die hier betrachteten Filterfunktionen erscheinen daher am ehesten geeignet, die nahezu konstante Wirksamkeit des Sandfilters nach einem mehrfachen Austausch des Porenvolumens durch das Verpressmittel zu beschreiben. Daher wurde auf eine statistische Auswertung der Injektionsversuche verzichtet und der Filterkoeffizient derart festgelegt, dass die errechnete Suspensionsdichte und der jeweils letzte Messwert übereinstimmen. Die auf diese Weise errechneten Filterkoeffizienten λ_0 sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Wie anhand der Verläufe der Dichten der austretenden Suspension zu erwarten war, wachsen die errech-

neten Filterkoeffizienten mit abnehmender Verpressrate und Filtergeschwindigkeit an. Im Verhältnis zu den beiden größeren untersuchten Verpressraten von 0,4 und 0,8 l/min ist jedoch bei einer Verpressrate von 0,2 l/min ein überproportionaler Anstieg des Filterkoeffizienten festzustellen.

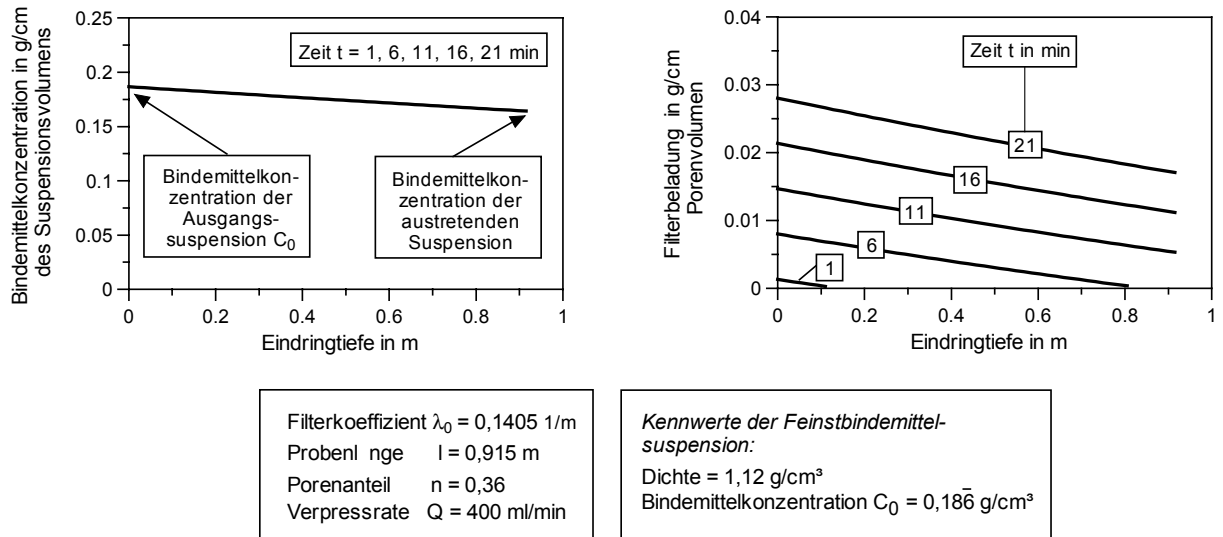


Bild 7.1: Beispiel der Bindemittelkonzentration, Filterbeladung und Dichte der austretenden Suspension bei eindimensionaler Suspensionsströmung und konstantem Filterkoeffizienten

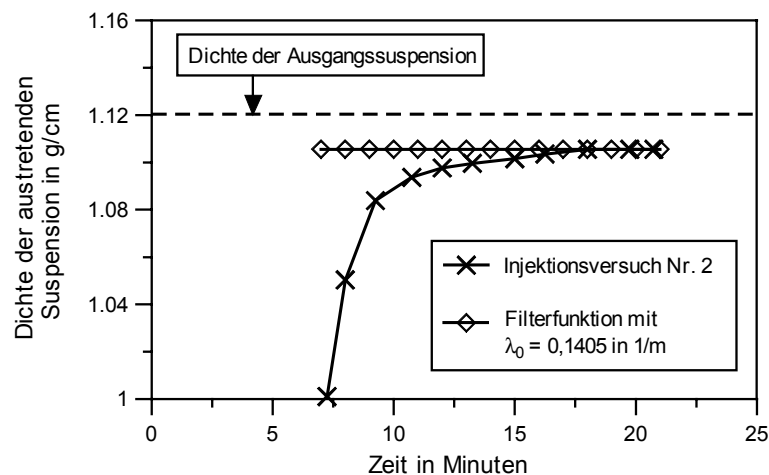


Bild 7.2: Gegenüberstellung der errechneten und gemessenen Verläufe der Dichte der austretenden Suspension bei eindimensionaler Suspensionsströmung und konstantem Filterkoeffizienten

Versuch Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B-Wert	Verpressrate in l/min	λ_0 in 1/m
1	Finosol F	4,0	0,2	0,145
2			0,4	0,129
3			0,8	0,112
4	Finosol F	5,0	0,2	0,203
5			0,4	0,140
6			0,8	0,100
10	Finosol U	5,0	0,2	0,248
11			0,4	0,204
12			0,8	0,161

Tab. 7.1: Bei der Anpassung der Filterfunktionen mit konstanter Filterwirksamkeit an die Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche errechnete Koeffizienten λ_0

7.2.2 Filtergesetz mit linear veränderlichem Filterfaktor

Wie die in Kapitel 7.2.1 beschriebene Auswertung der eindimensionalen Injektionsversuche zeigt, gelingt es bei Annahme einer unveränderlichen Wirksamkeit des Filters nicht, eine zufriedenstellende Annäherung an die Versuchsergebnisse zu erzielen. Vielmehr ist, wie die Versuchsergebnisse nahe legen, von einem mit zunehmender Beladung des Filters abnehmenden Filterkoeffizienten λ auszugehen. Ein veränderlicher Filterkoeffizient $\lambda = \lambda_0 \cdot f_\lambda$ setzt sich aus dem Filterkoeffizient in der Anfangsphase λ_0 und einer Korrekturfunktion f_λ zusammen. Wird im einfachsten Fall eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Filterkoeffizienten und der Filterbeladung angenommen, so lautet die Korrekturfunktion (Gl. 3.23)

$$f_\lambda = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}.$$

Erreicht die Filterbeladung die so genannte Sättigungsbiladung σ_s , wird der Filter vollständig unwirksam. Unter Verwendung der Gleichungen 3.24 und 3.25 kann nun die Bindemittelkonzentration und Filterbeladung bei eindimensionaler Filterströmungen berechnet werden.

Die Abschätzung der Koeffizienten λ_0 und σ_s erfolgte durch Auswertung der Versuchsdaten nach dem Prinzip der Minimierung der Fehlerquadrate. Die zu Beginn des Feststoffaustritts aus der Sandsäule stark ansteigenden Suspensionsdichten können, wie die Auswertung zeigte, nicht durch eine Filterfunktion mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten abgebildet werden. Hier wirken sich Verdünnungseffekte auf die Suspensionsdichten aus, die aus dem Einmischen von Porenwasser an der Injektionsfront resultieren und nicht mit Filterfunktionen

erfasst werden können. Daher wurden für die Auswertung der Versuche lediglich Suspensionsdichten nach dem 1,5-fachen Austausch des Porenvolumens durch das Injektionsmittel berücksichtigt. Bei der Auswertung des beispielhaft in Bild 7.3 dargestellten Injektionsversuchs 2 wurden auf diese Weise ein Filterkoeffizient $\lambda_0 = 0,333 \text{ 1/m}$ und eine Sättigungsbeladung $\sigma_s = 0,042 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. Mit einem linear von der Filterbeladung abhängigen Filterkoeffizienten kann somit eine erheblich bessere Übereinstimmung der errechneten und gemessenen Dichten der austretenden Suspension erzielt werden als bei Annahme eines konstanten Filterkoeffizienten.

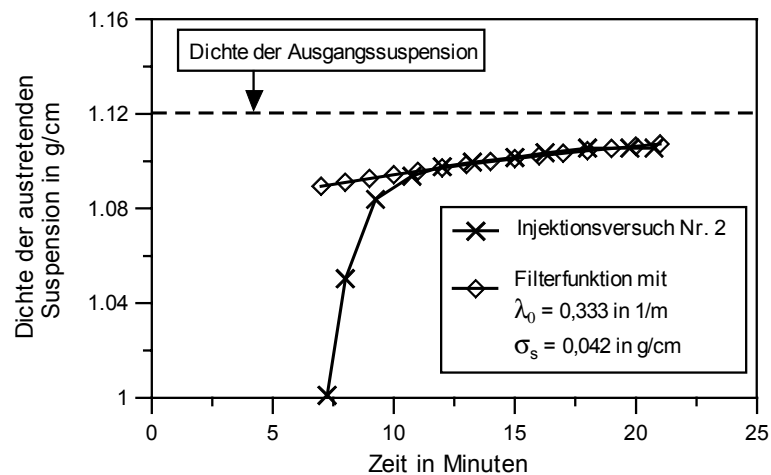


Bild 7.3: Gegenüberstellung der errechneten und gemessenen Verläufe der Dichte der austretenden Suspension bei eindimensionaler Suspensionsströmung und linear veränderlichem Filterkoeffizienten

Trotz der optisch vergleichsweise guten Übereinstimmung der errechneten und gemessenen Kurvenverläufe sind jedoch grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Grenzwerte, denen sich beide Verläufe annähern, festzustellen. Die Gleichungen 3.24 und 3.25 beinhaltet eine Sättigungsbeladung, ab der der Filter als unwirksam angesehen wird und keine Suspensionsfeststoffe mehr abgeschieden werden. Bei fortlaufender Filterströmung nähern sich dann die errechneten Dichten der austretenden Suspension in jedem Fall der Dichte der Ausgangssuspension an. Durch die Sättigungsbeladung σ_s und den Filterkoeffizienten λ_0 wird lediglich die Geschwindigkeit, mit der dieses geschieht, beschrieben. Die experimentellen Ergebnisse zeigen jedoch eher die Tendenz, sich an einen Grenzwert unterhalb der Dichte der Ausgangssuspension anzunähern. Eine kritische Beladung des Sandfilters in den Laborversuchen ist dagegen dann erreicht, wenn der Injektionsvorgang durch den mit zunehmender Filterbeladung ansteigenden Injektionsdruck abgebrochen werden muss oder, im dreidimensionalen Fall, der Suspensionstransport durch Crackadern stattfindet.

Bei der Anwendung der Filterfunktion mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten auf die Versuchsergebnisse wurden die in Tabelle 7.2 zusammengestellten Filterkoeffizienten λ_0 und

Sättigungsbeladungen σ_s bestimmt. Neben den errechneten Filterkoeffizienten nehmen jeweils auch die Sättigungsbeladungen bei einer Erhöhung der Verpressrate ab. Die überproportionale Zunahme der Filterwirksamkeit bei den mit der kleinsten Verpressrate von 0,2 l/min durchgeführten Versuchen im Vergleich zu den übrigen Versuchen ist hier wiederum festzustellen.

Versuch Nr.	Feinstbindemittelsorte	W/B-Wert	Verpressrate in l/min	λ in 1/m	σ_s in g/cm ³
1	Finosol F	4,0	0,2	0,382	0,133
2			0,4	0,273	0,048
3			0,8	0,187	0,014
4	Finosol F	5,0	0,2	0,556	0,143
5			0,4	0,333	0,042
6			0,8	0,212	0,015
10	Finosol U	5,0	0,2	0,715	0,192
11			0,4	0,389	0,065
12			0,8	0,203	0,027

Tab. 7.2: Bei der Anwendung von Filterfunktionen mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten auf eindimensionale Injektionsversuche errechnete Koeffizienten λ_0 und σ_s

7.3 Dreidimensionale Trichterversuche

7.3.1 Allgemeines

Im Unterschied zu den eindimensionalen Injektionsversuchen kann bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung nur aus den Glühverlusten abgebundener Injektionskörperproben auf den Bindemittelgehalt im Porensystem zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs rückgeschlossen werden. Zwischen der Bindemittelkonzentration der strömenden Suspension und dem bereits abgeschiedenen Bindemittelanteil kann hier nicht getrennt werden. Sollen die filtertheoretisch errechneten Bindemittelverteilungen den Ergebnissen von Trichterversuchen gegenübergestellt werden, so müssen jeweils die zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs errechneten Filterbeladungen und Bindemittelkonzentrationen, wie sie in den Poren vorliegen, addiert und in einer rechnerischen Suspensionsdichte zusammengefasst werden. Hierzu sind jedoch die errechneten Filterbeladungen zunächst durch den Porenanteil zu dividieren, da die Filterbeladung eine auf eine Volumeneinheit des Filters bezogene Größe ist, die sowohl den Porenanteil wie auch die Feststoffe umfasst.

7.3.2 Filtergesetz mit konstantem Filterfaktor

Wird eine gleichbleibende Wirksamkeit des Sandfilters und damit ein konstanter Filterfaktor angenommen, so wird die Konzentrationsverteilung $C(z,\tau)$ und die Filterbeladung $\sigma(z,\tau)$ bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung durch die Gleichungen 3.31 und 3.33 beschrieben. Die Bestimmung des Koeffizienten λ_k erfolgte durch statistische Auswertung der experimentell abgeschätzten Suspensionsdichten nach dem Prinzip der Minimierung der Abstandsquadrate. Mit den auf diese Weise ermittelten Filterkoeffizienten wurden anschließend Verläufe der Suspensionsdichten errechnet, in denen die Bindemittelkonzentration und die Filterbeladung zusammengefasst sind. Diese filtertheoretisch errechneten Verläufe der Suspensionsdichten sind in Bild 7.4 den experimentell abgeschätzten Verläufen gegenübergestellt. Eine gute Annäherung der filtertheoretisch errechneten Verläufe der Suspensionsdichten an die experimentell abgeschätzten Verläufe kann jedoch, wie zu erwarten war, nicht festgestellt werden. Insbesondere in den Randbereichen der Injektionskörper sind größere Abweichungen zwischen errechneten und experimentell abgeschätzten Suspensionsdichten zu beobachten, die eine Filterfunktion mit konstantem Filterfaktor ungeeignet erscheinen lassen, die Bindemittelverteilung in einem Trichterinjektionskörper zu beschreiben.

7.3.3 Filtergesetz mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten

Mit zunehmender Beladung eines Filters nimmt seine Wirksamkeit ab. Wird, wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, ein mit zunehmender Beladung von einer Anfangsgröße $\lambda = \lambda_0$ auf die Größe $\lambda = 0$ linear abnehmender Filterkoeffizient angenommen, so beschreiben die Gleichungen 3.35 und 3.36 die örtliche und zeitliche Bindemittelkonzentration und Filterbeladung bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung. Hierbei verliert der Filter seine Wirksamkeit, wenn die Beladung mit abgefilterten Partikeln der Sättigungsbeladung σ_s entspricht. Analog zu der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei der Auswertung der experimentellen Ergebnisse wurden die Sättigungsbeladung σ_s und der Filterkoeffizient in der Anfangsphase der Filtration λ_0 variiert bis sich ein Minimum der Abstandsquadrate zwischen theoretischer Lösung und experimentellen Ergebnissen ergab. Die Verläufe der mit diesen Koeffizienten errechneten Suspensionsdichten sind in Bild 7.5 den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Im Vergleich zu einer Filterfunktionen mit konstantem Filterkoeffizienten gelingt es mit einem linear von der Filterbeladung abhängigen Filterkoeffizienten in sehr viel besserem Maße, die Bindemittelverteilung innerhalb der Injektionskörper zu beschreiben. Lediglich bei den mit dem Feinstbindemittel Finosol X durchgeführten Versuchen weichen die errechneten Suspensionsdichteverläufe deutlicher von den experimentell bestimmten Verläufen ab. Der Einpressdruck an der Injektionsquelle sank jedoch bei diesen Versuchen jeweils nach zunächst stetigem Anstieg im Versuchsverlauf wieder ab. Daher ist hier von einer erheblichen Beeinflussung der Ausbreitung des Injektionsmittels durch Injektionscracks auszugehen, die nicht durch Filterfunktionen nachvollzogen werden kann.

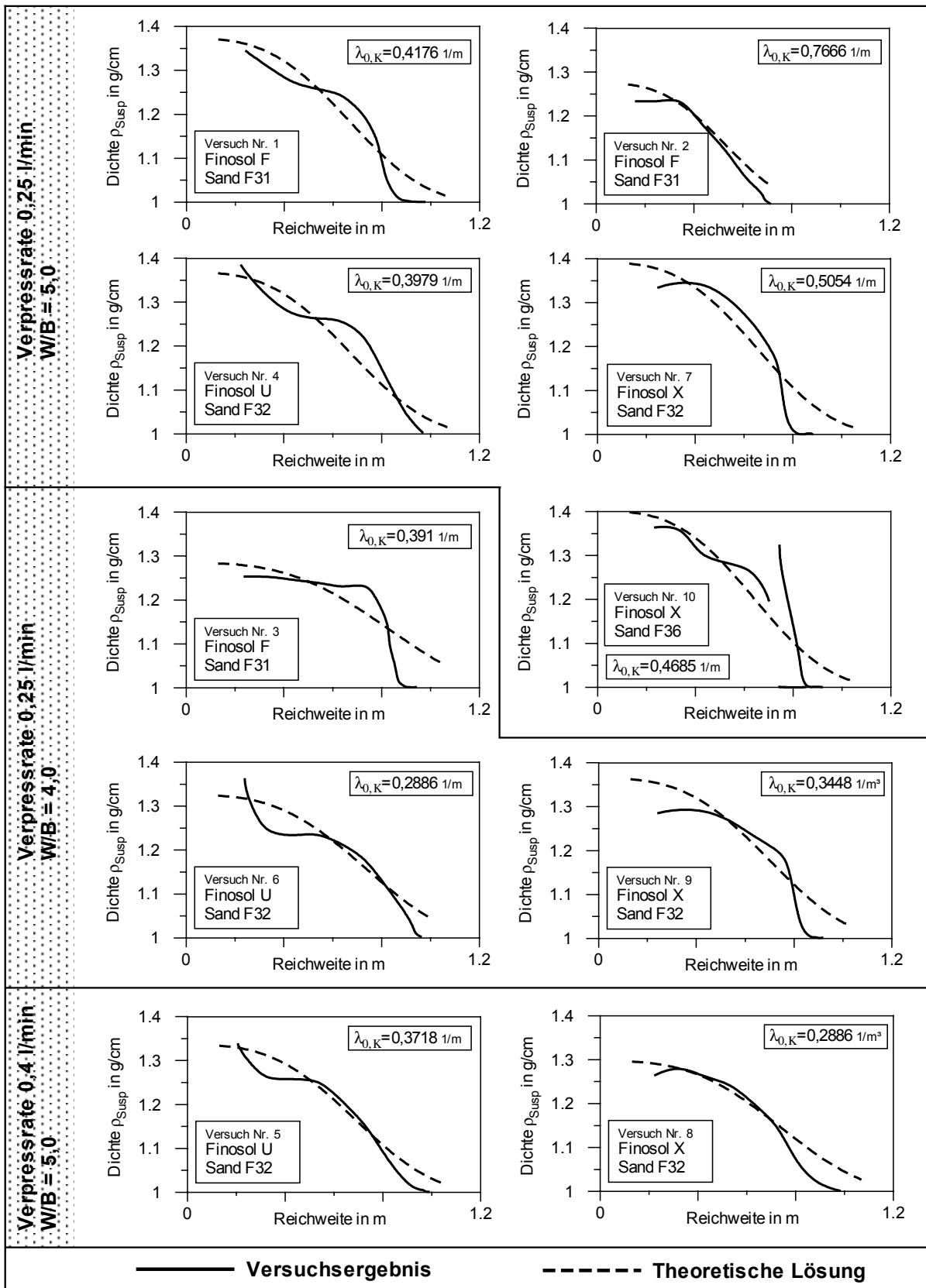


Bild 7.4: Gegenüberstellung der filtertheoretisch errechneten und gemessenen Verläufe der Suspensionsdichten bei kugelsymmetrischer Suspensionsströmung und einem konstanten Filterkoeffizienten

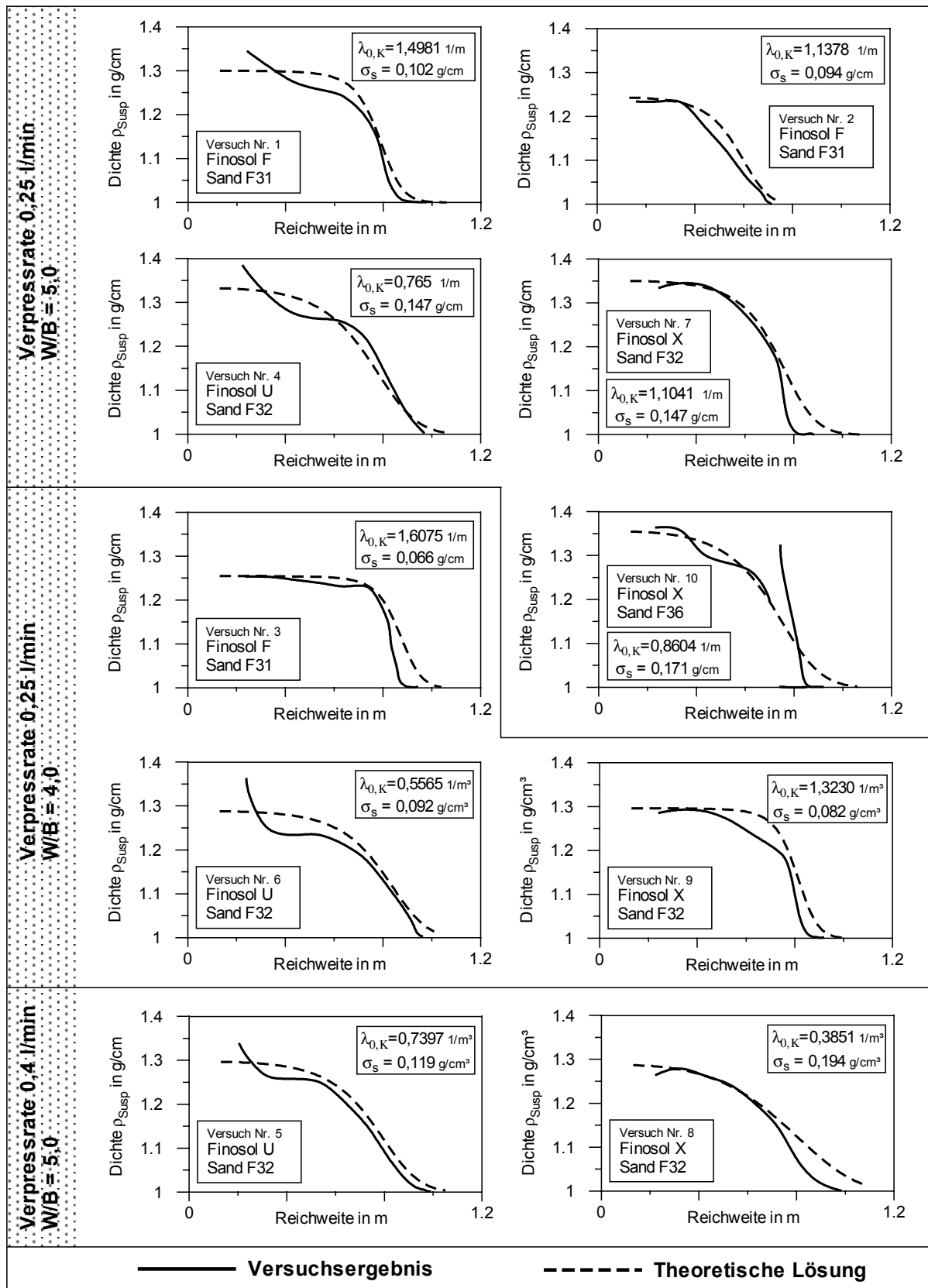


Bild 7.5: Gegenüberstellung der errechneten und gemessenen Verläufe der Suspensionsdichten bei kugelsymmetrischer Suspensionsströmung und einem linear veränderlichem Filterkoeffizienten

Bleiben hingegen die Auswirkungen von Injektionscracks, wie bei den mit den Feinstbindemitteln Finosol F und U durchgeführten Versuchen, von geringerer Bedeutung und eher auf den Bereich der Injektionsquelle beschränkt, so kann i.d.R. in den Randbereichen der Injektionskörper eine vergleichsweise gute Übereinstimmung von errechneten und experimentell bestimmten Suspensionsdichten erzielt werden. Damit gelingt es hier einerseits, die hinsichtlich der geforderten Abdichtungswirksamkeit kritischen Zonen gut einzuschätzen. Gleichzeitig wird aufgrund der mit zunehmender Entfernung von der Injektionsquelle anwachsenden Fläche der Kugelschalen auch die Verteilung eines Großteils des verpressten Feinstbindemittels richtig erfasst. Die Abweichungen der errechneten und experimentell bestimmten Suspensionsdichten in Quellennähe sind dagegen vermutlich auf den lokal begrenzten Einfluss von Injektionscracks zurückzuführen.

7.4 Iteratives Lösungsverfahren

Alternativ zu den geschlossenen Lösungen der eindimensionalen und kugelsymmetrischen Suspensionsausbreitung wird ein iteratives Lösungsverfahren beschrieben. Hiermit ist es möglich, die Eignung nahezu beliebiger Filterfunktionen zu untersuchen, für die z.B. keine geschlossenen Lösungen für die Konzentrationsverteilung und Filterbeladung existieren. Neben dem hier nachfolgend beschriebenen Anwendungsfall bietet sich diese Vorgehensweise, wie von IVES (1970) vorgeschlagen, auch für den Fall von geschichteten Filtern oder Filtern mit stark schwankenden Kornverteilungen an.

Die Injektionssäulen oder Injektionskugeln werden hierzu in Segmente unterteilt, deren Volumen und damit ihr Porenvolumen jeweils gleich sind. Gleichzeitig wird auch das zu verpressende Suspensionsvolumen in Teilvolumen ΔV unterteilt, die wiederum genau dem Porenvolumen der Einzelsegmente entsprechen. Aus der Multiplikation der Partikelkonzentration der Ausgangssuspension mit diesen Teilvolumen ΔV ist das Gewicht G_p der in der Teilmenge ΔV enthaltenen Partikel bekannt. Bei jedem Rechendurchlauf des iterativen Lösungsverfahrens wird nun an der Injektionsquelle das Partikelgewicht G_p eingesetzt und gleichzeitig alle zuvor eingesetzten Partikelgewichte jeweils zum nächstfolgenden Segment weitergereicht. Dies geschieht bis die Summe der in das quellennächste Segment eingesetzten Partikelgewichte G_p dem Gesamtgewicht des zu verpressenden Feinstbindemittels entspricht. Die Anzahl der Rechendurchgänge entspricht somit der Anzahl der Teilvolumen ΔV bzw. der Partikelgewichte G_p . Bei jedem Rechenschritt wird das in einem Segment zurückgehaltene von dem in das nächstfolgende Segment weitertransportierte Feinstbindemittel durch Multiplikation des Partikelgewichtes mit einem Filterkoeffizienten $\bar{\lambda}$ getrennt. Das jeweils abgeschiedene Partikelgewicht wird für jedes Segment aufsummiert. Der Filterkoeffizient kann als konstant oder auch als Funktion verschiedener Veränderlicher wie der Beladung, der Entfernung zur Injektionsquelle oder der Filtergeschwindigkeit gewählt werden und muss u.U. für jeden Rechenschritt und jedes Segment neu bestimmt werden. Nach dem Ende des Iterationsprozesses kann aus den Partikelgewichten in den Segmenten eine Verteilung der Suspensionsdichte errechnet werden, die den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt werden kann.

Die Genauigkeit des Rechenverfahrens steigt ebenso wie der Rechenaufwand mit zunehmender Anzahl der Segmente. Bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung hat es sich als hinreichend genau erwiesen wenn das zu verpressende Suspensionsvolumen in Teilvolumen von $\Delta V = 1$ l geteilt wird. Die Wahl deutlich kleinerer Teilvolumen führte bei erheblich vergrößertem Rechenaufwand zu keinen oder nur zu vernachlässigbar gering veränderten Rechenergebnissen. Zudem können sich bei allzu kleinen Teilvolumen auch Rundungsfehler des EDV-Systems negativ auf das Rechenergebnis auswirken. Damit ergeben sich bei der Auswertung der Trichterversuche je nach verpresstem Suspensionsvolumen zwischen 582 und 1942 Segmente.

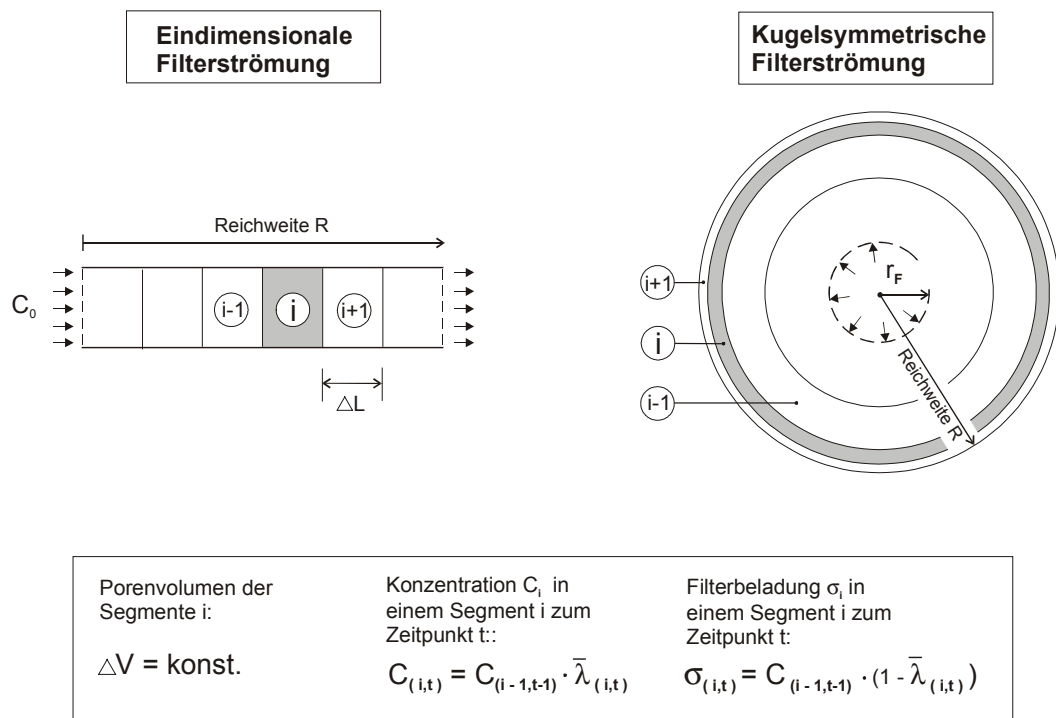


Bild 7.6: Prinzip des iteratives Lösungsverfahrens

Der Filterkoeffizient $\bar{\lambda}$ errechnet sich aus dem Filterkoeffizienten des partikelfreien Filters $\bar{\lambda}_{0,\Delta V}$ bei kugelsymmetrischer bzw. $\bar{\lambda}_{0,\Delta L}$ bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung und der Korrekturfunktion f_λ , mit der die Änderung der Filterwirksamkeit z.B. mit der Beladung beschrieben wird. Er lautet bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung

$$\bar{\lambda} = 1 - (1 - \bar{\lambda}_{0,\Delta V}) \cdot f_\lambda \quad (7.2)$$

sowie bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung

$$\bar{\lambda} = 1 - (1 - \bar{\lambda}_{0,\Delta L}) \cdot f_\lambda \quad (7.3)$$

Die Filterkoeffizienten $\bar{\lambda}$ bzw. $\bar{\lambda}_{0,\Delta L}$ und $\bar{\lambda}_{0,\Delta V}$ sind jedoch auf die Anzahl der Iterationsschritte abzustimmen, um bei der Wahl unterschiedlicher aber hinreichend geringer Teilvolumen ΔV jeweils die gleiche Bindemittelverteilung innerhalb des Injektionskörpers zu berechnen. Durch die Festlegung von Bezugsgrößen $L^* = 1$ m im eindimensionalen bzw. $V^* = 1$ m³ im kugelsymmetrischen Fall können die Filterkoeffizienten $\bar{\lambda}_{0,\Delta L}$ und $\bar{\lambda}_{0,\Delta V}$ in einen von der Anzahl der Iterationsschritte unabhängigen Koeffizienten $\bar{\lambda}_0$ überführt werden, in dem bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung

$$\bar{\lambda}_{0,\Delta L} = (\bar{\lambda}_0)^{\frac{\Delta L}{L^*}} \quad (7.4)$$

und bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung

$$\bar{\lambda}_{0,\Delta V} = (\bar{\lambda}_0)^{\frac{\Delta V}{V^*}} \quad (7.5)$$

gesetzt wird.

Wird beispielsweise analog zu Kapitel 7.2.2 und 7.3.3 ein linear von der Beladung abhängiger Filterkoeffizient angenommen, so ergibt sich der Filterkoeffizient $\bar{\lambda}$ bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung zu

$$\bar{\lambda} = 1 - \left(1 - (\bar{\lambda}_0)^{\frac{\Delta V}{V^*}} \right) \cdot (1 - \sigma/\sigma_s). \quad (7.6)$$

Durchgeführt wurde anhand des Trichterversuchs Nr. 1 eine vergleichende Anpassung des Dichteverlaufs über die Reichweite des Feinstbindemittels mit den geschlossenen Lösungen der Bindemittelkonzentration und der Beladung (Gl. 3.35 und 3.36) sowie dem iterativen Lösungsverfahren. Die in Bild 7.7 dargestellten Rechenergebnisse zeigen eine vollständige Übereinstimmung der geschlossenen und der iterativen Lösung. Die Filterkoeffizienten in der Anfangsphase $\bar{\lambda}_0$ und $\lambda_{0,K}$ unterscheiden sich jedoch bei beiden Rechenverfahren sowohl in der Größe als auch der Einheit.

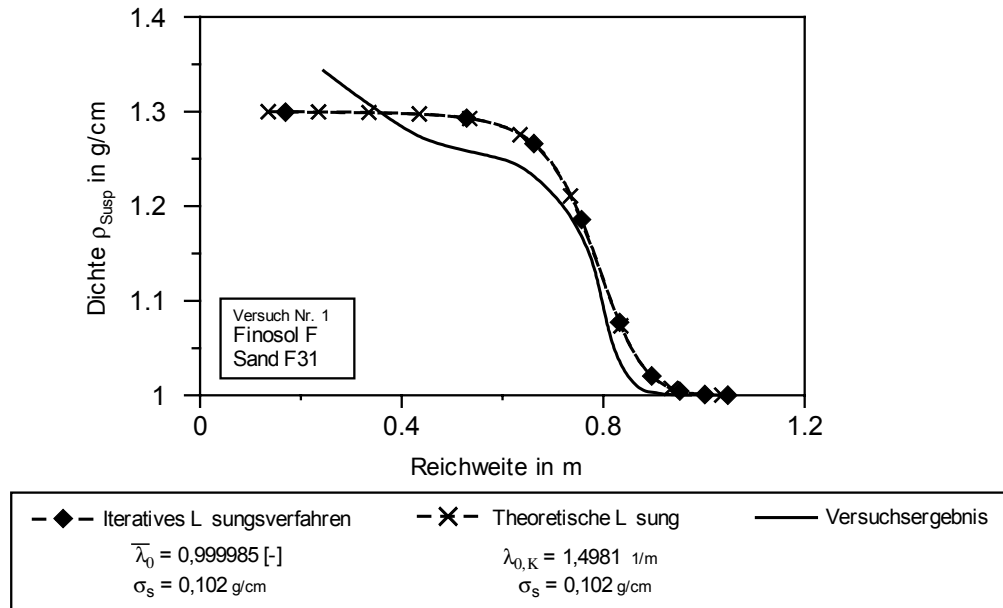


Bild 7.7: Vergleich der Ergebnisse der geschlossenen und der iterativen Lösungen mit einem linear von der Filterbelastung abhängigem Filterkoeffizienten

7.5 Diskussion und Bewertung der Anwendbarkeit von Filterfunktionen

Die Ergebnisse von eindimensionalen und Trichterinjektionsversuchen wurden durch Filterfunktionen mit konstanter und linear veränderlicher Filterwirksamkeit angenähert. Die Filterfunktionen mit konstantem Filterfaktor und einer somit stets unveränderten Wirksamkeit des Sandfilters erwiesen sich dabei als weitgehend ungeeignet, eine eindimensionale oder kugelsymmetrische Filterströmung zu beschreiben.

Auch von MITTAG (2000) wurden eindimensionale Injektionsversuche mit solchen Filterfunktionen unter Ansatz eines konstanten Filterfaktors ausgewertet. Hierbei wurde zunächst eine gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse und der theoretischen Auswertung festgestellt. Die Auswertung von MITTAG beschränkt sich jedoch auf die Verteilung des Feinstbindemittels in der Sandsäule zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs. Wird hingegen anhand der Dichte der aus der Sandsäule austretenden Suspension die veränderliche Wirksamkeit des Sandfilters mit der Filterfunktion nachvollzogen, so ist eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen Ergebnissen und filtertheoretischer Lösung bei Ansatz dieser vergleichsweise einfachen Filterfunktionen nicht mehr festzustellen.

Bei der Auswertung der eindimensionalen Injektionsversuche mit einer Filterfunktion unter Berücksichtigung eines linear veränderlichen Filterkoeffizientens ergaben sich lediglich in der Anfangsphase des Feststoffaustritts aus der Sandsäule größere Abweichungen zwischen experimentell und filtertheoretisch bestimmten Dichteverläufen. Im weiteren Versuchsverlauf

kam es zu einer immer besseren Annäherung beider Verläufe. Bei der Auswertung von Trichterversuchen mit dieser Filterfunktion waren hingegen erheblich größere Differenzen festzustellen, was auf verschiedene Einflussfaktoren zurückgeführt werden kann. Wird aus den experimentell abgeschätzten Dichteverläufen auf das in den Injektionskörpern vorhandene Feinstbindemittelgewicht rückgerechnet, so liegt dieses Gewicht zum Teil deutlich unter dem Gewicht des tatsächlich verpressten Feinstbindemittels. Ein deckungsgleicher Verlauf der filtertheoretisch errechneten und experimentell bestimmten Dichteverläufe kann somit nicht erreicht werden. Ursache dieser Gewichtsunterschiede können Ungenauigkeiten bei der indirekten Dichtebestimmung über Glühverluste oder nicht erfasste Feinstbindemittelreste im unverfestigten Injektionssand außerhalb der Injektionskörper sein. Gleichzeitig ist auch eine einsetzende Oberflächenfiltration an der Grenzfläche zwischen Filter und Injektionssand zu vermuten, durch die ein Teil des verpressten Feinstbindemittels schon vor dem Eintritt in den Versuchssand abgetrennt bzw. zurückgehalten wird. An der Injektionsquelle trifft eine Feinstbindemittelsuspension mit einem noch nicht reduzierten Feststoffgehalt auf den zu injizierenden Sand. Folglich kommt es an dieser Grenzfläche zuerst zu einer kritischen Verengung des Porensystems und einer einsetzenden Oberflächenfiltration sowie anschließend zu einem lokal begrenzten Aufsprengen des Korngerüsts durch den Injektionsdruck. Der vielfach beobachtete sägezahnartige Verlauf des Einpressdrucks an der Injektionsquelle deutet darauf hin, dass sich dieser Mechanismus über lange Zeit kontinuierlich wiederholen kann bis es eventuell zu einem großräumigen Aufsprengen des Korngerüsts kommt. In einem solchen Fall kann diese Grenzfläche auch noch weiter in den Injektionskörper hinein verschoben werden. Als Folge eines wiederholten Verstopfens und Aufsprengens des Porensystems kommt es zu einer Anreicherung des Feinstbindemittels im Übergangsbereich zum Injektionssand und damit zu einer Verringerung des in den Sandkörper eingetragenen Feinstbindemittelgewichtes. Auch der bei vielen Trichterversuchen beobachtete steile Anstieg der rechnerischen Suspensionsdichte zur Injektionsquelle hin ist vermutlich auf diese Vorgänge zurückzuführen.

Die Ausbildung eines Filterkuchens an der Oberfläche eines Filters wird auch von verschiedenen anderen Autoren beschrieben. HILL (1983) beschreibt mit Verweis auf IVES (1975a) und VAN RIESEN (1975) die Ausbildung einer Auflageschicht bzw. einer so genannten „Schmutzdecke“ an der Filteroberfläche, wenn eine Suspension mit hoher Feststoffkonzentration filtriert wird. Nach IVES (1975a) findet bei diesem Typ der Oberflächenfiltration eine Anlagerung der Partikel auf den Oberflächen der Filterkörner statt. Diese Anlagerung setzt sich von den Kornoberflächen an der Grenzfläche des Filters ausgehend an den Wandungen der Porenkanäle fort, wodurch zumindest diejenigen mit geringem Porenkanaldurchmesser verengt werden. Als Folge wird eine durchbrochene Auflageschicht genannt, deren Öffnungen mit darunter liegenden Porenöffnungen vergleichsweise großen Durchmessers in Kontakt stehen und über die weiterhin Partikel in den Filter eingetragen werden können. Auch von IVES (1991) wird mit Verweis auf experimentelle Ergebnisse von BAYLIS (1937) sowie BAUMANN und IVES (1987) dieses Phänomen bestätigt. Zur Untersuchung der Selbstdichtung von Gewässersohlen wurde von VAN RIESEN (1975) Quarzmehl mit verschiedenen Konzentrationen in Quarzsande eingespült. An Versuchen mit vergleichs-

weise hoher Konzentration des Quarzmehls wurde beobachtet, dass die Porenräume des Quarzsandes von der Oberfläche beginnend aufgefüllt werden. Über transportgünstige Porenkanäle mit geringen Ablagerungsmöglichkeiten wurde jedoch weiter Feststoff in den Sandfilter eingetragen.

Allerdings kann eine Porenengstelle auch dann blockiert werden, wenn die größten Suspensionspartikel prinzipiell jede Porenengstelle passieren können. Dies ist beispielsweise möglich, wenn mehrere Partikel gleichzeitig auf die Engstelle treffen und sich hier verkeilen (IVES 1970 und 1975a). Von SCHULER und BRAUNS (2000) wurde auf der Basis eines Porennetzwerkmodells ein Injektionskriterium aufgestellt, bei dem eine charakteristische Partikelgröße zu einer charakteristischen Korngröße des Filters ins Verhältnis gesetzt wird. Grundlage dieses Kriteriums ist die Annahme, dass die Injizierfähigkeit gegeben ist, wenn trotz Blockade einzelner Porenkanäle durch abgefilterte Partikel einige durchgehende Fließkanäle erhalten bleiben. Der Feststoffeintrag findet dann analog zu den von IVES (1975a), VAN RIESEN (1975), BAYLIS (1937) sowie BAUMANN und IVES (1987) beschriebenen experimentellen Beobachtungen durch die verbliebenen Porenkanäle mit strömungsgünstigem Querschnitt statt.

Die bei eindimensionalen Injektionsversuchen festgestellte anfänglich große Abweichung der experimentell und theoretisch bestimmten Dichteverläufe kann durch eine Vermischung der Suspension mit dem Porenwasser an der Injektionsfront oder auch durch eine erhöhte Wirksamkeit des partikelfreien Filters zu Versuchsbeginn verursacht sein, die bei den untersuchten theoretischen Lösungen nicht berücksichtigt werden kann. Hierbei sind weiterhin die Einwirkungen von Siebmechanismen nicht auszuschließen, die zu Beginn des Feststoffeintrags in den Filter zu einer Reduktion des Anteils der am Partikeltransport beteiligten Poren führen. Läuft der Feststofftransport jedoch über eine ausreichende Anzahl von transportgünstigen Porenkanälen weiter, reduziert sich auch die anfänglich hohe Filtereffektivität des Filters wieder.

Filterfunktionen mit einer Sättigungsbeladung implizieren die vollständige Unwirksamkeit des Filters, wenn ein kritischer Feinstbindemittelgehalt erreicht wird. Ein maximaler Feinstbindemittelgehalt im Porensystem, der sich aus der Addition der Sättigungsbeladung und dem Feststoffgehalt der Ausgangssuspension zusammensetzt, kann somit theoretisch nicht überschritten werden. Werden hingegen durch Injektionscracks Hohlräume geschaffen, in denen zusätzlich Feinstbindemittel abgelagert wird, so kann der Bindemittelgehalt örtlich stark anwachsen. Eine gute Übereinstimmung der filtertheoretischen Lösung mit den Versuchsergebnissen ist dann nicht mehr zu erwarten.

Mit dem vorgestellten iterativen Lösungsverfahren ist es möglich, nahezu beliebige Filterfunktionen anzuwenden, für die z.B. keine geschlossenen Lösungen existieren. Durch die Anwendung komplexerer Filterfunktionen ist jedoch nicht zwangsläufig eine bessere Annäherung an die Versuchsergebnisse zu erwarten. Verantwortlich hierfür sind die Einflüsse von Injektionscracks sowie die nicht endgültig geklärte Differenz zwischen dem im Injektionskörper aufgefundenen und dem tatsächlich verpressten Feinstbindemittelgewicht, die einer

guten Übereinstimmung von Versuchsergebnissen und filtertheoretischen Berechnungen entgegenstehen. Die Anwendung des iterativen Verfahrens mit EDV-Systemen bietet jedoch weitere verfeinerte Möglichkeiten der Versuchsauswertung, da auch komplexere Ansätze der Korrekturfunktion f_λ verwendet werden können, für die keine geschlossenen Lösungen der Differentialgleichungen existieren. Um jedoch solche vom Ergebnis her praxisnähere Simulationsmodelle umsetzen zu können, sind eine Vielzahl weiterer Injektionsversuche mit unterschiedlichen Feinstbindemittelsorten, W/B-Werten, Sanden, Lagerungsdichten, Verpressraten und Verpressvolumen notwendig, die bislang nicht vorliegen.

Bei guter Annäherung einer Filterfunktion an das Ergebnis eines dreidimensionalen Injektionsversuchs oder auch einer in situ durchgeführten Probeinjektion bieten sich vielfältige Auswertungsmöglichkeiten an, wie sie beispielhaft in Bild 7.8 dargestellt sind. Hier sind zunächst die Ergebnisse der mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 durchgeführten Trichterversuche Nr. 1 und 2 sowie der mit einer Filterfunktion mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten errechneten Suspensionsdichteverläufe dargestellt. Die Trichterversuche wurden unter ansonsten gleichen Randbedingungen mit Verpressvolumen von 15 l und 46,5 l durchgeführt. Als Filterkoeffizient λ_0 und Sättigungsbeladung σ_s wurden die bei der Anpassung an den mit einem Verpressvolumen von 46,5 l durchgeführten Trichterversuch bestimmten Werte übernommen. Mit der Filterfunktion ist es nun möglich, die Verläufe der rechnerischen Suspensionsdichten für verschiedene Verpressvolumen zu berechnen. Die in Bild 7.8 angegebenen Verpressvolumen beziehen sich auf eine Vollkugel. Als Injektionsquelle wurde eine kugelförmige Austrittsfläche mit einem Radius von 0,05 m angenommen. Trotz der eingeschränkten Übereinstimmung von experimentell bestimmten und filtertheoretisch errechneten Dichteverläufen ist festzustellen, dass Randzonen mit reduziertem Bindemittelgehalt auch bei geringen Verpressvolumen bzw. Injektionsreichweiten auftreten. Um auch in den Randbereichen der Injektionskörper die erforderliche Abdichtungswirkung zu erzielen, wäre es notwendig, den Bindemittelgehalt der Injektionssuspension soweit zu erhöhen, dass auch der durch Filtration reduzierte Bindemittelgehalt in den Reichweitenendpunkten zu den geforderten Durchlässigkeitsbeiwerten führt. Die untersuchten Filterfunktionen können hier als Ergänzung zu dreidimensionalen Injektionsversuchen bei der Wahl des Bindemittelgehaltes der Injektionssuspension und der Injektionsreichweite angewendet werden.

An der Injektionsfront wird die Feinstbindemittelsuspension fortlaufend ausgedünnt. Sinkt der Bindemittelgehalt unter die für eine Verfestigung erforderliche kritische Größe bzw. den Mindestbindemittelgehalt, so ergeben sich Reichweitenverluste. Dieser Mindestbindemittelgehalt der Injektionssuspension kann näherungsweise mit den an den Rändern der Injektionskörper aus Trichterversuchen bestimmten rechnerischen Suspensionsdichten gleichgesetzt werden. Die Unterscheidung zwischen unverfestigten und verfestigten Sandbereichen erfolgte im experimentellen Versuchsprogramm, indem die Oberfläche der Injektionskörper mit Hilfe eines schwachen Wasserstrahls freigespült wurde. Als Mittelwert aus allen drei mit dem Feinstbindemittel Finosol F und dem Sand F 31 durchgeführten Trichterversuchen ergab sich ein Mindestbindemittelgehalt von 0,196 Gew.-% der Injektionssuspension bis zu

der eine Verfestigung des Sandes eintritt. Dieser Mindestbindemittelgehalt der Verfestigung führt jedoch nur auf rechnerische Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} in einer Größenordnung von etwa 1×10^{-5} m/s. Aus den mit verschiedenen Suspensionsvolumen errechneten Dichteverläufen lassen sich nun mit festgelegtem Mindestbindemittelgehalt auch Volumen-Verlust-Kurven analog zu den in Bild 6.24 dargestellten Ergebnissen der Trichterversuche ermitteln.

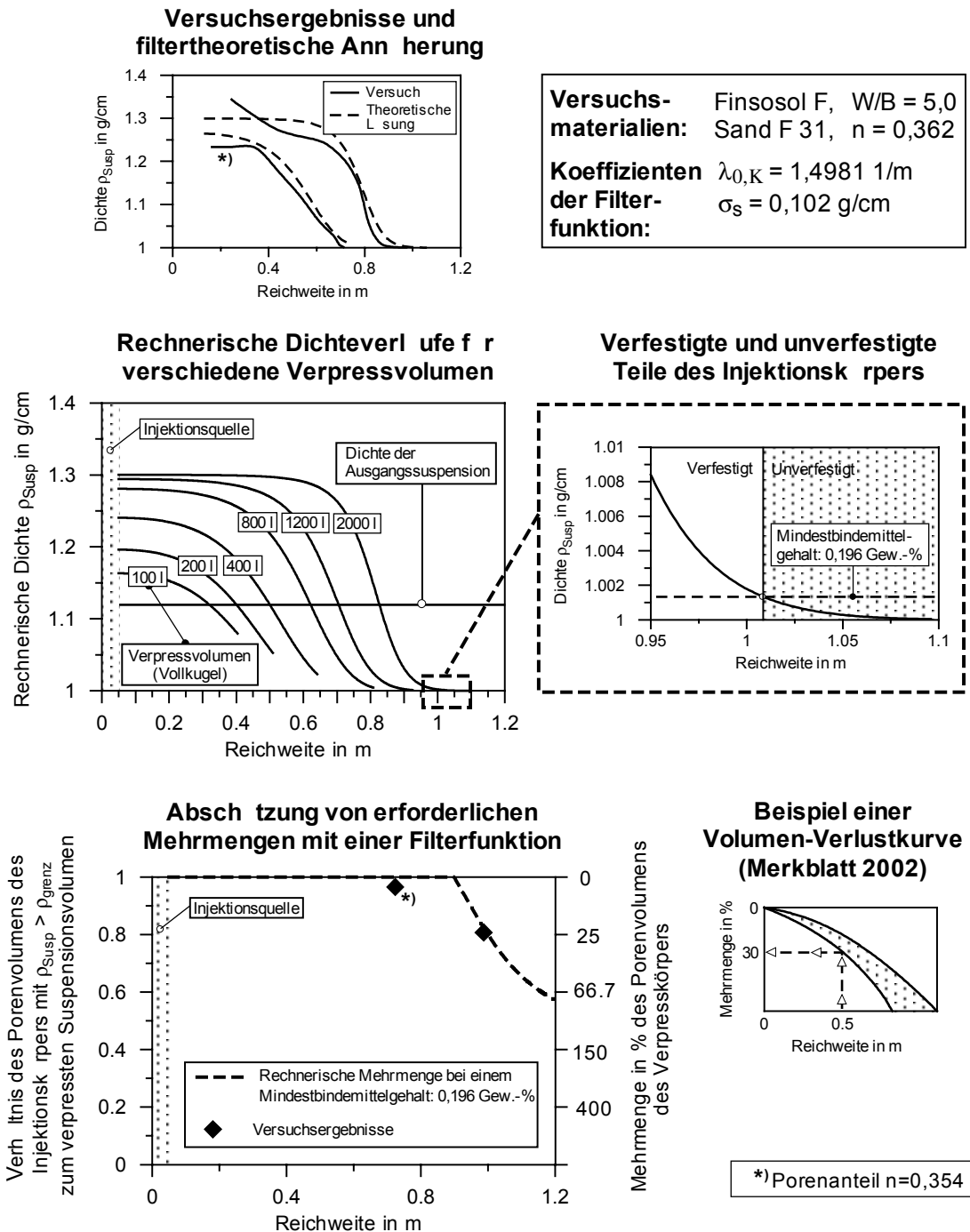


Bild 7.8: Beispiel für eine Auswertung von Injektionsversuchen mit einer Filterfunktion mit linear veränderlichem Filterkoeffizienten

Rechnerisch ergeben sich Volumenverluste bzw. zu verpressende Mehrmengen erst ab einer Injektionsreichweite von ca. 0,9 m, wenn an der Injektionsfront die rechnerische Suspensionsdichte unter die Grenzdichte für eine Verfestigung des Korngerüsts sinkt. Trotz der zuvor beschriebenen eingeschränkten Übereinstimmung von experimentell und filtertheoretisch bestimmten Dichteverläufen ergeben sich hier nur geringe Abweichungen der errechneten Verlustkurve von den Ergebnissen der Trichterversuche. Der Verlauf der Volumen-Verlustkurve unterscheidet sich hingegen deutlich von dem im MERKBLATT (2002) dargestellten Beispiel, bei dem von einer von der Injektionsquelle an exponentiell anwachsenden Verlustkurve ausgegangen wird. Wird ein solcher Verlauf der Volumen-Verlustkurve nach MERKBLATT (2002) angenommen, so kann dies u.U. zu einer Fehleinschätzung der Injektionsreichweite bzw. der zu verpressenden Mehrmenge führen. Während in Quellennähe die Reichweitenverkürzung vermutlich überschätzt wird, kann es bei größeren Reichweiten jedoch auch zu einer Unterschätzung der Reichweitenverkürzung kommen.

Neben der Ermittlung einer Volumen-Verlustkurve kann eine Filterfunktion bei hinreichend guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen auch angewendet werden, um zu überprüfen, in welchem Abstand zur Injektionsquelle die geforderte Dichtigkeit des Injektionskörpers vermutlich nicht mehr gegeben sein wird. Hierzu muss der für das Erreichen des geforderten Durchlässigkeitsbeiwertes erforderliche Bindemittelgehalt jedoch zuvor über Durchlässigkeitsuntersuchungen an Injektionsproben mit bekanntem Bindemittelgehalt bestimmt werden. Durch verschiedene Rechenläufe mit variierten Verpressvolumen ist dann eine Optimierung der Injektionsreichweite auch aus abdichtungstechnischer Sicht möglich.

Wird beispielsweise der von KUTZNER (1991) mit $k_{10} = 5 \times 10^{-7}$ m/s angegebene, mit den bisher eingesetzten Injektionsmitteln üblicherweise erzielbare Durchlässigkeitsbeiwert von Dichtsohlen als Kriterium für die Unterscheidung zwischen dem ausreichend und nicht ausreichend abgedichteten Anteil eines Injektionskörpers herangezogen, können analog zu der in Bild 7.8 dargestellten Volumen-Verlustkurve der Endreichweite auch entsprechende Kurven für die Abdichtungsreichweite bestimmt werden. Dargestellt ist eine solche Verlustkurve der Abdichtungsreichweite beispielhaft in Bild 7.9. Hierzu wurde zunächst anhand der Bilder 6.1 und 6.27 der für das Erzielen eines Durchlässigkeitsbeiwertes $k_{10} = 5 \times 10^{-7}$ m/s erforderliche Mindestanteil des Feinstbindemittels in der Injektionssuspension abgeschätzt, der in diesem Beispiel 17,982 Gew.-% beträgt. Demgegenüber beträgt der für eine Verfestigung erforderliche Mindestanteil des Feinstbindemittels in der Suspension, wie zuvor erläutert wurde, für das betrachtete Feinstbindemittel Finosol F und den Sand F 31 lediglich 0,196 Gew.-%. Für das ausgewählte Beispiel ist nach diesem Verfestigungskriterium eine Mehrmenge an Suspension zur Kompensation von Volumenverlusten erst dann erforderlich, wenn die Verfestigungsreichweite mehr als ca. 0,88 m betragen soll. Randzonen mit einem Durchlässigkeitsbeiwert über der definierten Grenze von $k_{10} = 5 \times 10^{-7}$ m/s ergeben sich hingegen schon ab einer Endreichweite größer als ca. 0,24 m. Zur Vermeidung der nicht ausreichend abgedichteten Randzonen wären somit entweder Injektionsreichweiten von max.

0,24 m zu wählen oder der Feinstbindemittelgehalt der Injektionssuspension unter Berücksichtigung der angestrebten Endreichweite entsprechend zu erhöhen.

Im Gegensatz zu den eindimensionalen Injektionsversuchen können Trichter- oder andere dreidimensionale Injektionsversuche nur mit einem erheblichen Kosten- und Zeitaufwand durchgeführt werden. Während sich eindimensionale Injektionsversuche zum Nachweis der prinzipiellen Injizierfähigkeit als gut geeignet erwiesen haben, ist es nur sehr eingeschränkt möglich, aus ihnen auf die Ausbreitung einer Feinstbindemittelsuspension im dreidimensionalen Fall zu schließen. Die bei der Auswertung von eindimensionalen und Trichterinjektionsversuchen bestimmten Filterkoeffizienten und Sättigungsbeladungen sind in Tabelle 7.3 gegenübergestellt. Aus den vorliegenden Daten kann jedoch eine unmittelbare Abhängigkeit zwischen den Ergebnissen der Versuchstypen nicht hergeleitet werden, so dass dreidimensionale Injektionsversuche im Labor oder Probeinjektionen in situ für eine genaue Einschätzung der Feinstbindemittelausbreitung im Untergrund ohne Alternative bleiben. Bei der Vorauswahl einer geeigneten Feinstbindemittelsuspension können eindimensionale Injektionsversuche jedoch wertvolle Dienste leisten.

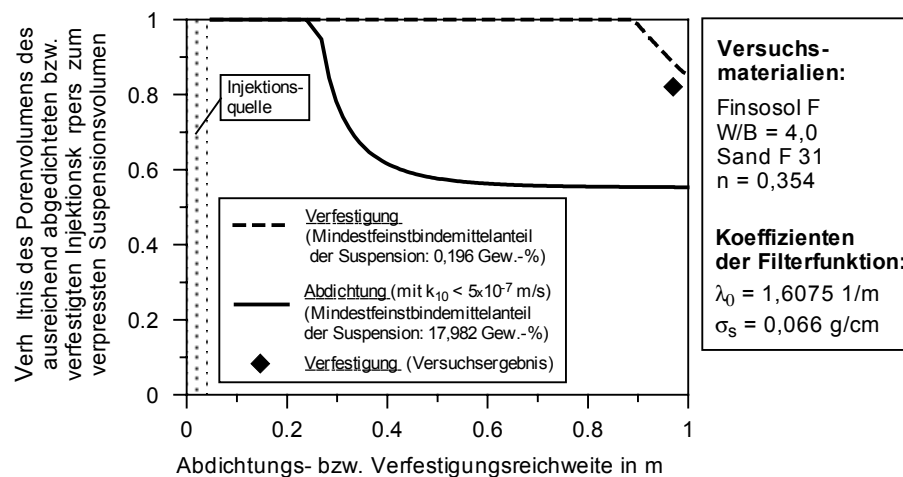


Bild 7.9: Beispiel von Volumen-Verlustkurven der Verfestigung und der Abdichtung (mit $k_{10} < 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)

Die bei der Auswertung der eindimensionalen Injektionsversuche mit einer Verpressrate $Q = 0,2 \text{ l/min}$ bzw. einer Filtergeschwindigkeit $v_f = 4,24 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ bestimmten Filterkoeffizienten und Sättigungsbeladungen kommen den bei der Auswertung der Trichterversuche bestimmten Werten am nächsten. Im Rahmen von Eignungsprüfungen erscheint es daher sinnvoll, eindimensionale Injektionsversuche mit Filtergeschwindigkeiten in der zuvor genannten Größenordnung durchzuführen, da hier auch die Filtrationsauswirkungen am deutlichsten zu beobachteten sind. Die Wahl weiter verringerter Filtergeschwindigkeiten wird hingegen i.d.R. kaum möglich sein, da eine Verpressrate von $0,2 \text{ l/min}$ bereits am unteren Rand des mit den üblicherweise verwendeten Pumpentypen realisierbaren Leistungsspektrums liegt.

Verpressrate in l/min	Finosol F, W/B=5,0, Sand F 31				Finosol U, W/B=5,0, Sand F32			
	Eindimensionale Injektions- versuche			Trichter- versuch	Eindimensionale Injektions- versuche			Trichter- versuch
	0,2	0,4	0,8	0,25 *)	0,2	0,4	0,8	0,25 *)
λ_0 in 1/m	0,556	0,333	0,212	1,4981 / 1,1378	0,715	0,389	0,203	0,765
σ_s in g/cm ³	0,143	0,042	0,015	0,102 / 0,094	0,192	0,065	0,027	0,147

*) Entspricht einer rechnerischen auf eine Vollkugel bezogenen Rate von 9,7 l/min

Tab. 7.3: Bei der Auswertung von eindimensionalen und Trichterinjektionsversuchen mit einer linear veränderlichen Filterfunktion bestimmte Filterkoeffizienten und Sättigungsbeladungen

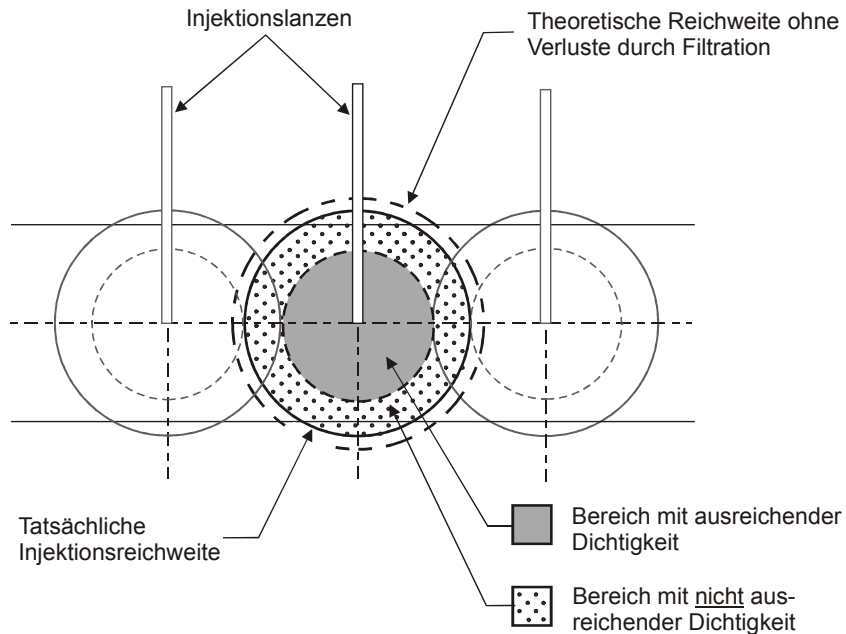
8 Fazit und Ausblick

Wie die experimentellen Untersuchungsergebnisse sowie die vorgestellten theoretischen Lösungsansätze zeigen, kommt es aufgrund von Filtrationsmechanismen zu einer inhomogenen Feinstbindemittelverteilung in den Injektionskörpern mit einer Anreicherung des Feinstbindemittels im Kern sowie einer Verringerung der Bindemittelgehalte in den Randzonen. Hieraus resultieren auch örtlich unterschiedliche Durchlässigkeiten des Injektionskörpers gegenüber Wasser, die sich stark auf das in einen Dichtungstrog eintretende Wasservolumen auswirken. Wie in Bild 8.1 dargestellt ist, können die Injektionskörper anhand des Gehaltes an Feinstbindemittel im Porensystem und der daraus resultierenden Durchlässigkeit in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden:

- Im Kern der Injektionskörper reicht der Feinstbindemittelgehalt aus, um den an den abgebundenen Injektionskörper in der Baupraxis üblicherweise gestellten Dichtigkeitsanforderungen gerecht zu werden.
- In der zweiten, außen anschließenden Zone bzw. Schale ist der Feinstbindemittelgehalt noch ausreichend, um eine Verfestigung des Injektionssandes zu bewirken. Die an die Durchlässigkeit gestellten Mindestanforderungen werden jedoch nicht mehr erreicht. Die äußere Grenze dieser Zone entspricht der tatsächlichen Injektionsreichweite.
- In der dritten, äußersten Schale des Injektionskörpers finden sich nur noch extrem geringe Gehalte an Feinstbindemittel, die auch für eine wirksame Verfestigung des Korngerüstes nicht mehr ausreichen. Das tatsächliche Injektionskörpervolumen fällt somit geringer aus, als es aufgrund des verpressten Suspensionsvolumen zu erwarten gewesen wäre.

Die Kompensation der beispielsweise auch im MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINDEMITTELN IN LOCKERGESTEIN (2002) beschriebenen, filtrationsbedingten Verpresskörpervolumen- bzw. Reichweitenverluste zur Vermeidung unverpresster Zwickelbereiche durch eine entsprechende Mehrmenge an Injektionssuspension reicht somit allein nicht aus, um in jedem Fall den Erfolg von Abdichtungsinjektionen mit Feinstbindemitteln sicherzustellen. Vielmehr gilt es, in der Praxis den Bindemittelgehalt der Injektionssuspension sowie die angestrebte Injektionsreichweite derart festzulegen, dass bindemittelärmere Randzonen, die den Dichtigkeitsanforderungen nicht genügen, entweder vermieden werden oder diese durch die gegenseitige Durchdringung zweier benachbarter Injektionskörper abgedichtet werden. Eine solche äußere Durchdringung der Injektionskörper kann jedoch nur stattfinden, wenn die Injektionen „frisch-in-frisch“ erfolgen oder die Bindemittelkonzentration im betreffenden Bereich aus den primär hergestellten Injektionskörpern derart gering ist, dass die Injizierfähigkeit des Korngerüstes für eine wirksame Sekundärinjektion weiterhin gegeben ist. Über den Erfolg solcher Injektionen „frisch-in-frisch“ bzw. die hierbei einzuhaltenden maximalen Zeitabstände und die erzielbaren Eigenschaften der Übergangsbereiche besteht jedoch noch

Forschungsbedarf. Weiterhin erscheint auch eine Veränderung der Zusammensetzung der Feststoffe der bei Abdichtungsinjektionen eingesetzten Injektions Suspensionen, bei denen ein Teil der hydraulisch aktiven Bestandteile des Feinstbindemittels durch inerte Füllstoffe ausgetauscht wird, in Kombination mit insgesamt höheren Suspensionsdichten



untersuchenswert.

Bild 8.1: Schnitt durch eine mit Feinstbindemitteln ausgeführte Dichtungssohle mit Zonen unterschiedlicher Abdichtungseigenschaften

Eine Injektionsabfolge, bei der benachbarte Injektionskörper stets in geringen zeitlichen Abständen hergestellt werden, ist baupraktisch schwer umzusetzen. Sollen, um den Erfolg der Injektionsmaßnahmen in jedem Fall sicherzustellen, Randzonen mit erhöhter Durchlässigkeit ausgeschlossen werden, so sind erheblich geringere Injektionsreichweiten sowie höhere Bindemittelkonzentrationen anzusetzen, als sie derzeit in der Praxis gebräuchlich sind und im experimentellen Untersuchungsprogramm verwendet wurden. Weiterhin sollte eine Verdichtung des Baugrundes beim Einbringen der Injektionslanzen nach Möglichkeit vermieden werden, da hierdurch die Filtrationsintensität insbesondere in den ohnehin kritisch einzuschätzenden Bereichen nahe der Injektionsquelle weiter gesteigert wird. Das Einrütteln der Injektionslanzen kann sich in diesem Zusammenhang als nachteilig gegenüber der Anwendung von Bohrverfahren erweisen.

Eine Abschätzung der Bindemittelverteilung innerhalb eines Injektionskörpers bzw. der tatsächlichen Injektionsreichweite auf der Basis der vorgestellten theoretischen Lösungsansätze gelingt ebenso nur in Ansätzen wie auf der Basis so genannter

eindimensionaler Injektionsversuche, wie sie üblicherweise zum Nachweis der Injizierfähigkeit durchgeführt werden. Großmaßstäbliche dreidimensionale Injektionsversuche bzw. Probeinjektionen in der Praxis bleiben daher derzeit für eine sichere Einschätzung der Feinstbindemittelverteilung innerhalb der Injektionskörper und der erzielten Verringerung der Wasserdurchlässigkeit ohne Alternative.

Ein weiterer Denkansatz wäre die Akzeptanz von verschiedenen Qualitäten der Injektionskörper in Bezug auf die Abdichtungswirksamkeit. Dies setzt einerseits voraus, dass auch in den lediglich verfestigten Bereichen das abgebundene Injektionsmittel in den Poren gegenüber höheren Strömungsgradienten ausreichend erosionsstabil ist. Andererseits ist ein höherer Wasserandrang zum Dichtungstrog zu berücksichtigen und zu tolerieren. Nach den vorgestellten Ergebnissen kann für den Kern der Dichtungskörper von einer Durchlässigkeit von mindestens $k_f = 5 \times 10^{-7}$ m/s und für die äußeren verfestigten Schalen im Extremfall von etwa $k_f = 1 \times 10^{-5}$ m/s ausgegangen werden. Hieraus wäre eine gradientenabhängige Gesamtwassermenge für den Dichtungstrog abzuschätzen.

Mit den in dieser Arbeit zusammengetragenen Erkenntnissen zur Reichweitenverkürzung, der inhomogenen Bindemittelverteilung innerhalb der Injektionskörper sowie den gegebenen Planungs- und Ausführungshinweisen können Fehlschläge, wie sie in der Vergangenheit bei Abdichtungsinjektionen mit Feinstbindemitteln zu verzeichnen waren, vermieden werden. Jedoch ist hierdurch auch ein Anstieg der Baukosten zu erwarten.

Alternativ zu Feinstbindemittelinjektionen können tiefliegende Dichtungssohlen in Fein- und Mittelsanden auch durch die Injektion von Silikatgel-Injektionslösungen mit unterschiedlichen Reaktiven oder mit dem Düsenstrahlverfahren hergestellt werden. Obwohl sich sogenannte Weichgele auf Wasserglasbasis (Natriumsilikatlösung) mit Natriumaluminat als Reaktiv für die Herstellung von Dichtungssohlen sowohl aus wirtschaftlicher Sicht wie auch aus Sicht der erzielten Durchlässigkeiten der Injektionssohlen bewährt haben, werden diese mancherorts aufgrund von Bedenken hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit nicht mehr zugelassen. Derzeit kommt hier als Ersatz i.d.R. das Düsenstrahlverfahren zum Einsatz, das neben höheren Kosten auch ein höheres Ausführungsrisiko gegenüber den Weichgelinjektionen mit sich bringt. Gleichzeitig besteht neben einem deutlich erhöhten Materialverbrauch auch eine Entsorgungsnotwendigkeit der Rücklaufsuspension und der sogenannten Düsenstrahlkerzen. Um die in Bezug auf Weichgelinjektionen geäußerten Bedenken auszuräumen wurden in jüngster Zeit verschiedene alternative Reaktive getestet. So wurde in einem am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover durchgeführten Versuchsprogramm die Eignung von Natriumbicarbonat (NaHCO_3) als Härter für Silikatgel-Injektionslösungen nachgewiesen (IGBE 1997) und baupraktisch auch bereits erfolgreich eingesetzt.

Weiterhin haben sich in jüngster Zeit Silikatgel-Injektionslösungen mit dibasischen Estern als Reaktiv auch im Baustelleneinsatz bewährt (TIEFBAU, INGENIEURBAU, STRAßENBAU (2003) sowie KLEINA und LIERSCH (2002)). Dieser Härter ist biologisch leicht abbaubar und lässt daher keine nachhaltige Beeinträchtigung der Grundwasserqualität erwarten.

9 Zusammenfassung

Bei der Herstellung tiefer Baugruben ist es i.d.R. erforderlich, diese soweit abzudichten, dass eine maßgebende bzw. nachteilige Beeinträchtigung benachbarter Bauwerke sowie der Grundwasserverhältnisse ausgeschlossen werden kann. Hierbei ist es neben der Wahl einer weitgehend wasserdichten Wandkonstruktion notwendig, eine künstliche Dichtungssohle herzustellen, sofern kein natürlicher Dichtungshorizont ansteht, in den die Baugrubenwände einbinden könnten. Die Herstellung einer solchen Dichtungssohle kann in nichtbindigen Böden mit Hilfe der Injektionstechnik erfolgen, bei der das Porensystem des Bodens mit einem abdichtenden Injektionsmittel aufgefüllt wird, ohne dabei das Bodengefüge planmäßig aufzubrechen. Für die Injektion in feineren Korngerüsten wie Fein- und Mittelsanden eignen sich hierzu neben chemischen Injektionslösungen auch so genannte Feinstbindemittel. Bei letzteren handelt es sich um hydraulische Bindemittel, die in ihrer stofflichen Zusammensetzung Zementen ähneln, aber eine wesentlich höhere Mahlfineinheit aufweisen.

Aus der Praxis sowie der Literatur ist bekannt, dass es infolge von Filtrationsvorgängen bei der Injektion von Feinstbindemittelsuspensionen zu einer Verkürzung der Injektionsreichweite mit der Folge von Fehlstellen in einer Dichtungssohle kommen kann. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen solcher filtrationsbedingten Bindemittelverlagerungen auf den zu erzielenden Abdichtungserfolg unter Berücksichtigung verschiedener Injektionsrandbedingungen.

Grundsätzlich kann nach dem Ort des Abtrennens der Suspensionsfeststoffe von der flüssigen Phase zwischen einer Oberflächen- und einer Tiefenfiltration unterschieden werden. Während bei einer Oberflächenfiltration die Form und Größe der Partikel ein Eindringen in den Filter nicht erlauben und diese an der Eintrittsfläche in den Filter abgeschieden werden, dringt bei einer Tiefenfiltration die Suspension zunächst in das Porensystem des Filters ein. Hierbei werden jedoch fortlaufend Partikel abgetrennt und die Suspension zunehmend ausgedünnt. Diese Abscheidevorgänge können sowohl durch Siebeffekte an Engstellen der Porenkanäle als auch durch Anhaften der Partikel auf den Kornoberflächen infolge von physikalischen oder chemischen Interaktionen zwischen den Suspensionspartikeln und den Filterkörnern eintreten.

Zur Durchführung großmaßstäblicher dreidimensionaler Injektionsversuche wurde ein Injektionstrichter eingesetzt, der einen Ausschnitt einer Injektionskugel repräsentiert. Auf diese Weise konnten Injektionsreichweiten zwischen 0,72 m und 1,00 m bei praxisüblichen Einpressraten realisiert werden. Während des Injektionsvorgangs wurden die Verpressrate und der Einpressdruck an der Injektionsquelle sowie an sieben weiteren Punkten entlang der Injektionsreichweite fortlaufend aufgezeichnet. Nach dem Abbinden des Feinstbindemittels wurden die Injektionskörper vermessen und die Verteilung des Bindemittels innerhalb der Injektionskörper bestimmt. Aus dieser Bindemittelverteilung konnten anschließend Verläufe rechnerischer Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit der Entfernung zur Injektionsquelle

abgeschätzt werden. Zusammengefasst ergeben sich aus den durchgeführten Trichterinjektionsversuchen folgende Erkenntnisse:

- An nahezu allen durchgeführten Versuchen waren sägezahnartige Schwankungen des Einpressdrucks festzustellen, die auf ein fortlaufendes Verstopfen und anschließendes lokales Aufsprengen des Porensystems im Bereich der Injektionsquelle hindeuten. In einigen Fällen kam es jedoch auch zu einem großräumigen Aufsprengen des Porensystems mit der Folge einer unkontrollierten, einseitig gerichteten Ausbreitung des nachfolgend verpressten Feinstbindemittels.
- Das tatsächliche Volumen der Injektionskörper fiel stets geringer aus als es nach dem verpressten Suspensionsvolumen zu vermuten gewesen wäre. Als Einflussgrößen auf die Filtrationsintensität und damit auf die Reichweitenverkürzung konnten neben der Porengeometrie, die Mahlfeinheit des Feinstbindemittels, der Bindemittelgehalt der Injektionssuspension und die Verpressrate festgestellt werden. Zwischen den Volumenverlusten und in der Literatur dargestellten theoretischen Injektionskriterien konnte keine Abhängigkeit festgestellt werden.
- Als Folge der Filtrationsvorgänge kommt es zu einer Anreicherung des Feinstbindemittels in der Nähe der Injektionsquelle sowie reduzierten Bindemittelgehalten in den Randbereichen der Injektionskörper. In der äußeren etwa 10-20 cm dicken Schale der Injektionskörper fanden sich vielfach jedoch nur Bindemittelanteile, die erheblich unter denen des restlichen Injektionskörpers liegen.
- Während die üblicherweise in der Praxis an die Durchlässigkeit von Injektionskörpern gestellten Anforderungen im Kern stets erreicht werden, ergeben sich in den Randzonen aufgrund geringerer Bindemittelgehalte deutlich höhere Durchlässigkeitsbeiwerte mit einer dementsprechend geringeren Abdichtungswirkung.

Ergänzend zu den Trichterversuchen wurden so genannte eindimensionale Injektionsversuche durchgeführt, wie sie zum Nachweis der Injizierfähigkeit eines Injektionsmittels üblich sind. Hierbei wurde jeweils ein Suspensionsvolumen verpresst, welches dem dreifachen des Porenvolumens der Sandsäule entsprach und, um Hinweise auf den beim Durchströmen des Porensystems zurückgehaltenen Bindemittelanteil zu erhalten, die Dichte der aus den Prüfsäulen austretenden Suspension bestimmt. Im Gegensatz zu den Trichterversuchen kam es bei den eindimensionalen Injektionsversuchen jedoch trotz zum Teil höherer Einpressdrücke nicht zu einem Aufsprengen des Porensystems. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der eindimensionalen und den dreidimensionalen Injektionsversuche konnte nicht festgestellt werden. Auch eine signifikante Veränderung der Partikelgrößenverteilung beim Durchströmen einer Sandsäule, die auf ein bevorzugtes Abscheiden bestimmter Partikelfractionen hindeuten würde, konnte nicht festgestellt werden.

Aufgrund der Vielzahl der zudem nur zum Teil erforschten Einwirkungen bei der Tiefenfiltration ist eine exakte theoretische Beschreibung dieser Vorgänge derzeit nicht möglich. Es wurde daher für die Auswertung der Injektionsversuche eine makroskopische Betrachtungsweise der Filtration angewendet. Hierbei werden vereinfachend die verschiedenen Einwirkungen in einem Filterkoeffizienten und einer von der Beladung des Filters mit abgeschiedenen Partikeln abhängigen Korrekturfunktion zusammengefasst. Somit war es für eine eindimensionale und eine kugelsymmetrischen Ausbreitung des Injektionsmittels möglich, unter Annahme einer konstanten sowie einer linear mit der Beladung abnehmenden Wirksamkeit des Tiefenfilters, geschlossene Lösungen der Partikelkonzentration der Injektionssuspension und der Partikelbeladung des Filters zu bestimmen.

Während sich bei Annahme einer stets konstanten Wirksamkeit des Tiefenfilters keine gute Annäherung an die Versuchsergebnisse ergab, konnten bei Annahme einer linear mit der Beladung abnehmenden Filterwirksamkeit die in den Trichterexperimenten beobachtete Reichweitenverkürzung und Ausbildung von bindemittelarmen Randzonen nachvollzogen werden. Die theoretischen Ansätze erwiesen sich jedoch aufgrund der hierin nicht erfassten Beeinflussung der Ausbreitung des Injektionsmittels durch Injektionscracks nur eingeschränkt geeignet, die Auswirkungen variierteter Injektionsrandbedingungen zu prognostizieren. Auch aus der theoretischen Auswertung der ein- und dreidimensionalen Injektionsversuche ergaben sich keine Hinweise, die eine Übertragung der Ergebnisse eindimensionaler Injektionsversuche auf den dreidimensionalen Fall möglich machen würden.

Bei der Ausführung von Abdichtungsinjektionen mit Feinstbindemitteln gilt es daher, neben der Berücksichtigung der filtrationsbedingten Reichweitenverluste auch den höheren Durchlässigkeiten in den Randbereichen der Injektionskörper Beachtung zu schenken. Damit solche durchlässigeren Randbereiche vermieden werden, könnten entweder die Bindemittelgehalte der Injektionssuspension und die angestrebten Endreichweiten verändert oder der Versuch unternommen werden, die Randbereiche durch eine gegenseitige Durchdringung der Injektionskörper bei einer Injektion „frisch-in-frisch“ abzudichten. Gleichzeitig erscheint es jedoch insbesondere bei einem Bauverfahren mit allgemein hoher Umweltakzeptanz wie Feinstbindemittelinjektionen sinnvoll zu prüfen, ob die tolerierbare Restwassermenge einer Trogbaugrube nicht im Einzelfall auch höher ausfallen kann als derzeit vielfach pauschal gefordert wird. Durch eine entsprechende Tolerierung erhöhter Wasserzutritte durch die weniger abdichtungswirksamen Randzonen der Injektionskörper dürfte sich der Aufwand zur Herstellung einer Feinstbindemittel-Dichtsohle deutlich reduzieren.

10 Literaturverzeichnis

ALBIKER, B. (1972): Kolmatation eines Kiesgerüsts: ein quasi-thermodynamischer Vorgang. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 52.

ARENZANA, L., KRIZEK, R. J., PEPPER, S. F. (1989): Injection of Dilute Microfine Cement Suspensions into Fine Sands. Proc. of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro 13-18. August 1989. A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield.

BAUMANN, E. R., IVES, K. J. (1987): The Evidence of Wormholes in deep bed filters. Proc. Filtech. Conf. Utrecht. September 1987. Vol. 1. S. 151-164.

BAYLIS, J. R. (1937): Experiences in Filtration. Journal American Water Works Association. Vol. 29. S. 1010-1048.

BEDBUR, E. (1989): Laboruntersuchungen zum Einfluss sedimentologischer und hydraulischer Parameter auf die Filterwirkung gleichförmiger Sande. Berichte - Reports. Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum. Universität Kiel. Nr. 31

BÖHME, M. (1996): Auswirkungen von Baugruben mit Weichgel- und Betonsohlen auf die Grundwasserqualität. Baurecht und Bautechnik. Bd. 7: „Baumaßnahmen im Grundwasser. Grundwasserschonende Bautechnik und Grundwassermanagement“. Erich Schmidt Verlag, Berlin. S. 83-93.

BORCHERT, K.-M. (1996): Einsatz und Grenzen von Unterwasserbetonsohlen und Zementinjektionen zur Sohldichtung. Baurecht und Bautechnik. Bd. 7: „Baumaßnahmen im Grundwasser. Grundwasserschonende Bautechnik und Grundwassermanagement“. Erich Schmidt Verlag, Berlin. S. 83-93.

BORCHERT, K.-M. (1999): Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlen-Konstruktionen – Lehren aus Schadensfälle. VDI-Tagung „Tiefe Baugruben. Neue Erkenntnisse und Erfahrungen bei ungewöhnlichen Baumaßnahmen“. VDI Verlag, Düsseldorf. Band 1436. S. 21-43.

BRAUNS, J., LUBER, M., SANTO, J., SCHULER, U., SCHULZE, B. (2002): Zum Ausbreitungsverhalten von Injektionsgütern. Beiträge des 17. Christian Veder Kolloquium „Injektionen in Boden und Fels“. Institut für Bodenmechanik und Grundbau. Technische Universität Graz

BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A. (1991): Taschenbuch der Mathematik. 25. Auflage. D. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Verlag Nauka Moskau.

BUSCH, K.-F., LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. Enke Verlag, Stuttgart.

- BUSCH, K.-F., LUCKNER, L., THIEMER, K. (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 3, Geohydraulik. Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- CAMBEFORT, H. (1969): Bodeninjektionstechnik. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- CLARKE, W. J. (1984): Performance Characteristics of Microfine Cement. ASCE. 14.-18.5.1984. Atlanta, Georgia.
- DIN EN 196, Teil 2 (1995): Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement. Ausgabe Mai 1995. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4093 (1987): Einpressen in den Untergrund. Planung, Ausführung und Prüfung. Ausgabe September 1987. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12715 (2000): Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen. Ausgabe Oktober 2000. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12716 (2001): Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektionen, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting). Ausgabe Dezember 2001. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 18123 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung. Ausgabe November 1996. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 18126 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. Ausgabe November 1996. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 18130, Teil 1 (1998): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche. Ausgabe Mai 1998. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DONEL, M. (1990): Bodeninjektionstechnik. Verlag Glückauf GmbH. Essen.
- DYCKERHOFF AG (2002a): Produktdatenblatt Finosol. Dyckerhoff AG, Wiesbaden.
- DYCKERHOFF AG (2002b): Dyckerhoff Injektionsprogramm. Hinweise zum Mischen und zur Injektion der Dyckerhoff Injektionsbindemittel. Dyckerhoff AG, Wiesbaden.
- EINSTEIN, A. (1905): Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. Annalen der Physik. S. 549–560.
- FUJII, S., SHIMODA, M., MATSUO, O., KOSEKI, J. (1996): Properties of Microfine Cement Grout and Grouting Tests Using Simulated Soil. Grouting and deep mixing. Proc. of the

Second Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems. 14.-17.5.1996, Tokyo. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

GAWALEK, K. (2001): Silikatgele auf Organosilanbasis, reine Lösungen und mit Füllstoffen beaufschlagte Suspensionen für Abdichtungsinjektionen im Lockergestein. Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover, Heft 57.

GDA (1997): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ – GDA. 3. Auflage Verlag Ernst & Sohn. Berlin.

GIMBEL, R.D. (1978): Untersuchungen zur Partikelabscheidung in Schnellfiltern. Dissertation Universität Karlsruhe.

GIMBEL, R.D. (1984): Abscheidung von Trübstoffen aus Flüssigkeiten und Tiefenfiltern. Veröffentlichungen des Bereichs und des Lehrstuhls für Wasserchemie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Heft 25.

HAPPEL, J. (1958): Viscous Flow in Multiparticle Systems: Slow Motion of Fluids Relative to Beds of Spherical Particles. Journal A.I.Ch.E.. Vol. 4. No. 2. S. 197-201.

HELAL, M., KRIZEK, R.J. (1992): Preferred Orientation of Pore Structure in Cement-Grouted Sand. Proc. ASCE Conf. On Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Vol. 1. Geotechnical special publication No. 30.

HERZIG, J. P., LECLERC, D. M., LE GOFF, P. (1970): Flow of Suspension through Porous Media – Application to Deep Filtration. Industrial and Chemical Engineering. Vol. 62. Nr. 5. S. 8-35.

HILL, S. (1983): Untersuchungen über die Wechselwirkungen zwischen Porenverstopfung und Filterwiderstand mittels Tracermessungen. Schriftenreihe des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt. Heft Nr. 18.

IGBE -INSTITUT FÜR GRUNDBAU, BODENMECHANIK UND ENERGIEWASSERBAU (1997): Versuchsbericht: Untersuchungen an Weichgel- und Injektionsproben. Universität Hannover. Unveröffentlicht.

ISON, C.R., IVES, K. J. (1969): Removal Mechanisms in Deep Bed Filtration. Chemical Engineering Science. Vol. 24. S. 717-729.

IVES, K. J. (1967): Deep filters. Filtration & Separation. No. 4. S. 125-135.

IVES, K. J. (1970): Rapid Filtration. Water Research. Pergamon Press. Vol. 4. S. 201-223.

IVES, K. J. (1975a): Capture Mechanisms in Filtration. Scientific Basis of Filtration. Ed. By K.J. Ives. Noordhoff, Leyden.

IVES, K. J. (1975b): Mathematical Models of Deep Bed Filtration. Scientific Basis of Filtration. Ed. By K.J. Ives. Noordhoff, Leyden.

IVES, K. J. (1980): Deep bed filtration. Filtration and Separation. Vol. 17. S. 157-166.

IVES, K. J. (1991): Progress in Deep Bed Filtration. Water Supply. Vol. 9. S. 151-155.

IVES, K. J., GREGORY, J. (1967): Basic Concepts of Filtration. Proc. of the Society of Water Treatment and Examination. Vol. 16. S. 147-169.

IWASAKI, T. (1937): Some Notes on Sand Filtration. Journal A.W.W.A.. Vol. 29. S. 1591-1602.

JENKINS, S. J., GARSHORE, G., LEVITT, K. (1992): The Rheology and Bled Properties of Blue Circle H900 Microfine Cement for Grouting Purposes. Proc. Int. Conf. Grouting in the ground. 25.-26.11.1992. London. Thomas Telford London. S. 591-604.

KLEINA, R., LIERSCH, L. (2002): Horizontale Penetrationsinjektion mit Hartgel und Ultrafeinzement als Stützgewölbe für die Ausbruchssicherheit von Fußgängertunneln in Abu Dhab. Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium „Injektionen im Baugrund“. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Graz. Heft 13.

KÜHLING, G. (1990): Feinstzemente – mikrofeine hydraulische Bindemittel. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau. Heft 11. S. 782-792.

KÜHLING, G., TAX, M., Schulze, B. (1993): Verbesserung der Injizierbarkeit und der chemischen Widerstandsfähigkeit von Feinstzement-Suspensionen. Felsbau. Nr. 2. S. 88-96.

KUTZNER, C. (1991): Injektionen im Baugrund. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.

LEVICH, V. G. (1962): Diffusion to Free-Falling Particle. Physicochemical Hydrodynamics. Prentice Hall. Englewood Cliffs. S. 80-87.

MBONIMPA, M. (1998): Injizierfähigkeit von Feinstbindemittelsuspensionen zur Abdichtung von Lockergesteinen. Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover. Heft 50.

MERKBLATT FÜR EINPRESSARBEITEN MIT FEINSTBINEMITTELN IN LOCKERGESTEIN (2002). Bautechnik 79. Heft 8 und Heft 9.

MITCHELL, J. K. (1982): Soil Improvement – State-of-the Art Report. 10th Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm 1981, A. A. Balkema, Rotterdam. S. 509-565.

- MITTAG, J. (2000): Untersuchungen zum Filtrationsverhalten von Feinstbindemittelsuspensionen bei der Injektion in Sande. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin. Heft 27.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., FRIEDRICH, W., ROGNER, J. (1991): Einfluss der Versuchsrandbedingungen auf die Ergebnisse von Dichtmassenuntersuchungen. Bautechnik 68. Heft 12. S. 421 – 425.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. (1968): Zur Theorie der Injektionen. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 32.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. (1969): Untersuchungen zur Eindringung von Injektionsmassen in porigen Untergrund und zur Auswertung von Probeverpressungen. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 39.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., WICHNER, R., FRIEDRICH, W., SCHLÖTZER, C., (1996): Zur Bemessung vertikaler und horizontaler Dichtelemente sohlgedichteter Baugruben. Vorträge der Baugrundtagung in Berlin. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik . S. 99 – 11.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., SCHLÖTZER, C., FRIEDRICH, W., WESELOH, K. (1998): Besondere Auswirkungen des Berliner Baugrundes gegenüber Maßnahmen des Spezialtiefbaus. Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. S. 263-284.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., KUK, M., SCHLÖTZER, C. (1999): Untersuchungen zur Injizierfähigkeit von Feinstbindemittelsuspensionen. 1. Int. Fachtagung für Injektionstechnik in Bergbau und Bauwesen „Inject’99“. Essen. Verlag Glückauf GmbH. Essen.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., GAWALEK, K., KUK, M. (2000): Neuere Erkenntnisse zur Injektionstechnik im Grundbau und Deponiegrundbau. 2. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Technische Akademie Essen. 18.-19.1.2000.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., KUK, M., GAWALEK, K., SCHLÖTZER, C. (2002): Ergebnisse zur Eindringung und Reichweitenentwicklung beim Einsatz neuartiger Injektionsmassen. Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium „Injektionen in Boden und Fels“. Institut für Bodenmechanik und Grundbau. Technische Universität Graz
- NONVEILLER, E. (1989): Grouting – Theory and Practice. Developments in Geotechnical Engineering, 57. Elsevier. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo.
- NEUMANN, B. (1983): Untersuchungen zur Elektrophorese als Transportmechnismus bei der Tiefenfiltration. Dissertation Universität Karlsruhe.

NOSKE, P., KÜHLING, G. (1992): Injektion mit Feinstbindemittel in der Geotechnik. Vorträge der Baugrundtagung 1992 in Dresden. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.

PERRET, S., BALLIVY, G. KHAYAT, K., MNIF, T. (1997): Injectability of Fine Sand with Cement-Based Grout. Grouting: Compaction, Remediation and Testing. 16-18.7.97 Logan, USA. ASCE of Engineers. Geotechnical Special Publication No. 66.

POST, S., RAKEL, M. (2003): Einflussgrößen auf die Partikelgrößenverteilung von Feinstbindemittelsuspensionen. Studienarbeit am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE). Universität Hannover. Unveröffentlicht.

PAYATAKES, A. C., TIEN, C., TURIAN, R.M. (1973): A New Model for Granular Porous Media. Journal A.I.Ch.E. Vol. 19. S. 58-76.

RAJAGOPALAN, R.; TIEN, C. (1979): The Theory of Deep Bed Filtration. Progress in filtration and separation. Elsevier Scientific publishing company. Amsterdam - Oxford – New York.

ROLKE, D. (1973): Vergleichende Untersuchungen an Trocken- und Überstaufiltern zum Mechanismus der Partikelablagerung in Kiesbettfiltern. Dissertation Universität Karlsruhe.

SANO, M., SHIMODA, M., MATSUO, O., KOSEKI, J. (1996): Microfine Cement Grouting as a Countermeasure Against Liquefaction. Grouting and Deep Mixing. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems. 14.-17.5.1996. Tokyo. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

SCHEIDEGGER, A. E. (1974): The Physics of Flow Through Porous Media. University of Toronto. Press Toronto. Canada.

SCHLÖTZER, C. (1995): Filtrationsverhalten von Dichtsuspensionen an flüssigkeitsgestützten Erdwänden. Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover. Heft 42.

SCHUBERT, A. (1993): Vorläufiges Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. Bautechnik 70 (1993), H. 9. Verlag Ernst & Sohn. Berlin.

SCHULER (1997): Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 143.

SCHULER, U. , BRAUNS, J. (2000): Die effektive Porenöffnung körniger Erdstoffe – ein Kriterium für die Injizierfähigkeit von Suspensionen. Geotechnik 23. Heft 4.

SCHULZE, B. (1992): Injektionssohlen – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe Heft 126.

- SCHULZE, B., KÜHLING, G., TAX, M. (1992): Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstbindemittel-Suspensionen. Bauingenieur 67. Heft 11. S. 499-504.
- SHERARD, J. L., DUNNINGAN, L. P. (1984): Basic Properties of Sand and Gravel Filters. ASCE Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 110. No. 6. S. 684-750.
- SHIMODA, M., OHMORI, H. (1982): Ultra Fine Grouting Material. Proc. of the Conf. on Grouting in Geotechnical Engineering. 10.-12.2.1982. New Orleans. ASCE.
- SILVEIRA, A. (1965): An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters. Proc. 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montreal. Vol. 3. S. 551-555.
- TAUSCH, N., ECKER, F. (2002): Untersuchungen zum Ausbreitverhalten von Feinstbindemittelinjektionen – oder Kunst im Injektionslabor. Beiträge zum 17. Christian Veder Kolloquium „Injektionen in Boden und Fels“. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Graz. Heft 13.
- TAUSCH, N., TEICHERT, H.-D. (1990): Injektionen mit Feinstbindemittel. Beiträge zum 5. Christian Veder Kolloquium „Neue Entwicklungen in der Baugrundverbesserung“. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Graz.
- TIEFBAU, INGENIEURBAU, STRAßENBAU (2003): Sichere Bodenverfestigung. Heft 4.
- TIEN, C., TURIAN, R.M., PENDSE, H. (1979): Simulation of the Dynamic Behaviour of Deep Bed Filters. Journal A.I.Ch.E.. Vol. 25. S. 385-395.
- TIEN, C., PAYATAKES, A. C. (1979): Advances in deep bed filtration. Journal A.I.Ch.E.. Vol. 25. No. 5. S. 737-759.
- VAN RIESEN, S. G. (1975): Uferfiltratminderung durch Selbstdichtung an Gewässersohlen. Dissertation. Universität Karlsruhe.
- YONEDA, S., TAMURA, M., MORI, A. (1996): Permeating Properties of Ultra-Fine-Cement-Grout. Grouting and Deep Mixing. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems. 14.-17.5.1996. Tokyo. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- YAO, K.-M., HAMIBIAN, T., O'MELIA, C.R. (1971): Water and Waste Water Filtration: Concepts and Applications. Environmental Science & Technology. Vol. 5. No. 11. S. 1105-1112.
- ZEBOVITZ, S., KRIZEK, R. J., ATMATZIDIS, D. K. (1989): Injektion of Fine Sand With Very Fine Cement Grout. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 115. No. 12. ASCE.
- ZIEMS, J. (1968): Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation. Technische Universität Dresden.

Anhang A Definitionen verwendeter Begriffe und Formelzeichen

A.1 Definitionen verwendeter Begriffe

<i>Injektionsreichweite</i>	Als Injektionsreichweite wird der Abstand vom Mittelpunkt zur äußeren Oberfläche einer Injektionskugel bezeichnet. Die Injektionsreichweite begrenzt den Bereich, in dem eine stabile Verkittung der Sandkörner durch das Feinstbindemittel erfolgt ist und ist damit nicht zwangsläufig identisch mit der Reichweite einzelner Bestandteile der Injektionssuspension. Bei Trichterversuchen beschreibt die Reichweite den Abstand der gedachten Trichterspitze zur äußeren Oberfläche der Injektionskörper.
<i>Verpresskörpervolumen bzw. Injektionskörpervolumen</i>	Als Verpresskörpervolumen bzw. Injektionskörpervolumen wird das tatsächliche, durch Vermessen bestimmte Volumen eines abgebundenen Injektionskörpers bezeichnet.
<i>Bezogenes Verpresskörpervolumen</i>	Das bezogene Verpresskörpervolumen bezeichnet das Verhältnis des Porenvolumens eines Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen.
<i>Bindemittelarme Randzonen</i>	Als bindemittelarme Randzonen werden Randbereiche von Trichterinjektionskörpern bezeichnet, in denen der durch Filtrationsvorgänge reduzierte Feinstbindemittelgehalt nicht mehr ausreicht um den nach KUTZNER (1991) üblicherweise bei Injektionssohlen erzielbaren Durchlässigkeitsbeiwert von 5×10^{-7} m/s einzuhalten.

A.2 Formelzeichen, Dimension und Bedeutung

A.2.1 Allgemeines

Die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen bzw. physikalischen Größen werden unabhängig vom Maßsystem aus den Grundgrößen abgeleitet. Die zugehörigen Einheiten ergeben sich dann jeweils als Potenzprodukt aus den Basiseinheiten.

Die verwendeten Grundgrößen lauten:

Länge	L
Masse	M
Zeit	Z
Temperatur	T

A.2.2 Kleine lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
a	Abstand der Injektionslanzen	L
d ₀	Durchmesser einer Sandsäule	L
d _{0,P}	Durchmesser des kleinsten Porenquerschnittes	L
d _{100,Susp}	Durchmesser des größten Suspensionspartikels	L
d ₁₅ , d ₅₀ , d ₈₅ , d ₉₅	Korn- bzw. Partikeldurchmesser bei 15, 50, 85 oder 95 Gew.-% Siebdurchgang	L
d _i	Durchmesser der i-ten Kornklasse	L
d _k	Mittlerer Korndurchmesser eines Filters	L
d _K	Korndurchmesser eines Filters	L
d _P	Partikeldurchmesser	L
f _λ	Korrekturfunktion	-
g	Erdbeschleunigung	M • Z ⁻²
i	Hydraulisches Gefälle	-
n	Porenanteil	-
O ₆₄	Fraktilwert der Oberflächenverteilung	L
p ₆₄	Fraktilwert der Partikelgrößenverteilung bei 64 Gew.-% Siebdurchgang	L

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
k	Boltzmann-Konstante	$M \cdot L^2 \cdot Z^{-2}$
k_{10}	Auf eine Vergleichstemperatur von 10°C bezogener Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	$L \cdot Z^{-1}$
k_f	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	$L \cdot Z^{-1}$
l	Länge der eindimensionalen Prüfsäule	L
Δl	Länge eines Segments	L
n_{\min}, n_{\max}	Minimaler bzw. maximaler Porenanteil	-
r_F	Radius eines kugelförmigen Filters	L
r_K	Entfernung einer Kugelschale vom Mittelpunkt der Kugel	L
t	Filterlaufzeit	Z
v_f	Filtergeschwindigkeit	$L \cdot Z^{-1}$
z	Filterschichttiefe	L
Δz	Höhe einer elementaren Filterschicht	L

A.2.3 Große lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
C	Partikelkonzentration der flüssigen Phase	$M \cdot L^{-3}$
C_0	Partikelkonzentration der Ausgangssuspension	$M \cdot L^{-3}$
C_i	Partikelkonzentration im Segment i	$M \cdot L^{-3}$
D	Bezogene Lagerungsdichte	-
\bar{D}	Axialer Dispersionskoeffizient	$L^2 \cdot Z^{-1}$
D_0	Diffusionskoeffizient	$L^2 \cdot Z^{-1}$
E	Trägheitsparameter	-
GV	Glühverlust	-
I	Interceptionskoeffizient	-
L^*	Bezugslänge	L
N, N_i	Verhältnis von Partikel- zu Korn- bzw. Porendurchmessern als Kennzahl der Injizierfähigkeit	-

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
P_e	Peclet-Zahl	-
Q	Durchfluss bzw. Verpressrate	$L^3 \cdot Z^{-1}$
R	Injektionsreichweite	L
T	Absolute Temperatur	T
V^*	Bezugsvolumen	L^3
ΔV	Volumen eines Segments	L^3
V_i	Verpresstes Suspensionsvolumen	L^3
V_P	Porenvolumen einer Sandsäule	L^3
V_{Susp}	Verpresstes Suspensionsvolumen	L^3

A.2.4 Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
η	Dynamische Viskosität	$M \cdot L^{-1} \cdot Z^{-1}$
γ_0	Elementarer Abscheidegrad einer Filterschicht	-
γ_0^*	Elementarer Abscheidegrad eines Einzelkollektors	-
$\gamma_{0,H}$	Haftwahrscheinlichkeit	-
$\gamma_{0,T}$	Transportwirksamkeit	-
γ_G^*	Einzelkollektorabscheidegrad durch Sedimentation	-
γ_I^*	Einzelkollektorabscheidegrad durch Interception	-
γ_S^*	Einzelkollektorabscheidegrad durch Sedimentation	-
γ_D^*	Einzelkollektorabscheidegrad durch Diffusion	-
λ	Filterkoeffizient bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung	L^{-1}
$\bar{\lambda}$	Filterkoeffizient bei Anwendung des iterativen Lösungsverfahrens	-
λ_0	Filterkoeffizient in der Anfangsphase bei eindimensionaler Suspensionsausbreitung	L^{-1}

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
$\bar{\lambda}_0, \bar{\lambda}_{0,\Delta L}, \bar{\lambda}_{0,\Delta V}$	Filterkoeffizienten in der Anfangsphase bei eindimensionaler bzw. kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung und Anwendung des iterativen Lösungsverfahrens	-
$\lambda_{0,K}$	Filterkoeffizient in der Anfangsphase bei kugelsymmetrischer Suspensionsausbreitung	L^{-3}
ρ_{FBM}	Kornrohddichte des Feinstbindemittels	$M \cdot L^{-3}$
ρ_p	Partikeldichte	$M \cdot L^{-3}$
ρ_s	Korndichte	$M \cdot L^{-3}$
ρ_{Susp}	Dichte der Suspension	$M \cdot L^{-3}$
ρ_w	Dichte des Wassers	$M \cdot L^{-3}$
σ	Filterbeladung (Abgeschiedene Partikel pro Volumeneinheit des Filters)	$M \cdot L^{-3}$
σ_e	Filterbeladung in der Einlaufschicht bei eindimensionaler Filterströmung	$M \cdot L^{-3}$
$\sigma_{e,K}$	Filterbeladung in der Einlaufschicht bei kugelsymmetrischer Filterströmung	$M \cdot L^{-3}$
σ_1	Durchströmungsdruck bei dreiaxialen Durchlässigkeitsversuchen	$M \cdot L^{-1} \cdot Z^{-2}$
σ_3	Zelldruck bei dreiaxialen Durchlässigkeitsversuchen	$M \cdot L^{-1} \cdot Z^{-2}$
σ_i	Filterbeladung im Segment i	$M \cdot L^{-3}$
σ_s	Sättigungsbeladung eines Filters	$M \cdot L^{-3}$
τ	Korrigierte Zeitvariable bei eindimensionaler Filterströmung	Z
τ_K	Korrigierte Zeitvariable bei kugelsymmetrischer Filterströmung	Z

Anhang B Versuchsrandbedingungen und Ergebnisdiagramme der durchgeführten Trichterinjektionsversuche

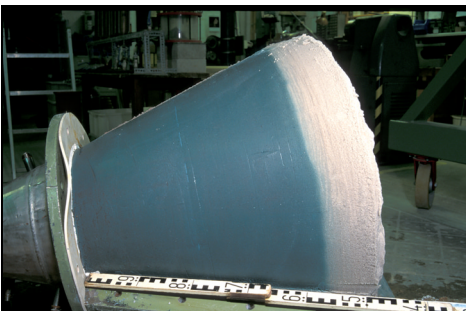
Nr.	Feinstbinde- mittelsorte	W / B	Sand	Tatsächliche Verpressrate in l/min	Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min
1	Finosol F	5,0	F 31	0,25	9,7
2		4,0			
3					
4	Finosol U	5,0	F 32	0,25	9,7
5		4,0		0,40	15,5
6				0,25	9,7
7	Finosol X	5,0	F 32	0,25	9,7
8		4,0		0,40	15,5
9				0,25	9,7
10		5,0	F 36		

Trichterversuch Nr. 1

Feinstbindemittelsorte	Finosol F
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 31
Porenanteil	0,36
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	46,5
Reichweite in m	0,99
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,81
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	23,9
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein

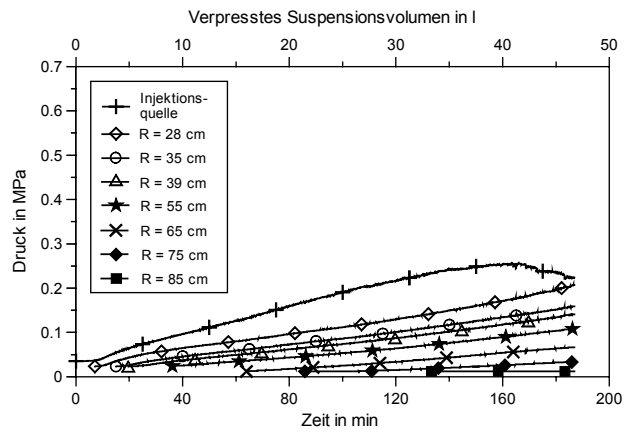


Oberfläche des Injektionskörpers

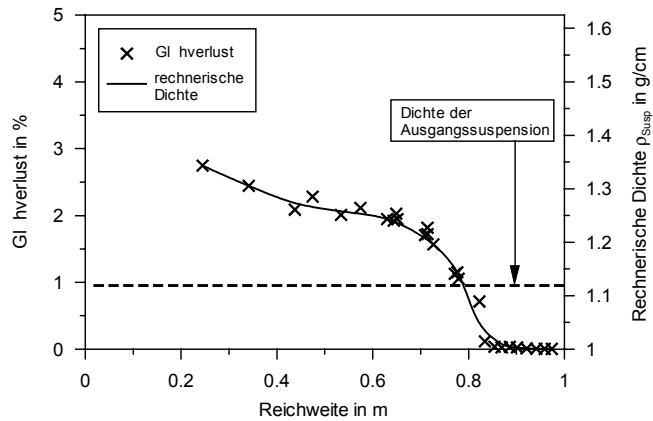


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers

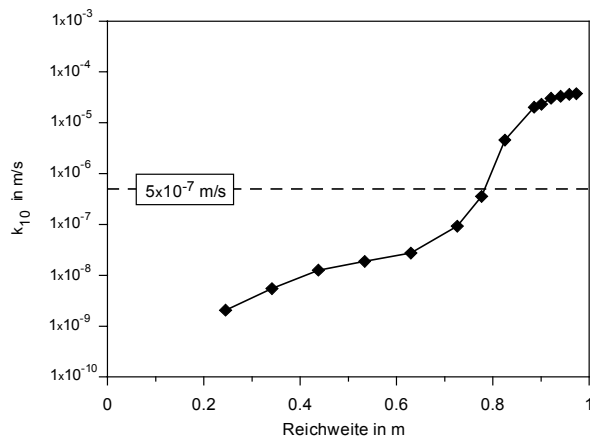
Einpressdruck an der Injektionsquelle und in verschiedenen Entfernungen R



Glühverluste und rechnerische Dichten der Feinstbindemittelsuspension



Verlauf der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte



Trichterversuch Nr. 2

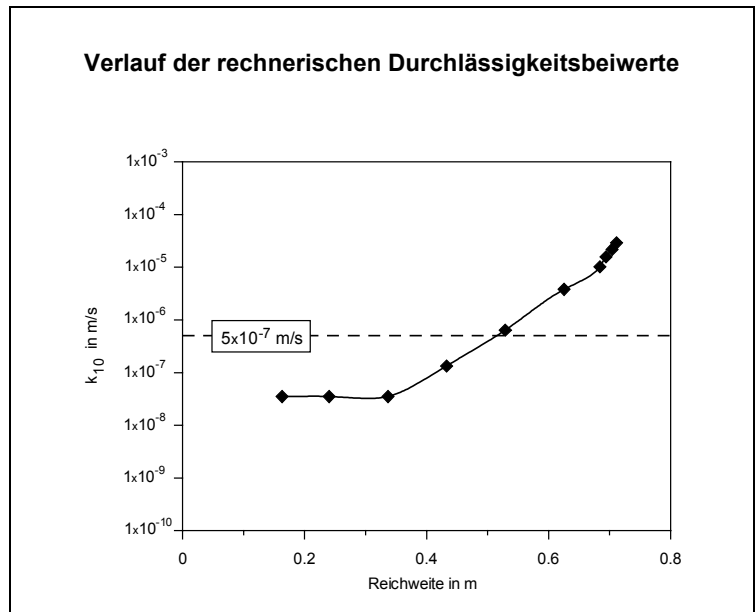
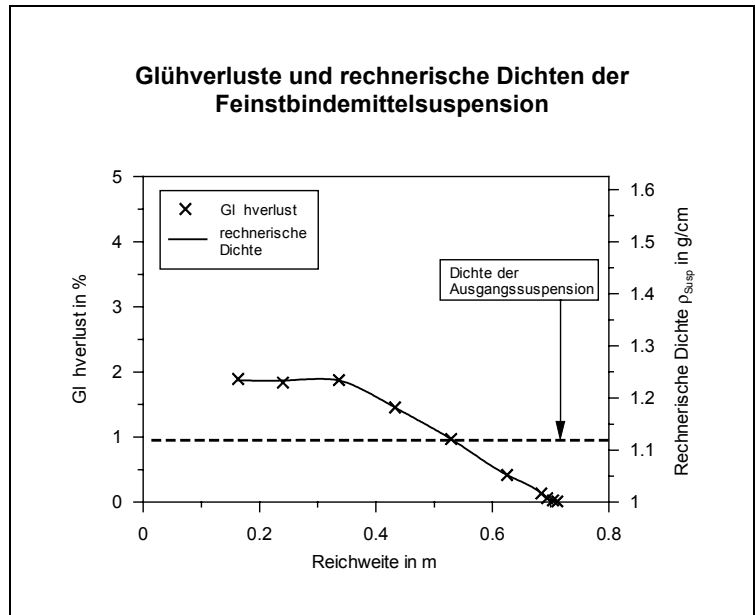
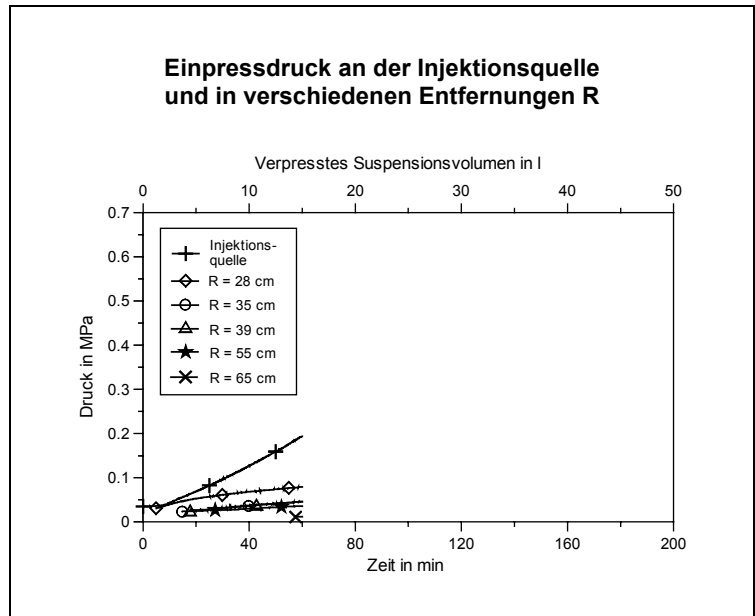
Feinstbindemittelsorte	Finosol F
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 31
Porenanteil	0,35
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	15,0
Reichweite in m	0,72
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,97
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	3,6
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein



Oberfläche des Injektionskörpers



Ansicht des freigelegten Injektionskörpers



Trichterversuch Nr. 3

Feinstbindemittelsorte	Finosol F
W / B	4,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,15
Sand	F 31
Porenanteil	0,35
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	42,4
Reichweite in m	0,97
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,82
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	21,8
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein

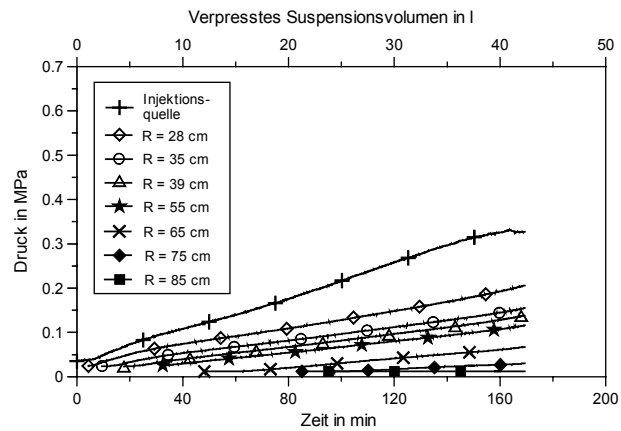


Oberfläche des Injektionskörpers

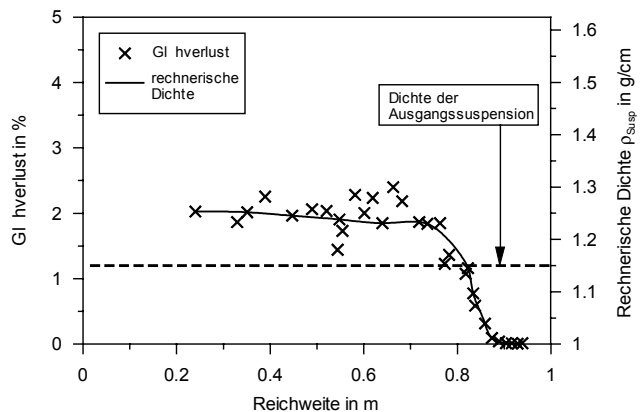


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers

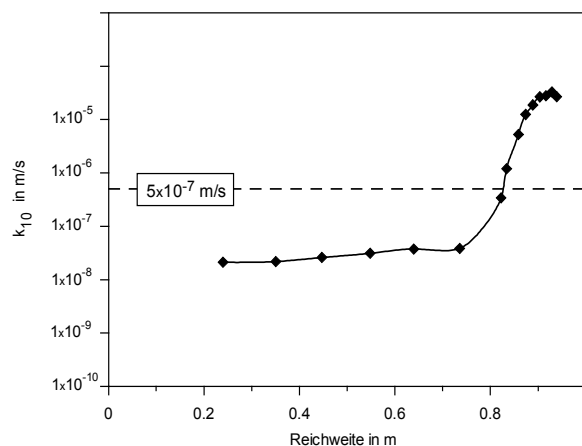
Einpressdruck an der Injektionsquelle und in verschiedenen Entfernungen R



Glühverluste und rechnerische Dichten der Feinstbindemittelsuspension



Verlauf der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte



Trichterversuch Nr. 4

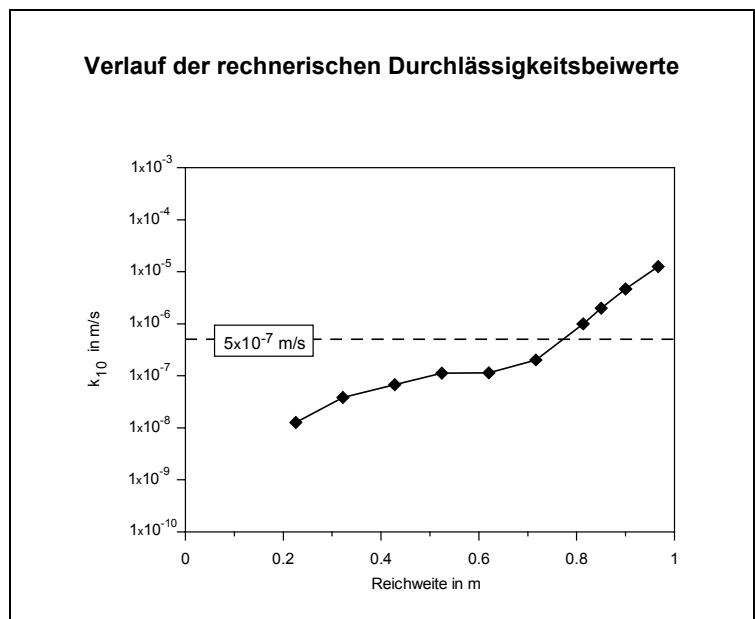
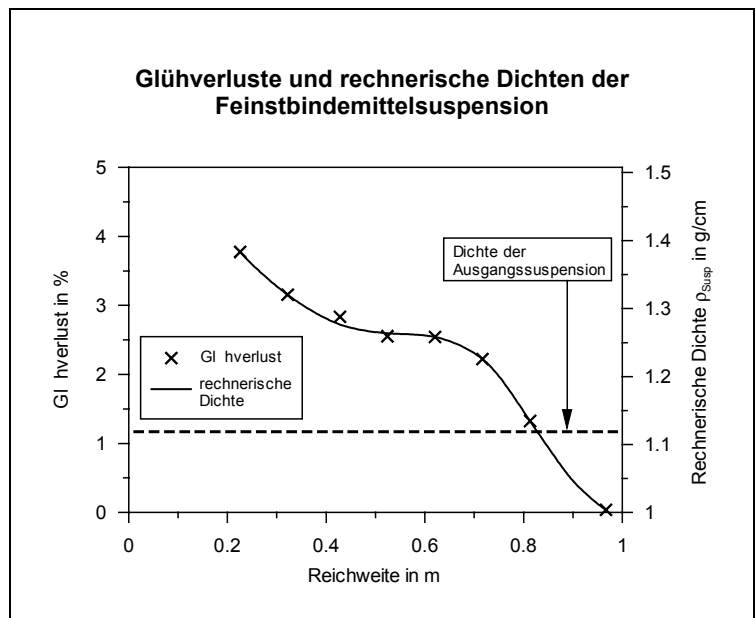
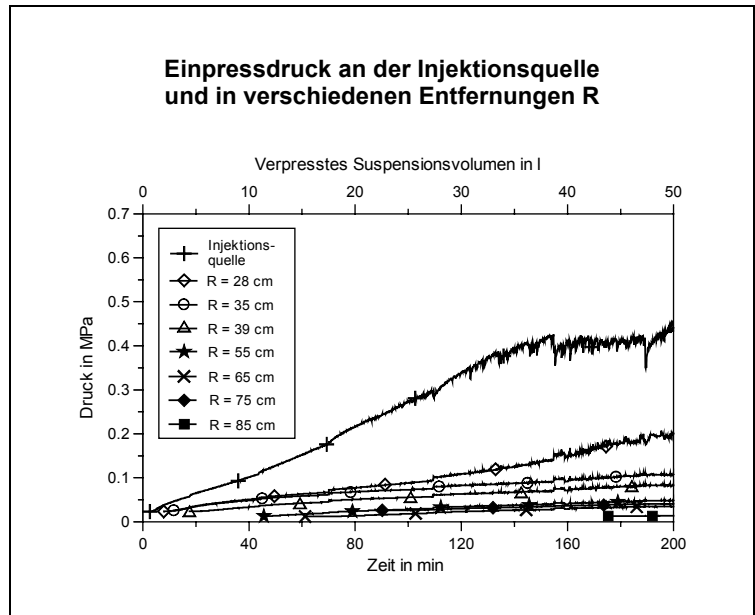
Feinstbindemittelsorte	Finosol U
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 32
Porenanteil	0,38
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	50,0
Reichweite in m	0,97
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,74
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	35,7
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein



Oberfläche des Injektionskörpers



Ansicht des freigelegten Injektionskörpers



Trichterversuch Nr. 5

Feinstbindemittelsorte	Finosol U
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 32
Porenanteil	0,38
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,4
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	15,5
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	47,0
Reichweite in m	1,00
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,87
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	14,8
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein

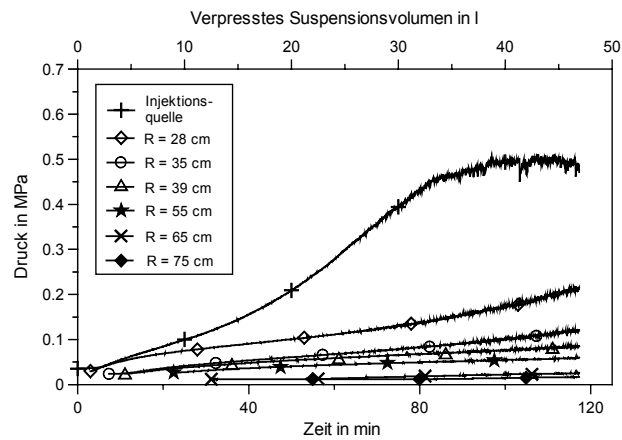


Oberfläche des Injektionskörpers

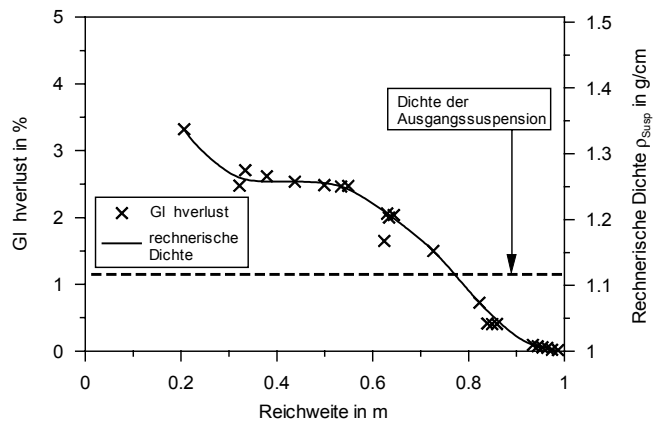


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers

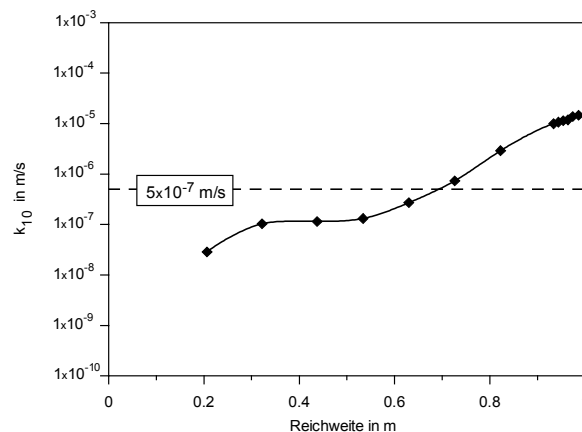
Einpressdruck an der Injektionsquelle und in verschiedenen Entfernungen R



Glühverluste und rechnerische Dichten der Feinstbindemittelsuspension

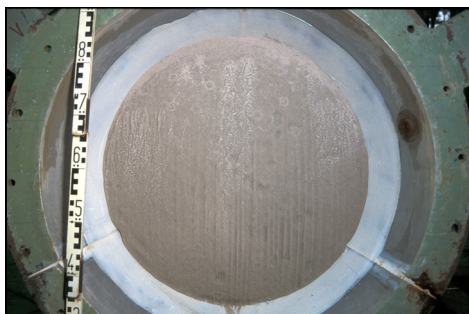


Verlauf der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte

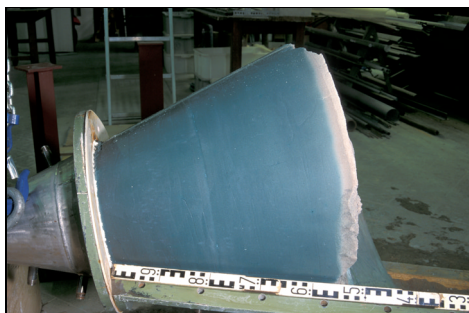


Trichterversuch Nr. 6

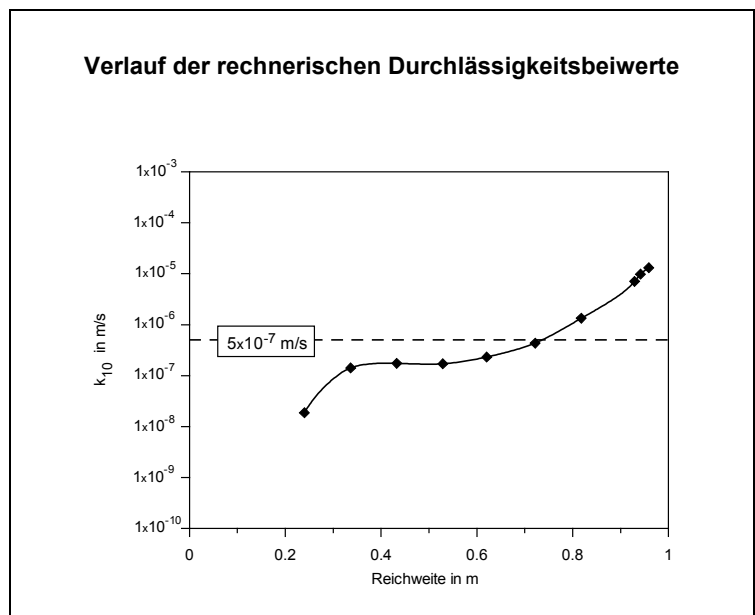
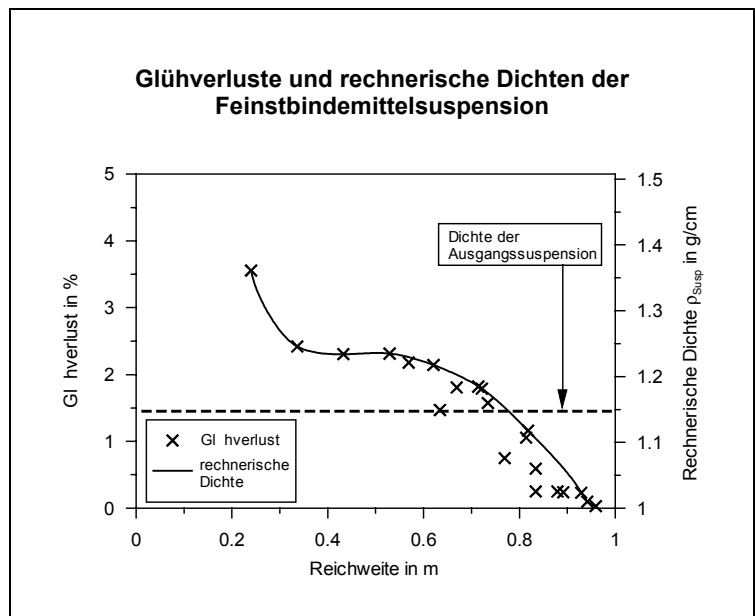
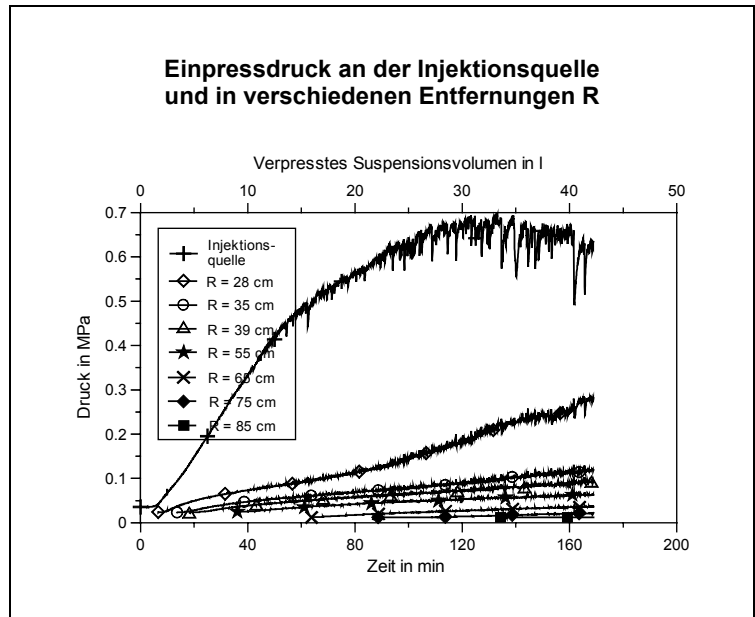
Feinstbindemittelsorte	Finosol U
W / B	4,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,15
Sand	F 32
Porenanteil	0,38
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	42,0
Reichweite in m	0,96
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,86
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	16,1
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein



Oberfläche des Injektionskörpers

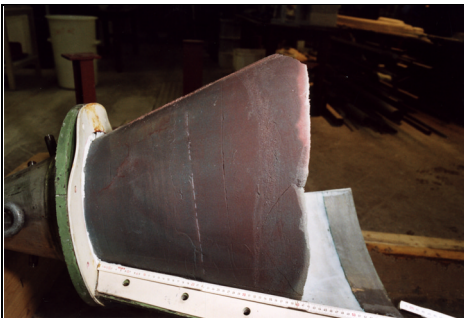


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers



Trichterversuch Nr. 7

Feinstbindemittelsorte	Finosol X
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 32
Porenanteil	0,38
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	50,0
Reichweite in m	0,89
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,58
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	71,9
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	ja

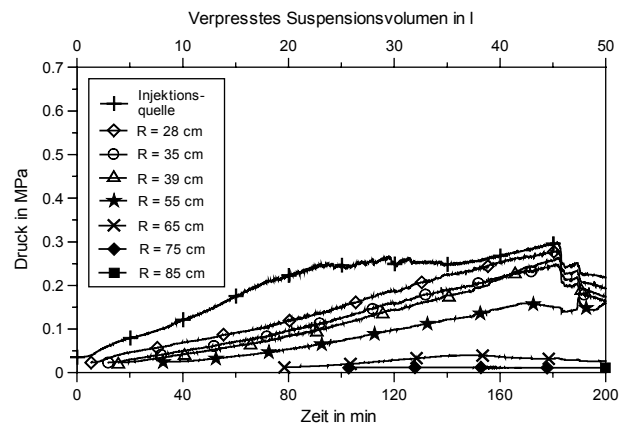


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers

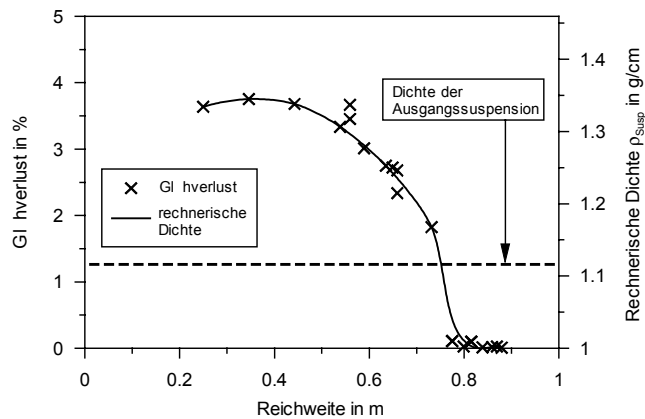


Schnitt durch den Injektionskörper mit Cracks

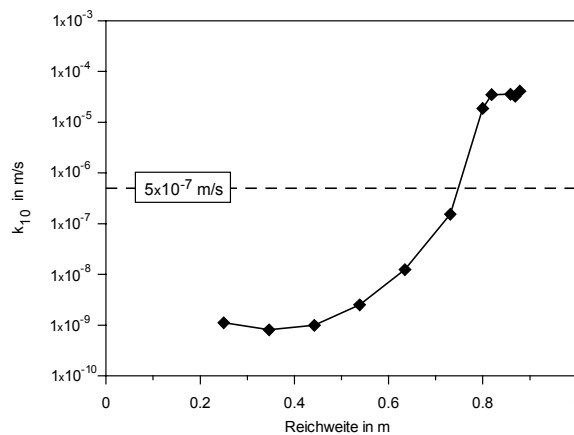
Einpressdruck an der Injektionsquelle und in verschiedenen Entfernungen R



Glühverluste und rechnerische Dichten der Feinstbindemittelsuspension



Verlauf der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte

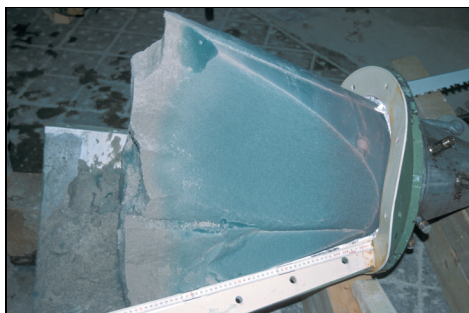


Trichterversuch Nr. 8

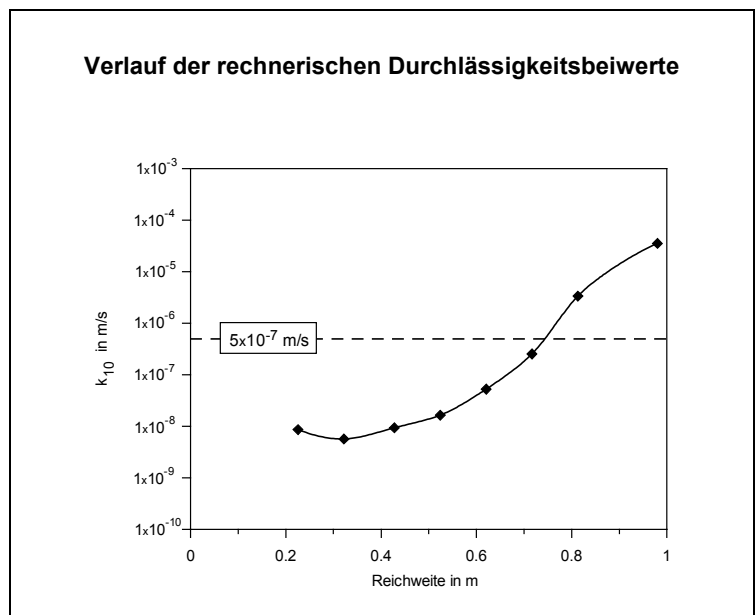
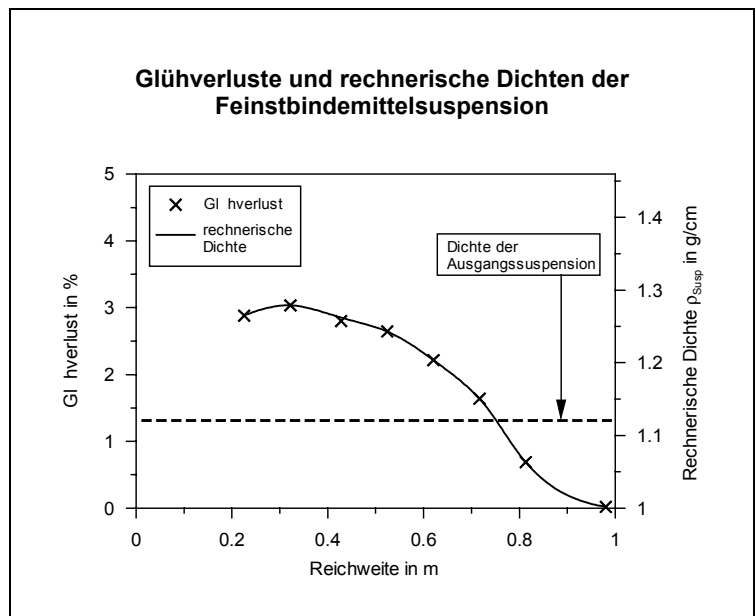
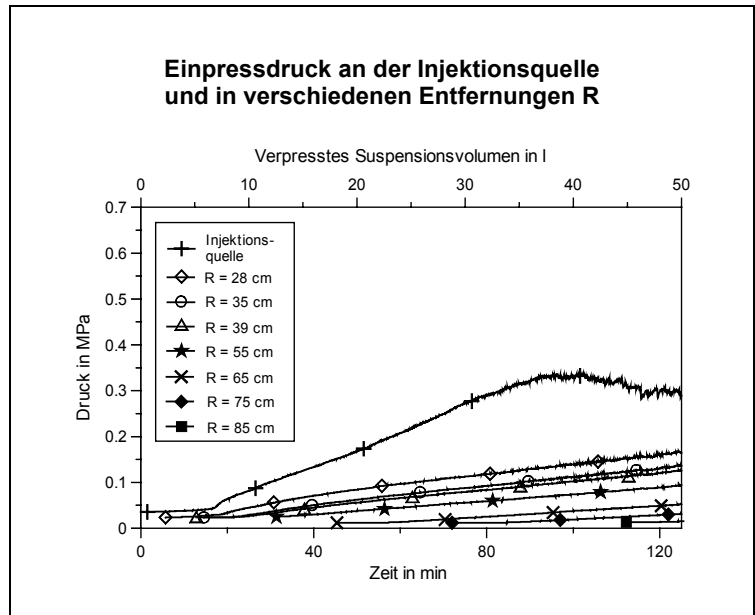
Feinstbindemittelsorte	Finosol X
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 32
Porenanteil	0,38
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,4
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	15,5
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	50,0
Reichweite in m	0,98
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,78
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	28,3
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein



Oberfläche des Injektionskörpers



Ansicht des freigelegten Injektionskörpers



Trichterversuch Nr. 9

Feinstbindemittelsorte	Finosol X
W / B	4,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,15
Sand	F 32
Porenanteil	0,35
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	40,0
Reichweite in m	0,93
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,78
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	28,6
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	nein

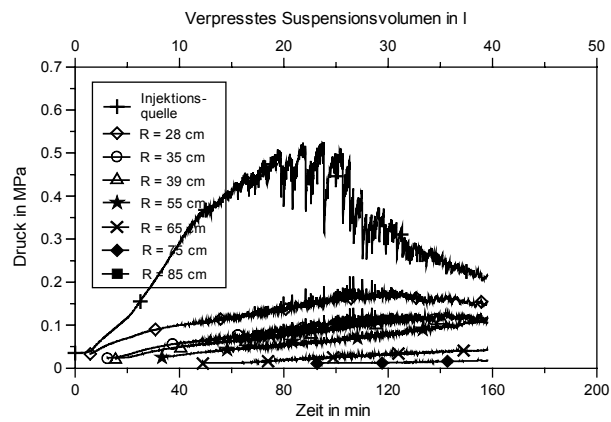


Oberfläche des Injektionskörpers

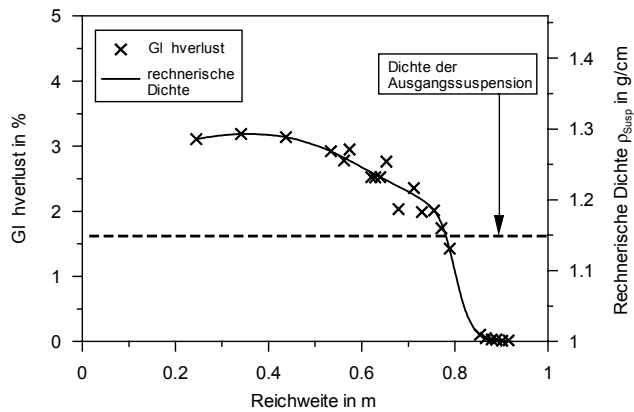


Ansicht des freigelegten Injektionskörpers

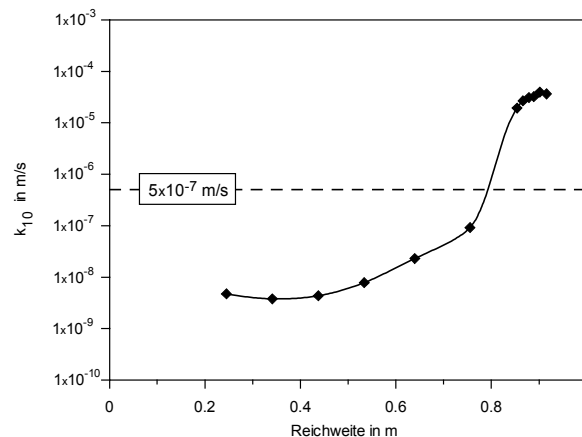
Einpressdruck an der Injektionsquelle und in verschiedenen Entfernungen R



Glühverluste und rechnerische Dichten der Feinstbindemittelsuspension



Verlauf der rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwerte



Trichterversuch Nr. 10

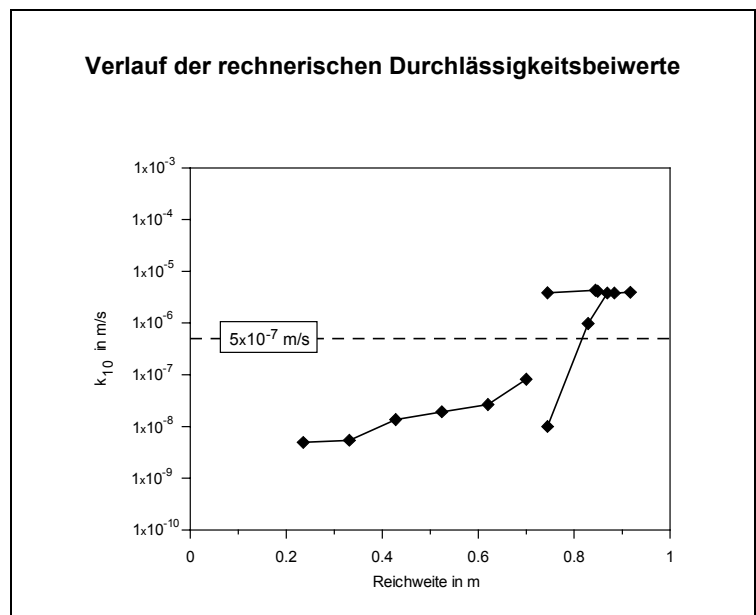
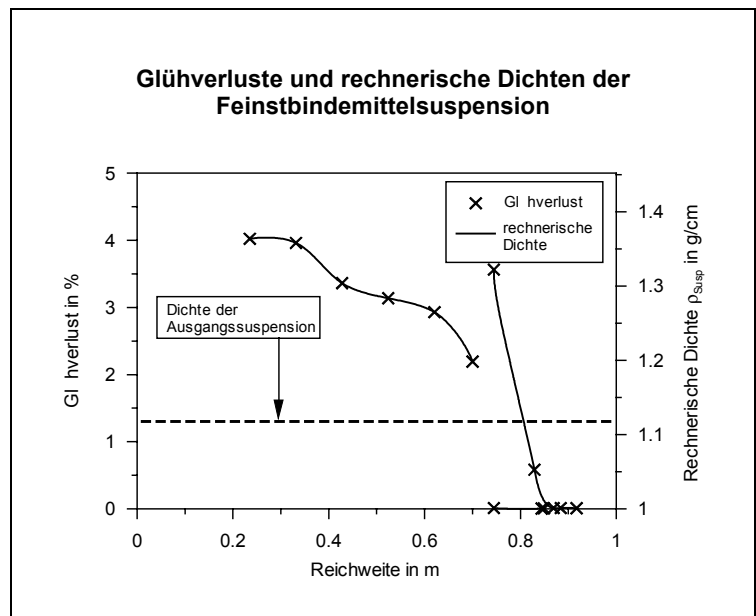
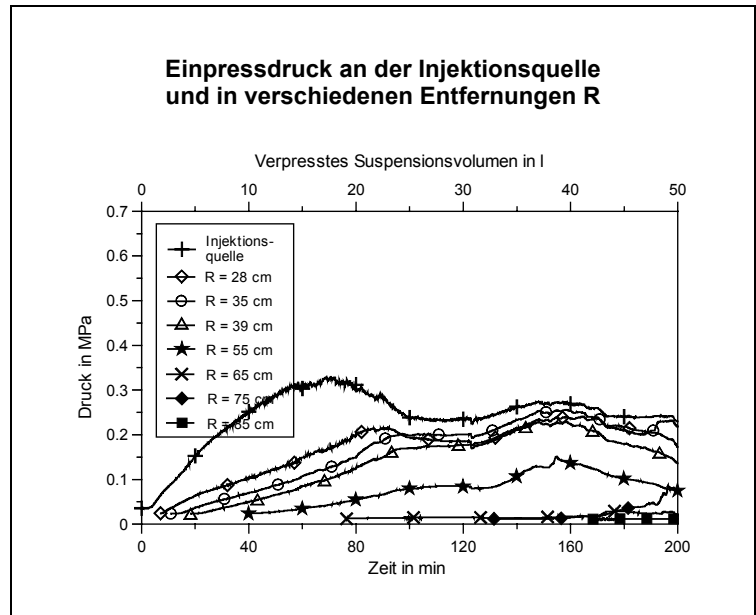
Feinstbindemittelsorte	Finosol X
W / B	5,0
Dichte der Suspension in g/cm ³	1,12
Sand	F 36
Porenanteil	0,39
Tatsächliche Verpressrate in l/min	0,25
Rechnerische Verpressrate (Vollkugel) in l/min	9,7
Verpresstes Suspensionsvolumen in l	50,0
Reichweite in m	0,87-0,97
Verhältnis des Porenvolumens des Injektionskörpers zum verpressten Suspensionsvolumen	0,66
Mehrmenge an Feinstbindemittelsuspension in % des Porenvolumens der Verpresskörper	52,5
Am Injektionskörper festgestellte Cracks	ja



Oberfläche des Injektionskörpers



Ansicht des freigelegten Injektionskörpers



Wissenschaftlicher Werdegang

Name	Matthias Kuk
Geburtsdatum	17.06.1968
Geburtsort	Herford
Familienstand	verheiratet seit 16.3.01 mit Frau Iris Dittmann
Schulbildung	1974 bis 1978 Grundschule Lemgo-Brake 1978 bis 1984 Bürgermeister-Gräfer-Realschule in Lemgo 1984 bis 1987 Marianne-Weber-Gymnasium in Lemgo 26.5.1987 Abitur
Studium	1989 bis 1997 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Hannover 16.7.97 Diplomprüfung
Berufstätigkeit	1.8.97 bis 31.5.04 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover Mitglied im Arbeitskreis 2.9 „ <i>Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein</i> “ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik Seit 1.6.04 Inhaber des Ingenieurbüros für Erd- und Grundbau Detmold (EGD)