

**Untersuchungen zum erweiterten Einsatz  
von Erddruckschilden  
in grobkörnigem Lockergestein**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

der

**Fakultät für Bau- und  
Umweltingenieurwissenschaften**

der

**Ruhr-Universität Bochum**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christoph Budach

Referenten: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum  
Prof. Dr. M. Alber, Ruhr-Universität Bochum  
Prof. Dr. G. Anagnostou, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Eingereicht am: 07. September 2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 2011



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes für die intensive Förderung und wissenschaftliche Begleitung der Promotion, die stete Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner lehrreichen und interessanten Tätigkeit am Lehrstuhl.

Herrn Prof. Dr. Michael Alber und Herrn Prof. Dr. Georg Anagnostou danke ich für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Ihre Ratschläge und Anregungen waren sehr hilfreich bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt danke ich für seine freundliche Bereitschaft zur Übernahme der Aufgaben des fachfremden Prüfers.

Ein herzliches Dankeschön richte ich an meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für die sehr gute Zusammenarbeit, fachliche und kollegiale Unterstützung sowie das ganz hervorragende Arbeitsklima. Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern der Konstruktionsteilprüfung für die stete Hilfsbereitschaft bei der Umsetzung von Versuchen.

Des Weiteren danke ich dem Team der Abteilung Forschung und Entwicklung der Business Unit Traffic Tunnelling der Herrenknecht AG für die intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Bei meinen Eltern und Schwiegereltern bedanke ich mich sehr herzlich für die Unterstützung und die übernommenen Korrekturarbeiten. Ebenso ist es mir ein Anliegen, meinem Schwiegervater für viele konstruktive Hinweise und intensive Fachgespräche zu danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Anja, die mich immer mit Rat und Tat unterstützt hat, eine wunderbare Lektorin ist und der ich so viel zu verdanken habe.

Essen, im Januar 2012

Christoph Budach



## Zusammenfassung

Die Einsatzgrenzen von Erddruckschilden ergaben sich ursprünglich dadurch, dass der Baugrund vor allem aus feinkörnigen oder gemischtkörnigen Böden mit mindestens 30 M-% Feinanteil ( $d < 0,06$  mm) bestand. Zur Erweiterung der Einsatzgebiete auf Böden mit geringem Feinanteil hat sich die Konditionierung des abgebauten Materials durch die Verwendung von Schäumen, Polymeren und Feinstoffsuspensionen als effektiv erwiesen. Der Einsatz von Konditionierungsmitteln erfolgte bislang jedoch größtenteils auf Basis empirischer Erfahrungen. Eine Bewertung der Einsatzgebiete von Erddruckschilden in grobkörnigen Böden auf Grundlage systematischer, wissenschaftlicher Untersuchungen wurde nicht durchgeführt. Zudem existieren bisher keine standardisierten Methoden, um die Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und von konditionierten Lockergesteinen zu bestimmen. Bei Erddruckschilden besteht die Möglichkeit, dass Sickerströmungen bzw. Strömungsdrücke infolge der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums entstehen und diese sich auf die Größe des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks auswirken können. Auch die Einflüsse der Konditionierung auf die Strömungsdrücke bzw. auf die Ermittlung des Stützdrucks blieben bisher unberücksichtigt.

Im Rahmen der Dissertation werden zunächst Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der wesentlichen Eigenschaften von Schäumen, Polymeren und Feinstoffsuspensionen sowie konditionierten Böden vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft. Anschließend erfolgt zunächst die Bestimmung unterschiedlicher Eigenschaften der Konditionierungsmittel, insbesondere von Schäumen, da diese sehr häufig bei Vortrieben mit Erddruckschilden genutzt werden. Für die Herstellung von Schäumen wird dabei eine Schaumanlage verwendet, die einen praxisnahen Aufbau und ähnliche Einstellungsmöglichkeiten wie eine Anlage auf Erddruckschilden hat. Bei den Versuchen werden erstmals verschiedene Einflüsse, wie z. B. des Aufbaus der Schaumanlage oder des Schaumvolumenstroms, auf die Eigenschaften bei der Schaumproduktion unter realitätsnahen Randbedingungen bestimmt. Auf Grundlage der jeweiligen Versuchsergebnisse erfolgt die Auswahl an Konditionierungsmitteln, mit denen anschließend die Konditionierung grobkörniger Böden erfolgt.

Zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften von konditionierten, grobkörnigen Böden werden Versuchsreihen mit Variationen der Konditionierungsmittel und der Kornverteilung durchgeführt. Es zeigt sich dabei, dass vor allem die Ergebnisse zur Verarbeitbarkeit, Kompressibilität und Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums für die Bestimmung der Einsatzmöglichkeit eines Erddruckschildes relevant sind.

Ergänzend werden mithilfe numerischer Berechnungen bei unterschiedlichen hydrogeologischen Randbedingungen im Baugrund, in der Abbaulammer und in der Förderschnecke Strömungsdrücke ermittelt, die sich auf die Größe des effektiven Stützdrucks auswirken können. Die anschließende Analyse der Berechnungsergebnisse zeigt, dass die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials wesentlichen Einfluss auf den minimal erforderlichen effektiven Stützdruck hat.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und der Stützdruckberechnungen werden abschließend Empfehlungen zur Verwendung von Konditionierungsmitteln beim Einsatz eines Erd-druckschildes in grobkörnigen Lockergesteinen erarbeitet. Unter anderem erfolgt die Entwicklung einer auf Laboruntersuchungen basierenden Empfehlung zu Einsatzbereichen von Erd-druckschilden in grobkörnigen Lockergesteinen unter Verwendung von Konditionierungsmitteln.

## Summary

### **Extended application ranges of EPB-Shields in coarse-grained soils**

Earth Pressure Balance (EPB-) Shields were originally used in soils with a content of fines ( $d < 0.06$  mm) of at least 30 %. In order to apply the application ranges of EPB-Shields into soils with lower content of fines conditioning of soil by injecting foam, polymers and suspension of fillers has proved to be effective. Up to now, the use of conditioning agents is based on practical experiences from former tunneling projects. Until now, a validation of these application ranges in coarse-grained soils has not been conducted by systematically research. Furthermore, standardised methods to determine the properties of conditioning agents and conditioned soils are not existing, yet. By using Earth-Pressure-Balance-Shield seepage flows and hydraulic pressures, as a result of different water permeability of the support medium and the soil, could be generated and have influence on the minimal required effective support pressure. The influence of the soil conditioning on the hydraulic pressures and respectively on the determination of the effective support pressure was not proved yet.

In this Ph.D.-thesis test methods for determining the main properties of foams, polymers, suspension of fillers and conditioning agents are presented and their adaptabilities is tested. Besides, the determination of the main properties of conditioning agents, in particular foams, are carried out, because foams are often used in tunnel drives with EPB-Shields. A foam generator, that has realistic properties installation and similar the same adjustment like generators on EPB-Shields, is used for foam production. For the first time, different influences on the properties of foam, like the installation of the foam lance and the volume flow of the foam, are determined. Based on these results, conditioning agents are chosen that will be used for soil conditioning in coarse-grained soils.

Series of experiments with variation of the conditioning agent and the grain distribution curve are conducted for determination the main properties of conditioned coarse-grained soils. Especially the results of workability, compressibility and water permeability of the support medium are relevant for the application ranges of EPB-Shields.

Additional, numerical calculations with different hydraulic boundaries in the soil, in the excavation chamber and in the screw conveyor were conducted to determine the hydraulic pressures that could influence the value of the effective support pressure. The analysis of the results shows, that the water permeability of the support medium has an enormous influence on the minimal required effective support pressure.

Based on the results of the experimental research and on the research of support pressure recommendations for the use of conditioning agents and for the application ranges in coarse-grained soils are developed.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Summary</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Einführung.....	1
1.2. Problemstellung .....	3
1.3. Zielsetzung.....	5
1.4. Vorgehensweise.....	6
<b>2. Grundlagen zur Konditionierung von Lockergestein bei Erddruckschilden</b> ....	<b>8</b>
2.1. Konstruktionselemente für Materialabbau, Ortsbruststützung und Förderung des abgebauten Materials bei Erddruckschilden .....	8
2.1.1. Schneidrad.....	8
2.1.2. Abbaukammer.....	9
2.1.3. Schneckenförderer.....	10
2.2. Eigenschaften des aufzufahrenden Baugrunds .....	11
2.3. Grundlagen zur Bodenkonditionierung .....	13
2.3.1. Ziele der Konditionierung bei Erddruckschilden.....	14
2.3.2. Konditionierung mit Wasser .....	15
2.3.3. Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen .....	16
2.3.4. Konditionierung mit Polymersuspensionen.....	17
2.3.5. Konditionierung mit Schäumen.....	18
2.3.6. Umweltverträglichkeit von Konditionierungsmitteln .....	24
2.4. Grundlagen der Stützdruckberechnung .....	27
2.4.1. Zur Stützdruckberechnung nach <i>Anagnostou &amp; Kovári</i> .....	27
2.4.2. Zur Stützdruckberechnung nach <i>Piaskowski &amp; Kowalewski</i> .....	37
2.4.3. Anmerkungen zu den betrachteten Modellen zur Stützdruckberechnung .....	38
<b>3. Bisheriger Stand der Forschung zur Konditionierung von Lockergestein</b> .....	<b>41</b>
3.1. Einsatzbereiche von Erddruckschilden im Lockergestein ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln .....	41
3.2. Bisherige Empfehlungen zu Einsatzbereichen von Erddruckschilden bei Verwendung von Konditionierungsmitteln .....	46
3.3. Bisherige Erkenntnisse zur Konditionierung von Lockergestein.....	50
3.3.1. Praxiserfahrungen zur Konditionierung bei Erddruckschilden.....	50
3.3.2. Bisherige Forschungsergebnisse zur Konditionierung bei Erddruckschilden .....	53

3.4.	Motivation für weitergehende Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein.....	70
<b>4.</b>	<b>Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein..</b>	<b>73</b>
4.1.	Konditionierung mit Schäumen.....	73
4.1.1.	Einflussparameter auf die Herstellung von Schäumen .....	73
4.1.2.	Eigenschaften von Schäumen.....	75
4.1.3.	Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen .....	76
4.1.4.	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen.....	83
4.2.	Konditionierung mit Polymeren und Polymersuspensionen .....	90
4.2.1.	Einflussparameter bei der Anwendung von Polymeren und Polymersuspensionen	90
4.2.2.	Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen .....	90
4.2.3.	Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen .....	91
4.2.4.	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen .....	91
4.3.	Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen .....	93
4.3.1.	Einflussparameter auf die Herstellung von Feinstoffsuspensionen .....	93
4.3.2.	Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen .....	94
4.3.3.	Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen .....	94
4.3.4.	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen .....	95
4.4.	Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein .....	96
4.4.1.	Einflussparameter bei der Herstellung von konditioniertem Lockergestein .....	96
4.4.2.	Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein.....	98
4.4.3.	Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein ...	98
4.4.4.	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein.....	101
<b>5.</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln .....</b>	<b>115</b>
5.1.	Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen.....	115
5.1.1.	Bestimmung der Dichte von Schäumen.....	115
5.1.2.	Drainageverhalten von Schäumen .....	120
5.1.3.	Bläschengröße von Schäumen.....	126
5.1.4.	Kompressibilität von Schäumen .....	132
5.1.5.	Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Schäume.....	133
5.2.	Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen .....	134
5.2.1.	Marsh-Zeit von Polymeren und Polymersuspensionen.....	134
5.2.2.	Kugelharfenversuche nach <i>von Soos</i> für Polymere und Polymersuspensionen....	135
5.2.3.	Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Polymere und Polymersuspensionen ...	136
5.3.	Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen .....	136
5.3.1.	Dichtebestimmung von Feinstoffsuspensionen.....	137
5.3.2.	Pumpfähigkeit von Feinstoffsuspensionen .....	138
5.3.3.	Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Feinstoffsuspensionen .....	139

5.4.	Wahl der Konditionierungsmittel für die weiteren Untersuchungen.....	139
<b>6.</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein.....</b>	<b>141</b>
6.1.	Untersuchungsergebnisse zur Herstellung von konditioniertem Lockergestein ....	141
6.1.1.	Herstellung von Versuchsböden.....	141
6.1.2.	Einfluss des Wassergehalts .....	143
6.1.3.	Einfluss infolge der Durchmischung .....	145
6.1.4.	Schlussfolgerungen aus den Versuchen .....	153
6.2.	Untersuchungsergebnisse von mit Schaum konditionierten, grobkörnigen Böden	153
6.2.1.	Bestimmung der Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische bei unterschiedlichen Bodeneigenschaften .....	154
6.2.2.	Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Boden-Schaum-Gemischen als Stützmedium .....	170
6.3.	Untersuchungsergebnisse von mit unterschiedlichen Schäumen konditioniertem Boden .....	172
6.3.1.	Bestimmung der Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische bei unterschiedlichen Schaumeigenschaften .....	173
6.3.2.	Einflüsse der Parameter FIR, FER und $c_f$ auf die Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen .....	183
6.4.	Untersuchungsergebnisse von mit Polymerschaum konditionierten, grobkörnigen Böden .....	185
6.5.	Untersuchungsergebnisse von mit Feinstoffsuspensionen konditionierten, grobkörnigen Böden.....	187
6.6.	Untersuchungsergebnisse von mit mehreren Mitteln konditionierten, grobkörnigen Böden.....	190
6.7.	Anmerkungen zu den Untersuchungsergebnissen mit konditionierten, grobkörnigen Böden.....	192
<b>7.</b>	<b>Einfluss der Konditionierung auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks .....</b>	<b>195</b>
7.1.	Vorgehensweise zur Berechnung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks sowie Parameterstudie zur Bestimmung des Einflusses der Konditionierung auf den effektiven Stützdruck.....	195
7.2.	Numerisches Modell zur Ermittlung der Sickerströmung sowie Vorgehen zur Berechnung des Stützdrucks.....	198
7.3.	Ergebnisse der Stützdruckberechnung unter Berücksichtigung von Sickerströmungen .....	205
<b>8.</b>	<b>Erkenntnisse aus den Untersuchungen und Empfehlungen für die Praxis ...</b>	<b>215</b>
8.1.	Erkenntnisse aus den Versuchen mit Konditionierungsmitteln und Empfehlungen für die Praxis .....	215
8.2.	Erkenntnisse aus den Versuchen mit konditionierten, grobkörnigen Lockergesteinen und Empfehlungen für die Praxis.....	219

---

8.3.	Erkenntnisse aus den Ergebnissen zur Stützdruckberechnung und Empfehlungen für die Praxis .....	225
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>227</b>
<b>10.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>229</b>
<b>11.</b>	<b>Anlagen.....</b>	<b>239</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Konstruktionselemente für Materialabbau, Ortsbruststützung und Förderung des abgebauten Materials bei einem Erddruckschild [68] .....	2
Abbildung 2-1:	Schema eines Erddruckschildes mit wesentlichen Konstruktionselementen ..	8
Abbildung 2-2:	Erforderlicher Druckabbau zwischen zwei Wendeln eines Schneckenförderers .....	11
Abbildung 2-3:	Prinzip zur Herstellung von Schäumen mit einer Schaumlanze mit Störkörper nach [146] .....	19
Abbildung 2-4:	Mikroskopische Aufnahme des Aufbaus eines Schaums .....	21
Abbildung 2-5:	Mikroskopische Aufnahme eines Schaums beim Übergang eines Polyederschaums zu einem Kugelschaum [133] .....	22
Abbildung 2-6:	Anordnung von Tensidmolekülen an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser (a), bei der Bildung einer Mizelle (b) sowie bei der Bildung einer Schaumblase (c) nach [152] .....	23
Abbildung 2-7:	Prozentualer Verlauf des Anteils der biologisch abgebauten Substanz eines im Tunnelbau genutzten Produkts, hier CLB F4 der Fa. Condat Lubrifiants [31] .....	24
Abbildung 2-8:	Arbeitsschritte zur Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels hinsichtlich der Anforderungen an die Deponierfähigkeit .....	26
Abbildung 2-9:	Bruchkörpermodell von <i>Horn</i> nach [5] sowie angreifende Kräfte am Gleitkeil in Anlehnung an [4] .....	28
Abbildung 2-10:	Darstellung zur Definition der piezometrischen Höhe .....	30
Abbildung 2-11:	Darstellung der Berechnung des Strömungsdrucks im Prisma auf der Höhe $z$ .....	31
Abbildung 2-12:	Belastungen des Gleitkeils in horizontaler Richtung aufgrund von Sickerströmungen (Abbildung eines näherungsweise linearen Verlaufs) ..	32
Abbildung 2-13:	Belastungen des Gleitkeils in vertikaler Richtung aufgrund von Sickerströmungen (Abbildung eines näherungsweise linearen Verlaufs) ..	33
Abbildung 2-14:	Nomogramme für dimensionslose Koeffizienten $F_0$ bis $F_3$ nach [4] .....	37
Abbildung 2-15:	Darstellung des Bruchkörpermodells von <i>Piaskowski &amp; Kowalewski</i> [9] ...	37
Abbildung 2-16:	Vergleich von gemessenen Drücken beim Hydroschild und beim EPB-Schild .....	40
Abbildung 3-1:	Einsatzgrenze eines Erddruckschildes hinsichtlich der maximalen Wasserdurchlässigkeit von $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsmethoden; Darstellung nach [84] (grün) und Berechnung nach [67] (rot) .....	42
Abbildung 3-2:	Klassische Einsatzbereiche von Erddruck- und Hydroschilden in Abhängigkeit der Kornverteilung nach [105] .....	46
Abbildung 3-3:	Auswahl von Projekten mit Erddruckschilden, Kornverteilungslinien, möglichen Grundwasserdrücken, Angaben zu den eingesetzten Konditionierungsmitteln sowie der Kornverteilungslinie der klassischen Einsatzgrenze [7, 61] in Anlehnung an [147] .....	47
Abbildung 3-4:	Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [100, 105] ...	48
Abbildung 3-5:	Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [60] .....	48
Abbildung 3-6:	Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [141] .....	49
Abbildung 3-7:	Darstellung der Konditionierungsparameter $Q_F$ , FIR und FER von drei Vortrieben .....	51

Abbildung 3-8:	Darstellung von beispielhaften Kornverteilungslinien für die Injektionsraten von FIR = 0 % und FIR = 100 %, den Kornverteilungslinien von drei Sanden sowie Übersicht der notwendigen Parameter zur Bestimmung der Kornverteilungslinien bei Anwendung der Formel von [88] .....	58
Abbildung 3-9:	Porenwasserdruckverteilung im Baugrund bei einem numerischen Modell nach [65].....	68
Abbildung 4-1:	Schemata und Fotos zweier unterschiedlicher Schaumlanzen .....	75
Abbildung 4-2:	Darstellung der im Labor des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum genutzten Schaumanlage [26]..	77
Abbildung 4-3:	Schemata der im Labor verwendeten Schaumanlage in Anlehnung an [64] .....	78
Abbildung 4-4:	Schemata und Foto der installierten Schaumlanze 3 .....	79
Abbildung 4-5:	Störkörpermaterialien bei Schaumlanze 3 .....	81
Abbildung 4-6:	Konzept zur Bestimmung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Schäumen bei Nutzung unterschiedlicher Schaumlanzen (SL 1 und SL 2 oben, SL 3 unten) .....	82
Abbildung 4-7:	Behälter zur Bestimmung der Schaumdichte .....	84
Abbildung 4-8:	$FER_{ist}$ von Schäumen .....	84
Abbildung 4-9:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Drainagezeiten von Schäumen.....	85
Abbildung 4-10:	Drainagezeiten bei Verwendung von Filter 1 und Schaumlanze 2 sowie 80 g Schaum .....	86
Abbildung 4-11:	Drainagezeiten von mit Lanze 2 produzierten Schäumen bei Verwendung von verschiedenen Filtern sowie 40 g bzw. 80 g Schaum ....	87
Abbildung 4-12:	Versuchsaufbau zur Ermittlung des durchschnittlichen und maximalen Bläschendurchmessers mit dem Mikroskop (links) sowie zur Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Risslineal (rechts) .....	88
Abbildung 4-13:	Bläschendurchmesser von Schäumen.....	88
Abbildung 4-14:	Druckbehälter zur Bestimmung der Kompressibilität von Schäumen .....	89
Abbildung 4-15:	Konzept zur Untersuchung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Polymeren oder Polymersuspensionen.....	91
Abbildung 4-16:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Marsh-Zeit sowie der Kugelnummer mit der Kugelharfe nach <i>von Soos</i> .....	92
Abbildung 4-17:	Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften des Polymers 2 ( $c_p = 100\%$ ).....	93
Abbildung 4-18:	Konzept zur Untersuchung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen.....	94
Abbildung 4-19:	Versuchsmaterialien zur Bestimmung der Dichte sowie des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen .....	95
Abbildung 4-20:	Ergebnisse zur Bestimmung der Dichte und des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen mit Material 1 ( $c_{susp} = 55\%$ ).....	96
Abbildung 4-21:	Konzept zur Bestimmung von Einflüssen auf Boden-Schaum-Gemische bei Variation des Lockergesteins (oben) bzw. der Schaumeigenschaften (unten).....	99
Abbildung 4-22:	Konzept zur Bestimmung der Einflüsse auf konditionierte Lockergesteine unter Verwendung von Schäumen mit Polymerzusatz ...	100
Abbildung 4-23:	Konzept zur Bestimmung der Einflüsse auf mit Feinstoffsuspensionen konditionierte Lockergesteine .....	100
Abbildung 4-24:	Ausbreitmaß von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR	103
Abbildung 4-25:	Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR .....	103

Abbildung 4-26:	Versuchsmaterialien zur Bestimmung des Setzmaßes und Setzfließmaßes* von Boden-Schaum-Gemischen .....	104
Abbildung 4-27:	Setzmaße von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR ...	105
Abbildung 4-28:	Plexiglaszylinder zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen nach [83] .....	106
Abbildung 4-29:	Wasserdurchlässigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten von Boden-Schaum-Gemischen.....	108
Abbildung 4-30:	Plexiglaszylinder mit abgenommenem Deckel zur Bestimmung der Kompressibilität nach [134].....	109
Abbildung 4-31:	Bei Kompressionsversuchen ermittelte Dichten und Kompressibilitäten unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische .....	110
Abbildung 4-32:	Flügelsonde zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von konditionierten Böden.....	111
Abbildung 4-33:	Flügelscherfestigkeit unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische.....	111
Abbildung 4-34:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stabilität von Böden nach [83] .....	112
Abbildung 4-35:	Stabilität unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische in Anlehnung an [134] .....	113
Abbildung 5-1:	$FER_{ist}$ von Schäumen bei Variation der eingestellten FER bei unterschiedlichen Schaumlanzen .....	116
Abbildung 5-2:	$FER_{ist}$ von Schäumen bei Variation des Schaumvolumenstroms $Q_F$ bei unterschiedlichen Schaumlanzen .....	117
Abbildung 5-3:	$FER_{ist}$ von Schäumen bei Variation des Materials (links), der Länge des Störkörpers (Mitte) und der Polymerkonzentration (rechts) bei Schaumlanze 3.....	120
Abbildung 5-4:	Drainagezeiten von Schäumen bei Variation der FER .....	121
Abbildung 5-5:	Drainagezeiten von Schäumen bei Variation der Tensidkonzentration $c_f$	123
Abbildung 5-6:	Drainagezeiten von Schäumen bei Variation des Produkts.....	124
Abbildung 5-7:	Drainagezeiten von Schäumen bei Variation des Materials (links), der Länge des Störkörpers (Mitte) und der Polymerkonzentration (rechts) bei Schaumlanze 3 .....	126
Abbildung 5-8:	Bläschengröße von Schäumen bei Variation der FER .....	127
Abbildung 5-9:	Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Volumenstroms des Schaums .....	128
Abbildung 5-10:	Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Produkts.....	129
Abbildung 5-11:	Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Störkörpermaterials (links) und der Länge des Störkörpers (rechts) .....	130
Abbildung 5-12:	Maximaler Bläschendurchmesser in Abhängigkeit der Drainagezeit für 40 g Liquid und der Art der Schaumlanze .....	131
Abbildung 5-13:	Kompressibilität von verschiedenen Schäumen im Vergleich zum mittleren theoretischen Schaumvolumen .....	132
Abbildung 5-14:	Marsh-Zeit von verschiedenen Polymeren bzw. Polymersuspensionen in Abhängigkeit von Mischzeit und Konzentration.....	135
Abbildung 5-15:	Kugelnnummern von verschiedenen Polymeren bzw. Polymersuspensionen in Abhängigkeit der Mischzeit und Konzentration	136
Abbildung 5-16:	Dichte von Feinstoffsuspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen und Materialien .....	137
Abbildung 5-17:	Ausbreitmaß von Feinstoffsuspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen und Materialien .....	138

Abbildung 6-1:	Matrix zur Berechnung der Kornverteilungslinie eines künstlich zusammengestellten Bodens in Anlehnung an [95].....	143
Abbildung 6-2:	Einteilung des Setzmaßes von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR und Wassergehalten.....	144
Abbildung 6-3:	Bei Untersuchungen genutzte Planetenmischer (links, Fa. Hobart GmbH) und Freifallmischer (rechts, Fa. Atika GmbH & Co. KG) .....	146
Abbildung 6-4:	Dichte von mit unterschiedlichen Mixchern hergestellten Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der Mischdauer.....	147
Abbildung 6-5:	Darstellung von zwei möglichen Situationen hinsichtlich der Sättigung bei Boden-Schaum-Gemischen .....	149
Abbildung 6-6:	Theoretische Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs in Abhängigkeit der FIR .....	150
Abbildung 6-7:	Theoretische und gemessene Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs (Boden L) in Abhängigkeit der FIR.....	151
Abbildung 6-8:	Dichte von mit dem Freifallmischer hergestellten Boden-Schaum- und Boden-Liquid-Gemischen in Abhängigkeit der Mischdauer .....	152
Abbildung 6-9:	Kornverteilung der untersuchten Böden.....	154
Abbildung 6-10:	Versuche zur Bestimmung des Setzmaßes von Boden-Schaum-Gemischen in Anlehnung an [134].....	155
Abbildung 6-11:	Setzmaße von Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der FIR .....	156
Abbildung 6-12:	Darstellung der erforderlichen FIR für verschiedene Setzmaße in Abhängigkeit der Kornfraktion des Bodens .....	157
Abbildung 6-13:	FIR in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche $S_v$ für verschiedene Boden-Schaum-Gemische.....	158
Abbildung 6-14:	Setzmaße und Setzfließmaße* verschiedener Boden-Schaum-Gemische .....	160
Abbildung 6-15:	Kompressibilität verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR bei Drücken von 0,5 bar.....	161
Abbildung 6-16:	Kompressibilität verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit von $C_U$ .....	162
Abbildung 6-17:	Wasserdurchlässigkeit $k$ verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit kleinster Kornfraktion Feinsand in Abhängigkeit der Zeit .....	163
Abbildung 6-18:	Wasserdurchlässigkeit $k$ verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit kleinster Fraktion Mittelsand oder Grobsand in Abhängigkeit der Zeit.....	165
Abbildung 6-19:	Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR .....	166
Abbildung 6-20:	Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit von $C_U$ und der kleinsten Kornfraktion .....	166
Abbildung 6-21:	Flügelscherfestigkeit verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR.....	167
Abbildung 6-22:	Bei Stabilitätsuntersuchungen ermittelte Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR .....	168
Abbildung 6-23:	Kornverteilungen von Böden, bei denen durch Konditionierung mit Schaum Setzmaße von ca. 10 cm bzw. 20 cm erreicht wurden .....	169
Abbildung 6-24:	Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Schaum als Konditionierungsmittel .....	172
Abbildung 6-25:	Kornverteilungslinie des Bodens $V$ .....	173
Abbildung 6-26:	Setzmaß von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	174



Abbildung 6-27:	Setzfließmaß* von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	174
Abbildung 6-28:	Kompressibilität von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums .....	176
Abbildung 6-29:	Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	177
Abbildung 6-30:	Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	179
Abbildung 6-31:	Flügelscherfestigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	180
Abbildung 6-32:	Prozentuale Veränderung des Volumens von Boden-Schaum-Gemischen infolge von 90 Hüben mit dem Ausbreittisch bei Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums.....	181
Abbildung 6-33:	Übersicht der Herstellungsparameter zur Gewährleistung der Schaumeigenschaften für eine geeignete Konditionierung des Bodens V .....	182
Abbildung 6-34:	Einsatzbereiche unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzter Erddruckschilde, sofern der Boden mindestens 5 M-% Feinanteil aufweist.....	184
Abbildung 6-35:	Kornverteilungslinien von Böden, die mit Feinstoffsuspensionen konditioniert wurden .....	187
Abbildung 6-36:	Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Feinstoffsuspensionen als Konditionierungsmittel .....	190
Abbildung 6-37:	Kornverteilungslinien von Böden, die mit mehreren Konditionierungsmitteln aufbereitet wurden .....	190
Abbildung 6-38:	Einsatzbereiche von Erddruckschilden bei Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel .....	192
Abbildung 7-1:	Kräfte am Gleitkeil zur Ermittlung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks bei Vortrieben in kohäsionslosen Lockergesteinen in Anlehnung an [4] .....	196
Abbildung 7-2:	Konzept der Parameterstudie zur Berechnung der Strömungsdrücke mit Variation der Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke .....	197
Abbildung 7-3:	Abmessungen des Beispiels und Darstellung der ermittelten piezometrischen Höhen nach [4] .....	198
Abbildung 7-4:	Geometrisches Modell des Baugrunds zur Ermittlung der piezometrischen Höhen.....	199
Abbildung 7-5:	Seitliche Ansicht des Gleitkeils mit unterschiedlichen Gleitflächenwinkeln sowie Aufbau des Prismas in Abhängigkeit des Gleitflächenwinkels.....	200
Abbildung 7-6:	Numerisches Modell zur Ermittlung der Strömungsdrücke; orthogonal zur Vortriebsrichtung (links) bzw. parallel zur Vortriebsrichtung (rechts) .	201
Abbildung 7-7:	Darstellung des Grundwasserstands $h_0$ und der piezometrischen Höhe in der Abbaukammer $h_F$ nach [4] .....	202
Abbildung 7-8:	Ansicht der Ortsbrust (grün dargestellt) und des dahinter liegenden Gleitkeils in Vortriebsrichtung (gelb dargestellt) im numerischen Modell .	203
Abbildung 7-9:	Effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ und des Berechnungsverfahrens bei Berechnung A.....	204

Abbildung 7-10: Effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ und des Berechnungsverfahrens bei den Berechnungen A und B .....	205
Abbildung 7-11: Effektiver Stützdruck $s'$ bei Variation der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund und des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ .....	206
Abbildung 7-12: Piezometrische Höhen bei $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s im Baugrund und in der Förderschnecke sowie $k = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s (oben) und $k = 1$ m/s (unten) in der Abbaukammer .....	207
Abbildung 7-13: Effektiver Stützdruck $s'$ bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ .....	207
Abbildung 7-14: Piezometrische Höhen bei $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s im Baugrund und in der Abbaukammer sowie $k = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s (oben) und $k = 1$ m/s (unten) in der Förderschnecke .....	208
Abbildung 7-15: Effektiver Stützdruck $s'$ bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ .....	209
Abbildung 7-16: Piezometrische Höhen bei $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s im Baugrund sowie $k = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s (oben) und $k = 1$ m/s (unten) in der Abbaukammer und in der Förderschnecke .....	209
Abbildung 7-17: Effektiver Stützdruck $s'$ bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke sowie des Winkels der inneren Reibung $\varphi$ .....	210
Abbildung 8-1: Mögliche Verfahrenstechnik zur Untersuchung von Schaumeigenschaften während des Vortriebs .....	216
Abbildung 8-2: Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen .....	219
Abbildung 8-3: Einsatzbereiche von Erddruckschilden für grobkörnige Böden auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen .....	221
Abbildung 8-4: Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen sowie auf Grundlage der Empfehlungen nach [150] .....	222
Abbildung 8-5: Einsatzbereiche von Erddruckschilden sowie Kornverteilungslinien und Konditionierungsparameter ausgewählter Vortriebe .....	224

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Kosten für unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten von konditioniertem Lockergestein in Anlehnung an [10].....	25
Tabelle 3-1:	Bereich der Konsistenzzahl $I_C$ zur möglichen Gewährleistung eines Druckgradienten von 0,2 bar pro Wendel auf Basis von [156].....	45
Tabelle 3-2:	Erforderliche Eigenschaften des Lockergesteins in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen.....	45
Tabelle 3-3:	Empfohlene Injektionsrate FIR unterschiedlicher Böden nach [60] .....	49
Tabelle 3-4:	Übersicht zu üblichen Größen verschiedener Parameter der Schaumkonditionierung bei Vortrieben mit Erddruckschilden .....	52
Tabelle 3-5:	Übersicht zu Versuchen zur Bestimmung maßgeblicher Eigenschaften von konditionierten Böden und Randbedingungen hinsichtlich des Drucks bei Untersuchungen nach [131].....	69
Tabelle 3-6:	Übersicht zu von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen durchgeführten Versuchen mit Schäumen.....	69
Tabelle 3-7:	Übersicht zu von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen durchgeführten Versuchen mit konditionierten Lockergesteinen.....	70
Tabelle 4-1:	Einflüsse auf die Herstellung von Schäumen unterteilt in Einflüsse infolge von Schaumingredienzien und maschinentechnischen Einstellungen.....	73
Tabelle 4-2:	Übliche Einstellungsmöglichkeiten von Schaumanlagen auf Erddruckschilden und Randbedingungen der in Versuchen verwendeten Schaumanlage .....	77
Tabelle 4-3:	Eigenschaften von bei Versuchen zur Bestimmung der Drainagezeit genutzten Trichtern mit unterschiedlicher Geometrie und Porosität .....	86
Tabelle 4-4:	Einflüsse bei der Nutzung von Polymeren bzw. Polymersuspensionen ....	90
Tabelle 4-5:	Einflüsse bei der Nutzung von Feinstoffsuspensionen.....	94
Tabelle 4-6:	Einflüsse bei der Nutzung von konditionierten Lockergesteinen .....	97
Tabelle 4-7:	Verfahren zur Bestimmung der Dichte von konditionierten Böden in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes .....	102
Tabelle 4-8:	Übersicht verschiedener Versuche zur Bestimmung der maßgeblichen Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein in Abhängigkeit des Größtkorns .....	113
Tabelle 4-9:	Versuchsreihenfolge zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein .....	114
Tabelle 5-1:	Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Schäume.....	133
Tabelle 5-2:	Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Polymere bzw. Polymersuspensionen.....	136
Tabelle 5-3:	Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Feinstoffsuspensionen .....	139
Tabelle 6-1:	Übersicht über bei Versuchen genutzte Körnungen von Böden.....	142
Tabelle 6-2:	Übersicht zur Porosität, effektiven Porosität und Retention-Porosität von kohäsionslosem Lockergestein nach [30].....	144
Tabelle 6-3:	Übersicht zu Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation der Bodeneigenschaften.....	170
Tabelle 6-4:	Übersicht zu Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation der Schaumeigenschaften .....	182

---

Tabelle 6-5:	Drainagezeit und maximale Bläschengröße von Schäumen, die eine ausreichende Konditionierung des Bodens V ermöglichten .....	183
Tabelle 6-6:	Qualitative Einflüsse auf verschiedene Parameter von Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der FIR, FER und $c_f$ .....	183
Tabelle 6-7:	Eigenschaften verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit unterschiedlichen Polymerkonzentrationen.....	186
Tabelle 6-8:	Eigenschaften verschiedener Boden-Feinstoffsuspensions-Gemische ...	188
Tabelle 6-9:	Eigenschaften von mit mehreren Mitteln konditionierten Böden.....	191
Tabelle 7-1:	Abstände vom Tunnel zu den Rändern des numerischen Modells.....	199
Tabelle 7-2:	Ergebnisse der Berechnungen A und B.....	202
Tabelle 7-3:	Vergleich der Berechnungen 1 und 19 sowie 3 und 20 .....	212
Tabelle 8-1:	Beispiel zur Reduzierung der Anzahl an verwendeten Schaumlanzen....	218
Tabelle 8-2:	Randbedingungen der wesentlichen Eigenschaften des Stützmediums..	224
Tabelle 8-3:	Randbedingungen der weniger bedeutenden Eigenschaften des Stützmediums.....	225

## Verzeichnis der Abkürzungen

%	Prozent
“	Zoll
°	Grad
µm	Mikrometer
€	Euro
bar	Bar
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius
ca.	zirka
cm	Zentimeter
cmc	critical micelle concentration
d	Durchmesser
DepV	Deponieverordnung
D/H	Durchmesser zu Höhe
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Deponieklasse
dyn.	dynamisch
d <sub>außen</sub>	Durchmesser außen
d <sub>innen</sub>	Durchmesser innen
d <sub>oben</sub>	Durchmesser oben
d <sub>unten</sub>	Durchmesser unten
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EN	Europäische Norm
EPB	Earth Pressure Balance
Fa.	Firma
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
GOK	Geländeoberkante
H	Höhe
h	Stunde
H/D	Höhe zu Durchmesser
H <sub>2</sub> O	Wasser
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal

---

kW	Kilowatt
l	Liter
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
m	Meter
M-%	Massenprozent
max.	maximal
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Nr.	Nummer
o. ä.	oder ähnliches
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
p	Druck
Pa	Pascal
PET	Polyethylenterephthalat
s	Sekunde
s. o.	siehe oben
SL	Schaumlanze
stat.	statisch
r	Radius
to	Tonnen
TUNCONSTRUCT	Technology Innovation in Underground Construction (TUNCONSTRUCT) = europäisches Forschungsprojekt zur Erforschung und Entwicklung innovativer Methoden, Materialien und Maschinen zur Verbesserung des Entwurfes, des Baus und der Instandhaltung von Tunnelbauten
U	Umdrehungen
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
Vol-%	Volumenprozent
W	Watt
WGK	Wassergefährdungsklasse
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
zzgl.	zuzüglich

## Formelzeichen

$A$	durchflossener Querschnitt
$A_B$	Fläche eines Bodenelements im Prisma
$A_S$	Abbaufäche des Schilds
$a_W$	Abstand der Wendel
$c'$	effektive Kohäsion
$c_i$	Kohäsion der Bodenschicht
$C_{Fl}$	Kohäsionskraft einer Flanke
$c_f$	Tensidkonzentration
$C_L$	Faktor in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und Ungleichförmigkeitszahl
$c_p$	Konzentration der Polymersuspension
$c_{susp}$	Konzentration der Feinstoffsuspension
$C_U$	Ungleichförmigkeitszahl
$C_1$	Kohäsionskraft der Gleitfläche
$d$	Durchmesser
$d'$	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels
$d_i$	Druckhöhe im Punkt i
$d_{10}$	Durchmesser des Korns bei 10 %-igem Massendurchgang
$d_{60}$	Durchmesser des Korns bei 60 %-igem Massendurchgang
$d_{60,max}$	maximaler Durchmesser des Korns bei 60 %-igem Massendurchgang
$d_{60,min}$	minimaler Durchmesser des Korns bei 60 %-igem Massendurchgang
$d_{max}$	Durchmesser des Größtkorns
$d_{Schild}$	Durchmesser des Schilds
$d_{Schnecke}$	Durchmesser der Förderschnecke
$F$	Sicherheitsfaktor
$F_0$	Koeffizient nach [4]
$F_1$	Koeffizient nach [4]
$F_2$	Koeffizient nach [4]
$F_3$	Koeffizient nach [4]
$FER$	Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate
$FER_{Ist}$	ermittelte Foam Expansion Ratio (engl.) = ermittelte Aufschäumrate
$FER_S$	effektive Foam Expansion Ratio (engl.) = effektive Aufschäumrate
$FIR$	Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate
$FIR_{10}$	Foam Injection Ratio für ein Setzmaß von ca. 10 cm
$FIR_{20}$	Foam Injection Ratio für ein Setzmaß von ca. 20 cm
$F_x$	Strömungskraft in x-Richtung
$F_z$	Strömungskraft in z-Richtung
$f_z^{**}$	vertikaler Strömungsdruck des Bodenelements in der Höhe z

$G$	Gewichtskraft des Gleitkeils
$G_{Schneid}$	Gewicht des Schneidrads inkl. Abbauwerkzeuge
$H$	Überdeckung
$h^*$	piezometrische Höhe (im Gleitkeil)
$h^{**}(d)$	hydraulische Höhe im Prisma in der Höhe $d$
$h^{**}(z)$	hydraulische Höhe im Prisma in der Höhe $z$
$h_i^{**}$	piezometrische Höhe im Punkt $i$
$h_{z,oben}^{**}$	piezometrische Höhe auf der oberen Fläche des Elements
$h_{z,unten}^{**}$	piezometrische Höhe auf der unteren Fläche des Elements
$h_0$	Höhe des Grundwasserspiegels
$h_a$	Höhe der Probe des konditionierten Materials unter atmosphärischen Bedingungen
$h_F$	piezometrische Höhe in der Abbaukammer
$h_g$	Höhe der Überlagerung des Tunnels
$h_{hyd}$	hydraulische Druckhöhe
$h_{Liquid}$	Höhe des Liquids im Zylinder nach vollständiger Drainage
$h_{Schaum}$	Höhe des Schaums im Zylinder unmittelbar nach Einfüllen
$h_p$	Höhe der Probe des konditionierten Materials bei Druckbeaufschlagung
$h_{\Delta}$	piezometrische Höhe vor der Ortsbrust
$i$	hydraulisches Druckgefälle
$I_C$	Konsistenzzahl
$I_i$	Undurchlässigkeits-Index nach [24]
$k$	Wasserdurchlässigkeitswert
$k_{Schn}$	ursprüngliche Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke
$k_{Schn}^*$	angepasste Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke
$K_{ach}$	aktiver Erddruckbeiwert infolge von Kohäsion
$K_{agh}$	aktiver Erddruckbeiwert infolge von Bodeneigengewicht und Auflast
$K_i$	Beiwert der Bodenschicht
$k_i$	Silobeiwert der Bodenschicht
$L_{Abbau}$	Länge der Abbaukammer in Vortriebsrichtung
$l_{hyd}$	Probenlänge
$LIR$	Liquid Injection Ratio (engl.) = Liquidinjektionsrate
$L_{Schn}$	Länge des Schneckenförderers
$L_{Schn}^*$	hydraulische Länge des Schneckenförderers
$L_{ges}^*$	hydraulische Länge des Schneckenförderers und der Abbaukammer
$m_{Beh}$	Masse des Behälters
$m_d$	Masse des trockenen Bodens
$m_f$	Masse des Tensids
$m_F$	Masse des Schaums



$m_{ges}$	Masse des Behälters inkl. konditioniertem Material
$m_L$	Masse der Tensidlösung
$m_W$	Masse des Wassers
$m_{0,2}$	prozentualer Siebdurchgang bei $d = 0,2$ mm
$m_{0,6}$	prozentualer Siebdurchgang bei $d = 0,6$ mm
$m_2$	prozentualer Siebdurchgang bei $d = 2$ mm
$m_6$	prozentualer Siebdurchgang bei $d = 6$ mm
$n$	Porenanteil
$n_{eff}$	effektive Porosität
$n_F$	Porenanteil des Schaums
$n_{Lanze}$	Anzahl der aktiven Schaumlanzen
$n_{Lanze,neu}$	reduzierte Anzahl der verwendeten Schaumlanzen
$n_{max}$	maximaler Porenraum
$n_r$	Retention-Pporosität
$n_{Schnecke}$	Drehzahl der Schnecke pro Sekunde
$n_w$	Porenanteil des Wassers
$p$	Druck
$p_{atm}$	atmosphärischer Druck (näherungsweise 1 bar)
$p_{supp}$	Druckdifferenz zwischen Stützdruck und atmosphärischem Druck
$PIR$	Polymer Injection Ratio (engl.) = Polymerinjektionsrate
$Q_A$	Luftvolumenstrom
$Q_{A,atm}$	Volumenstrom der Luft unter atmosphärischen Bedingungen
$Q_f$	Volumenstrom des Tensids
$Q_F$	Volumenstrom des Schaums
$Q_{fein,susp}$	Volumenstrom des Feinstoffanteils
$Q_{F,ges}$	Gesamtvolumenstrom des Schaums
$Q_L$	Volumenstrom der Tensidlösung
$Q_{Lanze}$	Volumenstrom des Schaums pro Lanze
$Q_{Lanze1}$	Untergrenze des Volumenstroms des Schaums bei Lanze 1
$Q_{Lanze1,neu}$	Schaumvolumenstrom pro Lanze bei reduzierter Anzahl der verwendeten Schaumlanzen
$Q_P$	Volumenstrom der Polymersuspension
$Q_{Pol}$	Volumenstrom des Polymers
$Q_S$	Volumenstrom des Bodens
$Q_{susp}$	Volumenstrom der Feinstoffsuspension
$Q_W$	Volumenstrom des Wassers
$R$	Reaktionskraft
$R_{FL}$	Reibungskräfte aus beiden Flanken
$r_S$	Radius der Schaumblase
$s^\#$	Setzmaß

$s^*$	Setzfließmaß*
$s$	Stützdruck
$S$	Stützkraft
$s'$	effektiver Stützdruck
$S'$	effektive Stützkraft
$S_V$	volumenbezogene spezifische Oberfläche
$SIR$	Suspension Injection Ratio (engl.) = Suspensionsinjektionsrate
$spa e_{ah}(z)$	räumlicher aktiver Erddruck in der Tiefenlage $z$
$t_{Abbau}$	durchschnittliche Verweildauer des Stützmediums in der Abbaukammer
$U$	Umfang eines Bodenelements im Prisma
$v$	Filtergeschwindigkeit
$V$	Gesamtvolumen
$V'$	vertikale Kraft auf den Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung
$V_A$	Volumen der Luft
$V_{Beh}$	Volumen des Behälters
$V_d$	Volumen des trockenen Bodens
$V_{Einbau}$	Volumen der Einbauteile
$V_f$	Volumen des Tensids
$V_F$	Volumen des Schaums
$V_{F,atm}$	theoretisches Schaumvolumen unter atmosphärischen Bedingungen
$V_{F,P}$	theoretisches Schaumvolumen unter Druck
$V_{fein,susp}$	Volumenanteil des Feinstoffanteils in der Suspension
$V_L$	Volumen der Tensidlösung
$V_P$	Volumen der Polymersuspension
$V_{Pol}$	Volumen des Polymers
$V_S$	Volumen des Bodens
$V_{sch} (\%)$	prozentuale Schaumzugabemenge
$V_{susp}$	Volumenanteil der Suspension
$v_{Vortrieb}$	Vortriebsgeschwindigkeit
$V_W$	Volumen des Wassers
$V_A^*$	Ausbruchvolumen
$V_f^*$	Volumen der feinkörnigen Bestandteile
$V_g^*$	Volumen der grobkörnigen Bestandteile
$V_L^*$	Volumen der Luft
$V_{Sch}^*$	erforderliches Schaumvolumen
$V_w^*$	Volumen des Porenwassers
$w$	Wassergehalt
$W$	resultierende Kraft aus Wasserdruck
$w_{Achse}$	Höhe von Achse der Schildmaschine bis zum Grundwasserspiegel
$w_{soll}$	einzustellender Wassergehalt

$X$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 0,074$ mm [M-%]
$Y$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 0,25$ mm [M-%]
$Z$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 2,0$ mm [M-%]
$z$	Höhe von Tunnelsohle bis zum betrachteten Element
$z_i$	geodätische Höhe im Punkt $i$
$\phi h_{ABCD}^*$	durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks ABCD
$\phi h_{ABEF}^*$	durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks ABEF
$\phi h_{CDEF}^*$	durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks CDEF
$\phi h_W$	mittlere piezometrische Höhe in der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils
$\int_{ABCD} ds$	Integration über die Fläche des Vierecks ABCD
$\int_{ABEF} ds$	Integration über die Fläche des Vierecks ABEF
$\int_{CDEF} ds$	Integration über die Fläche des Vierecks CDEF
$a$	Beiwert nach [4]
$\alpha_u$	Faktor in Abhängigkeit von $C_u$ nach [88]
$\gamma_i$	Wichte der Bodenschicht
$\gamma_i'$	Wichte der Bodenschicht unter Auftrieb
$\gamma_G$	Wichte des Bodens des Gleitkeils
$\gamma_W$	Wichte des Wassers
$\Delta h$	Differenz zwischen Höhe des Wasserstands und piezometrischer Höhe in der Abbaukammer
$\Delta p$	Druckdifferenz zwischen den Grenzflächen einer Schaumblase
$\Delta p_{1f}$	Differenzdruck zwischen den Grenzflächen bei Schäumen
$\Delta t$	Reaktionszeit des Systems
$\Delta V_W$	Volumen des zuzugebenden Wassers
$\varepsilon_K$	erforderliches Kompressionsverhalten des konditionierten Lockergesteins
$\varepsilon_S$	erforderliches Schwellverhalten des konditionierten Lockergesteins
$\eta_E$	Teilsicherheitsbeiwert für Erddrücke
$\eta_W$	Teilsicherheitsbeiwert für Wasserdrücke
$\theta$	Gleitflächenwinkel
$\mu_{ach}$	Formbeiwert für die Kohäsion
$\mu_{agh}$	Formbeiwert für den räumlichen aktiven Erddruck
$\rho_{cond\ soil}$	Dichte des konditionierten Materials
$\rho_d$	Trockendichte
$\rho_F$	Dichte des Schaums
$\rho_L$	Dichte der Tensidlösung
$\rho_{Pol}$	Suspensionsdichte
$\rho_W$	Dichte des Wassers

---

$\rho_{Stahl}$	Dichte des Stahls
$\rho_{soil,A}$	Dichte des konditionierten Bodens (Situation A)
$\rho_{soil,B}$	Dichte des konditionierten Bodens (Situation B)
$\sigma_S$	Oberflächenspannung der Schaumblase
$\sigma_v^*$	vertikale effektive Spannung in der jeweiligen Tiefenlage
$\sigma'_v$	reduzierte vertikale Spannung zwischen Prisma und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung
$\sigma_v^{I*}$	reduzierte vertikale Spannung zwischen Prisma und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung, wenn $h_0 < H$
$\sigma_z^{I*}(h_0)$	reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung in der Höhe $h_0$ , wenn $h_0 < H$
$\tau_{cond}$	Scherfestigkeit des konditionierten Materials
$\tau_F$	Fließgrenze
$\tau_{uncond}$	Scherfestigkeit des unkonditionierten Materials
$\varphi$	Winkel der inneren Reibung des Bodens
$\varphi_{Füllung}$	Füllungsgrad der Abbaukammer

# 1. Einleitung

## 1.1. Einführung

Für die Herstellung von Tunnelbauwerken im Lockergestein werden sehr häufig Schildmaschinen genutzt, die eine Stützung der Ortsbrust ermöglichen und Senkungen an der Oberfläche reduzieren oder vermeiden können. Die Unterteilung von Schildmaschinen erfolgt nach der Art der Ortsbruststützung. Es kommen vor allem Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und Schildmaschinen mit erddruckgestützter Ortsbrust zum Einsatz. Bei Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust gewährleisten üblicherweise Bentonit-suspensionen eine Übertragung des Stützdrucks auf den anstehenden Baugrund. Bei Schildmaschinen mit erddruckgestützter Ortsbrust wird hingegen auf Bentonitsuspensionen verzichtet und der abgebaute Boden in der Abbaukammer zur Stützung der Ortsbrust verwendet. Für den Gebrauch als Stützmedium sollte das Lockergestein spezielle Eigenschaften, wie z. B. eine ausreichende Verarbeitbarkeit im Sinne eines für einen Erddruckschild geeigneten Fließverhaltens und eine geringe Wasserdurchlässigkeit, aufweisen. Schneckenförderer transportieren das Material aus der üblicherweise unter Druck stehenden Abbaukammer und müssen über ihre Länge einen Druckabbau des Stützmediums zwischen dem Druck in der Abbaukammer und dem atmosphärischen Druck ermöglichen. Die Regulierung des Stützdrucks erfolgt i. d. R. durch die Veränderung der Schneckendrehzahl und der Vortriebsgeschwindigkeit. Die Begriffe Erddruckschilde und EPB-Schilde (Abkürzung für die englische Bezeichnung Earth Pressure Balance Shield) haben sich als Synonym für Schildmaschinen mit erddruckgestützter Ortsbrust in der Baupraxis durchgesetzt und werden in dieser Arbeit gleichbedeutend genutzt.

Ca. 90 % der weltweit eingesetzten Schildmaschinen mit aktiver Ortsbruststützung werden als Erddruckschilde im Lockergestein, in Übergangsbereichen mit gemischter Ortsbrust und im Festgestein genutzt [70]. EPB-Schilde haben gegenüber Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, wie z. B. Hydroschilden, wesentliche Vorteile. Durch den Verzicht auf Bentonitsuspensionen sind bei Erddruckschilden weder die Installation der Förderkreisläufe für Stütz- und Transportmedien noch der Aufbau und Betrieb von Anlagen zur Separierung des Bodens vom Stütz- und Transportmedium erforderlich. Durch den Entfall einer Separationsanlage lässt sich der für die Baustelleneinrichtung notwendige Platzbedarf reduzieren, welcher vor allem bei Projekten in urbanen Bereichen oft nur begrenzt vorhanden ist. Zudem weisen Erddruckschilde im Vergleich zu Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust eine weniger komplexe Verfahrenstechnik auf und es besteht die Möglichkeit, die Betriebsmodi kurzfristig den geologischen Randbedingungen anzupassen [150]. Zu den Vorteilen von Hydroschilden gegenüber Erddruckschilden zählen u. a. die vergleichsweise geringen Schwankungen der an der Druckwand gemessenen Drücke, eine präzise, definierte Stützdruckverteilung an der Ortsbrust, eine genauere Stützdruckregelung und daraus resultierend geringere Senkungen. Zu den weiteren Vorteilen der Hydroschilde zählen nach [150] ihre Einsatzmöglichkeit in gemischt- und grobkörnigen Lockergesteinen, ein schnellerer Einstieg in die Abbaukammer sowie der üblicherweise geringere Verschleiß an den Abbauwerkzeugen.

Die Erläuterung der Funktionsweise von Erddruckschilden mit aktiver Ortsbruststützung im geschlossenen Modus erfolgt in Anlehnung an [70] mithilfe der Abbildung 1-1. Der Baugrund wird durch auf dem rotierenden Schneidrad (1) angebrachte Abbauwerkzeuge gelöst und in den Bereich der Abbaukammer (2) gefördert. Diese ist rückwärtig durch die Druckwand (3) begrenzt, an der üblicherweise Erddruckmessdosen installiert sind. Die Steuerung des Stützdrucks innerhalb der Abbaukammer ergibt sich aus der Regulierung des Zuflusses (Vortriebsgeschwindigkeit der Vortriebspresen (4) und Zugabe von Konditionierungsmitteln) sowie des Abflusses des Materials (Volumenstrom im Schneckenförderer (5)). Die Vortriebspresen können nach Erreichen der jeweiligen Hublänge abschnittsweise eingefahren und einzelne Tübbinge (7) mithilfe des Erektors (6) eingebaut werden. Der verfahrensbedingt hergestellte Ringspalt zwischen Außenseite der Tübbinge und angrenzendem Boden wird üblicherweise mit Mörtel verpresst (vgl. [143]).

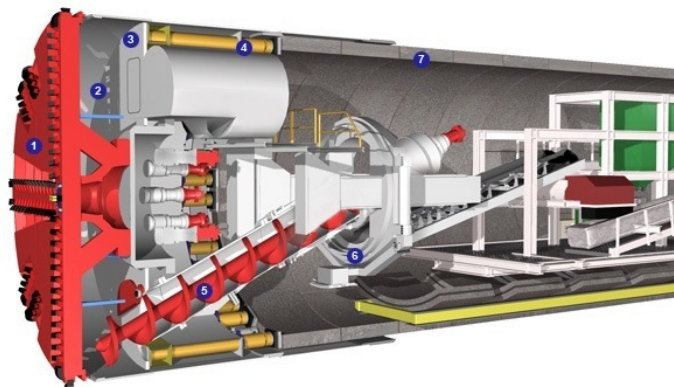


Abbildung 1-1: Konstruktionselemente für Materialabbau, Ortsbruststützung und Förderung des abgebauten Materials bei einem Erddruckschild [68]

Der Stand der Verfahrenstechnik ermöglicht den Einsatz von Erddruckschilden bei verschiedenen geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen. Neben dem oben beschriebenen geschlossenen Betriebsmodus mit bei Stützdruckbedingungen abgebautem Material in der vollständig gefüllten Abbaukammer und Druckabbau im Schneckenförderer sind weitere Modi anwendbar. So ist ein Betrieb im geschlossenen Modus mit Dickstoffpumpe oder mit hydraulischer Förderung, im halb offenen Modus, im Übergangsmodus oder im offenen Modus möglich. Die Merkmale und Einsatzbereiche der jeweiligen Modi erläutert [70].

Ursprünglich wurden Erddruckschilder im geschlossenen Modus in feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinanteil ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) von mindestens 30 M-% eingesetzt. Bei geeigneten geologischen Randbedingungen kann ein Vortrieb eines Erddruckschildes in diesen Böden ohne zusätzliche Maßnahmen erfolgen. Um die Einsatzgebiete von Erddruckschildern zu erweitern, hat sich die Konditionierung von Böden als effektiv erwiesen. Bei feinkörnigen Böden wird vielfach Wasser, Polymer- oder Bentonitsuspension als Konditionierungsmittel (z. B. im überkonsolidierten Ton) verwendet, um die Konsistenz des Bodens zu beeinflussen. Mithilfe von Schaum lässt sich bei Tonböden eine Verringerung von Verklebungerscheinungen erreichen [149].

In gemischt- und grobkörnigen Böden werden grundsätzlich Tensidschäume, nach Bedarf auch Tensidschäume mit Polymeranteil, Polymersuspensionen oder feinstoffreiche Suspensionen verwendet, um die Eigenschaften der Lockergesteine zu verändern und den Anforderungen an das Stützmedium gerecht zu werden. Durch Injektion der genannten Konditionierungsmittel sind Erddruckschilde auch in Böden einsetzbar, in denen in der Vergangenheit Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust vorgezogen wurden [105].

## 1.2. Problemstellung

Die Erweiterung der klassischen Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf gemischtkörnige Böden mit geringem Feinanteil und grobkörnige Lockergesteine basiert bislang vor allem auf Erfahrungen, die bei Vortrieben mit unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen unter Verwendung von verschiedenen Konditionierungsmitteln gewonnen wurden. Mithilfe der jeweiligen Konditionierungsmittel und -mengen lässt sich der anstehende Baugrund vielfach so aufbereiten, dass Vortriebe mit Erddruckschilden möglich sind. Bisher gibt es jedoch noch keine Einschätzung zu den Einsatzbereichen von Erddruckschilden auf Grundlage experimenteller Untersuchungen mit gezielt variierten Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen.

Für feinkörnige und gemischtkörnige Lockergesteine mit einem Feinanteil von mindestens 30 M-% existieren basierend auf empirischen Erfahrungen Empfehlungen für die notwendigen Eigenschaften des Lockergesteins zur Nutzung als Stützmedium. Diese Empfehlungen sind jedoch nicht auf konditionierte gemischtkörnige Lockergesteine mit einem geringeren Feinanteil als 30 M-% oder grobkörnige Böden übertragbar. Für diese Böden bestehen lediglich stark vereinfachte Empfehlungen zu den Einsatzgrenzen. Eine Definition der erforderlichen Eigenschaften zur Verwendung als Stützmedium bei gleichzeitiger Konditionierung erfolgte bislang nicht.

Zur Abschätzung der Einsetzbarkeit eines Erddruckschilds, eines geeigneten Konditionierungsmittels sowie dessen Verbrauchs werden zu Beginn eines Projekts oftmals vereinzelte, nicht standardisierte Versuche mit Projektböden unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt. Während des Vortriebs erfolgt eine Anpassung der auf diese Weise abgeschätzten Konditionierungsparameter, bis ein aus technischer und ökonomischer Sicht zufriedenstellender Vortrieb erreicht wird. Aufgrund der Heterogenität des Baugrunds besteht üblicherweise nicht die Möglichkeit, die Körnungslinie, die Dichte oder den Porenraum des zu untersuchenden Materials gezielt zu beeinflussen. Eine vortriebsbegleitende Bestimmung dieser geotechnischen Parameter erfolgt nicht. Außerdem finden Veränderungen der wesentlichen Vortriebsparameter wie Vortriebsgeschwindigkeit, Schneidrad- und Schneckendrehzahl oder Höhe des Stützdrucks statt. Durch diese Veränderungen sind i. d. R. während des Vortriebs keine vortriebsbegleitenden Untersuchungen zu Konditionierungsmitteln oder konditionierten Lockergesteinen bei gleichbleibenden Bedingungen durchführbar.

Art und Menge der zu injizierenden Konditionierungsmittel können die Eigenschaften des Stützmediums stark beeinflussen. Durch den üblichen Einsatz von Schäumen in der Praxis wurden vor allem die Auswirkungen dieser Konditionierungsmittel auf das Stützmedium nä-

her untersucht. Die Einflüsse von Herstellungsparametern, wie z. B. dem Aufbau der Schaumlanze oder den Schaumvolumenströmen, auf die Eigenschaften der Schäume blieben dabei weitgehend unberücksichtigt. Da Untersuchungen zur Schaumkonditionierung mit gezielter Variation von Parametern auf einer Schildmaschine während eines Vortriebs nur sehr schwer umzusetzen sind, wurden bislang in verschiedenen Forschungseinrichtungen Versuche zur Konditionierung von Lockergesteinen durchgeführt. Die dafür genutzten Schaumanlagen wiesen im Gegensatz zu Anlagen auf Erddruckschildmaschinen deutlich geringere Volumenströme auf. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Untersuchungen mit Boden-Schaum-Gemischen, bei denen der Schaum mit unterschiedlichen Anlagen hergestellt wurde, ist aufgrund des Einflusses der Schaumanlage nicht zwingend gegeben. Es sind daher Versuche zur Bestimmung des Einflusses auf die Eigenschaften der Schäume bei Verwendung einer Schaumanlage mit Volumenströmen wie auf einer Schildmaschine durch gezielt veränderte Einstellungen erforderlich.

Zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften von unterschiedlichen Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen wurden bisher Methoden genutzt, die nicht einheitlich waren und z. T. zu denen keine detaillierte Beschreibungen vorlagen, so dass Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit von Untersuchungsergebnissen bestehen. Um den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen zu bestimmen, ist eine Entwicklung und Beschreibung entsprechender Verfahren erforderlich. Dafür können Versuche aus anderen Anwendungsbereichen, wie z. B. der Untersuchung von Eigenschaften von Lockergesteinen oder Mörteln, angepasst werden.

Zur Einstellung des erforderlichen Stützdrucks ist es notwendig, konkrete Annahmen zu den Eigenschaften des Stützmediums zu treffen, die meist jedoch nur abgeschätzt und nicht gemessen werden. In wasserführenden Baugrundformationen mit hoher Wasserdurchlässigkeit können bei Verwendung eines Erddruckschilds Sickerströmungen durch die Ortsbrust und den Schneckenförderer auftreten, die einen Strömungsdruck verursachen und zu einer zusätzlichen Belastungen des Gleitkeils vor der Ortsbrust führen. Eine Anpassung des effektiven Stützdrucks ist aufgrund dieser Belastungen möglicherweise erforderlich und wird im Verfahren zur Stützdruckberechnung nach *Anagnostou & Kovári* [4] berücksichtigt. Die Einflüsse der Konditionierung auf die Eigenschaften von grobkörnigen Lockergesteinen gehen bislang jedoch noch nicht in die Stützdruckberechnung bei Berücksichtigung von Strömungsdrücken ein.

Die Herausforderungen bei der Konditionierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Einsatzgrenzen von Erddruckschilden wurden bisher nur auf Grundlage von Erfahrungen bei durchgeführten Vortrieben beschrieben.
- Für die Nutzung von Erddruckschilden in grobkörnigen Böden bestehen bislang keine Hinweise zu den erforderlichen Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine.
- Es existieren keine einheitlichen Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen.



- Bisher wurden keine systematischen Untersuchungen mit gezielter Variation verschiedener Einflussparameter zu den Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen durchgeführt.
- Der Einfluss der Wasserdurchlässigkeit von konditionierten Böden in der Abbaukammer und im Schneckenförderer blieb bislang bei der Ermittlung der Größe des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks unberücksichtigt.

### 1.3. Zielsetzung

Da für die Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln, insbesondere von Schaum, und konditionierten Lockergesteinen zur Nutzung als Stützmedium bislang keine standardisierten Untersuchungsmethoden existieren, sollen zunächst geeignete Versuchsmethoden für Laboruntersuchungen entwickelt werden. So ist aufgrund der Eigenschaften des Stützmediums z. B. eine Adaption von Untersuchungsmethoden aus der Geotechnik oder Baustofftechnologie möglich.

Die Eigenschaften von unter atmosphärischen Bedingungen konditionierten Lockergesteinen können als Näherung der Eigenschaften von in der Abbaukammer aufbereiteten Lockergesteinen angesehen werden. Aus diesem Grund erfolgen zahlreiche, ausgewählte Versuchsreihen unter atmosphärischen Randbedingungen.

Es sollen die maßgebenden Eigenschaften unterschiedlicher Konditionierungsmittel erläutert und die Durchführung von Versuchen mit bei realitätsnahen Randbedingungen hergestellten Schäumen beschrieben werden. Eine Ermittlung der Eigenschaften von Schäumen mit Polymeranteil, von Polymeren bzw. Polymersuspensionen und von Feinstoffsuspensionen schließt sich an.

Ausgewählte und hinsichtlich ihrer Kornverteilung gezielt variierte grobkörnige Böden werden zur Abschätzung ihrer Eignung als Stützmedium unter atmosphärischen Bedingungen mit Konditionierungsmitteln vermischt. Es erfolgt die Bestimmung der für die Nutzung als Stützmedium maßgebenden Eigenschaften, wie der Verarbeitbarkeit, Wasserdurchlässigkeit oder Kompressibilität, um so Aussagen zu den Einflüssen unterschiedlicher Konditionierungsmittel auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine zu erhalten. Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen soll eine verbesserte Möglichkeit zur Ermittlung der Einsatzbereiche für Erddruckschilde unter Verwendung von Konditionierungsmitteln entwickelt werden. Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich Auswirkungen auf den Baubetrieb ableiten.

Zudem werden Einflüsse auf die Größe des erforderlichen effektiven Stützdrucks aufgrund der Konditionierung untersucht. Dafür sind Berechnungen erforderlich, in die die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums eingehen. Mithilfe dieser Untersuchungen soll der Einfluss von möglichen Sickerströmungen bzw. Strömungsdrücken bei Nutzung von Konditionierungsmitteln bestimmt und die Größe des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks ermittelt werden.

Die Ziele der in dieser Arbeit durchzuführenden Untersuchungen zu Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen sind nachfolgend zusammengefasst:

- Entwicklung von geeigneten Methoden zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und von konditionierten Lockergesteinen.
- Ermittlung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln sowie der Einflüsse auf deren Eigenschaften.
- Bestimmung der Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen sowie der Einflüsse auf deren Eigenschaften.
- Entwicklung der Einsatzgrenzen von Erddruckschilden bei Verwendung unterschiedlicher Konditionierungsmittel basierend auf Ergebnissen von systematischen Untersuchungen.
- Bestimmung des Einflusses der Konditionierung auf die Größe des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks.

#### 1.4. Vorgehensweise

Die Ausführungen beginnen mit der Erläuterung der Grundlagen zu einzelnen Konstruktionselementen eines Erddruckschildes und zur Konditionierung von Lockergesteinen. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung der erforderlichen Verfahrenstechnik zur Nutzung der üblichen Konditionierungsmittel. Zudem wird die Bestimmung des minimal erforderlichen Stützdrucks anhand von zwei in der Praxis häufig genutzten Methoden vorgestellt. Eines der Verfahren stellt die Basis für spätere Untersuchungen dar, bei denen Einflüsse aus der Konditionierung des Stützmediums hinsichtlich dessen Wasserdurchlässigkeit auf den minimal erforderlichen effektiven Stützdruck berücksichtigt werden.

Der Stand der Forschung zur Konditionierung von Lockergesteinen wird im dritten Kapitel beschrieben. Dafür werden zunächst Einsatzbereiche von Erddruckschilden ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln erläutert. Zudem erfolgt die Zusammenstellung bestehender Empfehlungen von Einsatzbereichen von EPB-Schilden, die die Verwendung von Konditionierungsmitteln berücksichtigen. Im Anschluss daran werden die bisherigen Erkenntnisse zur Bodenkonditionierung auf Grundlage von Untersuchungen verschiedener Forschungseinrichtungen vorgestellt. Aus diesen Erkenntnissen leitet sich die Motivation für neue Untersuchungen im Bereich der Konditionierung von grobkörnigen Böden ab.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich zunächst mit der Herstellung von Konditionierungsmitteln sowie der Bestimmung ihrer Eigenschaften. Es wird ein Konzept zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Mittel (Schäume und Schäume mit Polymerzusatz, Polymere und Polymersuspensionen sowie Feinstoffsuspensionen) erarbeitet. Zudem werden mögliche Einflüsse auf die Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen unter atmosphärischen Randbedingungen vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgen die Entwicklung eines Untersuchungskonzepts zur Bestimmung der Eigenschaften konditionierter Lockergesteine sowie eine Beschreibung der jeweiligen Untersuchungsmethoden zur Ermittlung dieser Eigenschaften.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften der jeweiligen Konditionierungsmittel werden im fünften Kapitel vorgestellt. Zudem findet eine Vorstellung der wesentlichen Einflüsse auf die jeweiligen Konditionierungsmittel statt. Die Erkenntnisse dieses Kapitels gehen in die Untersuchungen zu konditionierten Lockergesteinen im anschließenden Kapitel ein.

In Kapitel sechs werden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zu konditionierten Lockergesteinen zunächst verschiedene Einflüsse auf die Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen untersucht. Im Anschluss daran erfolgt die Vorstellung von Untersuchungsergebnissen mit schaumkonditioniertem Lockergestein. Bei diesen Versuchen werden sowohl die Eigenschaften der Schäume als auch die des Bodens variiert. Ferner sind die Ergebnisse von Untersuchungen zusammengefasst, bei denen unterschiedliche Böden mit Feinstoffsuspensionen bzw. mehreren Konditionierungsmitteln aufbereitet wurden. Auf Basis dieser Versuchsergebnisse erfolgt anschließend die Erarbeitung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden in Abhängigkeit des jeweiligen Konditionierungsmittels.

Diese Versuchsergebnisse gehen in die Beschreibung zur Berechnung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks für Erddruckschilde bei Verwendung von Konditionierungsmitteln im siebten Kapitel ein. Mithilfe des Software-Programms midas GTS werden numerische Berechnungen zu den Sickerströmungen für einen Tunnelvortrieb bei unterschiedlichen hydrogeologischen Randbedingungen unter Berücksichtigung verschiedener Wasserdurchlässigkeiten des konditionierten Materials durchgeführt. Aus den Sickerströmungen resultieren Strömungsdrücke im Baugrund, die in der Stützdruckberechnung Eingang finden. Mithilfe der Variation verschiedener Randbedingungen erfolgt so die Bestimmung des Einflusses der Konditionierung auf die Stützdruckberechnung.

Im achten Kapitel werden zusammenfassende Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu den vorangegangenen drei Kapiteln hinsichtlich der Konditionierungsmittel, der konditionierten Lockergesteine und der Stützdruckberechnung gezogen. Ferner werden auf Grundlage dieser Erkenntnisse Empfehlungen für die praktische Anwendung entwickelt.

Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen. Zudem wird ein Ausblick auf die weitere Forschung gegeben.

## 2. Grundlagen zur Konditionierung von Lockergestein bei Erddruckschilden

Erddruckschilde müssen hinsichtlich ihrer Komponenten an die Eigenschaften des anstehenden Baugrunds angepasst sein. Die wesentlichen Konstruktionselemente eines EPB-Schildes, die erforderlichen Eigenschaften der zu durchörternden Lockergesteine, die Grundlagen zur Aufbereitung des Stützmediums mit verschiedenen Konditionierungsmitteln sowie Ansätze zur Berechnung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks sind sowohl für einen erfolgreichen Praxiseinsatz als auch für die in dieser Arbeit durchzuführenden Untersuchungen von wesentlicher Bedeutung und werden daher in diesem Kapitel erläutert.

### 2.1. Konstruktionselemente für Materialabbau, Ortsbruststützung und Förderung des abgebauten Materials bei Erddruckschilden

Wesentliche Konstruktionselemente für den Materialabbau, die Ortsbruststützung und die Förderung des abgebauten Materials sind bei Erddruckschilden vor allem das Schneidrad, die Abbaukammer und der Schneckenförderer. Diese sind schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

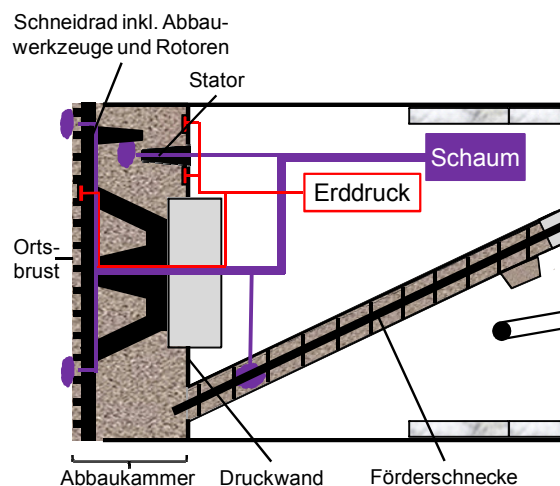


Abbildung 2-1: Schema eines Erddruckschildes mit wesentlichen Konstruktionselementen

#### 2.1.1. Schneidrad

Das Schneidrad eines Erddruckschildes dient im Allgemeinen als Träger der Abbauprodukte, als Mischwerkzeug für bereits abgebauten Boden, als Injektionsort für Konditionierungsmittel und als mechanisches Stützmittel der Ortsbrust. Die Gestaltung des Schneidrads und der Einsatz der entsprechenden Abbauprodukte können die Vortriebsleistung wesentlich beeinflussen.

Für eine Aufbereitung des Bodens an der Ortsbrust mit Schäumen werden diese durch Drehdurchführungen vom starren Teil innerhalb des Antriebs in den sich drehenden Teil des Schneidrads transportiert. Die Förderung bis zur Austrittsöffnung auf dem Schneidrad erfolgt

durch in das Schneidrad integrierte Leitungskanäle. Zur Verhinderung eines Eindringens von Lockergestein in die Leitungskanäle während eines Stillstands sind die Austrittsöffnungen üblicherweise mit einem Rückschlagmechanismus ausgestattet.

Die Anordnung der Austrittsöffnungen an unterschiedlichen Stellen des Schneidrads ermöglicht eine lokale Konditionierung des unmittelbar vor der Austrittsöffnung anstehenden Lockergesteins, so dass an der Ortsbrust durch Rotation des Schneidrads ein konditionierter Bodenring entsteht. Eine vollflächige Konditionierung des Baugrunds an der Ortsbrust ist aufgrund des geringen Sprühwinkels und der verhältnismäßig geringen Anzahl an Austrittsöffnungen nicht gegeben.

Auf der Rückseite eines Schneidrads sind üblicherweise Einbauteile aus Stahl angebracht, die durch die Rotation des Schneidrads eine bessere Durchmischung des zwischen Schneidrad und Druckwand befindlichen Bodens gewährleisten. Die als Rotoren bezeichneten Einbauteile sind auf an der Druckwand installierte starre Einbauteile (Statoren) abgestimmt, wobei Letztere ebenfalls genutzt werden, um dem Lockergestein in der Abbaukammer Konditionierungsmittel zuzugeben (vgl. Abbildung 2-1).

### 2.1.2. Abbaukammer

Das Material in der Abbaukammer soll durch eine etwaige Zugabe von Konditionierungsmitteln zu einem Stützmedium mit den erforderlichen Eigenschaften vermischt werden. Die Ortsbrust, die Druckwand und der Stahlmantel des Schilds begrenzen die Abbaukammer, die so konstruiert sein sollte, dass das konditionierte Material kontinuierlich und strömungsgünstig in Richtung des Schneckenförderers fließen kann.

Die durchschnittliche Verweildauer des Stützmediums in der Abbaukammer ist u. a. von der Vortriebsgeschwindigkeit sowie der Länge und dem Füllungsgrad der Abbaukammer abhängig. Unter Annahme einer gleichmäßigen Vermischung und Berücksichtigung des Volumens des Schneidrads sowie möglicher Einbauteile (vgl. Abbildung 2-1) lässt sich die durchschnittliche Verweildauer des Stützmediums in der Abbaukammer während des Vortriebs nach Gleichung 2.1 überschlägig ermitteln. Dabei können sowohl Statoren als auch in die Abbaukammer ragende Teile der Förderschnecke als Einbauteile angesehen werden. Eine mögliche Verschiebung des Schneidrads in Vortriebsrichtung ist bei der Länge der Abbaukammer zu berücksichtigen.

$$t_{\text{Abbau}} = \frac{L_{\text{Abbau}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{Schild}}^2}{4} \cdot \frac{G_{\text{Schneid}}}{\rho_{\text{Stahl}}} - V_{\text{Einbau}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{Schild}}^2}{4} \cdot v_{\text{Vortrieb}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{Füllung}}}{100} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit  $d_{\text{Schild}}$  = Durchmesser des Schilds [m]

$G_{\text{Schneid}}$  = Gewicht des Schneidrads inkl. Abbauwerkzeuge [to]

$L_{\text{Abbau}}$  = Länge der Abbaukammer in Vortriebsrichtung [m]

$t_{\text{Abbau}}$  = durchschnittliche Verweildauer des Stützmediums in der Abbaukammer [min]

$V_{\text{Einbau}}$  = Volumen der Einbauteile [m<sup>3</sup>]

$v_{\text{Vortrieb}}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/min]

$$\rho_{\text{Stahl}} = \text{Dichte des Stahls [to/m}^3\text{]}$$
$$\varphi_{\text{Füllung}} = \text{Füllungsgrad der Abbaukammer [\%]}$$

Üblicherweise ist die Abbaukammer eines Erddruckschildes zwischen 1,0 und 1,5 m lang, während die Vortriebsgeschwindigkeit aufgrund von geologischen Randbedingungen zwischen 0,02 und 0,10 m/min und der Füllungsgrad der Abbaukammer im geschlossenen Modus bei 100 % liegen können. Unter Ansatz des Gewichts des Schneidrads mit 115 to bei einer Materialdichte von Stahl mit 7,85 to/m<sup>3</sup> und einem Volumen der Einbauteile von 0,5 m<sup>3</sup> ergibt sich bei einem Erddruckschild mit einem Durchmesser von 10,0 m eine durchschnittliche Verweilzeit des Lockergesteins in der Abbaukammer im geschlossenen Modus ohne Berücksichtigung der Zeit für einen Ringbau zwischen ca. 8 und 65 Minuten.

Sofern die Konsistenz von feinkörnigen Böden in der Abbaukammer zu steif ist oder die Abbaukammer nicht strömungsgünstig gebaut wurde, besteht die Gefahr, dass diese durch Verklebungen blockiert wird [148] oder oberhalb des Schneckeneingangs ein Gewölbe aus abgebautem Material entsteht [103]. Dies kann zur Folge haben, dass kein Material mehr aus dem Firstbereich der Abbaukammer zur Schnecke gefördert wird [103]. Zur Ermittlung des Drucks in der Abbaukammer sind üblicherweise Erddrucksensoren in die Druckwand eingelassen.

### 2.1.3. Schneckenförderer

Schneckenförderer sind bei Erddruckschilden erforderlich, um eine kontinuierliche Förderung des Materials bei gleichzeitiger Gewährleistung eines Stützdrucks zu ermöglichen. Dazu muss das abgebaute Lockergestein im Schneckenförderer über seine Länge einen entsprechenden Druckgradienten abbauen können. In Abhängigkeit des zu erwartenden Stützdrucks und des Abstands der Schneckenwendel ergibt sich eine Mindestlänge des Schneckenförderers für den Druckabbau. Bei geeignetem Material kann nach empirischen Erfahrungen der Druckgradient zwischen zwei Wendeln 0,2 bar betragen [156]. Durch die Zugabe von Konditionierungsmitteln in den Schneckenförderer können die Eigenschaften des Materials verändert werden.

Zum Druckabbau zwischen zwei Wendeln eines Schneckenförderers erfolgten eigene Untersuchungen. Dazu wurde aus den Daten der Länge der Förderschnecke, des Wendelabstands und des angesetzten Stützdrucks der erforderliche Druckabbau zwischen zwei Wendeln ermittelt. Die Auswertungen zeigen, dass durchschnittlich ein Druckabbau von ca. 0,2 bar und in Einzelfällen ein Druckabbau von bis zu 0,3 bar angesetzt wurde (vgl. Abbildung 2-2).

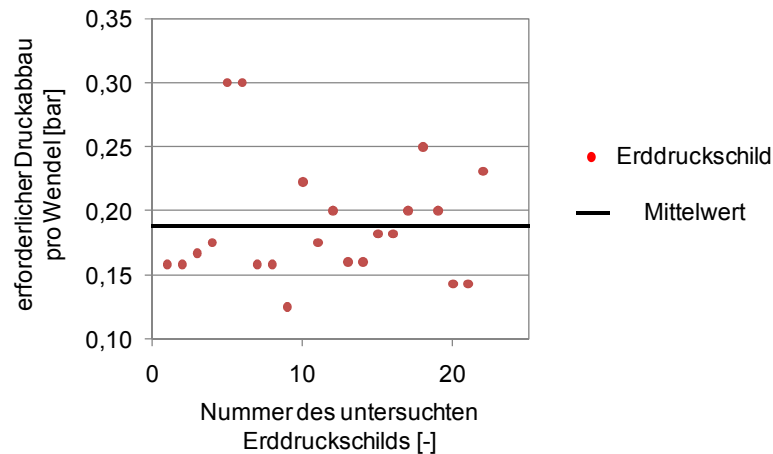


Abbildung 2-2: Erforderlicher Druckabbau zwischen zwei Wendeln eines Schneckenförderers

Für die Dimensionierung von Schneckenförderern im Tunnelbau gelten im Allgemeinen folgende Aussagen:

- Der maximal mit dem Schneckenförderer aus der Abbaukammer abzutransportierende Materialvolumenstrom muss mindestens so groß wie der Volumenstrom des in die Abbaukammer eindringenden Materials sein, um die Kontrolle des Stützdrucks zu gewährleisten.
- Der im geschlossenen Modus vorhandene Druckgradient zwischen der unter Druck stehenden Abbaukammer und dem atmosphärischen Teil des Tunnels muss durch das Material im Schneckenförderer übertragen werden können, um ein unkontrolliertes Ausströmen des Materials und ggf. einen kurzfristigen Verlust des Stützdrucks zu vermeiden.

Für die Dimensionierung von Schneckenförderern im Tunnelbau gibt es bisher keine allgemeingültigen Auslegungskriterien. Verschiedene Untersuchungsergebnisse zu Schneckenförderern wurden in [108, 121, 138, 142] vorgestellt.

## 2.2. Eigenschaften des aufzufahrenden Baugrunds

Die Eigenschaften des Lockergesteins haben wesentlichen Einfluss auf das konditionierte Material. Daher sind die für die Nutzung eines Erddruckschildes wesentlichen Parameter und Eigenschaften des aufzufahrenden Baugrunds nachfolgend aufgeführt:

- Verteilung der Größe der im Boden enthaltenen Kornfraktionen, aus denen die Kornverteilungslinie und die genaue Klassifizierung ermittelt werden kann (vgl. [45, 56]),
- Dichte des Lockergesteins, Kornrohndichte und Trockenrohndichte, die nach [42, 43] bestimmt werden können,
- Wassergehalt des Materials [39],
- Zustandsform nach [40, 41] bei bindigen Materialien,
- Flügelscherversuche nach [48],
- Kompressibilität eines konditionierten Materials nach [105] und
- Wasserdurchlässigkeit des Bodens, die nach [44] bestimmt werden kann.

Eine Unterteilung der Böden kann in Abhängigkeit der Korngröße nach [45] in die Bereiche fein-, gemischt- und grobkörnige Böden erfolgen. Zur Einordnung als feinkörniger Boden ist ein Anteil des Korndurchmessers mit  $d \leq 0,063$  mm von mindestens 40,0 M-% erforderlich. Böden mit Anteilen dieses Korndurchmessers zwischen 5,0 und 40,0 M-% werden als gemischtkörnige Böden definiert. Die Einstufung eines Lockergesteins als grobkörniger Boden ist hingegen gegeben, wenn der Anteil des Korndurchmessers mit  $d \leq 0,063$  mm Werte unter 5,0 M-% annimmt.

Von den oben aufgeführten Eigenschaften ist vor allem die Wasserdurchlässigkeit für die weitere Arbeit von Bedeutung, so dass diese Eigenschaft nachfolgend näher betrachtet wird. Bei laminarer Strömung in den Porenräumen besteht nach [32] für Mittel- und Grobsande ein Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Druckgefälle, welcher als Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  [m/s] bezeichnet wird und die Wasserdurchlässigkeit beschreibt. Dieser wird u. a. von den Parametern Kornverteilung, Lagerungsdichte, Porenraum und Druckgefälle beeinflusst. Die Filtergeschwindigkeit kann über den Volumenstrom des durchströmten Wassers und den durchflossenen Querschnitt bestimmt werden. Das hydraulische Druckgefälle wird als Quotient aus hydraulischer Druckhöhe und Probenlänge ermittelt [44]. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  kann mithilfe der Gleichungen 2.2 bis 2.5 bestimmt werden.

$$k = \frac{v}{i} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

$$v = \frac{Q_W}{A} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

$$i = \frac{h_{hyd}}{l_{hyd}} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

$$k = \frac{Q_W * l_{hyd}}{A * h_{hyd}} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

mit  $A =$  durchflossener Querschnitt [m<sup>2</sup>]  
 $h_{hyd} =$  hydraulische Druckhöhe [m]  
 $i =$  hydraulisches Druckgefälle [-]  
 $k =$  Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]  
 $l_{hyd} =$  Probenlänge [m]  
 $Q_W =$  Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/s]  
 $v =$  Filtergeschwindigkeit [m/s]

Für Sande und Kiese kann eine im laminaren Bereich liegende Durchströmung angenommen und die Wasserdurchlässigkeit nach [44] ermittelt werden. Für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von feinkörnigen Böden im Labor muss das hydraulische Gefälle in einem Bereich liegen, so dass ein linearer Strömungsvorgang des Wassers möglich ist. Für Schluffe beginnt der lineare Strömungsvorgang in einem Bereich zwischen  $i = 1$  und  $i = 10$  und für Tone zwischen  $i = 5$  und  $i = 20$  [127].

Um zeitaufwändige Wasserdurchlässigkeitsversuche zu vermeiden, sind verschiedene Untersuchungen zur Abschätzung des Beiwerts in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung durchgeführt worden. Nach *Hazen* [67] gilt zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit für



Sande mit Ungleichförmigkeitszahlen  $C_U$  zwischen 3 und 5 unter Berücksichtigung des Werts  $d_{10}$  die Gleichung 2.6.

$$k = 0,0116 * d_{10}^2 \quad (\text{Gl. 2.6})$$

- mit  $C_U =$  Ungleichförmigkeitszahl [-]  
 $d_{10} =$  Durchmesser des Korns bei 10 %-igem Massendurchgang [mm], für  
 $3 < C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$   
 $d_{60} =$  Durchmesser des Korns bei 60 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $k =$  Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Nach *Beyer* [11] kann der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl, der Lagerungsdichte des Bodens und des Werts  $d_{10}$  ermittelt werden, wenn  $d_{10}$  größer 0,06 mm und kleiner 0,6 mm ist (vgl. Gleichung 2.7).

$$k = C_L * d_{10}^2 \quad (\text{Gl. 2.7})$$

- mit  $C_L =$  Faktor in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und Ungleichförmigkeitszahl, vgl. [11]  
 $C_U =$  Ungleichförmigkeitszahl [-]  
 $d_{10} =$  Durchmesser des Korns bei 10 %-igem Massendurchgang [mm], für  
 $1 < C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 20$   
 $d_{60} =$  Durchmesser des Korns bei 60 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $k =$  Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Der Ansatz von *Hazen* kann aufgrund der geltenden Randbedingungen nicht für die Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit von Böden mit Ungleichförmigkeitszahlen kleiner 3 oder größer 5 angesetzt werden. Da bei Vortrieben mit Erddruckschilden Böden mit Ungleichförmigkeitszahlen größer als  $C_U = 10$  auftreten können, ist der Ansatz für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden nicht immer möglich. Der Ansatz von *Beyer* ist auf die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden beschränkt, wenn die Kornverteilungslinie des Lockergesteins einen Durchmesser des Korns bei 10 %-igem Massendurchgang von kleiner 0,6 mm aufweist. Da grobkörnige Böden einen Wert von  $d_{10}$  größer 0,6 mm aufweisen können, lässt sich dieser Ansatz nicht zwangsläufig für die Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit aller grobkörnigen Böden nutzen. Sowohl der Ansatz von *Hazen* als auch der Ansatz von *Beyer* berücksichtigen zudem nicht den Einfluss von Konditionierungsmitteln auf die Wasserdurchlässigkeit, so dass sich diese Ansätze nicht für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von konditionierten Lockergesteinen eignen.

### 2.3. Grundlagen zur Bodenconditionierung

Für die Erläuterung der Grundlagen zur Bodenconditionierung werden nachfolgend zunächst die Ziele der Conditionierung dargestellt und anschließend die üblichen Verfahrenstechniken

in Abhängigkeit des jeweiligen Konditionierungsmittels vorgestellt. Der Abschnitt 2.3 schließt mit Aussagen zur Umweltverträglichkeit von Konditionierungsmitteln ab.

### 2.3.1. Ziele der Konditionierung bei Erddruckschilden

Das Stützmedium eines Erddruckschildes muss verschiedenen Randbedingungen genügen. Vor allem die Wasserdurchlässigkeit, die Verarbeitbarkeit, der aufnehmbare Druck im Schneckenförderer und die Kompressibilität des aufzufahrenden Lockergesteins sind von Bedeutung, um einen erfolgreichen Vortrieb mit einem EPB-Schild zu gewährleisten. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden u. a. grobkörnige Böden konditioniert. Die Ziele der Konditionierung dieser Lockergesteine sind in Anlehnung an [147] nachfolgend zusammengefasst und werden im Anschluss näher erläutert:

- Die temporäre Übertragung von Eigenschaften auf das Stützmedium, wie einem geeigneten Fließverhalten, zur Sicherstellung eines ausreichenden Materialflusses in der Abbaukammer und im Schneckenförderer.
- Die Stützung der gesamten Ortsbrust mit annähernd homogenem Material zur Übertragung des Stützdrucks auf den anstehenden Baugrund.
- Die Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit, um destabilisierende Sickerströmungen von der Ortsbrust in die Abbaukammer zu vermeiden oder zu verringern.
- Die Erhöhung der Kompressibilität des Stützmediums, um verfahrenstechnisch bedingte Volumen- und Stützdruckschwankungen in der Abbaukammer zu dämpfen.
- Die Verringerung der inneren Reibung des Stützmediums, um die Antriebsdrehmomente bzw. den Energiebedarf von Schneidrad und Schneckenförderer zu senken sowie den Materialverschleiß an Abbauwerkzeugen und anderen Maschinenkomponenten zu reduzieren.

Das Stützmedium sollte ein geeignetes Fließverhalten aufweisen, so dass das Material innerhalb der Abbaukammer und im Schneckenförderer unter Vermeidung von Verklebungen transportiert werden kann. Da der Druckabbau und die damit verbundene Fließgeschwindigkeit im oberen Bereich der Abbaukammer gering sind, kann bei nicht ausreichend fließfähigem, feinkörnigem Material die Gefahr bestehen, dass dieses in der Abbaukammer aufgrund geringerer Strömungsgeschwindigkeiten zu Verklebungen führt, das Antriebsdrehmoment des Schneidrads und der Verschleiß der Abbauwerkzeuge steigen sowie das Material ungleichmäßig oder nicht vollständig abgefördert wird. Unkontrollierte Senkungen an der Geländeoberfläche wären eine mögliche Folge.

Durch Differenzen zwischen den Volumenströmen des in die Abbaukammer eingetragenen Materials und des aus der Abbaukammer ausgetragenen Materials können Änderungen des Stützdrucks resultieren. Eine ausreichende Kompressibilität des Stützmediums ermöglicht die Dämpfung der Schwankungen des Stützdrucks. Die Reduzierung dieser Schwankungen führt zu einer genaueren und verbesserten Stützdruckregelung. Der in der Abbaukammer herrschende Stützdruck muss über die Länge des Schneckenförderers abgebaut werden, damit das Stützmedium nicht unkontrolliert aus dem Schneckenförderer austritt. Kann der Druck nicht kontinuierlich abgebaut werden, ist durch Installation druckhaltender Austrittsme-

chanismen wie Schiebern oder Zellradschleusen am Ende des Schneckenförderers ein kontrollierter Druckabbau zu ermöglichen.

Das Stützmedium in der Abbaukammer sollte bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels eine niedrige Wasserdurchlässigkeit aufweisen, so dass keine oder nur geringe Mengen des Grundwassers aus dem Baugrund in die Schildmaschine eindringen können. Zudem sollte der Abbau des Porenwasserdrucks im Bereich der Abbaukammer und im Schneckenförderer erfolgen. Dadurch wird eine zusätzliche Strömungskraft auf den Boden vor der Ortsbrust vermieden, die eine Erhöhung des effektiven Stützdrucks erfordern könnte.

Die Zugabe von Konditionierungsmitteln führt i. d. R. zu einer Verminderung des Winkels der inneren Reibung des Stützmediums, so dass sich sowohl das Antriebsdrehmoment des Schneidrads als auch das Drehmoment des Schneckenförderers verringern lässt. Dadurch reduziert sich üblicherweise auch der Materialverschleiß an den Abbauwerkzeugen und an den Trägerkomponenten.

Für die Konditionierung in feinkörnigen Lockergesteinen werden vielfach Wasser, Polymer- oder Bentonitsuspensionen genutzt, während in gemischt- und grobkörnigen Böden üblicherweise Schäume, nach Bedarf auch Polymerschäume, Polymersuspensionen oder feinstoffreiche Suspensionen zum Einsatz kommen. Die Verfahrenstechnik der verschiedenen Konditionierungsarten, ihre wesentlichen Parameter sowie die Aufbereitung der zuzuführenden Mittel werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 2.3.2. Konditionierung mit Wasser

In feinkörnigen Böden mit fester bis steifer Konsistenz ermöglicht die Zugabe von Wasser eine Veränderung der Konsistenz und so die Konditionierung des anstehenden Bodens. Durch die Erhöhung des Wassergehalts können der Winkel der inneren Reibung herabgesetzt und die Kohäsion des Stützmediums reduziert werden.

Das Volumen des zuzugebenden Wassers ist u. a. von dem erforderlichen und dem vorhandenen Wassergehalt als auch von der Dichte und dem Volumen des trockenen Bodens sowie der Dichte des Wassers abhängig. Auf Grundlage einer Betrachtung der Volumenanteile wurde daher die Gleichung 2.8 entwickelt, die diese Einflussparameter berücksichtigt. Bei Ansatz einer vollständigen Durchmischung des Materials mit Wasser stellt diese Formel die Grundlage des in Abhängigkeit der Abbaufäche der Schildmaschine zuzugebenden Volumenstroms des Wassers dar (vgl. Gleichung 2.9). Die Herleitung dieser Formeln wird in der Anlage A dieser Arbeit näher erläutert.

$$V_W = V_S * \frac{\rho_d}{\rho_w} * (w_{soll} - w) \quad (\text{Gl. 2.8})$$

$$Q_W = A_S * v_{Vortrieb} * \frac{\rho_d}{\rho_w} * (w_{soll} - w) \quad (\text{Gl. 2.9})$$

mit  $A_S =$  Abbaufäche des Schilds [m<sup>2</sup>]  
 $Q_W =$  Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/s]  
 $V_S =$  Volumen des Bodens [m<sup>3</sup>]  
 $V_W =$  Volumen des Wassers [m<sup>3</sup>]

$v_{Vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]
$w$	=	Wassergehalt [%]
$w_{soll}$	=	einzustellender Wassergehalt [%]
$\rho_d$	=	Trockendichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	=	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]

Bei Definition des Volumenstroms des Wassers in Abhängigkeit des Volumens des Bodens ist eine Definition des Betrachtungsorts des Materials erforderlich. Der Volumenstrom des aufzufahrenden Bodens vor der Ortsbrust ist durch die Geometrie der Schildmaschine und zusätzlich durch die Vortriebsgeschwindigkeit festgelegt. Die Dichte des Bodens vor der Schildmaschine kann im Vorfeld eines Projekts bestimmt bzw. abgeschätzt werden. Die Dichte des Bodens in der Abbaukammer kann hingegen aufgrund von Auflockerungsfaktoren, Konditionierungsmittelzugabe und Druckreduzierungen bzw. Druckerhöhungen unterschiedliche Werte annehmen. Da bei Schildmaschinen die Vortriebsgeschwindigkeiten aufgezeichnet werden und üblicherweise keine Möglichkeit zur Bestimmung der Dichte des Bodens in der Abbaukammer besteht, kann der Volumenstrom des aufgefahrenen Bodens nur mithilfe der Vortriebsgeschwindigkeit bestimmt werden. Aus diesem Grund ist als Volumen des Lockergesteins das Volumen des Bodens vor der Ortsbrust anzusehen, so dass sich mithilfe der Abbaufäche des Schilds und der Vortriebsgeschwindigkeit der Volumenstrom des Wassers ermitteln lässt (vgl. Gleichung 2-9).

### 2.3.3. Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen

Feinstoffe ( $d < 0,06$  mm) können im Wasser dispergiert und bei geeigneter Konzentration und Konsistenz als Suspension in die Abbaukammer gepumpt werden. Zur Verdrängung von Teilen des Wassers im Porenraum muss der Suspensionsdruck größer als der anstehende Porenwasserdruck sein. Durch den Eintrag von Feinstoffsuspensionen in das Stützmedium werden der Anteil an Feinstoffen erhöht und die Eigenschaften des konditionierten Bodens verändert. Die Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen soll vor allem die Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums reduzieren und ggf. auch die Verarbeitung des Materials beeinflussen. Auf Basis von [54] können die Feinstoffe auch als Füller bezeichnet werden, da diese einen geringeren Korndurchmesser als 0,063 mm haben. Die Dichten der bei EPB-Schilden eingesetzten Suspensionen sind üblicherweise deutlich höher als Dichten von bei Hydroschilden eingesetzten Suspensionen, so dass die Suspensionen bei Erddruckschilden auch als „High Density Slurries“ bezeichnet werden.

Wesentliche Parameter der Feinstoffsuspensionen sind neben ihren Ausgangsstoffen die Konzentration und Injektionsrate. In Anlehnung an die Parameter der später beschriebenen Schaumherstellung wird die Konzentrationen der Feinstoffsuspension  $c_{susp}$  und die Injektionsrate „Suspension Injection Ratio“ (SIR) genannt und nach den Gleichungen 2.10 und 2.11 ermittelt. Die  $c_{susp}$  und die SIR sind von den Volumina bzw. Volumenströmen der Bestandteile der Suspension (Wasser und Feinstoff) bzw. des Bodens abhängig. Auf Basis dieser Parameter und unter Annahme einer vollständigen Vermischung des Konditionierungs-

mittels mit dem Lockergestein wurden die Gleichungen 2.12 bis 2.14 zur Bestimmung der Volumenströme der Suspension und ihrer Bestandteile entwickelt. In der Anlage A dieser Arbeit ist die Herleitung dieser Formeln erläutert.

$$c_{susp} = \frac{V_{fein,susp}}{V_{susp}} * 100 = \frac{V_{fein,susp}}{V_{fein,susp} + V_w} * 100 = \frac{Q_{fein,susp}}{Q_{susp}} * 100 = \frac{Q_{fein,susp}}{Q_{fein,susp} + Q_w} * 100 \quad (\text{Gl. 2.10})$$

$$SIR = \frac{V_{susp}}{V_S} * 100 = \frac{Q_{susp}}{Q_S} * 100 \quad (\text{Gl. 2.11})$$

$$Q_{susp} = \frac{SIR}{100} * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.12})$$

$$Q_{fein,susp} = \frac{SIR}{100} * \frac{c_{susp}}{100} * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

$$Q_w = \frac{SIR}{100} * \left(1 - \frac{c_{susp}}{100}\right) * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.14})$$

- mit
- $A_S$  = Abbaufäche des Schilds [m<sup>2</sup>]
  - $c_{susp}$  = Konzentration der Suspension [%]
  - $Q_{fein,susp}$  = Volumenstrom des Feinstoffanteils [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_S$  = Volumenstrom des Bodens [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_{susp}$  = Volumenstrom der Feinstoffsuspension [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_w$  = Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/s]
  - $SIR$  = Suspension Injection Ratio (engl.) = Suspensionsinjektionsrate [%]
  - $V_{fein,susp}$  = Volumen des Feinstoffanteils in der Suspension [m<sup>3</sup>]
  - $V_S$  = Volumen des Bodens [m<sup>3</sup>]
  - $V_{susp}$  = Volumen der Suspension [m<sup>3</sup>]
  - $V_w$  = Volumen des Wassers [m<sup>3</sup>]
  - $v_{vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

#### 2.3.4. Konditionierung mit Polymersuspensionen

Polymere sind langkettige Moleküle, die je nach Anwendungsbereich in unterschiedlichen Typen hergestellt werden. Die Zugabe von wasserabsorbierenden Polymeren in den Schneckenförderer kann nach [110] erfolgen, um eine geeignete Konsistenz des Stützmedium und den Abbau des Porenwasserdrucks im Schneckenförderer über das Stützmediums zu gewährleisten. Ein wesentlicher Parameter der Polymere oder Polymersuspensionen ist zum einen die Polymerkonzentration, für deren Definition in Anlehnung an die Gleichung 2.10 die Abkürzung  $c_p$  gewählt und deren Berechnung mit Gleichung 2.15 empfohlen wird. Zum anderen ist die nach [110] definierte Injektionsrate der Polymersuspension „Polymer Injection Ratio“ (PIR), die von den Volumina bzw. Volumenströmen der Bestandteile der Polymersuspension (Polymer und Wasser) bzw. des Bodens abhängig ist (vgl. Gleichungen 2.16), ein wichtiger Faktor. Diese Parameter finden in den entwickelten Gleichungen zur Bestimmung der erforderlichen Volumenströme der Suspension und ihrer Bestandteile Eingang (Gleichungen 2.17 bis 2.19). Die Herleitung der Formeln erfolgt in der Anlage A dieser Arbeit.

$$c_P = \frac{V_{Pol}}{V_P} * 100 = \frac{V_{Pol}}{V_{Pol} + V_W} * 100 = \frac{Q_{Pol}}{Q_P} * 100 = \frac{Q_{Pol}}{Q_{Pol} + Q_W} * 100 \quad (\text{Gl. 2.15})$$

$$PIR = \frac{V_P}{V_S} * 100 = \frac{Q_P}{Q_S} * 100 \quad (\text{Gl. 2.16})$$

$$Q_P = \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.17})$$

$$Q_{Pol} = \frac{PIR}{100} * \frac{c_P}{100} * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.18})$$

$$Q_W = \frac{PIR}{100} * \left(1 - \frac{c_P}{100}\right) * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.19})$$

mit

$A_S =$	Abbaufäche des Schilds [m <sup>2</sup> ]
$c_P =$	Konzentration der Polymersuspension [%]
$Q_P =$	Volumenstrom der Polymersuspension [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{Pol} =$	Volumenstrom des Polymers [m <sup>3</sup> /s]
$Q_S =$	Volumenstrom des Bodens [m <sup>3</sup> /s]
$Q_W =$	Volumenstrom des Wassers [m <sup>3</sup> /s]
$PIR =$	Polymer Injection Ratio (engl.) = Polymerinjektionsrate [%]
$V_P =$	Volumen der Polymersuspension [m <sup>3</sup> ]
$V_{Pol} =$	Volumen des Polymers [m <sup>3</sup> ]
$V_S =$	Volumen des Bodens [m <sup>3</sup> ]
$V_W =$	Volumen des Wassers [m <sup>3</sup> ]
$v_{vortrieb} =$	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

### 2.3.5. Konditionierung mit Schäumen

Auf Erddruckschildmaschinen, die einen Tunnel in gemischt- oder grobkörnigen Böden auf-fahren sollen, werden üblicherweise Schaumanlagen installiert, wobei die Zugabe von Schaum die Eigenschaften des Stützmediums verändert. Zur Herstellung von Schaum wird Wasser und Tensid in einem vorgegebenen Verhältnis im Nachläufersystem zusammenge-führt und während des Transports bis zu den Schaumgeneratoren zu einer Tensidlösung gemischt. I. d. R. besteht die Möglichkeit, der Tensidlösung Polymere zur Veränderung der Schaumeigenschaften beizumischen. In den im vorderen Bereich der Nachläufer installierten Schaumgeneratoren wird die Tensidlösung im gewählten Verhältnis mit Druckluft turbulent vermischt. Nach der Zusammenführung von Tensidlösung und Luft werden beide Kompo-nenten durch einen Störkörper geführt, der Verwirbelungen verursacht, so dass die Herstel-lung von Schaum möglich ist. Üblicherweise erfolgt als Störkörper die Nutzung von orthogo-nal zur Strömungsrichtung installierten Gittern oder im Strömungsquerschnitt zwischen Sie-ben eingebrachten Glaskugeln [91]. Abbildung 2-3 zeigt das Prinzip zur Herstellung von Tensidschäumen mit einem Störkörper. Der hergestellte Schaum wird durch die Druckwand in die Abbaukammer, durch Anschlüsse in den Schneckenförderer sowie durch Drehdurch-führungen und über auf der Rückseite des Schneidrads verlegte Leitungen durch das Schneidrad an die Ortsbrust transportiert (vgl. Abbildung 2-1, Seite 8).

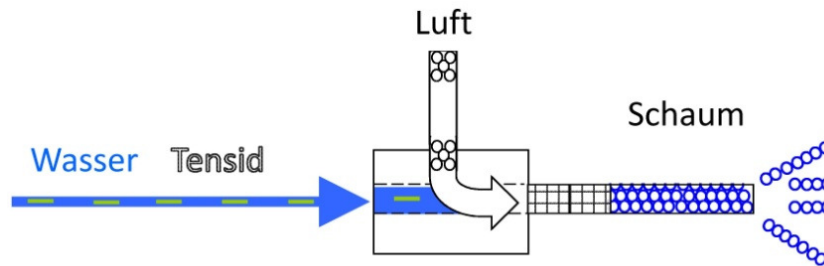


Abbildung 2-3: Prinzip zur Herstellung von Schäumen mit einer Schaumlanze mit Störkörper nach [146]

Für die Konditionierung von Lockergesteinen mit Schäumen sind verschiedene Parameter wichtig, deren Bestimmung durch die Ermittlung von Verhältnissen zwischen verschiedenen Volumina oder Volumenströmen erfolgt. Die Tensidkonzentration  $c_f$  gibt den Anteil des Tensids in der Tensidlösung an. Alternativ zum Begriff Tensidlösung wird vielfach der Begriff Liquid in der Literatur genutzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Begriffe synonym verwendet. Zur Ermittlung der Tensidkonzentration wird das Verhältnis der Massen des Tensids und der Tensidlösung bestimmt [59]. Da üblicherweise die Dichten von Tensiden den Dichten der Tensidlösungen gleichen, lässt sich die Konzentration auch über das Verhältnis zwischen Volumen bzw. Volumenstrom des Tensids und der Tensidlösung hinreichend genau bestimmen (vgl. Gleichung 2.20). Die Foam Expansion Ratio (FER) beschreibt nach [110] das volumetrische Verhältnis zwischen dem an der Düse austretenden Schaum und der dazu verwendeten Tensidlösung bzw. das Verhältnis zwischen den jeweiligen Volumenströmen des Schaums unter Druckbedingungen und der Tensidlösung (Gleichung 2.21). Das prozentuale Volumenverhältnis zwischen dem einzubringenden Schaum und dem abzubauenen Boden wird als Foam Injection Ratio (FIR) bezeichnet (vgl. Gleichung 2.22) [110]. Werden neben Schäumen auch Polymersuspensionen in das Stützmedium eingebracht, kann nach [22] die zugegebene Liquidmenge, bestehend aus der Tensidlösung des Schaums und der Polymersuspension, durch die Liquid Injection Ratio (LIR) nach Gleichung 2.23 beschrieben werden.

Der einzubringende Schaum besteht zu großen Teilen aus Luft, die ein druckabhängiges Volumen aufweist, so dass im geschlossenen Modus das Luftvolumen des Schaums an die Druckverhältnisse an der Ortsbrust anzupassen ist. Da während des Vortriebs kontinuierlich Schäume hergestellt werden, ist die Betrachtung eines Volumenstroms des Bodens für die praxisnahe Beschreibung geeigneter als eine Beschreibung des Volumens. Unter Berücksichtigung weiterer Zusammenhänge (siehe Anlage A) wurden nach [147] die Gleichungen der Volumenströme der einzelnen Schaumkomponenten in Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit entwickelt (Gleichungen 2.24 – 2.27). Die Herleitungen sind in der Anlage A zusammengefasst.

Zur Dimensionierung von Schaumanlagen bzw. zur Überprüfung der eingestellten Volumenströme während des Vortriebs wurde auf Grundlage der Gleichungen 2.24 bis 2.27 ein Nogramm erstellt und dessen beispielhafte Nutzung in [26] beschrieben. Das entwickelte

Nomogramm ist in der Anlage A als Vorlage für die Anwendung bei künftigen Tunnelbauprojekten enthalten.

$$c_f = \frac{m_f}{m_L} * 100 \approx \frac{V_f}{V_L} * 100 = \frac{Q_f}{Q_L} * 100 \quad (\text{Gl. 2.20})$$

$$FER = \frac{V_F}{V_L} = \frac{Q_F}{Q_L} \quad (\text{Gl. 2.21})$$

$$FIR = \frac{V_F}{V_S} * 100 = \frac{Q_F}{Q_S} * 100 = \frac{Q_F}{A_S * v_{vortrieb}} * 100 \quad (\text{Gl. 2.22})$$

$$LIR = \frac{V_L + V_P}{V_S} * 100 = \frac{Q_L + Q_P}{Q_S} * 100 = \frac{FIR}{FER} + PIR \quad (\text{Gl. 2.23})$$

$$Q_f = \frac{FIR/100}{FER} * \frac{c_f}{100} * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.24})$$

$$Q_W = \frac{FIR/100}{FER} * \left(1 - \frac{c_f}{100}\right) * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.25})$$

$$Q_A = \frac{FIR}{100} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * A_S * v_{vortrieb} \quad (\text{Gl. 2.26})$$

$$\begin{aligned} Q_{A,atm} &= \frac{FIR}{100} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (p_{atm} + p_{supp}) * A_S * v_{vortrieb} \\ &= \frac{FIR}{100} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (1 + p_{supp}) * A_S * v_{vortrieb} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 2.27})$$

mit	$A_S$	=	Abbaufäche des Schilds [m <sup>2</sup> ]
	$c_f$	=	Tensidkonzentration [%]
	$FER$	=	Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]
	$FIR$	=	Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate [%]
	$LIR$	=	Liquid Injection Ratio (engl.) = Liquidinjektionsrate [%]
	$m_f$	=	Masse des Tensids [kg]
	$m_L$	=	Masse der Tensidlösung [kg]
	$p_{atm}$	=	atmosphärischer Druck [bar] (näherungsweise 1 bar)
	$p_{supp}$	=	Differenzdruck zwischen Stützdruck und atmosphärischem Druck [bar]
	$PIR$	=	Polymer Injection Ratio (engl.) = Polymerinjektionsrate [%]
	$Q_A$	=	Volumenstrom der Luft unter Stützdruckbedingungen [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_{A,atm}$	=	Volumenstrom der Luft unter atmosphärischen Bedingungen [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_f$	=	Volumenstrom des Tensids [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_F$	=	Volumenstrom des Schaums [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_L$	=	Volumenstrom der Tensidlösung [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_P$	=	Volumenstrom des Polymers [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_S$	=	Volumenstrom des Bodens [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_W$	=	Volumenstrom des Wassers [m <sup>3</sup> /s]
	$V_f$	=	Volumen des Tensids [m <sup>3</sup> ]
	$V_F$	=	Volumen des Schaums unter Stützdruckbedingungen [m <sup>3</sup> ]
	$V_L$	=	Volumen der Tensidlösung [m <sup>3</sup> ]
	$V_P$	=	Volumen des Polymers [m <sup>3</sup> ]
	$V_S$	=	Volumen des Bodens [m <sup>3</sup> ]
	$v_{vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]



Tensidschäume sind ihrem Aufbau nach Dispersionen, wobei als Dispersionen heterogene Gemische, die mindestens aus zwei Stoffen bestehen und sich nicht oder nur kaum miteinander verbinden, bezeichnet werden. Bei Dispersionen heißt der Stoff, der von einem weiteren Stoff umgeben wird, disperse Phase oder Kolloid, während der umgebende Stoff kontinuierliche Phase oder Dispersionsmedium genannt wird [135]. Die Teilchengröße kolloider Stoffe liegt zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $1000 \mu\text{m}$  [86]. Schäume stellen Dispersionen dar, da sie als disperse Phase ein Gas und als Dispersionsmedium ein Liquid aufweisen. An den Kontaktstellen zweier Gasbläschen entstehen Lamellen, die von den benetzten Liquidoberflächen begrenzt werden (vgl. Abbildung 2-4). Treffen drei Schaumblasen an einer Stelle zusammen, ergeben sich Knotenpunkte, in deren Mitte sich kleinere Schaumblasen ansammeln können.

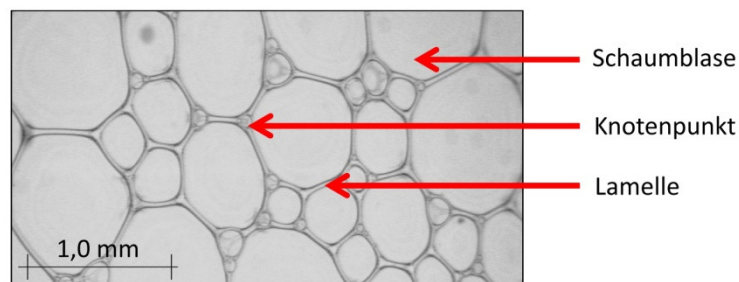


Abbildung 2-4: Mikroskopische Aufnahme des Aufbaus eines Schaums

Der Anteil des Liquids im Schaum beeinflusst die Schaumstruktur. Schaum mit geringem Liquidanteil kann als trockener Schaum beschrieben werden und zeichnet sich durch eine geringe Lamellendicke aus. Infolge von dünnen Lamellen weisen die Bläschen keine runden Oberflächen auf, sondern haben gerade Übergänge zwischen einzelnen Schaumbläschen, die zur Bezeichnung als Polyederschaum führt (vgl. [133]). Mit zunehmendem Liquidanteil im Schaum erhöht sich die Lamellendicke. Damit geht die Ausrundung der einzelnen Schaumblasen einher, so dass annähernd runde Schaumblasen entstehen können. Dieser Schaum wird Kugelschaum genannt. An den Kontaktstellen von drei Schaumblasen entstehen bei räumlicher Betrachtung der Schäume Plateaukanäle, von denen drei in einem Knotenpunkt zusammentreffen [72]. Die Geometrie der Kanäle ist vom Anteil des Liquids im Schaum abhängig. Trockene Schäume können nach [110] z. B. im Raum reguläre zwölfblättrige Schaumblasen bilden.

Tensidschäume sind den physikalischen Schäumen zugeordnet, da diese im Gegensatz zu chemischen Schäumen auf die Zugabe von chemischen Treibmitteln verzichten. Physikalische Schäume weisen zeitabhängige Eigenschaften auf, da nach Herstellung des Schaums das in den Plateaukanälen befindliche Liquid aufgrund der Gravitationskraft drainiert. Nach der Schaumproduktion verändern sich wegen der Drainage die Eigenschaften des Schaums. Im oberen Bereich verringert sich der Anteil des Liquids, so dass der Tensidschaum die Struktur eines Polyederschaums annimmt. Im unteren Bereich sammelt sich hingegen das drainierte Liquid und bildet eine liquide Phase bzw. im Übergangsbereich zum Schaum einen Kugelschaum. Abbildung 2-5 zeigt eine mikroskopische Aufnahme des Übergangs von einem trockenen Polyederschaum im oberen Bereich zu einem Kugelschaum im unteren Bereich.

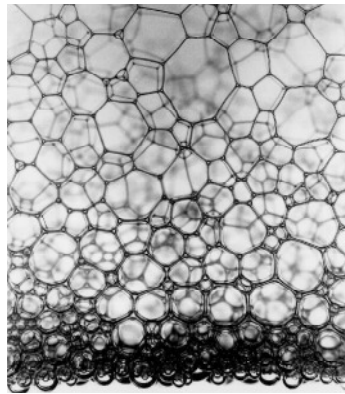


Abbildung 2-5: Mikroskopische Aufnahme eines Schaums beim Übergang eines Polyederschaums zu einem Kugelschaum [133]

Der Schubmodul von Schaum liegt im Bereich von 10 Pa, ist von der Bläschengröße sowie dem Liquidanteil abhängig und wird durch die niedrige Oberflächenspannung des Liquidfilms zwischen den Bläschenoberflächen hervorgerufen [72]. Bei geringer Belastung verhält sich der Schaum elastisch, während mit zunehmender Belastung plastische Verformungen auftreten. Der Schaum beginnt zu fließen, wenn die von der Bläschengröße und dem Liquidanteil abhängige Fließgrenze überschritten wird. Mit zunehmendem Liquidanteil sinken sowohl der Schubmodul als auch die Fließgrenze [72].

Zur Herstellung von Schäumen auf Erddruckschilden werden Tenside genutzt, die den grenzflächenaktiven Stoffen zuzuordnen sind und aufgrund ihres Aufbaus Einfluss auf die Eigenschaften der Schäume haben können. Tenside bestehen aus einer hydrophoben Kette von Kohlenwasserstoffen mit einem hydrophilen Kopf am Ende der Kette. Aufgrund des unterschiedlichen Molekülaufbaus werden Tenside einer der vier Gruppen der nichtionogenen, anionaktiven, kationaktiven oder amphoteren Tenside zugeordnet [93].

Tenside reichern sich an Grenzflächen von zwei nicht miteinander vermischbaren Phasen wie Luft und Wasser oder Feststoff und Wasser an. Die hydrophilen Enden verbleiben üblicherweise im Wasser und werden von durch Wasserstoffbrücken erzeugten Energiebarrieren gehalten. Durch die Tenside findet an den Grenzflächen eine Reduzierung der Oberflächenenergie und der Grenzflächenspannung statt. Die zunehmende Tensidkonzentration im Wasser führt zu einem Stadium, an dem alle Grenzflächen mit Tensidmolekülen bedeckt sind. Diese Tensidkonzentration wird als kritische Mizellen-Konzentration (englisch: critical micelle concentration, kurz: cmc) bezeichnet. Bei Tensidkonzentrationen größer der cmc bilden sich im Wasser Mizellen, bei denen sich die hydrophilen Köpfe in einem außenliegenden Kranz mit innenliegenden hydrophoben Ketten anordnen, so dass die hydrophoben Ketten nicht mit Wasser in Berührung kommen. Durch die Zuführung von Luft kann eine einzelne Schaumblase entstehen. Abbildung 2-6 zeigt die schematische Darstellung der Anordnung von Tensidmolekülen an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser (a), die Anordnung während der Bildung einer Mizelle (b) und bei Bildung einer Schaumblase (c).

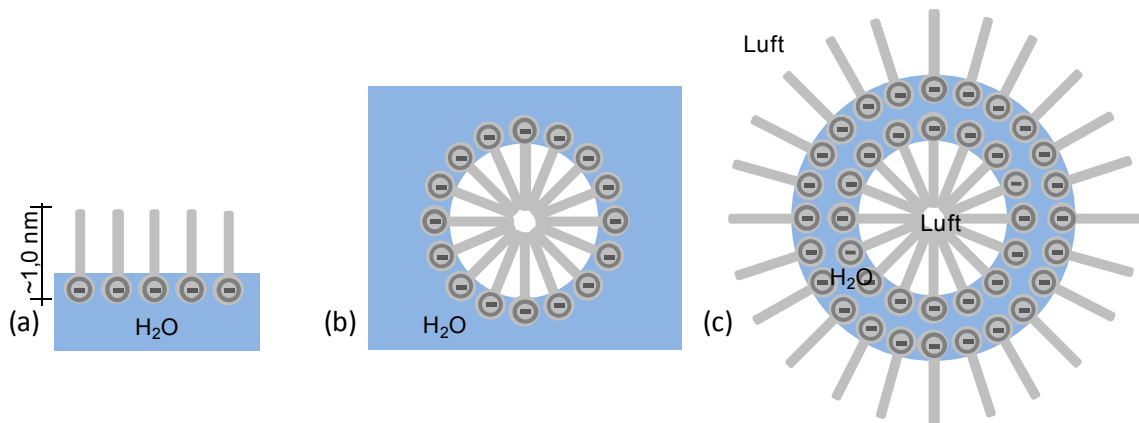


Abbildung 2-6: Anordnung von Tensidmolekülen an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser (a), bei der Bildung einer Mizelle (b) sowie bei der Bildung einer Schaumblase (c) nach [152]

Tensidschaum besteht aus zahlreichen Schaumblasen, die von einer tensidhaltigen Wasserhülle, der interlamellaren Flüssigkeit, umgeben sind. Durch die Anordnung der Tenside in der Wasserhülle bilden sich ein äußerer und ein innerer Film, welcher die Oberflächenspannung der Flüssigkeit herabsetzt [72]. Die Form einer einzelnen Schaumblase stellt üblicherweise eine Kugel dar, da in diesem Fall das Verhältnis zwischen eingeschlossenem Volumen und umgebender Fläche maximal ist. Der Radius der Kugel einer Schaumblase ist von den Drücken innerhalb und außerhalb der Schaumblase sowie von der Oberflächenspannung abhängig. Nach dem Gesetz von *Laplace* gilt für eine einzelne zweifilmige Schaumblase der Zusammenhang nach Gleichung 2.28. Bei Blasenverbänden bzw. Schäumen stellt der äußere Film gleichzeitig den inneren Film der angrenzenden Blase dar, so dass für eine einzelne Blase nur ein Film besteht. Aus diesem Grund reduziert sich der Differenzdruck zwischen den Grenzflächen bei einfilmigen Schaumblasen nach Gleichung 2.29 [87].

$$\Delta p = \frac{4 * \sigma_S}{r_S} \quad (\text{Gl. 2.28})$$

$$\Delta p_{1f} = \frac{2 * \sigma_S}{r_S} \quad (\text{Gl. 2.29})$$

mit  $r_S =$  Radius der Schaumblase [m]  
 $\Delta p =$  Druckdifferenz zwischen den Grenzflächen einer Schaumblase [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\Delta p_{1f} =$  Druckdifferenz zwischen den Grenzflächen bei Schäumen [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\sigma_S =$  Oberflächenspannung der Schaumblase [kN/m]

Die Oberfläche eines Bodenkorns ist üblicherweise hydrophil. Bei Konditionierung mit Schaum verbindet sich die hydrophile Oberfläche des Korns mit dem hydrophilen Teil des Tensidmoleküls, so dass der Schaumlösung ein Anteil des Tensids entzogen wird und eine Zerstörung der Schaumblase möglich ist [104]. In diesem Fall weisen die hydrophoben Enden des Moleküls irrtümlicherweise nach außen, so dass ein Aneinanderhaften feiner Partikel verstärkt werden kann [90]. Durch die Zugabe von weiteren Tensidmolekülen können sich die nach außen weisenden hydrophoben Enden mit hydrophoben Enden neuer Moleküle verbinden, so dass dann hydrophile Enden nach außen zeigen. Bei ausreichender Menge an Tensid entsteht so um das Korn ein Film, bei dem die hydrophilen Enden radial nach au-

ßen zeigen [105]. Zudem sinkt die Oberflächenspannung des Wassers durch die im Schaum vorhandenen Tenside und die Kapillarkräfte zwischen einzelnen Körnern nehmen ab. Mit zunehmendem Anteil an Tensidschaum kann der Korn-zu-Korn-Kontakt aufgehoben werden und das Boden-Schaum-Gemisch ein flüssigeres Verhalten annehmen.

### 2.3.6. Umweltverträglichkeit von Konditionierungsmitteln

Durch die Inhaltsstoffe von Konditionierungsmitteln können sich Auswirkungen auf die Umwelt ergeben. Die Risiken für Mensch und Umwelt werden durch vier Einwirkungen (Menge, Toxizität, chemische und physikalische Eigenschaften und Abbaubarkeit) beeinflusst [92]. Die Bestimmung der Risiken erfolgt u. a. mittels Laboruntersuchungen nach OECD Empfehlungen [114, 115, 116, 117, 118].

Um den Baugrund nicht übermäßig zu belasten, werden vielfach biologisch abbaubare Tenside oder Polymere für die Schaumherstellung eingesetzt. Die Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit erfolgt für die jeweiligen Produkte in Laboruntersuchungen. Abbildung 2-7 zeigt den prozentualen Verlauf des Anteils der biologisch abgebauten Substanz eines im Tunnelbau genutzten Produkts, hier CLB F4 der Fa. Condat Lubrifiants. Mit der Zeit nimmt der Verlauf zu, bis er nach 28 Tagen über 90 % beträgt. Nach [63] kann dieses Tensid als leicht abbaubar eingestuft werden, da nach 28 Tagen mindestens 60 % des maximal theoretischen Werts biologisch abgebaut wurden.

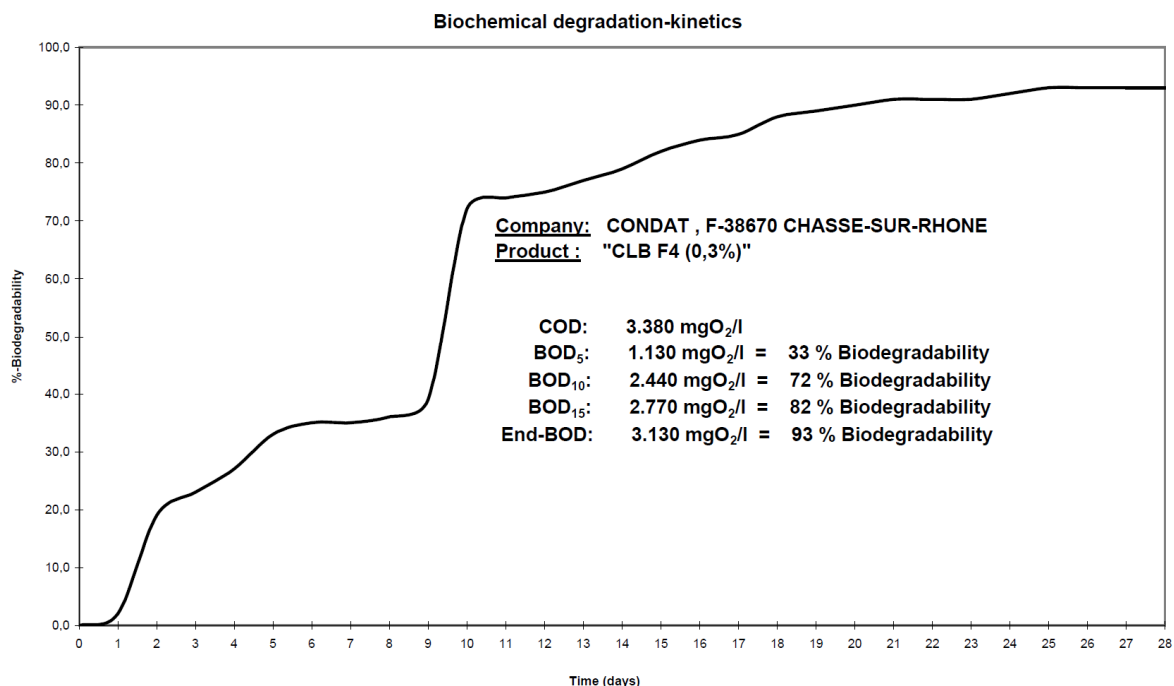


Abbildung 2-7: Prozentualer Verlauf des Anteils der biologisch abgebauten Substanz eines im Tunnelbau genutzten Produkts, hier CLB F4 der Fa. Condat Lubrifiants [31]

Nach [38] werden Konditionierungsmittel hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit in Wassergefährdungsklassen (WGK) unterteilt. Die WGK werden in der „Allgemeinen Verwaltungs-

vorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe“ [27] beschrieben und können wie folgt unterschieden werden:

- WGK 1: schwach wassergefährdend
- WGK 2: wassergefährdend
- WGK 3: stark wassergefährdend

Stoffe, die nicht wassergefährdend sind, wurden bis zum Jahr 1999 der Wassergefährdungsklasse 0 (WGK 0) „im Allgemeinen nicht wassergefährdende Stoffe“ zugeordnet. Diese Klasse entfiel durch eine Veränderung der Verwaltungsvorschrift. Um die Auswirkungen der Konditionierungsmittel auf die Umwelt gering zu halten, sind Konditionierungsmittel mit keiner oder einer niedrigen Wassergefährdungsklasse zu wählen. I. d. R. haben auf Erddruckschilden genutzte Tenside und Polymere in Abhängigkeit ihrer Inhaltsstoffe die Wassergefährdungsklasse 1 oder sie sind keiner WGK zugeordnet. Üblicherweise erfordert die Verwendung von Konditionierungsmitteln bei Erddruckschilden die Zustimmung der zuständigen Behörde (vgl. [33, 34, 35]).

Sofern das konditionierte Stützmedium nicht weiter verarbeitet werden kann, ist eine Deponierung des Materials erforderlich. Bereits bei der Auswahl der Konditionierungsmittel ist nach [38] zu berücksichtigen, dass das abgebaute konditionierte Material sowohl aus chemischer als auch aus physikalischer Sicht den Anforderungen zur Deponierung genügen muss.

Maßgebend für die Deponierung von konditioniertem Lockergestein sind die Richtlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [38]. Dabei geht die Richtlinie 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - technische Regeln“ auf die Wiederverwertung von Bodenaushub ein [89]. Die Zuordnung des Materials in Einbauklassen erfolgt auf Basis von Untersuchungen zu den Inhaltsstoffen. Die Abstufung beginnt mit der Einbauklasse Z0 für nicht oder schwach belastete Materialien und endet mit Einbauklasse Z5 für Sonderabfälle. Zudem bietet sich eine Charakterisierung des konditionierten Materials nach den Deponieklassen DK 0 bis DK III an [28].

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen ist ein geringer Verbrauch an Konditionierungsmitteln und eine geringe Einbau- bzw. Deponieklasse anzustreben [38]. Die Kosten pro Tonne zu entsorgenden Materials können in Abhängigkeit der Maßnahme nach [10] deutlich schwanken (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Kosten für unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten von konditioniertem Lockergestein in Anlehnung an [10]

Maßnahme	Preis
Verwertung von Boden in Kiesgruben (bis Z2)	4 bis 12 €/to
Deponierung nach DepV (DK I)	35 €/to
Deponierung nach DepV (DK II)	45 €/to

Für die Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels hinsichtlich der Anforderungen an die Deponierfähigkeit sind verschiedene Arbeitsschritte erforderlich, die in Abbildung 2-8 dargestellt sind. Im ersten Arbeitsschritt wird eine Probe des anstehenden Lockergesteins z. B.

durch eine Schürfung gewonnen oder künstlich aus verschiedenen Kornfraktionen zusammengestellt. Zudem wird auf Grundlage empirischer Erfahrungen oder Ergebnisse von Untersuchungen die Art, Menge und Konzentration des oder der Konditionierungsmittel ausgewählt. Ein Teil des Lockergesteins wird im zweiten Arbeitsschritt mit dem bzw. den Konditionierungsmitteln aufbereitet. Das konditionierte Material sollte den erforderlichen Anforderungen an die Eigenschaften eines Stützmediums entsprechen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden. Im dritten Arbeitsschritt wird die Deponierfähigkeit der unkonditionierten und der konditionierten Lockergesteine bestimmt. In Anlehnung an [21] eignen sich dafür vor allem Elutionsversuche.

Durch die Bestimmung der jeweiligen Eigenschaften des unkonditionierten und des konditionierten Materials kann bei einem Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungen der Einfluss des gewählten Konditionierungsmittels ermittelt werden. Auf Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen zu den konditionierten Lockergesteinen erfolgt auch die Bestimmung des Einflusses der verschiedenen Konditionierungsmittel auf deren Deponierfähigkeit. Werden die jeweiligen, festgelegten Grenzwerte der Deponie hinsichtlich der Eigenschaften des konditionierten Materials nicht überschritten, kann dieses deponiert werden. Hingegen erfordert die Überschreitung eines oder mehrerer festgelegter Grenzwerte die neue Wahl eines Konditionierungsmittels. Neben einer möglichen Veränderung der Konzentration, der Menge oder der Produkte können auch mehrere Arten an Konditionierungsmitteln (Polymere, Tenside, Feinstoffsuspensionen) eingesetzt werden.

#### Arbeitsschritte zur Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels hinsichtlich der Anforderungen an die Deponierfähigkeit

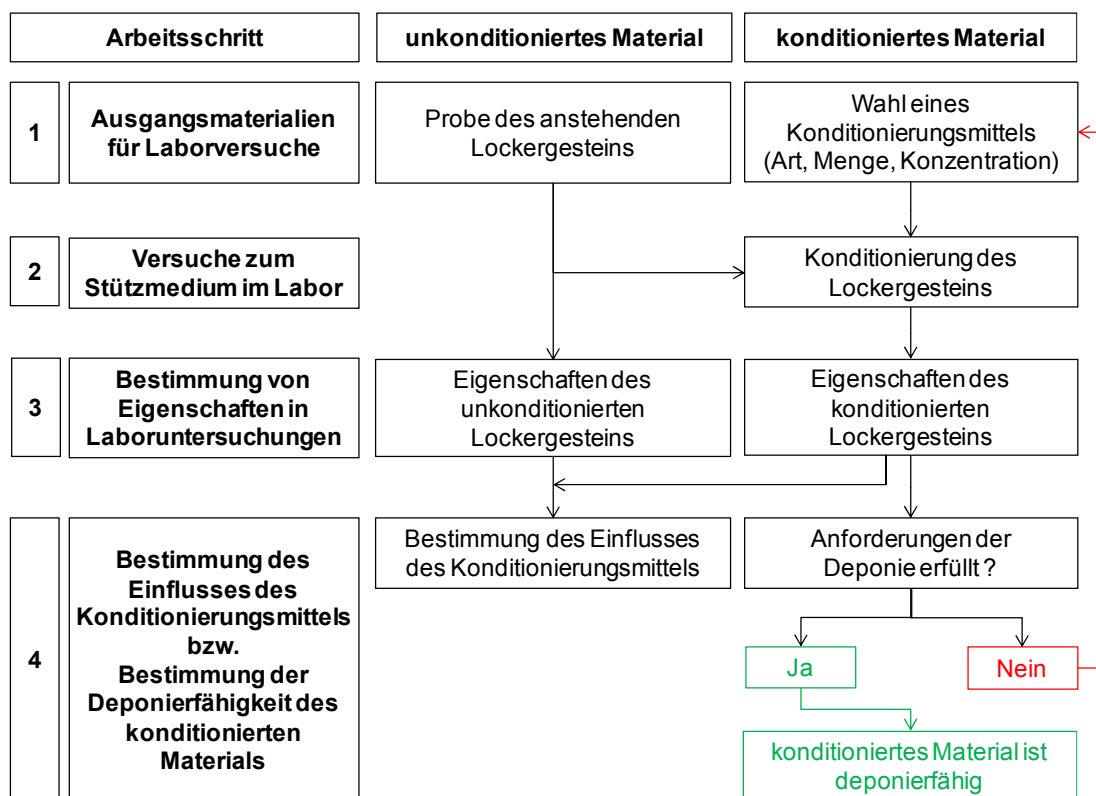


Abbildung 2-8: Arbeitsschritte zur Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels hinsichtlich der Anforderungen an die Deponierfähigkeit

## 2.4. Grundlagen der Stützdruckberechnung

Bei Vortrieben mit Erddruckschilden im Lockergestein, bei dem eine Stützung der Ortsbrust erforderlich ist, muss eine Berechnung des minimalen bzw. maximalen Stützdrucks erfolgen, um Senkungen bzw. Hebungen an der Geländeoberkante zu vermindern. Zur Bestimmung der erforderlichen Stützdrücke sind verschiedene Modelle entwickelt worden, bei denen unterschiedliche Geometrien der Bruchmechanismen Eingang finden. So sieht u. a. der Bruchmechanismus nach *Horn* [71] einen in den Tunnel eindringenden Gleitkeil mit einem darüber liegenden Prisma vor. Das Modell nach [94] berücksichtigt einen kegelförmigen Bruchkörper, das Verfahren von [85] geht von einem Bruchkörper in Form einer Halbkugel aus, der Bruchmechanismus nach [112] entspricht einem Viertel eines Ellipsoids und das Verfahren nach [126] nimmt einen muschelförmigen Bruchkörper mit gekrümmter Gleitfläche an. Weitere Modelle sind in [80, 85, 132] zusammengestellt.

In Deutschland werden vor allem Modelle auf Basis der Bruchmechanismen nach *Horn* [71] und nach *Piaskowski & Kowalewski* [126] angewandt (vgl. [136]). Basierend auf dem Bruchmechanismus von *Horn* [71] wurde von *Anagnostou & Kovári* ein Modell zur Bestimmung des Stützdrucks bei Erddruckschilden entwickelt [4]. Das Verfahren nach *Piaskowski & Kowalewski* [126] ist in der DIN 4085 von 1987 zur Bestimmung des Erddrucks erläutert [46]. Da diese beiden Verfahren für die Stützdruckberechnung geeignet sind und die den Verfahren zugrunde liegenden Bruchmechanismen in Deutschland häufig angewandt werden, erfolgt die nähere Betrachtung der Verfahren nach *Anagnostou & Kovári* [4] und *Piaskowski & Kowalewski* [126].

### 2.4.1. Zur Stützdruckberechnung nach *Anagnostou & Kovári*

Das Verfahren nach [4] berücksichtigt auf Basis der Erkenntnisse von [77, 139] die Silowirkung des Bodens oberhalb von Tunnelquerschnitten. So kann eine Spannungsumlagerung von einem über dem Gleitkeil liegenden Prisma auf den umliegenden Boden angesetzt werden. Die aufgrund der Silowirkung abgeminderte vertikale Kraft wirkt auf den der Ortsbrust vorgelagerten Gleitkeil. Auf diesen wirken zusätzlich Kräfte aus Eigengewicht, mögliche aus Sickerströmungen resultierende Strömungskräfte in vertikaler und horizontaler Richtung, Reibungs- und mögliche Kohäsionskräfte in den seitlichen Gleitflächen und in der Gleitfläche, eine Reaktionskraft sowie die zu ermittelnde Stützkraft. Durch Variation des Gleitflächenwinkels kann die erforderliche Stützkraft bzw. der erforderliche Stützdruck bestimmt werden. Das dreidimensionale Bruchkörpermodell nach *Horn* und die nach *Anagnostou & Kovári* auf den Gleitkeil wirkenden Kräfte sind in Abbildung 2-9 dargestellt.

Der Ansatz von *Horn* sieht vor, dass die Höhe und Breite des Gleitkeils dem Durchmesser des Tunnels entspricht. Alternativ zu diesem Ansatz kann eine Flächengleichheit zwischen Ortsbrust des Tunnels und der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils gewählt werden (vgl. [79]). Der Ansatz von *Horn* liegt im Gegensatz zum Ansatz des gleichen Flächeninhalts von Ortsbrust des Tunnels und der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils auf der „sicheren Seite“. Aus diesem Grund wurde in den eigenen Untersuchungen zum

Einfluss der Konditionierung auf die Bestimmung der Größe des effektiven Stützdrucks der Ansatz von *Horn* gewählt.

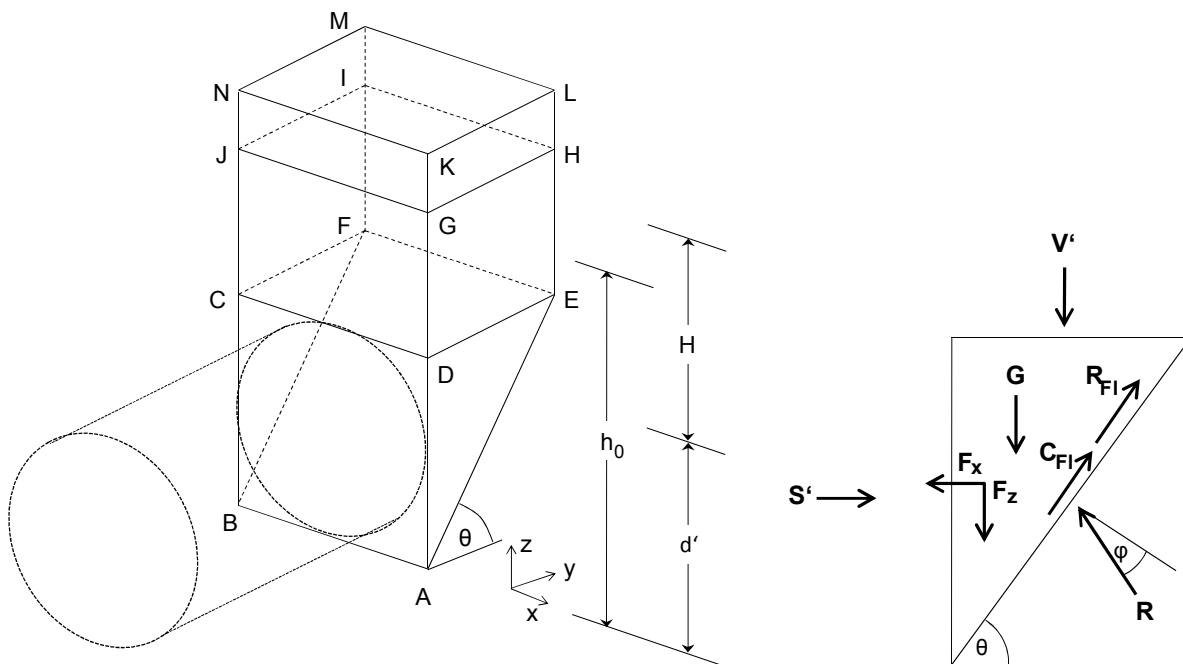


Abbildung 2-9: Bruchkörpermodell von *Horn* nach [5] sowie angreifende Kräfte am Gleitkeil in Anlehnung an [4]

Bei unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzten Erddruckschilden können Sickerströmungen im Gleitkeil und im Prisma zu einer zusätzlichen Belastung des Gleitkeils führen, wenn das Potential im umgebenden Baugrund und nicht innerhalb der Abbaukammer und des Schneckenförderers abgebaut wird. Aufgrund eintretender Sickerströmungen kann die vertikal gerichtete Spannung zwischen Prisma und Gleitkeil zunehmen, so dass eine Erhöhung des erforderlichen effektiven Stützdrucks möglich ist. Zur Ermittlung der Kräfte des Strömungsdrucks aufgrund von Sickerströmungen führten *Anagnostou & Kovári* Untersuchungen mithilfe eines numerischen Modells u. a. mit Variation der piezometrischen Höhe in der Abbaukammer, der Höhe des Grundwasserspiegels und der Höhe der Überdeckung des Tunnels durch (vgl. [4]). Es erfolgte eine Berücksichtigung der zusätzlichen Belastungen aus den Grundwasserströmungen bei der Berechnung des erforderlichen effektiven Stützdrucks. Die Sickerströmungen und somit die daraus resultierenden zusätzlichen Strömungskräfte auf den Gleitkeil können durch Verringerung der Wasserdurchlässigkeit des Bodens in der Abbaukammer und in der Förderschnecke mittels Verwendung von Konditionierungsmitteln beeinflusst werden [3]. Allerdings hat es hinsichtlich des Einflusses von Konditionierungsmitteln auf den Stützdruck bislang noch keine systematischen Untersuchungen gegeben. Da aufgrund unterschiedlicher Berechnungsansätze die Ergebnisse von Stützdruckberechnungen bei Erddruckschilden z. T. stark differieren können [132], werden die nach [4] auf den Gleitkeil einwirkenden, in Abbildung 2-9 dargestellten und im Rahmen der Arbeit betrachteten Kräfte nachfolgend erläutert.



*Vertikale Kraft  $V'$  (unter Berücksichtigung der Sickerströmung) auf den Gleitkeil*

Die auf den Gleitkeil wirkende vertikale Kraft  $V'$  kann mithilfe der Fläche zwischen Gleitkeil und Prisma und der in dieser Fläche wirkenden Spannung nach Gleichung 2.30 ermittelt werden (vgl. [79]).

$$V' = \sigma'_v * d' * \frac{d'}{\tan \theta} \quad (\text{Gl. 2.30})$$

- mit  $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]  
 $V' =$  vertikale Kraft auf den Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN]  
 $\sigma'_v =$  reduzierte vertikale Spannung zwischen Prisma und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\theta =$  Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

Für die Bestimmung von  $\sigma'_v$  gelten bezüglich des Umfangs und der Fläche eines Bodenelements im Prisma die Gleichungen 2.31 und 2.32.

$$U = 2 * \left( d' + \frac{d'}{\tan \theta} \right) = 2 * d' * (1 + \cot \theta) \quad (\text{Gl. 2.31})$$

$$A_B = d' * \frac{d'}{\tan \theta} = d'^2 * \cot \theta \quad (\text{Gl. 2.32})$$

- mit  $A_B =$  Fläche eines Bodenelements im Prisma [m<sup>2</sup>]  
 $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]  
 $U =$  Umfang eines Bodenelements im Prisma [m]  
 $\theta =$  Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

Die Definition der piezometrischen Höhe bei möglichen Sickerströmungen wird anhand zweier in der Abbildung 2-10 dargestellter Situationen erläutert. An mit gesättigtem Boden gefüllten Zylindern sind je zwei Steigrohre in unterschiedlichen Höhen (A und B) angebracht. Besteht keine Drainage (im Beispiel links) haben die piezometrischen Höhen der betrachteten Punkte A und B die gleichen Werte. Lediglich der Anteil aus geodätischer Höhe und Druckhöhe ist unterschiedlich. Im Beispiel mit einer Drainage durch den Boden (rechts) kann die piezometrische Höhe auf Höhe des Punkts B geringer als die piezometrische Höhe auf Höhe des Punkts A sein, so dass eine Sickerströmung eintritt. Mithilfe der Differenz der piezometrischen Höhen ist so die Ermittlung des zusätzlichen Strömungsdrucks im Boden zwischen den Höhen A und B möglich.

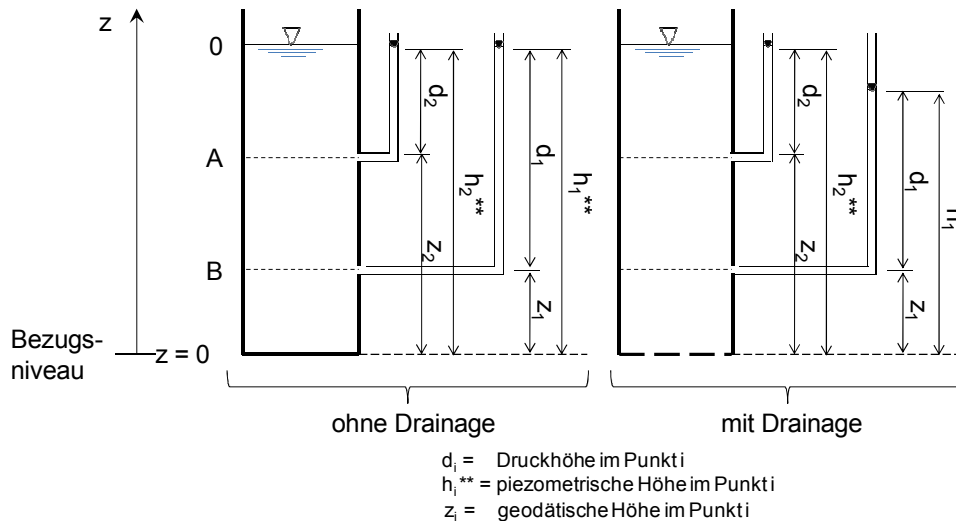


Abbildung 2-10: Darstellung zur Definition der piezometrischen Höhe

Zur Bestimmung des Drucks auf den Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmungen wird nach [4] unterschieden, ob sich der Grundwasserspiegel oberhalb oder unterhalb der Geländeoberkante befindet. Die Ermittlung der vertikalen Spannung auf den Gleitkeil erfolgt mit den Gleichungen 2.33 und 2.34, sofern der Grundwasserspiegel oberhalb der Geländeoberkante liegt. Sollte sich der Grundwasserspiegel unterhalb der Geländeoberkante befinden, ist das Prisma auf Höhe des Grundwasserspiegels zu unterteilen und der Boden sowohl ohne als auch mit Auftrieb zu berücksichtigen (vgl. Gleichungen 2.35 und 2.36). Die Formeln wurden in Anlehnung an [4] zusammengefasst.

Die Gleichungen 2.33 und 2.35 beinhalten neben den Ansätzen zur Berücksichtigung der Silotheorie der Bodenauflast den Term  $\gamma_W * a$ , der eine Spannung aufgrund des Einflusses des Strömungsdrucks infolge möglicher Sickerströmungen darstellt. Dieser Anteil der vertikalen Spannung wird in Gleichung 2.34 näher betrachtet und kann mithilfe einer numerischen Berechnung bestimmt werden. Abbildung 2-11 zeigt beispielhaft die Ermittlung des Strömungsdrucks im Prisma auf der Höhe z. Sollten keine Sickerströmungen im Boden auftreten, gehen diese nicht weiter in die Berechnung ein. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zur Sickerströmung liefern die durchschnittlichen piezometrischen Höhen in unterschiedlichen betrachteten Höhen des Prismas, mit deren Hilfe der vertikale Strömungsdruck  $f_z^{**}$  errechnet werden kann. In den Gleichungen wird für den Faktor  $k_i$  nach [4] und [66] der Faktor 0,8 angesetzt.

$$\sigma'_v = \frac{\gamma'_i - c_i * \frac{U}{A_B}}{k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi} * \left(1 - e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * H}\right) + \gamma_W * a \quad (\text{Gl. 2.33})$$

$$\text{mit } \gamma_W * a = \int_{d'}^{d'+H} f_z^{**} * e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (z - d')} dz \quad (\text{Gl. 2.34})$$

$$\text{bzw. } \sigma'_v = \sigma'_z(h_0) * e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (H + d' - h_0)} + \frac{\gamma'_i - c_i * \frac{U}{A_B}}{k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi} * \left(1 - e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (h_0 - d')}\right) + \gamma_W * a \quad (\text{Gl. 2.35})$$

$$\text{mit } \sigma_z'^*(h_0) = \frac{\gamma_i - c_i \cdot \frac{U}{A_B}}{k_i \cdot \frac{U}{A_B} \cdot \tan \varphi} * \left( 1 - e^{-k_i \cdot \frac{U}{A_B} \cdot \tan \varphi * (H + d' - h_0)} \right) \quad (\text{Gl. 2.36})$$

- mit  $A_B$  = Fläche eines Bodenelements im Prisma [m<sup>2</sup>]  
 $c_i$  = Kohäsion der Bodenschicht [kN/m<sup>2</sup>]  
 $d'$  = Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]  
 $f_z^{**}$  = vertikaler Strömungsdruck des Bodenelements in der Höhe z [kN/m<sup>2</sup>]  
 $H$  = Überdeckung [m]  
 $h_0$  = Höhe des Grundwasserspiegels von Tunnelsohle [m]  
 $k_i$  = Silobeiwert der Bodenschicht [-]  
 $U$  = Umfang eines Bodenelements im Prisma [m]  
 $z$  = Höhe von Tunnelsohle bis zum betrachteten Element [m]  
 $a$  = Beiwert nach [4] [m]  
 $\gamma_i$  = Wichte der Bodenschicht [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_i'$  = Wichte der Bodenschicht unter Auftrieb [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_w$  = Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_v'$  = reduzierte vertikale Spannung zwischen Prisma und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 > H$   
 $\sigma_v'^*$  = reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 < H$   
 $\sigma_z'^*(h_0)$  = reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung in der Höhe  $h_0$  [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 < H$   
 $\varphi$  = Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

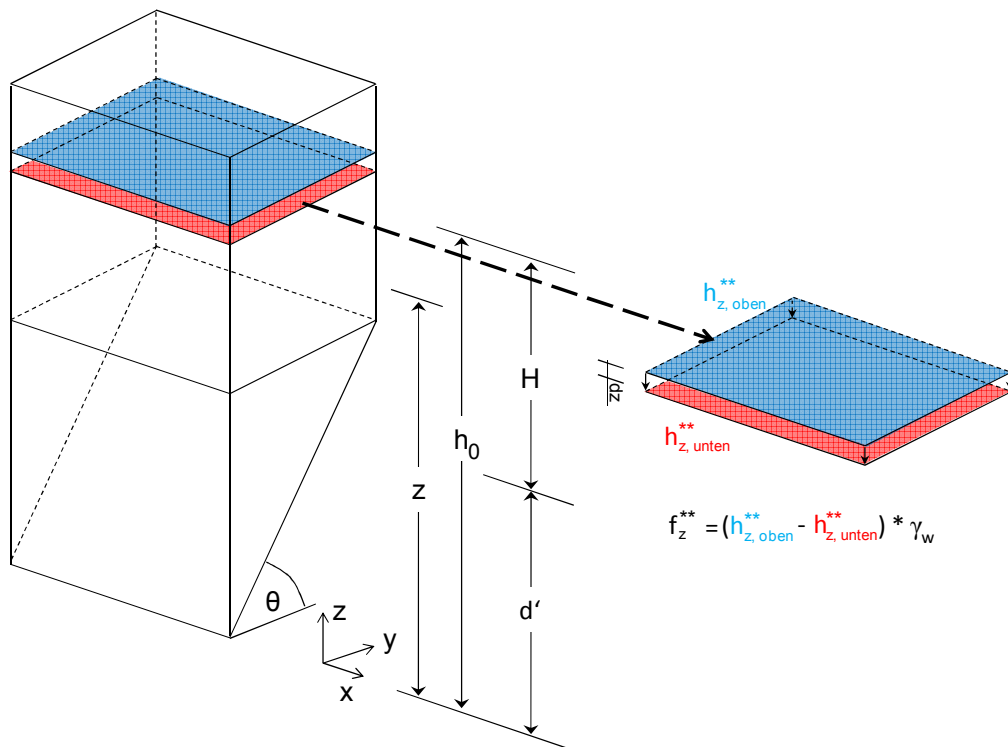


Abbildung 2-11: Darstellung der Berechnung des Strömungsdrucks im Prisma auf der Höhe z

**Bestimmung der horizontalen Strömungskraft  $F_x$  auf den Gleitkeil**

Zur Bestimmung der Strömungskraft  $F_x$  wird die Differenz der horizontalen, auf den Gleitkeil einwirkenden Kräfte aufgrund der piezometrischen Höhen gemäß Gleichung 2.37 ermittelt (vgl. [4]). Die piezometrischen Höhen lassen sich durch eine numerische Berechnung bestimmen. Alternativ dazu kann die Ermittlung der Strömungskraft  $F_x$  nach Gleichung 2.38 erfolgen, in der die durchschnittlichen piezometrischen Höhen in den jeweiligen Flächen eingehen (vgl. Abbildung 2-12).

$$F_x = \gamma_w * (\sin \theta * \int_{ABEF} h^* ds - \int_{ABCD} h^* ds) \quad (\text{Gl. 2.37})$$

$$F_x = \gamma_w * (\varnothing h_{ABEF}^* - \varnothing h_{ABCD}^*) * d' * d' \quad (\text{Gl. 2.38})$$

mit  $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]  
 $F_x =$  Strömungskraft in x-Richtung [kN]  
 $h^* =$  piezometrische Höhe (im Gleitkeil) [m]  
 $\gamma_w =$  Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\theta =$  Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

$\int_{ABCD} ds =$  Integration über die Fläche des Vierecks ABCD (Abbildung 2-9) [m<sup>2</sup>]

$\int_{ABEF} ds =$  Integration über die Fläche des Vierecks ABEF (Abbildung 2-9) [m<sup>2</sup>]

$\varnothing h_{ABCD}^* =$  durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks ABCD (Abbildung 2-9) [m]

$\varnothing h_{ABEF}^* =$  durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks ABEF (Abbildung 2-9) [m]

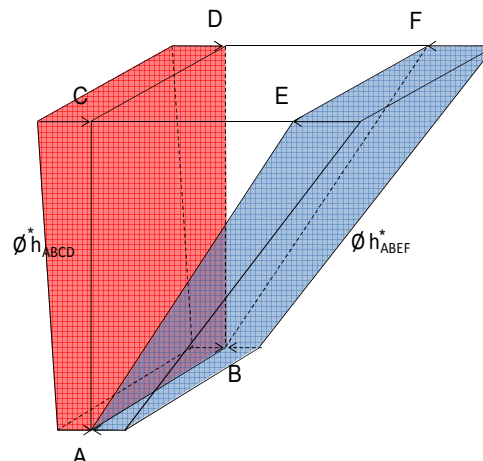


Abbildung 2-12: Belastungen des Gleitkeils in horizontaler Richtung aufgrund von Sickerströmungen (Abbildung eines näherungsweise linearen Verlaufs)

**Bestimmung der vertikalen Strömungskraft  $F_z$  auf den Gleitkeil**

Zur Ermittlung der Strömungskraft  $F_z$  wird die Differenz der vertikalen, auf den Gleitkeil einwirkenden Kräfte gemäß Gleichung 2.39 ermittelt (vgl. [4]). Alternativ besteht auch hier die Möglichkeit, die Kraft mittels der durchschnittlichen hydraulischen Höhen auf den betrachteten Flächen zu errechnen (vgl. Gleichung 2.40). Die Belastungen aufgrund der piezometrischen Höhen sind in Abbildung 2-13 dargestellt.

$$F_z = \gamma_w * \left( \cos \theta * \int_{ABEF} h^* ds - \int_{CDEF} h^* ds \right) \quad (\text{Gl. 2.39})$$

$$F_z = \gamma_w * (\varnothing h_{ABEF}^* - \varnothing h_{CDEF}^*) * d' * \frac{d'}{\tan \theta} \quad (\text{Gl. 2.40})$$

mit  $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]

$h^* =$  durchschnittliche piezometrische Höhe im Gleitkeil [m]

$F_z =$  Strömungskraft in z-Richtung [kN]

$\gamma_w =$  Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]

$\theta =$  Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

$\int_{ABEF} ds =$  Integration über die Fläche des Vierecks ABEF (Abbildung 2-9) [m<sup>2</sup>]

$\int_{CDEF} ds =$  Integration über die Fläche des Vierecks CDEF (Abbildung 2-9) [m<sup>2</sup>]

$\varnothing h_{ABEF}^* =$  durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks ABEF (Abbildung 2-9) [m]

$\varnothing h_{CDEF}^* =$  durchschnittliche piezometrische Höhe in der Fläche des Vierecks CDEF (Abbildung 2-9) [m]

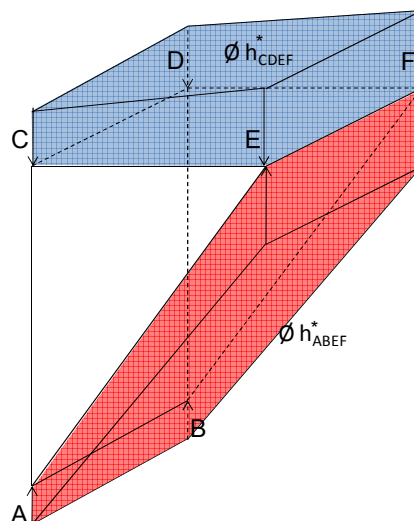


Abbildung 2-13: Belastungen des Gleitkeils in vertikaler Richtung aufgrund von Sickerströmungen (Abbildung eines näherungsweise linearen Verlaufs)

### Gewichtskraft $G$ des Gleitkeils in Abhängigkeit des Gleitflächenwinkels $\theta$

Die Gewichtskraft des Gleitkeils ist abhängig von der Wichte des Bodens und seines Volumens. Die Gewichtskraft kann nach Gleichung 2.41 ermittelt werden.

$$G = \gamma_G * d' * d' * \frac{1}{2} * \frac{d'}{\tan \theta} \quad (\text{Gl. 2.41})$$

mit  $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]

$G =$  Gewichtskraft des Gleitkeils [kN]

$\gamma_G =$  Wichte des Bodens des Gleitkeils [kN/m<sup>3</sup>]

$\theta =$  Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

**Reibungskraft  $R_{Fl}$  in den Flanken des Gleitkeils**

Die dem Bruchmechanismus entgegenwirkenden Reibungskräfte in beiden Flanken des Gleitkeils lassen sich durch einen konstanten Anteil der vertikalen Spannung und einen mit der Tiefe zunehmenden Anteil gemäß [5] auf Basis von [49] beschreiben, aus denen die Gleichung 2.42 folgt.

$$R_{Fl} = K_i * \left( \frac{1}{3} * \gamma_G * d' + \frac{2}{3} * \sigma'_v \right) * \frac{\tan \varphi}{F} * d' * \frac{d'}{\tan \theta} \quad (\text{Gl. 2.42})$$

mit	$d'$ =	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$F$ =	Sicherheitsfaktor
	$K_i$ =	Beiwert der Bodenschicht, gemäß [3] = 0,4 [-]
	$R_{Fl}$ =	Reibungskräfte aus beiden Flanken [kN]
	$\gamma_G$ =	Wichte des Bodens des Gleitkeils [kN/m <sup>3</sup> ]
	$\theta$ =	Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)
	$\sigma'_v$ =	angesetzte Spannung an der Oberkante des Gleitkeils [kN/m <sup>2</sup> ]
	$\varphi$ =	Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

**Kohäsionskraft  $C_{Fl}$  in der Flanke und in der Gleitfläche**

Gemäß [79] kann eine mögliche Kohäsionskraft in den Flanken nach Gleichung 2.43 und die Kohäsionskraft in der Gleitfläche nach Gleichung 2.44 berechnet werden.

$$C_{Fl} = 0,5 * d' * \frac{d'}{\tan \theta} * c_i \quad (\text{Gl. 2.43})$$

$$C_1 = d' * \frac{d'}{\sin \theta} * c_i \quad (\text{Gl. 2.44})$$

mit	$d'$ =	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$c_i$ =	Kohäsion des Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]
	$C_{Fl}$ =	Kohäsionskraft einer Flanke [kN]
	$C_1$ =	Kohäsionskraft der Gleitfläche [kN]
	$\theta$ =	Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)

**Wasserkraft  $W$** 

Zur Stützdruckberechnung geht die durchschnittliche piezometrische Höhe in der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils bei Berücksichtigung möglicher Sickerströmungen in die Berechnung der Wasserkraft ein (vgl. Gleichung 2.45).

$$W = \gamma_W * \phi h_W * d' * d' \quad (\text{Gl. 2.45})$$

mit	$d'$ =	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$W$ =	Wasserkraft [kN]
	$\phi h_W$ =	mittlere piezometrische Höhe in der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils [m]
	$\gamma_W$ =	Wichte des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ]

**Reaktionskraft R**

Die Reaktionskraft R kann in Anlehnung an [79] mittels des vertikalen Gleichgewichts bestimmt werden (vgl. Gleichung 2.46).

$$R = \frac{1}{\cos(\theta - \varphi)} * (V' + F_z + G - \sin \theta * (R_{Fl} + 2 * C_{Fl} + C_1)) \quad (\text{Gl. 2.46})$$

mit	$C_{Fl}$	=	Kohäsionskraft einer Flanke [kN]
	$C_1$	=	Kohäsionskraft der Gleitfläche [kN]
	$F_z$	=	Strömungskraft in z-Richtung [kN]
	$G$	=	Gewichtskraft des Gleitkeils [kN]
	$R$	=	Reaktionskraft [kN]
	$R_{Fl}$	=	Reibungskräfte aus beiden Flanken [kN]
	$V'$	=	vertikale Kraft auf den Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung
	$\theta$	=	Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)
	$\varphi$	=	Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

**Effektive Stützkraft S'**

Die effektive Stützkraft lässt sich mittels des horizontalen Gleichgewichts berechnen (vgl. Gleichung 2.47).

$$S' = \sin(\theta - \varphi) * R + F_x - \cos \theta * (R_{Fl} + 2 * C_{Fl} + C_1) \quad (\text{Gl. 2.47})$$

mit	$C_{Fl}$	=	Kohäsionskraft einer Flanke [kN]
	$C_1$	=	Kohäsionskraft der Gleitfläche [kN]
	$F_x$	=	Strömungskraft in x-Richtung [kN]
	$R$	=	Reaktionskraft [kN]
	$R_{Fl}$	=	Reibungskräfte aus beiden Flanken [kN]
	$S'$	=	effektive Stützkraft [kN]
	$\theta$	=	Gleitflächenwinkel [°] (zur Horizontalen)
	$\varphi$	=	Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

Der ermittelte effektive Stützdruck  $s'$  kann nach Gleichung 2.48 bestimmt werden:

$$s' = \frac{S'}{d' * d'} \quad (\text{Gl. 2.48})$$

mit	$d'$	=	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$S'$	=	effektive Stützkraft [kN]
	$s'$	=	effektiver Stützdruck [kN/m <sup>2</sup> ]

**Stützkraft S**

Die Stützkraft S ergibt sich aus der Summe der effektiven Stützkraft S' und der Wasserkraft W (vgl. Gleichung 2.49). Dabei gilt:

$$S = S' + W \quad (\text{Gl. 2.49})$$

mit	$S$	=	Stützkraft [kN]
	$S'$	=	effektive Stützkraft [kN]
	$W$	=	Wasserkraft [kN]

Die Variation des Gleitflächenwinkels verändert verschiedene, auf den Gleitkeil einwirkende Kräfte. Da diese Kräfte auch Auswirkungen auf den Stützdruck haben, ist der Gleitflächenwinkel so zu variieren, bis der höchste Wert des minimal erforderlichen Stützdrucks ermittelt wird.

Aus den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen mit Variation der piezometrischen Höhe in der Abbaukammer, der Höhe des Grundwasserspiegels, der Höhe der Überdeckung des Tunnels sowie der Kohäsion und des Reibungswinkels des Bodens wurde von *Anagnostou & Kovári* eine Formel entwickelt, mit der der effektive Stützdruck berechnet werden kann (vgl. Gleichung 2.50) [4].

$$s' = F_0 * \gamma' * d' - F_1 * c_i + F_2 * \gamma' * \Delta h - F_3 * c * \frac{\Delta h}{d'} \quad (\text{Gl. 2.50})$$

mit	$c_i$ =	Kohäsion der Bodenschicht [kN/m <sup>2</sup> ]
	$d'$ =	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$F_0$ =	Koeffizient nach [4] [-]
	$F_1$ =	Koeffizient nach [4] [-]
	$F_2$ =	Koeffizient nach [4] [-]
	$F_3$ =	Koeffizient nach [4] [-]
	$s'$ =	effektiver Stützdruck [kN/m <sup>2</sup> ]
	$\gamma'$ =	Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m <sup>3</sup> ]
	$\Delta h$ =	Differenz zwischen Höhe des Wasserstands und piezometrischer Höhe in der Abbaukammer [m]

Die einzelnen Werte der Koeffizienten  $F_0$  bis  $F_3$  sind in Nomogrammen in [4] zusammengefasst und können aus der Abbildung 2-14 ermittelt werden. Auf die jeweiligen Koeffizienten können die Parameter des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$ , das Verhältnis zwischen Tunneldurchmesser und Überdeckung  $H/D$  sowie die Differenz zwischen Höhe des Wasserstands und piezometrischer Höhe in der Abbaukammer  $\Delta h$  einen wesentlichen Einfluss haben.



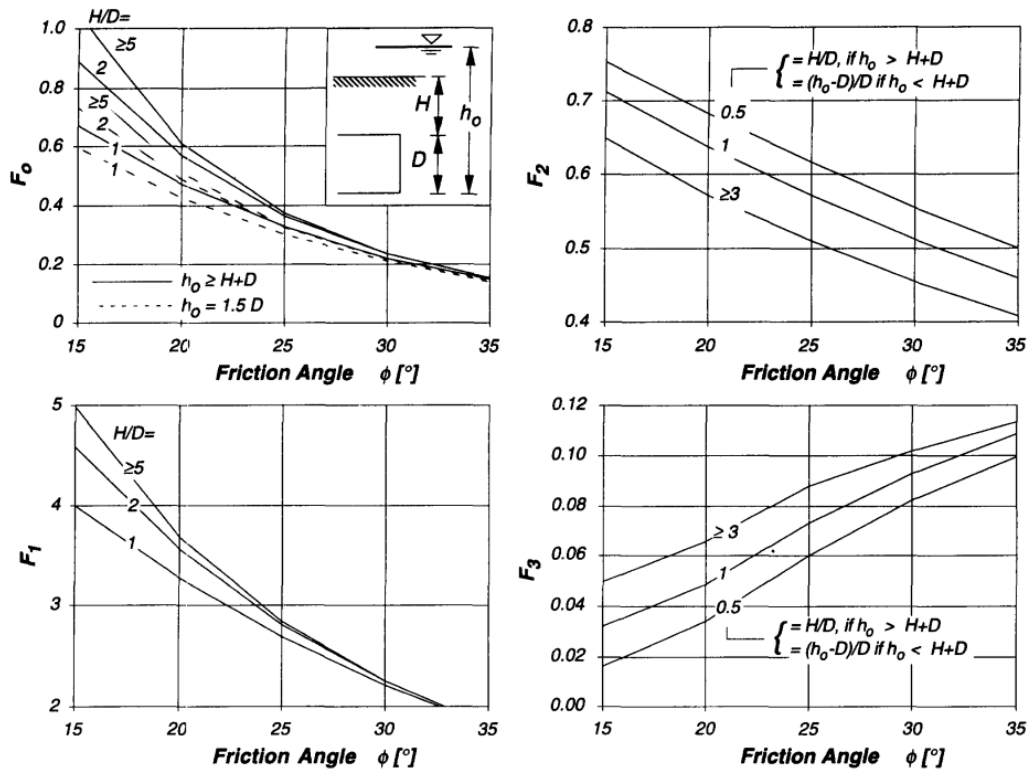


Abbildung 2-14: Nomogramme für dimensionslose Koeffizienten  $F_0$  bis  $F_3$  [4]

### 2.4.2. Zur Stützdruckberechnung nach *Piaskowski & Kowalewski*

Die Ermittlung des Stützdrucks unter Berücksichtigung von [46] basiert auf der Annahme, dass es sich bei dem zu stützenden Körper um einen mit einer Bentonitsuspension gefüllten Schlitz handelt, der bis an die Oberfläche reicht. Diese Annahme geht von einem muschelförmigen Bruchkörpermodell nach *Piaskowski & Kowalewski* [9] aus, welches in Abbildung 2-15 dargestellt ist.

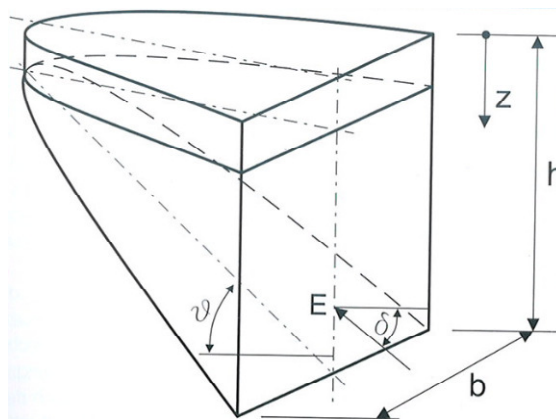


Abbildung 2-15: Darstellung des Bruchkörpermodells von *Piaskowski & Kowalewski* [9]

Die minimal benötigte Stützkraft setzt sich aus einem Wasserdruck- und einem Erddruckanteil zusammen, die beide mit Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert werden. Der Erddruckanteil nach [46] wird durch den Schilddurchmesser und den räumlich aktiven Erddruck beein-

flusst, wobei in die Berechnung des Erddrucks Beiwerte aus Bodeneigenschaften und Formfaktoren hinsichtlich des Verhältnisses von Höhe der Überdeckung und Durchmesser des Tunnels eingehen. Zur Berechnung des Stützdrucks gelten in Anlehnung an [6, 9] die Gleichungen 2.51 bis 2.55.

$$s = \eta_E * (spa_{eh}(Firste) + spa_{eh}(Sohle)) * 0,5 + \eta_W * \gamma_w * w_{Achse} \quad (\text{Gl. 2.51})$$

$$spa_{eh}(z) = \sigma_v^* * \mu_{agh} * K_{agh} - c' * \mu_{ach} * K_{ach} \quad (\text{Gl. 2.52})$$

$$\sigma_v^* = \gamma' * h_g \quad (\text{Gl. 2.53})$$

$$K_{agh} = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{Gl. 2.54})$$

$$K_{ach} = 2 * \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{Gl. 2.55})$$

mit	$c'$ =	effektive Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]
	$h_g$ =	Höhe der Überlagerung des Tunnels [m]
	$K_{ach}$ =	aktiver Erddruckbeiwert infolge von Kohäsion [-]
	$K_{agh}$ =	aktiver Erddruckbeiwert infolge von Bodeneigengewicht und Auflast [-]
	$s$ =	Stützdruck [kN/m <sup>2</sup> ]
	$spa_{eh}(z)$ =	räumlich aktiver Erddruck in der Tiefenlage $z$ [kN/m <sup>2</sup> ]
	$w_{Achse}$ =	Höhe von Achse der Schildmaschine bis zum Grundwasserspiegel [m]
	$\gamma'$ =	Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m <sup>3</sup> ]
	$\gamma_w$ =	Wichte des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ]
	$\eta_E$ =	Teilsicherheitsbeiwert für Erddrücke [-]
	$\eta_W$ =	Teilsicherheitsbeiwert für Wasserdrücke [-]
	$\mu_{ach}$ =	Formbeiwert für die Kohäsion [46], sichere Seite = 1,0 [-]
	$\mu_{agh}$ =	Formbeiwert für den räumlichen aktiven Erddruck nach [46] [-]
	$\sigma_v^*$ =	vertikale effektive Spannung in der jeweiligen Tiefenlage [kN/m <sup>2</sup> ]
	$\varphi$ =	Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

### 2.4.3. Anmerkungen zu den betrachteten Modellen zur Stützdruckberechnung

Die Berücksichtigung der Silowirkung für die Ermittlung des Stützdrucks ist von der Überdeckung und dem Schilddurchmesser abhängig. Da bei geringen Überdeckungen die volle Auflast aus der Überlagerung auf den Tunnel wirken kann, ist in diesem Fall die vertikale Spannung bei homogenen Böden durch die Höhe der Auflast und deren Wichte zu ermitteln. Nach [37] sollte die Abminderung der vertikalen Spannung aufgrund der Silowirkung erst ab einem Verhältnis von Höhe der Überdeckung zum Durchmesser des Tunnels größer eins erfolgen. Zur Abminderung der vertikalen Last sollte nach [96] die Höhe der Überdeckung größer dem zwei- bis dreifachen Tunneldurchmesser sein. Durch die höheren vertikalen Spannungen ohne Berücksichtigung der Silowirkungen wird der vor der Ortsbrust liegende Gleitkeil so belastet, dass auch für erforderliche Stützdrücke höhere Werte erreicht werden. Der Verzicht auf die Silowirkung würde somit bei der Berechnung des erforderlichen Stützdrucks für Tunnel, deren Überdeckungshöhe geringer als der einfache [37] bzw. zwei- bis dreifache Tunneldurchmesser [96] ist, die „sichere Seite“ darstellen. Für die eigenen Berechnungen wurde

der Ansatz so gewählt, dass die Silowirkung ab einer Höhe der Überdeckung, die dem zweifachen Schilddurchmesser entspricht, anzusetzen ist.

Das Verfahren nach *Anagnostou & Kovári* ermöglicht die Berücksichtigung von Strömungskräften, die durch die Nutzung eines Erddruckschildes bei unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund und Stützmedium vorherrschen können. Dieses Verfahren eignet sich daher gut für die Ermittlung des Einflusses der Konditionierung auf die Berechnung des Stützdrucks bei einem Erddruckschild, da die Konditionierung die Wasserdurchlässigkeit beeinflussen kann.

Im Zuge der Erneuerung der DIN 4085 wurde [47] eingeführt. Das oben beschriebene muschelförmige Bruchkörpermodell nach *Piaskowski & Kowalewski* hat in der aktuellen Norm keine Berücksichtigung mehr gefunden. Da im Gegensatz zum Verfahren nach *Anagnostou & Kovári* bislang nur wenig Erfahrungen mit der überarbeiteten Norm [47] in Bezug auf die Ermittlung des Stützdrucks bei Tunnelvortrieben vorliegen, wurde das Verfahren nach *Anagnostou & Kovári* für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Nach [8] können die Differenzen zwischen Drücken an der Ortsbrust und den gemessenen Werten von Erddrucksensoren an der Druckwand bis zu 1,0 bar betragen. Die Schwankungen von vereinzelt im Schneidrad eingesetzten Erddrucksensoren sind nach [29] als zu hoch anzusehen, als dass diese Sensoren für die Einstellung eines Stützdrucks geeignet wären. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fluktuationen der Werte von einzelnen Erddrucksensoren an der Vorder- und Rückseite des Schneidrads sowie in der Druckwand auf annähernd gleicher Höhe bei bis zu ca. 0,5 bar lagen [144]. Die Werte der Erddrucksensoren an der Druckwand wiesen vor allem im unteren Bereich der Abbaukammer Unterschiede bis zu ca. 1,0 bar auf.

Zum Vergleich zwischen den erfassten Drücken bei einem Hydroschild und einem EPB-Schild wurden Betriebsdaten zweier Vortriebe mit annähernd gleichem Schilddurchmesser ( $d_{\text{Schild}} = 9,8 \text{ m}$ ) ausgewertet. Die Abbildung 2-16 zeigt den Verlauf der alle 10 Sekunden aufgezeichneten Drücke des jeweils am höchsten gelegenen Sensors an der Tauchwand (Hydroschild) und an der Druckwand (Erddruckschild) während des Vortriebs (inkl. Ringbau) eines ausgewählten Rings. Beim Hydroschild schwankten die aufgezeichneten Drücke zwischen 2,3 und 2,6 bar, während beim Erddruckschild Drücke mit deutlich größeren Schwankungen zwischen 2,2 und 3,1 bar aufgezeichnet wurden. Zudem sind beim Erddruckschild höhere Druckschwankungen innerhalb kurzer Zeiträume im Gegensatz zum Verlauf beim Hydroschild zu verzeichnen gewesen. Beim Erddruckschild ist daher eine Berücksichtigung von höheren Stützdruckschwankungen als beim Hydroschild nötig.

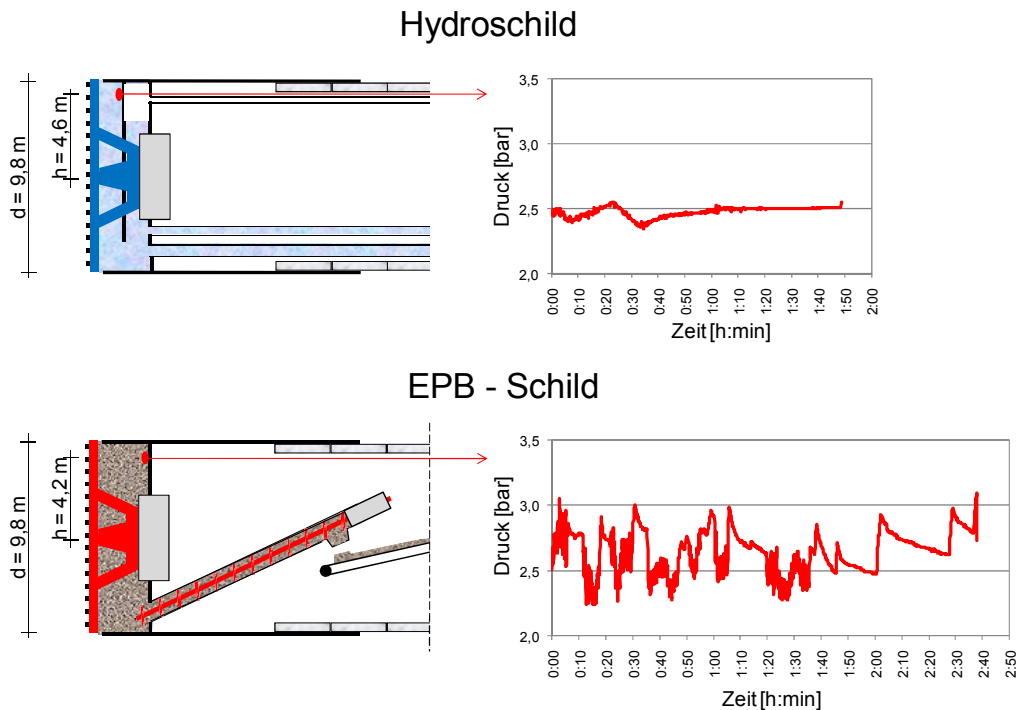


Abbildung 2-16: Vergleich von gemessenen Drücken beim Hydroschild und beim EPB-Schild

Auf Grundlage der oben aufgeführten Anmerkungen zu den betrachteten Modellen zur Stützdruckberechnung sollten für die Berechnung des minimal erforderlichen Stützdrucks generell folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Mögliche Druckdifferenzen zwischen den an der Druckwand und den am Schneidrad gemessenen Drücken.
- Größe der Schwankungen der an der Druckwand gemessenen Drücke.
- Wahl des Verfahrens zur Ermittlung des Stützdrucks unter Berücksichtigung möglicher Strömungsdrücke.
- Wahl der Überdeckungshöhe, ab wann eine Abminderung der vertikalen Spannung erfolgen soll.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Auswirkungen der Konditionierung auf die Verfahrenstechnik der Erddruckschilde ermittelt werden. Da die Nutzung von Konditionierungsmitteln die Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums beeinflusst, ist eine Veränderung des effektiven Stützdrucks möglich. Aus diesem Grund werden in der weiteren Arbeit die Wahl der Überdeckungshöhe, ab welcher Höhe eine Abminderung der vertikalen Spannung soll, (zweifacher Tunneldurchmesser, s. o.) sowie die Wahl des Verfahrens zur Ermittlung des Stützdrucks (Vorgehensweise nach *Anagnostou & Kovári*, s. o.) berücksichtigt.

Die Druckdifferenzen zwischen den an der Druckwand und den am Schneidrad gemessenen Werte bzw. die Größe der Schwankungen der an der Druckwand bestimmten Drücke könnten hingegen als ein möglicher Sicherheitszuschlag in der Stützdruckberechnung Eingang finden.

### 3. Bisheriger Stand der Forschung zur Konditionierung von Lockergestein

Als Grundlage des bisherigen Stands der Forschung zur Konditionierung von Lockergestein werden in diesem Kapitel zunächst die Einsatzbereiche von Erddruckschilden ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln erarbeitet. Anschließend erfolgt die Erläuterung verschiedener Empfehlungen zu den Einsatzbereichen von Erddruckschilden auf Basis der Erfahrungen von unterschiedlichen Projekten. Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse von Untersuchungen zu Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen sowohl aus der Praxis als auch aus der Forschung vorgestellt.

#### 3.1. Einsatzbereiche von Erddruckschilden im Lockergestein ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln

Schildmaschinen, die mit den in Abschnitt 2.1 aufgeführten Komponenten ausgestattet sind, können auch ohne die Verwendung von Konditionierungsmitteln eingesetzt werden. Das Stützmedium einer Erddruckschildmaschine muss dabei verschiedenen Anforderungen genügen, wobei vor allem die Wasserdurchlässigkeit, die Verarbeitbarkeit, die Kompressibilität und der aufnehmbare Druck im Schneckenförderer des aufzufahrenden Lockergesteins für einen erfolgreichen Vortrieb von Bedeutung sind. Basierend auf den nachfolgend beschriebenen Anforderungen werden am Ende des Abschnitts die erforderlichen Eigenschaften des Lockergesteins zusammengefasst.

##### *Wasserdurchlässigkeit*

Hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums in der Abbaukammer liegen die Voraussetzungen für einen EPB-Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels, bei dem keine weitere Aufbereitung des Bodens erfolgt, auf Grundlage empirischer Erfahrungen [156] bei ca.  $k \leq 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Nach der auf Gleichung 2.6 (nach *Hazen*) basierenden Gleichung 3.1 kann der Korndurchmesser bei 10 %-igem Massendurchgang in Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit für Sande abgeschätzt werden. Für die angesetzte maximale Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s liegt der Korndurchmesser bei 10 %-igem Massendurchgang bei 0,024 mm (vgl. Gleichung 3.2), so dass nach Gleichung 3.3 unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeitsbeiwerte von 3 und 5 der minimale und maximale Korndurchmesser bei 60 %-igem Massendurchgang ermittelt werden kann. Die aus den Werten von  $d_{10}$  und  $d_{60}$  abgeschätzte Kornverteilung für den maximalen Korndurchmesser (vgl. Abbildung 3-1) entspricht nach [45] einem Sand-Schluff-Gemisch bzw. nach [56] einem schluffigen Sand.

Zur Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit nach *Beyer* kann die Gleichung 2.7 nicht genutzt werden, da der Durchmesser bei 10 %-igem Massendurchgang mit 0,024 mm kleiner ist als die nach [11] mit 0,06 mm festgelegte, untere Grenze des Einsatzbereichs der Gleichung.

$$k = 0,0116 * d_{10}^2 \Rightarrow d_{10} = \sqrt{\frac{k}{0,0166}} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$d_{10} = \sqrt{\frac{1 * 10^{-5}}{0,0166}} = 0,024 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$d_{60,min} = 3 * d_{10} = 0,072 \text{ mm} < d_{60} < d_{60,max} = 5 * d_{10} = 0,120 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

- mit  $d_{10}$  = Durchmesser des Kornes bei 10 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $d_{60}$  = Durchmesser des Kornes bei 60 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $d_{60,max}$  = maximaler Durchmesser des Kornes bei 60 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $d_{60,min}$  = minimaler Durchmesser des Kornes bei 60 %-igem Massendurchgang [mm]  
 $k$  = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Durch die abgeschätzten, maximalen Korndurchmesser bei 10 bzw. 60 %-igem Massendurchgang ergeben sich die in Abbildung 3-1 dargestellten Einsatzgrenzen von Erddruckschilden hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit. Links der grünen Linie kann der Einsatz eines Erddruckschildes in Bezug auf die Wasserdurchlässigkeit des Bodens gemäß dem Ansatz von [84] erfolgen. Die rot dargestellte Linie mit den zwei Zwangspunkten begrenzt hingegen den Einsatzbereich eines EPB-Schildes in Bezug auf die Wasserdurchlässigkeit aufgrund der oben durchgeführten Berechnung nach Hazen [67].

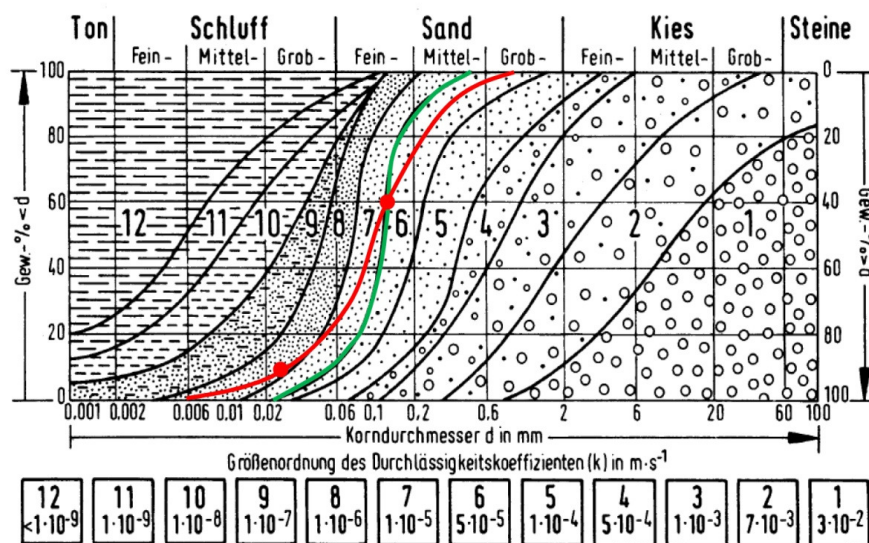


Abbildung 3-1: Einsatzgrenze eines Erddruckschildes hinsichtlich der maximalen Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsmethoden; Darstellung nach [84] (grün) und Berechnung nach [67] (rot)

### Verarbeitbarkeit

Eine geeignete Verarbeitbarkeit des Lockergesteins ist notwendig, um Material von der Ortsbrust durch die Abbaukammer und den Schneckenförderer zu transportieren, ohne dass es zu Beeinträchtigungen beim Materialtransport kommt. Bei feinkörnigen Lockergesteinen mit zu geringer Konsistenzzahl  $I_C$  kann das Stützmedium durch den Schneckenförderer ohne ausreichenden Druckabbau entweichen, was unter Umständen zur Folge hat, dass der Stützdruck in der Abbaukammer sinkt und Schwierigkeiten beim Transport des Materials

auftreten. Bei Lockergesteinen mit zu hoher Konsistenzzahl ist nach [105] eine ausreichende Verformbarkeit nicht mehr gegeben, so dass sowohl das Antriebsdrehmoment von Schneidrad und Schneckenförderer als auch der Verschleiß an verschiedenen Komponenten der Schildmaschine ansteigen. Nach [105] sollte das Stützmedium eine Konsistenzzahl  $I_C$  zwischen 0,40 und 0,75 aufweisen, um als Stützmedium geeignet zu sein. Die Übertragung dieses Ansatzes auf konditionierte grobkörnige Böden kann nicht erfolgen, da die Ermittlung der für die Bestimmung der Konsistenzzahl erforderlichen Ausroll- und Fließgrenzen [40] nur für bindige Böden möglich ist.

### *Kompressibilität*

Für die Aufrechterhaltung eines Stützdrucks an der Ortsbrust muss das in der Abbaukammer befindliche Lockergestein kompressibel sein, damit Schwankungen durch ungleichen Zufluss von der Ortsbrust und dem Abfluss über den Schneckenförderer gedämpft bzw. ausgeglichen werden können. Die Steuerung des Stützdrucks wird üblicherweise über die Schneckendrehzahl und die Vortriebsgeschwindigkeit gewährleistet. Daher sind die Auswirkungen durch eine Zunahme des Stützdrucks aufgrund des Zuflusses von Boden in die Abbaukammer bei keinem oder reduziertem Abfluss bzw. einer Abnahme des Stützdrucks aufgrund des Abflusses des Bodens aus der Abbaukammer bei keinem oder reduziertem Zufluss zu untersuchen.

Zur Ermittlung der erforderlichen Kompressibilität des Stützmediums werden zwei Fälle betrachtet, die folgende Randbedingungen haben:

- Zufluss des Bodens in die Abbaukammer ohne gleichzeitigen Abfluss
- Abfluss des Bodens aus der Abbaukammer ohne gleichzeitigen Zufluss

Das Kompressions- bzw. Schwellverhalten des Lockergesteins in der Abbaukammer kann in Abhängigkeit verschiedener Eingangsgrößen in Anlehnung an [156] nach den Gleichungen 3.4 und 3.5 abgeschätzt werden. Das Kompressionsverhalten ist dabei u. a. von der Vortriebsgeschwindigkeit und der Länge der Abbaukammer abhängig, während das Schwellverhalten vor allem von den geometrischen Abmessungen der Förderschnecke beeinflusst wird.

Beispielhaft sind die Werte für eine Schildmaschine mit einem Schilddurchmesser von 10,0 m, einer Vortriebsgeschwindigkeit von 50 mm/min, einer Länge der Abbaukammer von 1,0 m, einer Förderschnecke mit einem Durchmesser von 0,7 m, einer maximalen Schneckendrehzahl von 24 U/min und einem Wendelabstand von 0,63 m gegeben. Üblicherweise werden die Betriebsdaten von den meisten Sensoren auf einer Schildmaschine, wie z. B. Erddruckmessdosen in der Druckwand oder Wegmessung der Vorschubpressen, alle 10 Sekunden gespeichert. Bei einem möglichen Stopp der Vortriebspressen oder des Schneckenförderers sollte das Lockergestein durch seine Kompressibilität weiterhin einen annähernd konstanten Stützdruck gewährleisten. Als Reaktionszeit des Systems kann neben der Zeit zur Messwerterfassung ein steuerungsbedingter Zuschlag angesetzt werden, so dass sich ein Wert von 15 Sekunden ergibt. Das Beispiel ergibt, dass das konditionierte Material ein Kompressionsverhalten bzw. ein Schwellverhalten von 1,3 % bzw. 1,9 % aufweisen sollte (siehe Gleichungen 3.6 und 3.7). Soll der Druck in der Abbaukammer aufgrund der Volu-

menstromdifferenzen nicht mehr als z. B. um 0,5 bar schwanken, muss das konditionierte Stützmedium mindestens einen Wert von 1,9 % pro 0,5 bar aufweisen.

$$\varepsilon_K = \frac{\pi * \frac{d_{Schild}^2}{4} * v_{Vortrieb} * \Delta t}{\pi * \frac{d_{Schild}^2}{4} * L_{Abbau}} * 100 = \frac{v_{Vortrieb} * \Delta t}{L_{Abbau}} * 100 \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$$\varepsilon_S = \frac{\pi * \frac{d_{Schnecke}^2}{4} * n_{Schnecke} * a_W * \Delta t}{\pi * \frac{d_{Schild}^2}{4} * L_{Abbau}} * 100 = \frac{d_{Schnecke}^2 * n_{Schnecke} * a_W * \Delta t}{d_{Schild}^2 * L_{Abbau}} * 100 \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$\varepsilon_K = \frac{v_{Vortrieb} * \Delta t}{L_{Abbau}} * 100 = \frac{50 \frac{mm}{min} * 0,25 min}{1.000 mm} * 100 = 1,3 \% \quad (\text{Gl. 3.6})$$

$$\varepsilon_S = \frac{d_{Schnecke}^2 * n_{Schnecke} * a_W * \Delta t}{d_{Schild}^2 * L_{Abbau}} * 100 = \frac{0,7^2 m^2 * 24 \frac{1}{min} * 0,63 m * 0,25 min}{(10 m)^2 * 1,0 m} * 100 = 1,9 \% \quad (\text{Gl. 3.7})$$

- mit  $a_W$  = Abstand der Wendel [m]  
 $d_{Schild}$  = Durchmesser des Schilds [m]  
 $d_{Schnecke}$  = Durchmesser der Förderschnecke [m]  
 $L_{Abbau}$  = Länge der Abbaukammer in Vortriebsrichtung [m]  
 $n_{Schnecke}$  = Drehzahl der Schnecke pro Sekunde [1/s]  
 $v_{Vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]  
 $\varepsilon_K$  = erforderliches Kompressionsverhalten des konditionierten Lockergesteins [%]  
 $\varepsilon_S$  = erforderliches Schwellverhalten des konditionierten Lockergesteins [%]  
 $\Delta t$  = Reaktionszeit des Systems [s]

#### Aufnehmbarer Druck im Schneckenförderer

Der Abbau eines Druckgradienten im Bereich des Schneckenförderers gewährleistet eine aktive Stützung der Ortsbrust. Weist das zu fördernde Material eine flüssige oder breiige Konsistenz auf, kann das Lockergestein aufgrund seiner Fließfähigkeit und geringen Reibung zwischen Boden und Schneckenwendel bzw. Schneckenrohr durch den Schneckenförderer ggf. ohne kontrollierten Druckgradienten transportiert werden. Lockergesteine, die hohe Konsistenzahlen aufweisen, können zu Verschlüssen in der Förderschnecke bzw. zu höheren Antriebsdrehmomenten führen. [156] hat zur Gewährleistung eines Druckgradienten von 0,2 bar pro Wendel in Abhängigkeit verschiedener Lockergesteine und unterschiedlicher Konsistenzahlen Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 3-1 zusammengefasst sind. Für die untersuchten Lockergesteine wurden verschiedene Bereiche von Konsistenzahlen ermittelt, bei denen ein kontrollierter Druckgradient möglich war. Bei allen Bodengruppen mit Konsistenzahlen zwischen  $I_C = 0,6$  und  $I_C = 0,7$  war ein Abbau des Druckgradienten von 0,2 bar pro Wendel möglich.



Tabelle 3-1: Bereich der Konsistenzzahl  $I_C$  zur möglichen Gewährleistung eines Druckgradienten von 0,2 bar pro Wendel auf Basis von [156]

Bodengruppe	Bereich der Konsistenzzahl $I_C$ zur möglichen Gewährleistung eines Druckgradienten von 0,2 bar pro Wendel auf Basis von [156]
Grobschluff	0,5 – 0,9
Schluff	0,5 – 0,8
Mergel	0,4 – 0,7
Gemischte Böden	0,6 – 0,8
<b>Schnittmenge</b>	<b>0,6 – 0,7</b>

### Zusammenfassung

Für einen Vortrieb mit einem Erddruckschild ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln sind die beschriebenen Randbedingungen an das Lockergestein und die erforderlichen Eigenschaften der Lockergesteine in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Erforderliche Eigenschaften des Lockergesteins in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen

Randbedingung	Eigenschaften des Lockergesteins	Anmerkungen
Wasserdurchlässigkeit	$k < 1 \cdot 10^{-5}$ m/s	Auf Grundlage empirischer Erfahrungen
Konsistenz	$0,40 < I_C < 0,75$	Notwendige Konsistenz für eine ausreichende Verformung des Lockergesteins
Kompressibilität	z. B. $\varepsilon_K = 1,3$ % $\varepsilon_S = 1,9$ %	In Abhängigkeit der geologischen Randbedingungen des Baugrunds und der geometrischen Abmessungen der Schildmaschine, vgl. Gleichungen 3.4 und 3.5
Aufnehmbarer Druck im Schneckenförderer	$0,60 < I_C < 0,70$	Genauere Größe in Abhängigkeit des feinkörnigen Lockergesteins

mit  $I_C$  = Konsistenzzahl  
 $k$  = Durchlässigkeitsbeiwert  
 $\varepsilon_K$  = erforderliches Kompressionsverhalten des konditionierten Lockergesteins  
 $\varepsilon_S$  = erforderliches Schwellverhalten des konditionierten Lockergesteins

Gemischt- und feinkörnige Böden mit einem Feinanteil ( $d < 0,06$  mm) von mindestens 30 % können üblicherweise die für einen Vortrieb erforderlichen Eigenschaften des Lockergesteins gewährleisten, so dass diese Böden den klassischen Einsatzbereich von Erddruckschilden darstellen. Abbildung 3-2 zeigt diese klassischen Einsatzbereiche sowohl von Erddruck- als auch von Hydroschilden auf Grundlage von [105].

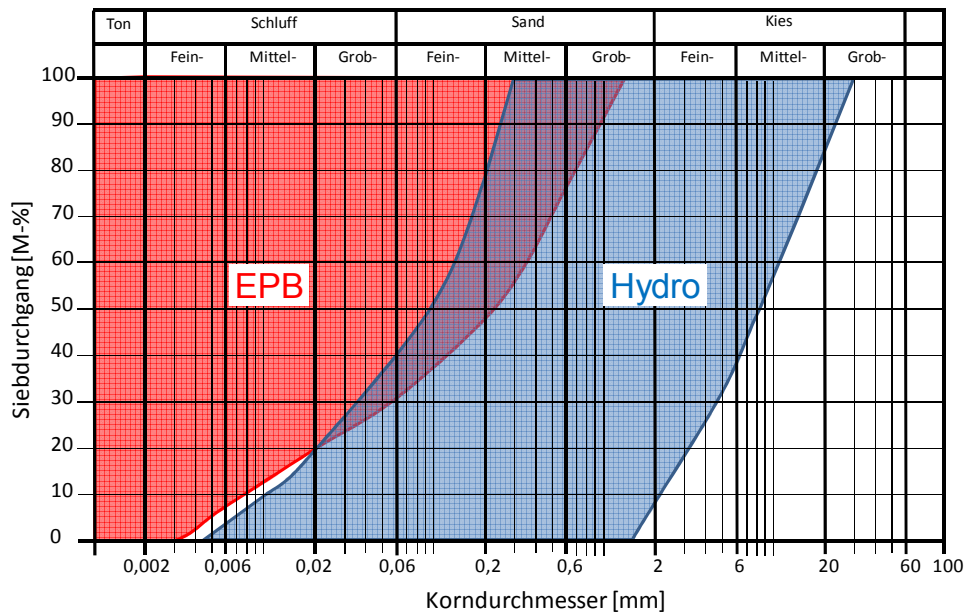


Abbildung 3-2: Klassische Einsatzbereiche von Erddruck- und Hydroschilden in Abhängigkeit der Kornverteilung nach [105]

### 3.2. Bisherige Empfehlungen zu Einsatzbereichen von Erddruckschilden bei Verwendung von Konditionierungsmitteln

Auf Grundlage von Erfahrungen bei Projekten mit EPB-Schilden bei Verwendung von Konditionierungsmitteln sind verschiedene Empfehlungen zu Einsatzbereichen von Erddruckschilden entwickelt worden, die z. T. deutliche Unterschiede zu den in Abbildung 3-2 dargestellten klassischen Einsatzgebieten aufweisen. Eine Auswahl von Projekten mit EPB-Schilden, den Randbedingungen hinsichtlich der Kornverteilungslinien und Grundwasserdrücken sowie den eingesetzten Konditionierungsmitteln ist in Abbildung 3-3 in Anlehnung an [147] dargestellt. Bei den aus der Literatur entnommenen Angaben zu den Projektrandbedingungen ist anzumerken, dass hier die prognostizierten Kornverteilungslinien und Grundwasserdrücke angegeben sind. Es ist zu erkennen, dass die Kornverteilungslinien der Projektböden z. T. weit außerhalb der schwarz dargestellten klassischen Einsatzgrenze liegen.

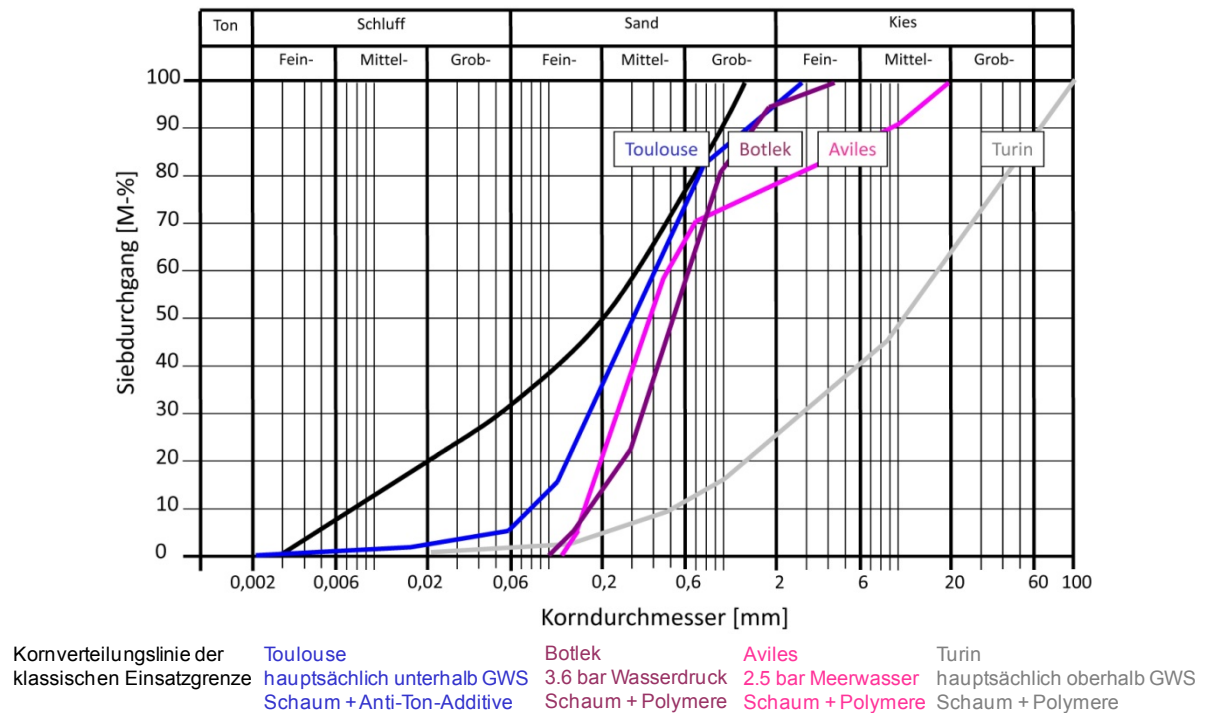


Abbildung 3-3: Auswahl von Projekten mit Erddruckschilden, Kornverteilungslinien, möglichen Grundwasserdrücken, Angaben zu den eingesetzten Konditionierungsmitteln sowie der Kornverteilungslinie der klassischen Einsatzgrenze [7, 61] in Anlehnung an [147]

#### Empfohlene Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach Maidl, 1995

Für den Einsatz von Erddruckschilden wurde in Abhängigkeit der Kornverteilung des Bodens ein Diagramm von *Maidl* erstellt (vgl. Abbildung 3-4) [105]. Dabei wird zwischen den Einsatzbereichen von Erddruckschilden bei Verwendung verschiedener Konditionierungsmittel und bei Ansatz unterschiedlicher Randbedingungen differenziert. Im ersten Bereich (links der Linie 1) können Wasser, Suspensionen oder Schäume in Böden mit einer Bandbreite der Konsistenzzahl  $I_C$  zwischen 0,4 bis 0,75 eingebracht werden, während der Einsatz eines Erddruckschildes in einem Boden mit einer Kornverteilung aus dem Bereich 2 (zwischen den Linien 1 und 2) durch die Zugabe dieser Konditionierungsmittel bei einer maximalen Wasserdurchlässigkeit  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s bei einem maximalen Stützdruck von  $p_{\text{supp}} < 2$  bar ermöglicht wird. Innerhalb des dritten Bereichs (zwischen den Linien 2 und 3) wird empfohlen, Polymerschäume oder feinstoffreiche Suspensionen als Konditionierungsmittel zu nutzen. Bei Böden in diesem Bereich sollten nur Vortriebe oberhalb des Grundwasserspiegels erfolgen. Rechts der Linie 3 wird der Vortrieb mit einem Erddruckschild als nicht möglich erachtet. Die empfohlenen Einsatzbereiche beruhen auf Projekterfahrungen sowie Ansätzen zur Verarbeitbarkeit und Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums. Allerdings sind keine Untersuchungen mit den empfohlenen Konditionierungsmitteln und Böden, die eine Kornverteilungslinie annähernd der festgelegten Grenzlinien aufweisen, durchgeführt worden.

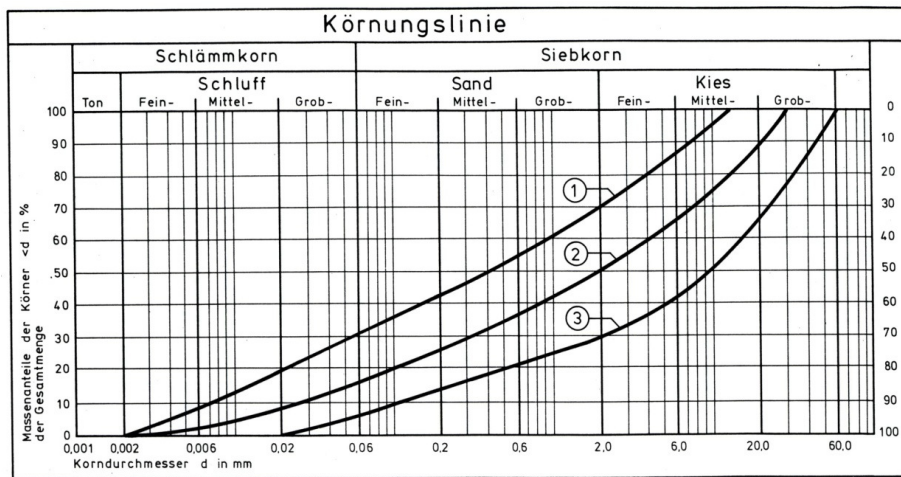


Abbildung 3-4: Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [100, 105]

*Empfohlene Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach EFNARC, 2005*

Eine Übersicht zu typischen Kornverteilungslinien zur Nutzung von Erddruckschilden mit Konditionierungsmitteln in Abhängigkeit unterschiedlicher Ziele der Konditionierung ist in [60] enthalten (vgl. Abbildung 3-5). Die *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC)* empfiehlt u. a. den Einsatz von Schäumen, um die erforderlichen Eigenschaften des Stützmediums gewährleisten zu können. Durch die Verwendung von feinstoffreichen Suspensionen soll eine Erweiterung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden auch auf Bereiche möglich sein, in denen nach [105] Vortriebe als nicht durchführbar erachtet werden. Grundlage dieser Übersicht sind vor allem Erfahrungen aus zurückliegenden Projekten. Allerdings wurden auch hier keine experimentellen Untersuchungen durchgeführt, um die beschriebenen Einsatzbereiche zu verifizieren.

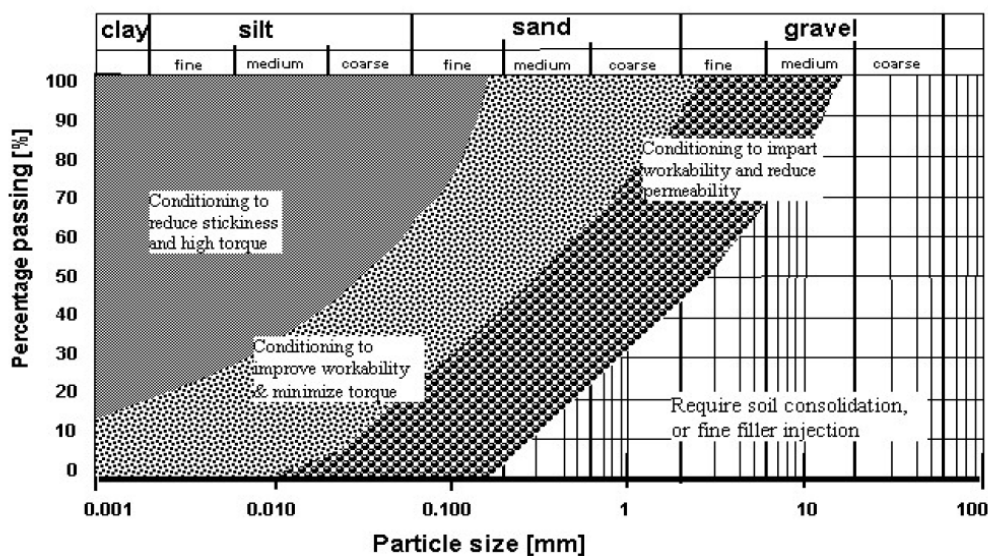


Abbildung 3-5: Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [60]

Zur Abschätzung der Foam Injection Ratio (FIR) wurde auf Grundlage von Praxiserfahrungen eine Übersicht in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodengruppen erstellt (vgl. Tabelle 3-3). Die angegebenen FIR orientieren sich an dem Porenanteil der jeweiligen Bodengruppen.

Tabelle 3-3: Empfohlene Injektionsrate FIR unterschiedlicher Böden nach [60]

Boden	FIR [%]
sandiger Ton - Schluff	40 - 60
Sand - toniger Schluff	20 - 40
Sand	30 - 40
toniger Kies*	25 - 50
sandiger Kies*	30 - 60

\* hohe Stabilität und Vermeidung von Segregationseffekten gefordert

#### Empfohlene Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach Thewes, 2007

Auf Basis empirischer Erfahrungen gibt [150] typische Einsatzbereiche von Erddruckschilden in Abhängigkeit der Art der oftmals erforderlichen Bodenconditionierung an (vgl. Abbildung 3-6). Neben einer Zugabe von Wasser und Schaum zur Reduktion von Verklebungseigenschaften in schluffigen Sanden (Bereich 1) sollte Schaum hauptsächlich Schluff-Sand-Gemischen (Bereich 2) hinzugegeben werden. Mit zunehmendem Größtkorn bietet sich in gemischtkörnigen Böden die Zuführung von Schäumen und Polymeren an, wobei der Wasserdruck kleiner als 2 bar sein sollte (Bereich 3). Im Bereich von gemischt- oder grobkörnigen Böden (Bereich 4) können ebenfalls Polymere und Schäume als Conditionierungsmittel genutzt werden; jedoch sollte in diesen Baugrundformationen kein Grundwasserdruck vorherrschen. Die eingezeichneten Linien stellen keine scharfe Trennung, sondern vielmehr eine Orientierung der Grenzen der Bereiche dar [141].

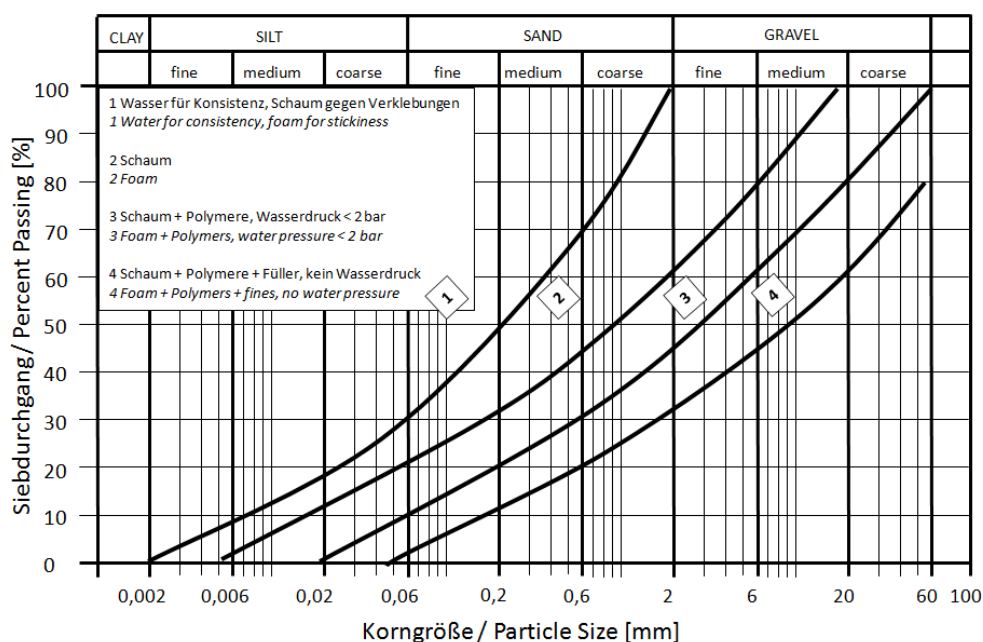


Abbildung 3-6: Darstellung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden nach [141]

### 3.3. Bisherige Erkenntnisse zur Konditionierung von Lockergestein

Bisher wurden in der Praxis verschiedene Erkenntnisse bei Vortrieben mit Erddruckschilden gewonnen. An verschiedenen Forschungseinrichtungen wurden zudem Untersuchungen zur Konditionierung von Lockergesteinen insbesondere mit Tensidschäumen durchgeführt. Nachfolgend werden zunächst Erkenntnisse von durchgeführten Vortrieben und im Anschluss daran eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Forschungseinrichtungen präsentiert.

#### 3.3.1. Praxiserfahrungen zur Konditionierung bei Erddruckschilden

Ausgewählte Zusammenhänge von für die Bodenkonditionierung wichtigen Parametern sind in [144] erläutert. Die darin beschriebenen Auswertungen der Betriebsdaten während des Vortriebs zeigten, dass

- die Konditionierung starken Einfluss auf den Stützdruck haben kann,
- ein Druckunterschied zwischen Druckwand und Ortsbrüst möglich ist,
- starke Schwankungen der Werte der Erddruckmessdosen während des Vortriebs typisch sind,
- während der Vortriebspausen ein nahezu linearer Abbau des Stützdrucks auftreten kann,
- der Schaumvolumenstrom  $Q_F$  einer Lanze zwischen 120 und 200 l/min realisiert werden kann,
- die aufgenommenen Drücke an der Druckwand in Abhängigkeit der Höhe und des betrachteten Zeitpunkts stark schwanken können und
- der Schneckenförderer Einfluss auf die Messwerte an der Druckwand in unmittelbarer Umgebung haben kann.

Weitere Erkenntnisse von unterschiedlichen Untersuchungen zur Konditionierung bei verschiedenen Vortrieben sind u. a. in [20, 22, 69, 97, 98, 101, 124] veröffentlicht.

Als Grundlage für die Dimensionierung einer Schaumanlage wurden im Rahmen dieser Arbeit Betriebsdaten von drei Vortriebsprojekten ausgewertet. In Abbildung 3-7 sind die Schaumvolumenströme  $Q_F$  der einzelnen Lanzen sowie deren Mittelwerte, die Foam Injection Ratio (FIR) und die Foam Expansion Ratio (FER) dargestellt. Bei den Projekten 1a und 1b handelt es sich um zwei Röhren eines Tunnels mit ca. 2.000 m Länge. Die Linienführung sah einen Vortrieb größtenteils in Tonen, Schluffen und Sanden vor. Der Wasserspiegel lag bei maximal 17 m oberhalb der Firste. Der Baugrund des ca. 5.400 m langen Tunnels (Projekt 2) war durch Sand- und Kiesschichten geprägt, vereinzelt traten auch schluffige Sande und schluffige Tone auf. Dieser Vortrieb wurde oberhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt.

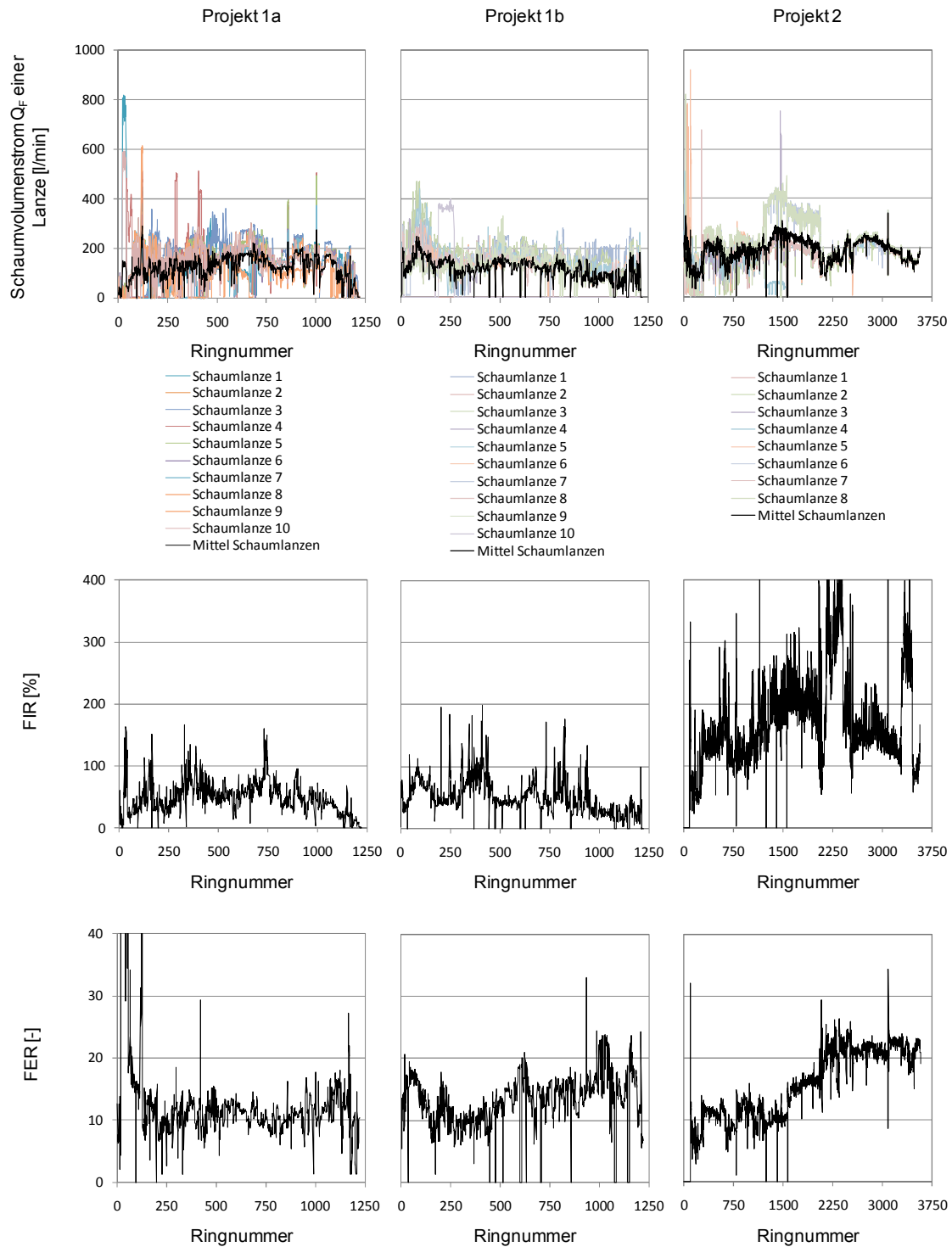


Abbildung 3-7: Darstellung der Konditionierungsparameter  $Q_F$ , FIR und FER von drei Vortrieben

In der oberen Zeile der Abbildung 3-7 sind die Schaumvolumenströme der unterschiedlichen Lanzen in verschiedenen Farben dargestellt. Die Schaumvolumenströme  $Q_F$  pro Lanze lagen bei den Projekten pro Ring größtenteils zwischen  $Q_F = 0$  l/min und  $Q_F = 500$  bis  $600$  l/min, im Einzelfall sogar bei mehr als  $Q_F = 900$  l/min. Die schwarz dargestellten Mittelwerte des Volumenstroms des Schaums nahmen Werte zwischen  $Q_F = 0$  l/min und  $Q_F = 300$  bis  $400$  l/min an.

Die FIR der Projekte 1a und 1b lag größtenteils zwischen 0 und 100 %, wobei abschnittsweise auch Werte von bis zu 200 % erreicht wurden (vgl. mittlere Zeile der Abbildung 3-7). Diese Injektionsraten lagen somit höher als die nach [60] empfohlenen Werte (vgl. Tabelle 3-3). Bei Vortrieb 2 wurden Injektionsraten über 400 % erreicht, die deutlich von den oben genannten Werten abwichen. Da dieser Vortrieb oberhalb des Grundwasserspiegels lag, könnte eine hohe FIR und eine damit einhergehende hohe Liquidzugabe für die Benetzung der Bodenkörner erforderlich gewesen sein. Aufgrund dessen konnte auch die Reduktion des Winkels der inneren Reibung des Stützmediums sowie des Verschleißes erreicht worden sein. Ein Defekt der Messaufnehmer dürfte nicht vorgelegen haben, da ansonsten auch die Verläufe von  $Q_F$  und FER fehlerbehaftet gewesen wären. Da diese Verläufe vergleichbar mit den Projekten 1a und 1b sind, ist davon auszugehen, dass die angegebenen Schaumvolumenströme in den Boden injiziert wurden.

Die FER der betrachteten Vortriebe lagen größtenteils zwischen 8 und 25, wobei vereinzelt höhere bzw. niedrigere Werte auftraten (vgl. Abbildung 3-7 unten). Bei Projekt 2 fällt auf, dass die FER in der zweiten Hälfte des Vortriebs gesteigert wurde.

Auf Grundlage der Auswertung der drei Projekte sind in Tabelle 3-4 übliche Größen der Parameter von  $Q_F$ , FIR und FER bei Erddruckschilden zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Übersicht zu üblichen Größen verschiedener Parameter der Schaumkonditionierung bei Vortrieben mit Erddruckschilden

Parameter	Größe
Schaumvolumenstrom $Q_F$ pro Lanze	Üblicherweise zwischen 0 und 400 l/min, in Einzelfällen bis 900 l/min
FIR	In Abhängigkeit des Baugrunds; z. T. um 100 %
FER	I. d. R. zwischen 8 und 25

Neben den Vortriebsdaten wurden auch Ausschreibungen von Tunnelbauprojekten analysiert, bei denen Schildmaschinen mit erddruckgestützter Ortsbrust zum Einsatz kommen sollten [33, 34, 35, 109]. Hinsichtlich der Bodenkonditionierung spielen vor allem Anforderungen an die Konditionierungsmittel und die Schaumanlage sowie an die Umweltverträglichkeit der Stoffe eine wesentliche Rolle. Das auf der Schildanlage installierte Injektionssystem sollte die nachfolgenden Anforderungen erfüllen:

- Die eingesetzten Schäume sollten umweltverträglich und der Einsatz von den zuständigen Behörden genehmigt worden sein.
- Das konditionierte Material muss so aufbereitet werden, dass die Vorgaben zur Weiterverwertung oder Deponierung erfüllt werden.
- Jede Injektionsstelle sollte durch unabhängig steuerbare Schaumlanzen beschickt werden.
- Die Schaumlanzen sollten möglichst nah am Injektionsort installiert sein, um eine hohe Schaumqualität zu erzielen.
- Es sollte möglich sein, die Schaumrezeptur wechselnden Bodenverhältnissen anzupassen.



- Die Schaumherstellung muss unter Berücksichtigung wechselnder Stützdrücke erfolgen und dem Regelkreislauf ein Drucküberwachungssystem zugrunde liegen.
- Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels muss eine Injektion bis zu einem definierten Druckniveau möglich sein.

Die Schaumanlagen auf Erddruckschilden sind i. d. R. so konzipiert, dass sie die oben aufgeführten maschinentechnischen Anforderungen erfüllen. In Abhängigkeit des zu nutzenden Konditionierungsmittels sind im Einzelfall die Umweltverträglichkeit und die Weiterverwertung der konditionierten Böden zu untersuchen (vgl. auch Abschnitt 2.3.6). Die ausgewerteten Ausschreibungsunterlagen sehen hingegen keine Hinweise zu möglichen Konditionierungsmitteln, deren Mengen, Volumenströmen von Schaumngredienzen, FIR oder FER vor, so dass diese Parameter den projektspezifischen Randbedingungen anzupassen sind.

### 3.3.2. Bisherige Forschungsergebnisse zur Konditionierung bei Erddruckschilden

Bislang wurden Versuche zum konditionierten Stützmedium größtenteils unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt, da das Abbilden der Druckbedingungen der Abbaukammer bei der Konditionierung sowie die Untersuchung des konditionierten Materials unter Druck einen erheblichen Aufwand darstellen. Die Ergebnisse verschiedener Forschungseinrichtungen zur Konditionierung bei Erddruckschilden werden nachfolgend weitestgehend chronologisch vorgestellt.

#### *Deutschland, 1995*

Ergebnisse zu verschiedenen Untersuchungen mit Schäumen und konditionierten Lockergesteinen wurden von *Maidl* in [105] veröffentlicht. Die Einstellungen der in den Versuchen genutzten Schaumanlage waren für den Volumenstrom der Luft  $Q_L = 160 \text{ l/min}$ , für die Foam Expansion Ratio (FER = 29) und für die Tensidkonzentration  $c_f = 1,6 \%$ . Neben der Produktion von Tensidschäumen ohne weitere Zusätze erfolgte die Herstellung von Tensidschäumen mit Polymeren und Bentoniten. Für die Untersuchungen mit konditionierten Lockergesteinen wurde Sand bzw. Kies-Sand mit verschiedenen Schäumen vermischt.

Im Gegensatz zu den eingestellten Werten der FER von 29 schwankte die ermittelte FER ( $FER_{\text{ist}}$ ) in den Versuchen zwischen 12,5 und ca. 29, was auf eine unzureichende Durchmischung von Liquid und Luft im Störkörper bei gewählten Volumenströmen zurückzuführen war. Da nur die tatsächlich gemessenen Dichten der Schäume für die weiteren Untersuchungen relevant waren, blieben die Unterschiede zwischen Einstellungsparametern und ermittelten Werten ohne weitere Betrachtung. Eine gezielte Variation der FER war daher nicht möglich. Die Ergebnisse zum Kompressionsverhalten von Schaum haben gezeigt, dass die Bläschengröße des Schaums möglichst gering sein sollte. Aufgrund der Ergebnisse des Drainageverhaltens der Schäume erfolgte ein Hinweis auf die zeitliche Veränderung ihrer Eigenschaften.

Zur Bestimmung der Dichte von Boden-Schaum-Gemischen wurde Sand mit unterschiedlichen Schäumen in verschiedenen Mengen vermischt. Mit zunehmender FIR konnte die Dichte reduziert werden. Das genutzte Mischverfahren, die Mischleistung und die Mischdauer wurden nicht näher beschrieben, so dass eine Bestimmung dieser Einflüsse auf die Dichte nicht möglich war. Es erfolgten Drainageversuche zur qualitativen Beurteilung von verschiedenen Boden-Schaum-Gemischen. Dazu wurde konditioniertes Material in einen Standzylinder mit Sieb eingebracht und anschließend 3 l Wasser in diesen eingefüllt. Die Menge des drainierten Wassers konnte in Abhängigkeit der Untersuchungszeit bestimmt werden. Dabei wiesen mit Schäumen mit Polymerzusatz konditionierte Lockergesteine geringere Drainagezeiten als mit Schäumen mit Bentonitzugabe konditionierte Böden auf. Zudem stieg die Drainagezeit mit zunehmendem Polymergehalt.

Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen wurde Boden in einen Versuchsbehälter eingebracht und mit Schaum durchströmt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit bei einem hydraulischen Gefälle von  $i = 8,2$  bzw.  $20$ . Zur Abbildung eines realitätsnahen hydraulischen Gefälles wurde von *Maidl* u. a. angesetzt, dass im Bereich der Förderschnecke eine verringerte Materialdichte auftritt und dort kein Porenwasserdruck abgebaut wird. Aus diesem Grund erfolgte nur die Berücksichtigung der Länge der Abbaukammer als durchströmte Länge des Boden-Schaum-Gemischs. Aus diesem Ansatz ergab sich ein hydraulisches Gefälle von  $i = 20$ . Der Ansatz, dass im Bereich der Förderschnecke kein Porenwasserdruck abgebaut wird, basierte jedoch nicht auf Versuchsergebnissen, da keine Untersuchungen zu veränderten Materialdichten durchgeführt wurden. Sollte ein Porenwasserabbau im mit Material gefüllten Schneckenförderer jedoch möglich sein, kann der Ansatz eines hydraulischen Gefälles von  $i = 20$  als sehr hoch erachtet werden.

Die Wasserdurchlässigkeit der konditionierten Lockergesteine wies aufgrund des Drainageverhaltens des Schaums ein zeitabhängiges Verhalten auf. Für ein hydraulisches Gefälle von  $i = 20$  lag die Wasserdurchlässigkeit von unterschiedlich konditionierten Sanden nach 90 bis 120 Minuten bei  $k = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s. Eine ausreichende Konditionierung zur Erzielung einer Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s konnte in den Versuchen nicht erreicht werden. Zudem erfolgte bei diesen Versuchen keine Beschreibung der genutzten Schäume und ihrer Eigenschaften.

Das Kompressionsverhalten der Boden-Schaum-Gemische wurde für die außerhalb des Versuchsbehälters angemischten und in einem Druckzylinder eingebauten Boden-Schaum-Gemische bestimmt. Durch eingebrachte Belastung mit Luftdruck konnten die konditionierten Lockergesteine meist bis zur lockersten Lagerung des Lockergesteins zusammengedrückt werden.

Versuche zum Penetrationsvermögen des Schaums zeigten, dass die Eindringtiefe der Schäume stark von der Druckdifferenz und der Schaumrezeptur abhängig war. Allerdings wurden bei den Untersuchungen zum Penetrationsvermögen wesentliche Eigenschaften der Schäume wie ihre Drainagezeit oder ihre Bläschengröße nicht bestimmt.

Zur Abschätzung der FIR betrachtete [105] den Porenraum des Bodens bei lockerster Lagerung als wesentlichen Parameter, da durch Zugabe von Schaummengen, die für ein Füllen des Porenraums bei lockerster Lagerung ausreichen, der Korn-zu-Korn-Kontakt einzelner Bodenpartikel aufgehoben wird. Daher können nach [105] zur Bestimmung der erforderlichen FIR die Gleichungen 3.8 bis 3.10 genutzt werden.

$$FIR = V_{Sch} (\%) = \frac{V_{Sch}^*}{V_A^*} * 100 = \frac{V_{Sch}^*}{V - V_{Sch}^*} * 100 \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$V = V_g^* + V_f^* + V_w^* + V_L^* + V_{Sch}^* \quad (\text{Gl. 3.9})$$

$$V_{Sch}^* = \frac{n_{max}}{100} * V - V_f - V_w \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit  $FIR =$  Foam Injection Ratio = Schauminjektionsrate [%]  
 $n_{max} =$  maximaler Porenraum [%]  
 $V =$  Gesamtvolumen [m<sup>3</sup>]  
 $V_{Sch} (\%) =$  prozentuale Schaumzugabemenge [%]  
 $V_A^* =$  Ausbruchvolumen [m<sup>3</sup>]  
 $V_f^* =$  Volumen der feinkörnigen Bestandteile [m<sup>3</sup>]  
 $V_g^* =$  Volumen der grobkörnigen Bestandteile [m<sup>3</sup>]  
 $V_L^* =$  Volumen der Luft [m<sup>3</sup>]  
 $V_{Sch}^* =$  erforderliches Schaumvolumen [m<sup>3</sup>]  
 $V_w^* =$  Volumen des Porenwassers [m<sup>3</sup>]

#### *Frankreich, 1995 - 2000*

Im Rahmen der Forschungsvorhaben Eupalinos 2000 und Microtunnels wurden u. a. an der Universität Lille Untersuchungen zu Tensidschäumen und ausgewählten Boden-Schaum-Gemischen durchgeführt. Die Erläuterung der Versuchsmethoden unter atmosphärischen Bedingungen, die zur Charakterisierung von Boden-Schaum-Gemischen genutzt werden konnten, erfolgte in [129]. Zu diesen Methoden zählen

- ein Versuch zum Setzmaß, zur Abschätzung der Verarbeitbarkeit des Boden-Schaum-Gemischs,
- ein Mischversuch, bei dem die Reduzierung der für die Durchmischung erforderlichen Leistung durch Schaumzugabe eines im ausgewählten Boden rotierenden Rührwerks bestimmt werden kann,
- eine Adhäsionsprüfung, bei der der Reibungswinkel des Materials auf einer geneigten Ebene ermittelt wird sowie eine Durchlässigkeitsprüfung des Materials, um die Permeabilität des Stützmediums in der Abbaukammer abzuschätzen.
- Zusätzlich wird die Durchführung eines Durchtränkungs- oder Penetrationsversuchs unter Druckbedingungen empfohlen.

Bei den Versuchen wurde eine Schaumanlage genutzt, die eine Variation des Schaumvolumenstroms  $Q_F$  von 16 l/min bis 250 l/min, eine Tensidkonzentration  $c_f$  von 1,0 bis 5,0 % und eine FER zwischen 6 und 30 ermöglichte [130]. Zur Bestimmung von Eigenschaften der Schäume fanden Aufschäum-, Drainage- und Kompressibilitätsversuche mit drei verschiedenen Schäumen statt. Bei Versuchen zum Aufschäumverhalten wurde ermittelt, dass z. B. der

Förderdruck in der Leitung von Luft und Liquid Einfluss auf die FER bzw. die Dichte des Schaums hat. Die Drainagezeiten wiesen in Abhängigkeit des genutzten Tensids große Unterschiede auf. Die Kompressibilität der Schäume verhielt sich annähernd nach dem Gesetz von *Boyle-Mariotte*, welches bei gleicher Temperatur von einem konstanten Produkt von Druck und Volumen eines Gases ausgeht [58].

Die Untersuchungen zu Boden-Schaum-Gemischen wurden mit drei unterschiedlichen Böden (enggestufter Sand, weitgestufter Sand, Mittelkies) sowie verschiedenen Schäumen und Injektionsmengen durchgeführt. Zur Beschreibung einer geeigneten Verarbeitbarkeit der konditionierten Lockergesteine diente der aus der Betontechnologie stammende Versuch zur Bestimmung des Setzmaßes nach [75] mit einem festgelegten Zielwert von 12 cm. Die Bestimmung der Größe des Zielwerts wurde damit begründet, dass dieser Wert einem plastischen Beton entspricht.

Bei dem Versuch zur Bestimmung des Setzmaßes wird das konditionierte Lockergestein in drei Lagen in einen konischen Trichter mit einer Höhe von 30 cm gefüllt und jeweils verdichtet. Durch Anheben des Trichters kann sich das konditionierte Lockergestein hinsichtlich seiner Form verändern. Mithilfe der Bestimmung der Höhe der veränderten Form des konditionierten Materials lässt sich bei homogen durchmischter und zusammengesackter Probe das Differenzmaß zur Ausgangshöhe bestimmen, welches als Setzmaß bezeichnet wird. Mit den Versuchsbeschreibungen nach [1, 52, 74] kann das Setzmaß bestimmt werden.

Bei der Konditionierung von weitgestuftem Sand konnte der Wert von 12 cm durch Variation von FER und FIR erreicht und durch die Schaumzugabe für beide Sande eine deutliche Reduktion der erforderlichen Mischleistung festgestellt werden. Die Wasserdurchlässigkeit von Böden mit einem Wassergehalt von  $w = 12\%$  wurde durch die Schauminjektion reduziert. Eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit eines wassergesättigten Bodens war hingegen nicht möglich. Für eine Bodenmischung aus enggestuftem Sand und Mittelkies konnten zum Teil keine Versuche zum Setzmaß und zur Wasserdurchlässigkeit durchgeführt werden, da das Bodenmaterial nicht für die Schäume geeignet war. Lediglich die Zugabe von Polymeren konnte die Wasserdurchlässigkeit begrenzen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Schaumqualität durch den Herstellungsprozess beeinflusst wird, Schaum positiven Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der untersuchten Böden haben kann sowie die Wasserdurchlässigkeit der konditionierten Böden von der Kornverteilungslinie bzw. von möglichen Polymeren im Schaum abhängig ist.

#### *Japan, 1997*

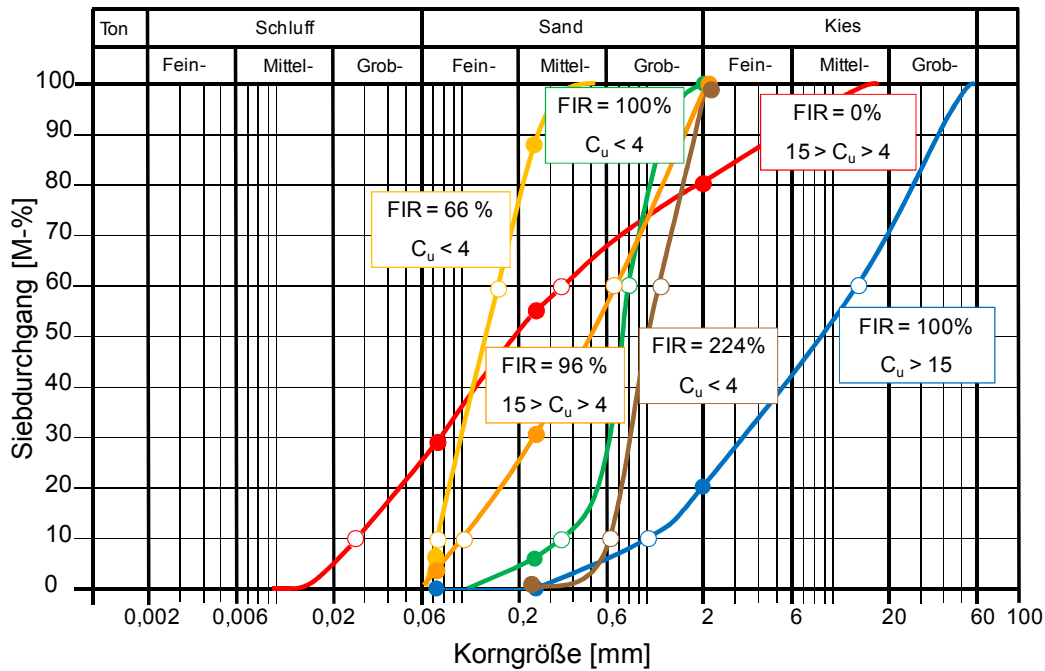
Auf Grundlage von empirischen Erfahrungen sind in [88] sowohl für die Konzentration von Polymersuspensionen  $c_p$  als auch für die Foam Injection Ratio (FIR) Berechnungsverfahren zusammengefasst. Allerdings gehen in die Formel zur Konzentration der Polymersuspensionen nicht die Eigenschaften der Polymere ein, die wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine haben können. Da zudem keine Angaben zur Polymer Injection Ratio (PIR) erfolgten, wird diese Formel für die weitere Forschung als nicht relevant erachtet und daher nicht weiter betrachtet.

Für die Bestimmung einer geeigneten FIR wurde Gleichung 3.11 entwickelt, die von den nachfolgend erläuterten Variablen abhängig ist (vgl. auch [88]). Bei der Gleichung gilt, dass die jeweiligen Terme in den runden Klammern der Gleichung nicht negativ werden dürfen. Sollte dies rechnerisch möglich sein, ist der Term zu Null zu setzen. Die Injektionsrate wird vom Koeffizienten  $\alpha_u$ , der in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  die Werte 1,0 (für  $15 \leq C_U$ ), 1,2 für ( $4 \leq C_U < 15$ ) und 1,6 (für  $C_U < 4$ ) annehmen kann, und vom prozentualen Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit  $d < 0,074$  mm (für die Variable X),  $d < 0,25$  mm (für die Variable Y) und  $d < 2,0$  mm (für die Variable Z) bestimmt.

$$FIR = \frac{\alpha_u}{2} * [(60 - 4 * X^{0,8}) + (80 - 3,3 * Y^{0,8}) + (90 - 2,7 * Z^{0,8})] \quad (\text{Gl. 3.11})$$

mit	$C_U =$	Ungleichförmigkeitszahl [-]
	$FIR =$	Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate [%]
	$X =$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 0,074$ mm [M-%]
	$Y =$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 0,25$ mm [M-%]
	$Z =$	prozentualer Siebdurchgang der Körnungslinie des anstehenden Bodens für Körner mit $d < 2,0$ mm [M-%]
	$\alpha_u =$	Faktor in Abhängigkeit von $C_U$ ; für $4 > C_U$ gilt $\alpha_u = 1,6$ ; für $15 > C_U \geq 4$ gilt $\alpha_u = 1,2$ ; für $15 \leq C_U$ gilt $\alpha_u = 1,0$

Eine detaillierte Beschreibung der Herleitung dieser, auf empirischen Erkenntnissen basierenden Formel erfolgte nicht, so dass eine Aussage zur Eignung der Formel zur Abschätzung der FIR zunächst nicht gegeben scheint. Durch Erstellen beispielhafter Kornverteilungslinien und Ermittlung entsprechender FIR kann hingegen eine Abschätzung der Anwendbarkeit dieser Formel möglich sein. Daher wurden basierend auf Gleichung 3.11 sowohl für unterschiedliche Kornverteilungslinien die jeweilige Injektionsrate als auch für verschiedene Injektionsraten die möglichen Kornverteilungslinien bestimmt. Abbildung 3-8 zeigt Kornverteilungslinien, für die nach Gleichung 3.11 die Injektionsraten von 0 % (rot dargestellt) bzw. 100 % (grüne bzw. blaue Linie) angesetzt wurden. Zudem erfolgte für drei Sande (Feinsand gelbe Linie, Mittel- bis Grobsand orangene Linie, Grobsand braune Linie) mit vorgegebenen Kornverteilungslinien die Bestimmung der Werte der FIR nach Gleichung 3.11. Weiterhin sind die wesentlichen Parameter, wie der prozentuale Siebdurchgang an verschiedenen Stellen und die Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$ , zur Berechnung der jeweiligen Injektionsrate markiert.



Farbe	d <sub>10</sub> [mm]	d <sub>60</sub> [mm]	C <sub>u</sub> [-]	M-% bei 0,074 mm	M-% bei 0,25 mm	M-% bei 2,0 mm	FIR
Rot	0,025	0,35	14,0	30	54	80	0
Grün	0,35	0,80	2,3	0	6	100	100
Blau	1,00	15,00	15,0	0	0	20	100
Gelb	0,08	0,17	2,1	7	88	100	66
Orange	0,10	0,70	7,0	3	30	100	96
Braun	0,60	1,20	2,0	0	0	100	224

Abbildung 3-8: Darstellung von beispielhaften Kornverteilungslinien für die Injektionsraten von FIR = 0 % und FIR = 100 %, den Kornverteilungslinien von drei Sanden sowie Übersicht der notwendigen Parameter zur Bestimmung der Kornverteilungslinien bei Anwendung der Formel von [88]

Auf Basis der Gleichung 3.11 gilt, dass Böden mit einer Kornverteilungslinie links der roten Linie mit Erddruckschilden ohne Zugabe von Schäumen aufgefahren werden könnten. Dieser Verlauf ähnelt im Bereich bis ca. 50 M-% des Siebdurchgangs dem Verlauf der klassischen Einsatzbereiche eines Erddruckschildes (vgl. Abbildung 3-8). Allerdings enthält die rot gekennzeichnete Linie deutlich größere Korndurchmesser im Bereich über 50 M-% des Siebdurchgangs als der klassische Einsatzbereich. Bei gewählter FIR von ca. 100 % können in grobkörnigen Böden die möglichen Kornverteilungskurven stark voneinander abweichen (vgl. grüne, blaue und orangene Kornverteilungslinie). Die Bandbreite des Einsatzbereichs einer FIR ≈ 100 % ist jedoch aus geotechnischer Betrachtung der Böden nicht zu erklären, da die Eigenschaften der beiden Böden stark unterschiedlich sind. Zudem wurden für die drei Sande Werte der FIR zwischen 66 % und 224 % ermittelt. Diese weichen wesentlich von den in Tabelle 3-3 aufgeführten, empfohlenen Injektionsraten nach EFNARC ab, deren Werte sich am Porenanteil der jeweiligen Bodengruppe orientieren. Ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Böden ist eine Begründung der Abweichungen der FIR aufgrund von geotechnischen Parametern nicht gegeben. Daher ist die Formel nach [88] für die Injektionsmenge an Schaum kritisch zu bewerten und wird in den folgenden Ausführungen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

*Niederlande, seit 1999*

In den Niederlanden sind Untersuchungen zur Konditionierung von Böden bei Verwendung von Erddruckschilden durchgeführt und deren Ergebnisse u. a. in [14, 15, 16, 17, 19, 20, 138] veröffentlicht worden. Ähnlich wie bei [105] wird zur Reduzierung des Winkels der inneren Reibung des Stützmediums empfohlen, die Injektionsrate FIR so zu wählen, dass diese den Anteil des maximalen Porenraums des anstehenden Bodens übersteigt. In diesem Fall ist von einer theoretischen Völlfüllung des Porenraums auszugehen und die Körner haben keinen direkten Kontakt mehr zueinander. Die Stützdruckübertragung in diesem Fall muss über den Druckabbau des Porenwassers bzw. des Schaums im Porenraum gewährleistet werden.

Von *Bezuijen* wurde eine Formel zur Ermittlung der effektiven  $FER_S$  entwickelt [20]. Die  $FER_S$  gibt an, welche effektive Aufschäumrate in der Abbaukammer in Abhängigkeit der Injektionsrate FIR und des Porenanteils  $n$  auftritt und berücksichtigt sowohl die Menge des durch den Schaum eingebrachten Liquids als auch die im Boden-Schaum-Gemisch verbleibende Menge an Porenwasser (vgl. Gleichung 3.12). Die Herleitung dieser Formel ist in [20] beschrieben. Bei der Bodenconditionierung mit Schaum ist der Parameter FIR in V-% angegeben. Für eine Vergleichbarkeit zwischen FIR und Porenanteil erfolgt in dieser Arbeit eine Umrechnung des Porenanteils  $n$  in V-%, während in der Geotechnik für den Porenanteil Werte zwischen 0 und 1,0 angesetzt werden.

$$FER_S = \frac{FER}{1 + \frac{FER}{FIR/100} * \left( \frac{n}{100} - \frac{k * h_{\Delta}}{\frac{d_{Schild}}{2} * v_{Vortrieb}} \right)} \quad (Gl. 3.12)$$

- mit
- $d_{Schild}$  = Durchmesser der Schildmaschine [m]
  - $FER$  = Foam Expansion Ratio = Aufschäumrate [-]
  - $FER_S$  = effektive Foam Expansion Ratio (engl.) = effektive Aufschäumrate [-]
  - $FIR$  = Foam Injection Ratio = Injektionsrate [%]
  - $h_{\Delta}$  = piezometrische Höhe vor der Ortsbrust [m]
  - $k$  = Wasserdurchlässigkeitswert [m/s]
  - $n$  = Porenanteil [%]
  - $v_{Vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

Bei einem geringen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert und einer hohen FER im Vergleich zum Wert von  $FIR/100$  kann nach [20] die Gleichung 3.12 reduziert werden (vgl. Gleichung 3.13), da der Term  $\frac{k * h_{\Delta}}{\frac{d_{Schild}}{2} * v_{Vortrieb}}$  deutlich kleiner als  $n/100$  sein kann und der Term  $\frac{FER}{FIR/100}$  deutlich größer eins ist. In diesem Fall würde kein Porenwasser aus der Abbaukammer verdrängt, so dass bei einer Injektionsrate von  $FIR = 40\%$  und einem Porenanteil gleicher Größe nach [140] die effektive Foam Expansion Ratio  $FER_S$  die Größe von eins annehmen kann.

$$FER_S = \frac{FIR}{n} \quad (Gl. 3.13)$$

- mit
- $FER_S$  = effektive Foam Expansion Ratio (engl.) = effektive Aufschäumrate [-]
  - $FIR$  = Foam Injection Ratio (engl.) = Injektionsrate [%]
  - $n$  = Porenanteil [%]

Die Anwendung der Gleichung 3.13 ist jedoch nur bei geringer Wasserdurchlässigkeit, wie z. B. bei Böden mit einem Wert von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s, anzuwenden. Bei gemischt- oder grobkörnigen Lockergesteinen kann die Wasserdurchlässigkeit des unkonditionierten Materials wesentlich größer als  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s sein (vgl. Abbildung 3-1, Seite 42). Das nachfolgende Beispiel zeigt, dass in diesem Fall die effektive  $FER_s$  annähernd gleich der  $FER$  sein kann.

Gegeben sei ein Boden mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von z. B.  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s und einem Porenanteil von  $n = 40$  %, ein Vortrieb mit einem Schilddurchmesser von 10,0 m, einer Vortriebsgeschwindigkeit von 40 mm/min und einer piezometrischen Höhe vor der Ortsbrust von  $h_{\Delta} = 30$  m. In diesem Fall wird der Term in den runden Klammern aus Gleichung 3.12 negativ und nach [20] zu null gesetzt (vgl. Gleichung 3.14). Der Wert der  $FER_s$  entspricht dann dem der  $FER$ , da der gesamte Porenanteil durch den Schaum ausgefüllt wird und kein Porenwasser zurückbleibt.

$$FER_s = \frac{FER}{1 + \frac{FER}{\frac{FIR}{100}} * \left( \frac{n}{100} - \frac{k * h_{\Delta}}{d_{Schild} * v_{Vortrieb}} \right)} = \frac{FER}{1 + \frac{FER}{\frac{40}{100}} * \left( \frac{40}{100} - \frac{5 * 10^{-5} \frac{m}{s} * 30 m}{\frac{10,0 m}{2} * 40 \frac{mm}{min} * \frac{1 min}{60 s} * \frac{1 m}{1000 mm}} \right)}$$

$$= \frac{FER}{1 + \frac{FER}{\frac{40}{100}} * (0,4 - 0,45)} = \frac{FER}{1 + \frac{FER}{\frac{40}{100}} * 0} = \frac{FER}{1} = FER \quad (\text{Gl. 3.14})$$

mit	$d_{Schild}$ = Durchmesser der Schildmaschine [m] =	10,0 m
	$FER_s$ = effektive Foam Expansion Ratio (engl.) = effektive Aufschäumrate [-]	
	$FER$ = Foam Expansion Ratio (engl.) = effektive Aufschäumrate [-]	
	$FIR$ = Foam Injection Ratio = Schauminjektionsrate [%]	40%
	$h_{\Delta}$ = piezometrische Höhe vor der Ortsbrust [m] =	30,0 m
	$k$ = Wasserdurchlässigkeitswert [m/s] =	$5 \cdot 10^{-5}$ m/s
	$n$ = Porenanteil [%] =	40 %
	$v_{Vortrieb}$ = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s] =	40 mm/min

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass bei der Berechnung der effektiven  $FER_s$  nach Gleichung 3.13 und 3.14 Unterschiede bestehen können. Für die Abschätzung der  $FER_s$  in gemischtkörnigen Böden mit geringem Feinanteil und grobkörnigen Lockergesteinen ist daher die Gleichung 3.12 zu empfehlen.

Die Durchführung von Versuchen zur Bestimmung von Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen erfolgte in experimentellen Untersuchungen mit einem Versuchsaufbau, bei dem Material unter Druck konditioniert wurde. Das auf diese Weise aufbereitete Material konnte mit einer Förderschnecke entnommen und untersucht werden. Zudem waren Porenwasserdrucksensoren im Behälter installiert, mit denen auf unterschiedlichen Höhen Werte aufgezeichnet werden konnten. Die Untersuchungen ergaben, dass

- die Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen vom Anteil des Liquids und des Anteils des im Porenraum verbleibenden Wassers abhängig ist,
- die Erhöhung der Porosität durch eine ausreichende Schaumzugabe (bei  $FIR > n_{max}$ ) zu einer Verringerung der Scherspannung führt und



- der maximale Porenanteil wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Bodens hat (vgl. [15]).

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitung eines Vortriebs wurden u. a. Auswertungen von Betriebsdaten eines Erddruckschilds durchgeführt [12, 13, 18]. Dabei glich der während des Vortriebs gemessene Porenwasserdruck unmittelbar vor der Maschine annähernd dem Druck an der Druckwand, was auf den hohen Porenanteil des Boden-Schaum-Gemischs zurückzuführen war, der oberhalb des maximalen Porenanteils des ursprünglichen Materials lag. Anhand von an der Druckwand gemessenen Drücken ließ sich ein Einfluss des rotierenden Schneidrads auf die Druckverteilung in der Abbaukammer ermitteln. Zudem wurden während des Vortriebs Proben des konditionierten Materials aus der Abbaukammer bis ca. 3,0 bar Stützdruck gewonnen. Der Porenanteil des Boden-Schaum-Gemischs lag mit Werten zwischen  $n = 46$  und  $n = 72$  % weitaus höher als die Werte des maximalen Porenanteils von  $n_{\max} = 44$  bis  $n_{\max} = 53$  %. Die Scherfestigkeit des Materials lag zwischen 5 und 30 kPa [138].

#### *Großbritannien, seit 2000*

Seit dem Jahr 2000 führten die Universitäten Cambridge und Oxford Untersuchungen auf dem Gebiet der Bodenconditionierung durch. Eine Übersicht zu verschiedenen Conditionierungsmitteln, unterschiedlichen Ansätzen zur Berechnung der FIR und möglichen Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen wird in [110] gegeben. Die Ergebnisse der ersten Versuche zu Schäumen und Boden-Schaum-Gemischen sind in [128] vorgestellt. Zur Schaumherstellung diente bei diesen Versuchen eine Labor-Schaumanlage, bei der eine Tensidlösung mit Luft in einer Venturi-Düse vermischt wurde, so dass zwischen 2 und 4 l/min Schaum hergestellt werden konnten. Bei dieser Schaumanlage war keine kontrollierte Steuerung des Volumenstroms des Liquids möglich. Dieser konnte nur über den Druck der in den Tank eingebrachten Luft verändert werden. Mit den so hergestellten Schäumen erfolgten Untersuchungen zum Aufschäumverhalten und zur Drainagefähigkeit. Für Versuche zu Boden-Schaum-Gemischen wurden ein Feinsand und ein Grobsand konditioniert und vor allem hinsichtlich ihres Scher- und Kompressionsverhaltens untersucht. Die Scherkräfte der konditionierten Böden wiesen geringe Werte auf. Beim Kompressionsverhalten des konditionierten Materials war ein Zusammenhang zwischen hoher FIR und großen Volumenveränderungen erkennbar.

Über die Bestimmung von verschiedenen Eigenschaften von mit unterschiedlichen Produkten hergestellten Schäumen, berichtete [106]. Für die Herstellung der Schäume stand ein Labor-Schaumgenerator zur Verfügung, dessen Einstellungen während der Schaumproduktion nicht verändert wurden. Weitere Informationen zur Verfahrenstechnik der Schaumherstellung sind jedoch nicht vorhanden. Insgesamt erfolgte die Herstellung von fünf Schäumen mit je zwei unterschiedlichen Tensidkonzentrationen. Durch die unterschiedlichen Conditionierungsmittel ergaben sich bei gleichen Volumenströmen verschiedene Drainagezeiten und FER der Schäume, wobei die FER bei den Produkten zwischen ca. 7 und 27 lag. Da auf Schildmaschinen die Volumenströme des Schaums u. a. von der FIR und der Vortriebsgeschwindigkeit abhängig sind (vgl. Gleichung 2.22), wären Untersuchungen zum Aufschäumverhalten bei unterschiedlichen Volumenströmen sinnvoll gewesen.

In [108] wurden neben Ergebnissen zur Auslegung von Schneckenförderern auch Ergebnisse von Versuchen zur Schaumherstellung aufgeführt. Die Schaumherstellung erfolgte mit einer Anlage, die im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Schaumanlage eine verbesserte Steuerung der Volumenströme von Luft und Liquid aufwies. Mit den Einstellungen der Schaumanlage waren FER zwischen 11 und 25 bei Schaumvolumenströmen  $Q_F$  zwischen 27,5 l/min und 60 l/min möglich. Für unterschiedlich hergestellte Schäume wurden sowohl die FER als auch die Drainagezeit ermittelt. Auf Grundlage des in [111] beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung des Gewichts des Schaums bei bekanntem Volumen konnte die FER ermittelt werden. Bei den Versuchsergebnissen wurden auch höhere FER als die eingestellten FER erreicht. Da bei der Probenentnahme normalerweise Luft aber kein Liquid entweichen kann, sollte die bestimmte FER maximal den Wert der eingestellten FER erreichen können und tendenziell eher niedriger sein. Sollte die ermittelte FER höher als die eingestellte FER sein, ist daraus zu folgern, dass eine Massenbilanz der Volumenströme nicht mehr gegeben ist oder zusätzlich Luft eingebracht wurde und daher Fehlmessungen vorliegen können. Für verschiedene Schäume wurde die Drainagezeit mithilfe eines Trichters ermittelt. Dabei gibt die Drainagezeit eines Schaums an, wie viel Flüssigkeit in Bezug auf die gesamte Schaummenge innerhalb einer bestimmten Zeit aus dem in einen Trichter eingefüllten Schaum drainiert. Auf diese Weise ist eine Aussage über die Drainagefähigkeit des Schaums möglich. Durch 25 Versuche mit unterschiedlichen Konditionierungsmitteln, Konzentrationen und Volumenströmen der Luft konnte geschlossen werden, dass

- die Drainagezeit von 50 % der Schaummasse bei den meisten Versuchen ungefähr der doppelten Drainagezeit von 25 % der Schaummasse entspricht,
- die Drainagezeiten mit zunehmender FER anstiegen,
- die FER und die Drainagezeiten normalerweise mit höherer Konzentration  $c_f$  zunahmen,
- die Konditionierungsmittelprodukte und deren Konzentration wesentlichen Einfluss auf die FER und die Drainagezeit hatten und
- die gemessenen FER stark von den eingestellten FER abweichen konnten.

Die Ergebnisse von Auswertungen eines Vortriebs im Sand mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert zwischen  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  bis  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s sind in [22] veröffentlicht. Bei diesen Untersuchungen erfolgte die Konditionierung sowohl mit Schäumen als auch mit Polymersuspensionen. Die Konditionierungsparameter lagen bei einer FIR von ca. 50 %, einer FER um 10 und einer PIR um 7 %. Bei den Untersuchungen wurden keine Aussagen zur Qualität der Konditionierungsmittel gemacht, so dass der Einfluss der Konditionierungsmittel auf den Boden nicht eindeutig bestimmbar war.

Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zu Konditionierungsmitteln und zu konditionierten Lockergesteinen enthalten [122, 123]. Die Schäume sowie verschiedene Polymersuspensionen wurden mit ausgewählten Sanden vermischt und das Setzmaß der konditionierten Böden bestimmt. Neben vereinzelt Versuchen zur Bestimmung der Bläschengröße erfolgten Untersuchungen zu den Dichten von Schäumen. Dabei waren deutliche Differenzen in Abhängigkeit des Konditionierungsmittels erkennbar. Möglicherweise verursachten die bei [123] genutzten und nicht weiter spezifizierten Inhaltsstoffe der Produkte diese Unter-

schiede. Da bei diesen Untersuchungen zudem die Einflüsse der Schaumanlage auf die FER keine Berücksichtigung fanden und keine Angaben zu den eingestellten Volumenströmen von Liquid und Luft gemacht wurden, besteht die Möglichkeit, dass Schwankungen dieser Volumenströme während der Schaumherstellung die Differenzen der unterschiedlichen FER verursachten.

Die Ergebnisse aus diesen Versuchen bildeten die Grundlage zur Auswahl von konditionierten Böden für die weitergehenden Untersuchungen. Mit ausgewählten und unterschiedlich konditionierten Sanden wurden Versuche zur Bestimmung der Scherparameter, zur Bestimmung der Kompressibilität und zum Verhalten im Schneckenförderer durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Versuche konnte geschlossen werden, dass der Reibungswinkel der konditionierten Böden geringer war als der Reibungswinkel der unkonditionierten Böden. Eine Reduktion des Drehmoments von Schneidrad und Schnecke sowie eine Verminderung des Verschleißes an den Abbauwerkzeugen und der Förderschnecke waren daher zu erwarten. Die Versuche zum Kompressionsverhalten der Boden-Schaum-Gemische zeigten, dass der konditionierte Boden auch bei Belastung von bis zu 2 bar stabil war. Zudem wurden Untersuchungen mit einem Schneckenförderer und unterschiedlich konditionierten Böden, verschiedenen Abmessungen der Förderschnecken und unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Schneckenförderers durchgeführt.

#### *EFNARC, 2001 - 2005*

In [59, 60] werden Empfehlungen zur Herstellung von Schäumen, zur Bestimmung der Drainagezeit des Schaums, zur Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Sand nach [55], zur Ermittlung ihrer Stabilität sowie zur Bestimmung ihrer Verarbeitbarkeit gegeben. Die Empfehlungen beschreiben zudem den generellen Aufbau einer Schaumanlage zur Schaumproduktion. Allerdings werden die Einflüsse aus verschiedenen Parametern, wie z. B. dem Volumenstrom des Schaums, dem Aufbau der Schaumlanze o. ä., nicht näher betrachtet, so dass es nicht möglich ist, auf Basis der Empfehlung einen äquivalenten Aufbau der Schaumanlage und somit reproduzierbare Schaumeigenschaften zu gewährleisten.

Bei der Beschreibung zur Ermittlung der Drainagezeit der Schäume wird das generelle Vorgehen erläutert. Es werden jedoch Einflussfaktoren, wie z. B. die Porosität des Filters und die Dimensionen des Zylinders, nicht weitergehend betrachtet. Zudem ermöglicht die beschriebene Verfahrenstechnik aufgrund des Volumens des Zylinders von 1,0 l und des einzubringenden Schaumgewichts von 80 g nur Untersuchungen von Schäumen mit einer FER von maximal 12,5. Allerdings werden in der Praxis auch Schäume mit höheren Werten eingesetzt (vgl. Abbildung 3-7), so dass auch deren Eigenschaften zu untersuchen wären.

Für die Herstellung eines Boden-Schaum-Gemischs wird nach [59] die Nutzung eines in [55] beschriebenen Sands empfohlen. Bei diesem Sand ist zwar eine Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Kornverteilungslinie gegeben, jedoch verhindert die Nutzung nur eines Sandes eine gezielte Variation der Kornverteilungslinien. Für Untersuchungen mit systematischer Variation der Kornverteilungslinie ist der Einsatz dieses Sands demnach nicht geeignet.

Zur Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen sollen 1,5 kg Boden genutzt werden, welcher in einem Mischer mit ca. 5,0 l Fassungsvermögen so lange mit Schaum zu vermischen ist, bis Schaum und Boden ein homogenes Material bilden. Die Festlegung des Gewichts der zu untersuchenden Probe und des begrenzten Volumens des Mixers ermöglichen nur die Herstellung kleiner Mengen an Boden-Schaum-Gemischen. Da aufgrund der zeitabhängigen Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen keine chargenweise hergestellten Proben untersucht werden, reduziert sich die jeweils für Untersuchungen zur Verfügung stehende Probemenge. Des Weiteren erfolgt keine Beschreibung der Einflussfaktoren wie der Füllungsgrad des Mixers in Abhängigkeit des Materials oder die Mischdauer, so dass eine Reproduzierbarkeit der nach der Empfehlung hergestellten Boden-Schaum-Gemische nicht zu gewährleisten ist.

Zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit des konditionierten Materials soll ein Versuchsaufbau mit dem Ausbreittisch in Anlehnung an [50] genutzt werden. Allerdings sollte nach [50] das minimale Probenvolumen 1,5 l betragen, was bei einer konditionierten Bodenprobe von 1,5 kg Ausgangsgewicht, einer hohen Dichte des unkonditionierten Materials und einer geringen FIR jedoch nicht gewährleistet ist. Zudem eignet sich dieser Versuch nur für Mörtel, so dass konditioniertes Lockergestein mit einem maximalen Korndurchmesser von größer 8 mm nicht untersucht werden kann.

Die Versuchsbeschreibungen zur Herstellung von Schäumen und Boden-Schaum-Gemischen sowie der Ermittlung ihrer wesentlichen Eigenschaften nach [59, 60] geben Hinweise auf die jeweilige Versuchsdurchführung. Die Empfehlungen sind jedoch nicht hinreichend definiert, um reproduzierbare Untersuchungsergebnisse zu liefern.

#### *Italien, seit 2004*

Basierend auf Vorversuchen in Oxford (vgl. [122]) wurde an der Technischen Universität Turin eine Schaumanlage mit einem maximalen Volumenstrom des Schaums  $Q_F = 165$  l/min installiert [155]. Zunächst erfolgte die Bestimmung der FER und der Drainagezeit für über 30 Proben unterschiedlicher Schäume. Zudem konnte für einen konditionierten Sand mit gleichem Wassergehalt, gleicher Injektionsrate und gleicher Aufschäumrate der Einfluss der Tensidkonzentration  $c_f$  und des Konditionierungsmittels bestimmt werden. Es zeigte sich, dass die Tensidkonzentration nur einen geringen Einfluss, die Wahl des Konditionierungsmittels dagegen einen wesentlichen Einfluss auf die Drainagezeit hat. Die Veränderung des Fließverhaltens des mit gleichen Schaumeigenschaften konditionierten Sands erfolgte mithilfe der Bestimmung des Setzmaßes zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Herstellung. In weiteren Untersuchungen wurde der ausgewählte Sand mit Polymeren vermischt, einer visuellen Kontrolle unterzogen und das Fließverhalten des konditionierten Materials durch die Bestimmung des Setzmaßes abgeschätzt.

In [155] wurden Ergebnisse früherer, vergleichbarer Untersuchungen ausgewertet und zusammengefasst. Diese zeigten, dass konditionierte Böden, deren Setzmaße Werte von ca. 10 oder 20 cm aufwiesen, eine als geeignet zu bezeichnende Verarbeitbarkeit eines Stützmediums im Tunnelbau mit EPB-Schilden aufweisen können (vgl. [155]). Gleichwohl der Un-

terschied dieser Werte mit 10 cm zunächst als hoch erachtet werden kann, können die Eigenschaften der Böden annähernd gleich sein (vgl. Untersuchungsergebnisse in Kapitel 6). Generell ist die Zugabe eines Konditionierungsmittels nötig, um bei einem grobkörnigen Lockergestein das Setzmaß von 10 cm zu erreichen, jedoch kann dieses bereits durch eine geringere Steigerung der Zugabemenge auf 20 cm ansteigen. Die Grenzwerte von 10 und 20 cm können daher den Übergang zu einem gut verformbaren Material angeben, wobei das Setzmaß von 10 cm annähernd dem von [130] empfohlenen Wert von 12 cm entspricht.

Zur Abschätzung des Fließverhaltens wurde für den mit variiertem Wassergehalt und angepassten Injektionsraten konditionierten Sand (Korngröße zwischen 0,03 und 2 mm) das Setzmaß bestimmt. Die in [155] beschriebene Versuchsdurchführung berücksichtigt jedoch keine Einflüsse aus Mischleistung oder Mischdauer. Aus den Ergebnissen konnte ein Bereich geeigneter Parameter für die Bodenconditionierung abgeleitet werden, bei dem das Setzmaß die Werte zwischen 15 und 20 cm annahm. Diese Werte lagen beim betrachteten Sand bei einer FIR zwischen 40 und 60 % bei einem Wassergehalt von 5 % und einer FIR von 25 bis 30 % bei einem Wassergehalt von ca. 18 % [153]. Zusätzlich wurde die Körnungslinie durch die Zugabe eines Feinsandes verändert und die Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische überprüft. So ergab sich, dass

- mit der Bestimmung des Setzmaßes die Verarbeitbarkeit abgeschätzt werden konnte,
- die erforderliche Injektionsrate des Schaums (FIR) für die Erzielung von festgelegten Setzmaßen vom Wassergehalt abhängig ist, da das Wasser eine Benetzung der Kornoberflächen bzw. Reduzierung des Winkels der inneren Reibung ermöglichte,
- mit steigendem Feinanteil des Bodens das Setzmaß bei gleichbleibender Injektionsrate und gleichbleibendem Wassergehalt abnahm, da aufgrund der größeren Kornoberfläche des Feinanteils zusätzliches Liquid für deren Benetzung nötig war und weniger Schaumblasen für die Reduzierung des Winkels der inneren Reibung zur Verfügung standen und
- der nötige Wasseranspruch mit höherem Feinanteil zur Erzielung eines annähernd gleichen Setzmaßes bei gleicher Injektionsmenge stieg, da mit höherem Feinanteil die Größe der spezifischen Oberfläche  $S_v$  der Körner anstieg und das Wasser für eine Benetzung der Kornoberfläche sorgte.

Zur Durchführung von Großversuchen wurde das ausgewählte Lockergestein unter atmosphärischen Bedingungen chargenweise mit dem Konditionierungsmittel vermischt und in einen Behälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 230 l eingebaut. Das Material konnte mit einem Hydraulikzylinder unter Druck gesetzt und anschließend mit einem schräg angebrachten Schneckenförderer abgezogen werden [153, 154]. Während der Entnahme des Bodens aus dem Behälter wurden an verschiedenen Stellen im Versuchszylinder und im Schneckenförderer die Drücke bestimmt sowie das Drehmoment der Förderschnecke aufgezeichnet. Aus den Untersuchungen mit unterschiedlichen Böden sowie der Förderung des Schneckenförderers konnte gefolgert werden, dass die Bodenconditionierung eine Reduktion des Drehmoments des Schneckenförderers verursacht.

Bei der oben beschriebenen Vorgehensweise wurde Schaum unter atmosphärischen Bedingungen hergestellt und mit einem Lockergestein vermischt. Anschließend erfolgten eine Be-

lastung des Boden-Schaum-Gemischs mit Druck, die Förderung des Materials mittels des Schneckenförderers und eine Untersuchung des Materials. Auf diese Weise trat durch die nachträgliche Komprimierung des Schaumanteils eine wesentliche Veränderung der Gemischeigenschaften auf, die in dieser Form nicht in der Abbaukammer eines EPB-Schildes stattfindet, weil dort der Schaum zu den bereits herrschenden Druckbedingungen hergestellt wird.

Außer Sand wurden weitere Lockergesteine hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit untersucht [120]. Auf Grundlage der Ergebnisse zum Setzmaß ließen sich Einsatzbereiche der Schäume in Abhängigkeit der FIR und des Wassergehalts für die untersuchten Böden bestimmen. Zudem erfolgte die Ermittlung des Einflusses des Untersuchungszeitpunkts und der Temperatur auf die Höhe des Setzmaßes [119]. Mit zunehmendem Untersuchungszeitraum reduzierte sich die Höhe des Setzmaßes der injizierten Böden stark. Das bei unterschiedlichen Temperaturen (20 und 40° C) gemessene Setzmaß veränderte sich nur bis zu 2 cm bei unterschiedlichen Injektionsraten und lag somit im Bereich der Messungengenauigkeit.

Für ausgewählte Projekte in Italien wurden Untersuchungen zu den Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen durchgeführt [23]. Neben den oben beschriebenen Versuchen veröffentlichten [24, 25] Untersuchungsergebnisse zur Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit verschiedener konditionierter Lockergesteine. Bei einem in Anlehnung an [2] konzipierten Versuchsstand wurde die erforderliche Zeit bestimmt, bis 2 l Wasser das konditionierte und eingebaute Lockergestein durchströmten. Als Vergleichswert dient der eingeführte Undurchlässigkeits-Index  $I_i$  [s]. Auf Basis von Untersuchungen mit einem weitgestuften puzzolanischen Lockergestein und Schäumen mit unterschiedlicher FER konnte ermittelt werden, dass der Wert für  $I_i$  bei Verwendung eines Schaums mit niedriger FER (FER = 7,5) größer war als bei Nutzung einer hohen FER (FER = 12) bei gleicher FIR. Vermutlich führte der niedrigere Liquidanteil bei einer hohen FER zu einer nicht ausreichenden Benetzung der Oberfläche der Bodenkörner. Dadurch zerplatzten die Schaumblasen und der Wert des Undurchlässigkeits-Index war geringer als bei einem Schaum mit niedriger FER. Für diese Vermutung spricht zudem, dass durch Steigerung der FIR und somit des Liquidanteils eine wesentliche Erhöhung des Werts erreicht werden konnte.

Zusammenfassend kann aus den Untersuchungen in Turin gefolgert werden, dass

- zur Bestimmung von wesentlichen Schaumeigenschaften verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen, die jedoch nicht detailliert beschrieben sind,
- die Konditionierung sowohl mit Schaum als auch mit Polymersuspensionen starken Einfluss auf die Eigenschaften der Lockergesteine haben kann,
- die Konditionierung eine Reduktion des Drehmoments des Schneckenförderers ermöglicht,
- mit der Bestimmung des Setzmaßes ein Verfahren zur Verfügung steht, um die Verarbeitbarkeit des Materials abzuschätzen,
- für unterschiedliche Lockergesteine verschiedene, geeignete Bereiche zur Bodenkonditionierung hinsichtlich der FIR und des Wassergehalts bestehen und
- die Schaumzugabe eine Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit ermöglicht.

An der Universität Rom wurden numerische Untersuchungen zum Einfluss der Konditionierung auf den Stützdruck bei einem Vortrieb mit einem Erddruckschild in Vancouver durchgeführt und die projektspezifischen Randbedingungen einer gemischten Ortsbrust simuliert [65]. Den größten Teil der Ortsbrust stellte ein schluffiger Boden mit einer Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s dar. Dieser Boden wurde durch eine Sandschicht ( $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s) mit einer Dicke von 1,5 m unterteilt. In den Berechnungen erfolgte eine Veränderung der Lage der Sandschicht. Die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials in der Abbaukammer und im Schneckenförderer lag bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  bzw.  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Aus den Ergebnissen von drei durchgeführten Simulationen ist zu folgern, dass

- die durch die Konditionierung beeinflusste Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums in Bezug auf die Stützdruckermittlung eine große Rolle spielt,
- ein Abbau des Porenwasserdrucks hauptsächlich in der Förderschnecke erfolgt,
- die Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums in der Abbaukammer und im Schneckenförderer niedriger als  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s sein sollte, um Sickerströmungen und Strömungsdrücke weitestgehend zu verhindern und
- mit zunehmender Permeabilität des Bodens der Porenwasserdruck an der Ortsbrust reduziert wird.

Beim numerischen Modell galten u. a. die Randbedingungen, dass der Erddruckschild und die Tübbinge wasserundurchlässig waren. Bei der Präsentation der Ergebnisse ergaben sich jedoch im Bereich zwischen Stützmedium in der Abbaukammer und radial zur Vortriebsrichtung anstehendem Boden Übergänge mit gleichen Porenwasserdrücken (vgl. rote Markierung in Abbildung 3-9). Dies ist vor allem in der Firste und in der Ulme anhand der eingezeichneten Verläufe der Linie gleichen Porenwasserdrucks deutlich zu erkennen. In der Praxis wird die Abbaukammer bei Erddruckschilden auch von einem wasserundurchlässigen Schildmantel begrenzt, so dass normalerweise an diesen Stellen keine gleichen Porenwasserdrücke auftreten. Aufgrund der Abbildung 3-9 ist aber anzunehmen, dass zwar die Tübbinge, die Druckwand sowie das Rohr des Schneckenförderers wasserundurchlässig simuliert wurden, der Schildmantel im Bereich der Abbaukammer jedoch ein Durchströmen von Wasser ermöglichte. Durch diese Randbedingung im numerischen Modell kann Wasser auch radial zur Vortriebsrichtung in die Abbaukammer fließen und so die Ergebnisse zur Untersuchung der Konditionierung auf die Ermittlung des Stützdrucks wesentlich beeinflussen.

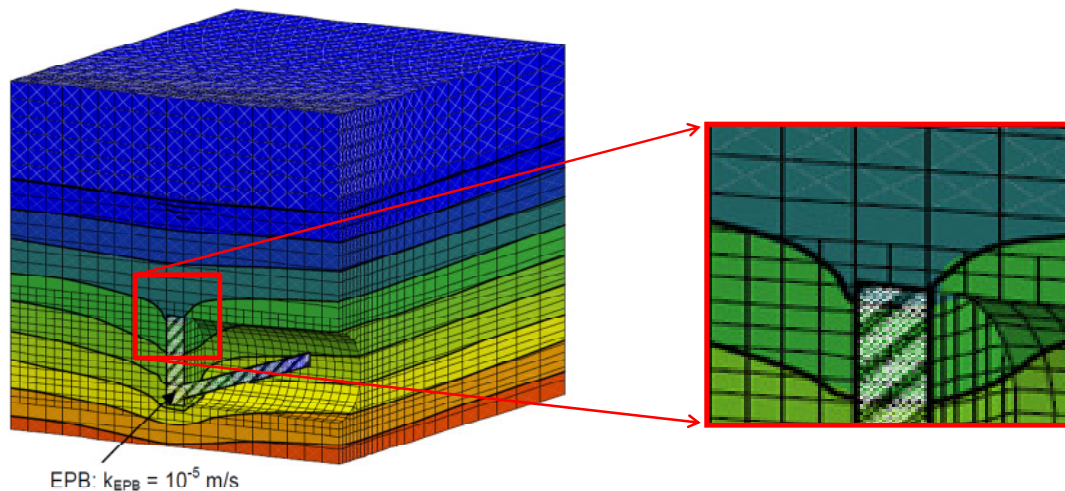


Abbildung 3-9: Porenwasserdruckverteilung im Baugrund bei einem numerischen Modell nach [65]

Bei den durchgeführten Untersuchungen lag die Wasserdurchlässigkeit der hauptsächlich an der Ortsbrust vorhandenen Bodenschicht bei  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s. Schäume werden bei gemischtkörnigen Lockergesteinen mit einem geringeren Feinanteil als 30 M-% oder grobkörnige Böden vor allem zur Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit auf  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s eingesetzt. Aus diesem Grund stellen die Randbedingungen der von [65] durchgeführten Untersuchungen nicht die typischen Randbedingungen eines Vortriebs mit einer Erddruckschildmaschine in z. B. grobkörnigen Böden dar, so dass eine Übertragung der Ergebnisse dieser Untersuchungen auf die in der Arbeit betrachteten Böden nicht gegeben ist.

#### *Europa, 2005 - 2009*

Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens Technology Innovation in Underground Construction (TUNCONSTRUCT) wurde ein Versuchskonzept entwickelt, welches die Schaumkonditionierung von unter Druck gesetztem Lockergestein vorsieht [131]. Durch Förderung von konditioniertem Material mit einem Schneckenförderer aus einem Behälter konnte dieses Material gewonnen und anschließend untersucht werden. Zur Bestimmung einzelner Eigenschaften des Boden-Schaum-Materials unter Druck war es zudem möglich, Proben bei bestehendem Gegendruck hinsichtlich verschiedener Eigenschaften zu untersuchen.

Zur Versuchsdurchführung wurde Lockergestein mit ausgewählter Kornverteilung in den Druckbehälter eingebracht und Wasser entsprechend des gewählten Wassergehalts zugegeben, so dass anschließend die Eigenschaften des unkonditionierten Materials bestimmbar waren. Bei gewählten Druckbedingungen wurden in einem zweiten Schritt durch Zuleitungen Konditionierungsmittel in erforderlicher Menge zugefügt und diese mit dem Lockergestein durchmischt. Dabei ist anzumerken, dass in bisherigen Untersuchungen die Eigenschaften der Konditionierungsmittel, wie z. B. die Dichte oder die Drainagezeit von Schäumen, nicht explizit erfasst wurden. Anschließend konnte dem Behälter das konditionierte Material kontinuierlich über die angebrachte Förderschnecke oder chargenweise über Öffnungen im Boden bei ständiger Druckbeaufschlagung von bis zu 4 bar entnommen werden.



In den bisherigen Untersuchungen wurden als unkonditionierte Materialien Ton, Schluff, Sand, ein gemischtkörniger Boden sowie ein Lockergestein mit Gipsanteilen ausgewählt und als Konditionierungsmittel Schäume genutzt. Mit diesen Materialien erfolgten verschiedene Untersuchungen sowohl bei Durchmischung unter atmosphärischen Bedingungen als auch bei Gegendruck. Des Weiteren fand eine Überprüfung der Eigenschaften des Boden-Schaum-Gemischs unter atmosphärischen Bedingungen statt [131]. Die jeweiligen Versuche und die Randbedingungen sind in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: Übersicht zu Versuchen zur Bestimmung maßgeblicher Eigenschaften von konditionierten Böden und Randbedingungen hinsichtlich des Drucks bei Untersuchungen nach [131]

Versuch zur Bestimmung	atmosphärisch durchmischt - atmosphärisch untersucht	unter Gegendruck durchmischt - atmosphärisch untersucht
Dichte	X	X
Setzmaß	X	X
Adhäsion	X	X
Drainage		X
Wasserdurchlässigkeit		X

Aus den veröffentlichten Ergebnissen ist zu folgern, dass die Dichte des konditionierten Lockergesteins mit zunehmendem Druck aufgrund der Kompressibilität des Schaums sinken kann. Da die Untersuchungen der Dichte unter atmosphärischen Bedingungen, das heißt nach einer möglichen Dekompressionsphase des Materials, durchgeführt wurden, kann dieser Einfluss aufgrund des Umgebungsdrucks hervorgerufen worden sein. Ansonsten sind aus den Ergebnissen keine Zusammenhänge zwischen Dichte und Parametern wie FIR, FER,  $c_f$  oder dem Wassergehalt  $w$  zu ermitteln. Weitere Ergebnisse zu Untersuchungen mit diesem Versuchsaufbau liegen als Veröffentlichung nicht vor.

### Zusammenfassung

In der Tabelle 3-6 sind Versuche verschiedener Forschungseinrichtungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen zusammengefasst. Es hat sich gezeigt, dass vor allem die Drainagezeit und die Dichte von Schäumen untersucht wurden. Vereinzelt erfolgte zudem die Bestimmung der Kompressibilität und der Bläschengröße der Schäume. Die wesentlichen Eigenschaften von Schäumen, die in den eigenen Untersuchungen bestimmt werden sollen, sind in Abschnitt 4.1.2 erläutert.

Tabelle 3-6: Übersicht zu von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen durchgeführten Versuchen mit Schäumen

		Deutschland	Frankreich	Großbritannien	EFNARC	Italien
Material	Bestimmung der					
Schaum	Dichte	x	x	x		x
	Drainagezeit			x	x	x
	Kompressibilität	x	x			
	Bläschengröße					x

In der Tabelle 3-7 sind verschiedene Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen zusammengefasst. Vor allem wurden Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit und zur Wasserdurchlässigkeit des Materials durchgeführt. Die wesentlichen Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen sind bereits in Abschnitt 2.3.1 dargestellt worden. Die in eigenen Untersuchungen zu bestimmenden Eigenschaften beschreibt Abschnitt 4.4.2.

Tabelle 3-7: Übersicht zu von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen durchgeführten Versuchen mit konditionierten Lockergesteinen

		Deutschland	Frankreich	Niederlande	Großbritannien	EFNARC	Italien	Europa
Material	Bestimmung der							
konditioniertes Lockergestein	Dichte	x		x				x
	Verarbeitbarkeit		x			x	x	x
	Wasserdurchlässigkeit	x	x	x			x	x
	Scherfestigkeit			x	x			
	Stabilität					x		
	Kompressibilität	x			x			
	Adhäsion	x	x					x
	Penetration		x					
	Einflüsse bei der Durchmischung		x					
	Einflüsse auf den Schneckenförderer			x	x		x	

### 3.4. Motivation für weitergehende Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein

Für die Bestimmung der Einsatzgrenzen von Erddruckschilden sind Untersuchungen sinnvoll, bei denen Böden mit gezielt variierten Kornverteilungslinien konditioniert und deren Eigenschaften bestimmt werden. Sofern die Eigenschaften den zu definierenden Anforderungen an konditionierte Lockergesteine entsprechen, sollte die Möglichkeit bestehen, den Boden mit einem Erddruckschild aufzufahren. Da Erddruckschilde vielfach außerhalb der klassischen Einsatzbereiche in kohäsionslosen Böden eingesetzt wurden (vgl. Abbildung 3-3), sind Untersuchungen in grobkörnigen Lockergesteinen erforderlich.

Durch die Nutzung von unterschiedlichen Böden sowie verschiedenen Konditionierungsmitteln und -mengen sollte das Material so aufbereitet werden, bis es die erforderlichen Eigenschaften aufweist. Diese Eigenschaften sind in entsprechenden Versuchen zu bestimmen. Die Konditionierungsmittel können die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine beeinflussen, so dass auch die Eigenschaften der Konditionierungsmittel mit geeigneten Methoden zu ermitteln sind. Da diese durch verschiedene Parameter verändert werden können, ist die Bestimmung der Auswirkungen der Veränderung dieser Parameter erforderlich. Die Konditionierung kann die Größe des effektiven Stützdrucks aufgrund unterschiedlicher Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke beeinflussen (vgl. [3]). Von großer Bedeutung für die Ermittlung des effektiven Stützdrucks ist da-

her die in Untersuchungen zu ermittelnde Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials.

Für einen erfolgreichen Vortrieb zählen in Anlehnung an Abschnitt 2.3.1 vor allem nachfolgende Eigenschaften des konditionierten Lockergesteins:

- Eine geeignete Verarbeitbarkeit, um ein adäquates Fließverhalten des Stützmediums zu gewährleisten.
- Eine hohe Kompressibilität des konditionierten Materials, um verfahrenstechnisch bedingte Stützdruckschwankungen zu dämpfen.
- Eine hinreichend geringe Wasserdurchlässigkeit, um einen unkontrollierten Wasserzutritt in die Schildmaschine zu vermeiden und destabilisierende Sickerströmungen von der Ortsbrust in die Abbaukammer zu verhindern oder zu verringern.
- Die Dichte des konditionierten Materials, um den Verlauf des Stützdrucks an der Ortsbrust abzuschätzen.
- Die Scherfestigkeit des Stützmediums zur Bewertung des Einflusses der Konditionierung auf das Drehmoment des Schneidrads.
- Die Stabilität des Materials nach der Förderung aus dem Tunnel, um eine Aussage zur Verdichtung des möglicherweise zu deponierenden Materials zu erreichen.

Zudem sollten die jeweiligen Konditionierungsmittel (Schäume bzw. Polymerschäume, Polymere bzw. Polymersuspensionen und Feinstoffsuspensionen) unterschiedlichen Anforderungen genügen.

Die bisherigen Empfehlungen zu Einsatzbereichen von Erddruckschilden basieren auf Erfahrungen bei durchgeführten Vortrieben, bei denen einzelne Lockergesteine konditioniert wurden (vgl. Abschnitt 3.2). Allerdings erfolgten weder in der Praxis noch an verschiedenen Forschungseinrichtungen standardisierte Versuche, um die Eigenschaften der Materialien zu bestimmen und vergleichen zu können (vgl. Abschnitt 3.3.2). Eine Definition der konkreten Anforderungen an konditionierte, kohäsionslose Lockergesteine erfolgte bislang nicht. Zudem wurden keine standardisierten Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften der Konditionierungsmittel zu ermitteln. Vielmehr nutzten verschiedene Forschungseinrichtungen Schaumanlagen mit unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten. Ein Nachweis, dass die mit diesen Anlagen hergestellten Schäume mit auf Erddruckschildmaschinen produzierten Schäumen vergleichbar sind, erfolgte nicht (vgl. z. B. [105, 122, 155]). Zudem liegen keine systematischen Untersuchungen des Einflusses der durch die Konditionierung veränderten Wasserdurchlässigkeit der konditionierten Materialien auf die Ermittlung des Stützdrucks vor.

Aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Forschung ist es nicht möglich, vergleichbare Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen durchzuführen, die Einsatzbereiche von Erddruckschilden in kohäsionslosen Lockergesteinen auf Grundlage von Versuchsergebnissen abzuschätzen sowie den Einfluss der Konditionierung auf die Bestimmung des effektiven Stützdrucks zu ermitteln. Daher erfolgen im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen, die in der bisherigen Forschung noch keine Berücksichtigung gefunden haben. Zu den in den nachfolgenden Kapiteln eingehend erläuterten Untersuchungen gehören:

- Erstellen systematischer Untersuchungsmethoden zur reproduzierbaren Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen (Kapitel 4).
- Versuche zu Konditionierungsmitteln, u. a. bei Nutzung einer Schaumanlage mit Einstellungen wie auf einer Erddruckschildmaschine zur Gewährleistung einer realitätsnahen Schaumproduktion (Kapitel 5).
- Gezielte Variation von Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und Lockergesteinen bei der Herstellung von konditionierten Böden, um die Einsatzgrenzen von Erddruckschilden abzuschätzen (Kapitel 6).
- Bestimmung des Einflusses der konditionierten Lockergesteine zur Stützdruckermittlung mittels numerischer Berechnungen und Variation der wesentlichen Parameter des Baugrunds und des konditionierten Lockergesteins (Kapitel 7).

## 4. Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein

Nachfolgend erfolgt zunächst abschnittsweise die Ermittlung der wesentlichen Einflüsse sowohl auf die üblicherweise eingesetzten Konditionierungsmittel Schäume, Polymerschäume, Polymersuspensionen und Feinstoffsuspensionen als auch auf die mit diesen Mitteln konditionierten Lockergesteine. Aufgrund dieser Einflüsse werden in diesem Kapitel Konzepte zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften erstellt. Den Abschluss eines jeden Abschnitts bildet eine Beschreibung von ausgewählten Methoden, um die maßgebenden Eigenschaften zu ermitteln. Zudem werden Versuchsergebnisse vorgestellt, die die Eignung der jeweiligen Methoden aufzeigen.

### 4.1. Konditionierung mit Schäumen

#### 4.1.1. Einflussparameter auf die Herstellung von Schäumen

Bei den Einflüssen auf die Herstellung von Schäumen kann zwischen Einflüssen durch Schaumngredienzen und maschinentechnischen Einflüssen unterschieden werden (vgl. Tabelle 4-1). Vor allem die nachfolgend dargestellten und im Anschluss daran detailliert erläuterten Einflüsse können für die Herstellung von Schaum relevant sein.

Tabelle 4-1: Einflüsse auf die Herstellung von Schäumen unterteilt in Einflüsse infolge von Schaumngredienzen und maschinentechnischen Einstellungen

Einflüsse auf die Herstellung von Schäumen infolge	
von Schaumngredienzen	von maschinentechnischen Einstellungen
Produkt und Konzentration $c_f$ des Tensids	Drücke der Fördermedien im Leitungssystem
Produkt und Konzentration $c_p$ eines möglicherweise einzubringenden Polymers	Länge der Förderleitung
Volumenstrom des Schaums $Q_F$	Art und Aufbau der Schaumlanze
Foam Expansion Ratio FER	

#### *Einflüsse infolge von Schaumngredienzen*

Die Zusammensetzung der zur Verfügung stehenden Konditionierungsmittel ist vom Hersteller vorgegeben und daher nicht weiter beeinflussbar, so dass die **Produkte** als nicht veränderbare Komponenten des Schaums anzusehen sind. Üblicherweise empfehlen die Tensidhersteller eine Bandbreite der **Tensidkonzentration**  $c_f$  zwischen  $c_f = 1,0$  und  $7,0$  %. Die Tensidkonzentration ist von den Volumenströmen des Tensids und Wassers abhängig und kann auf Schildmaschinen mithilfe von Ventilen gesteuert werden. In Abhängigkeit der erforderlichen FIR und der Vortriebsgeschwindigkeit ist ein Gesamtvolumenstrom erforderlich, der auf Schildmaschinen üblicherweise durch insgesamt 6 bis 12 Schaumlanzen gewährleistet wird. Zur Produktion des Schaums mit einer einzelnen Schaumlanze wird die Tensidlösung für alle Schaumlanzen gemeinsam hergestellt und anschließend mittels Leitungssystem, Steuerventilen und Durchflussmessern auf die einzelnen Schaumlanzen in den erforderlichen Mengen aufgeteilt. Der Volumenstrom der Luft und der der Tensidlösung kann

für die unterschiedlichen Schaumlanzen separat gesteuert werden. Auf diese Weise lassen sich für die jeweiligen Schaumlanzen unterschiedliche FIR und FER einstellen, während die  $c_f$  für alle Schaumlanzen unverändert bleibt.

Für die Zugabe von Polymeren zum Schaum stehen verschiedene **Produkte** zur Verfügung, die in ihrem Aufbau als unveränderlich anzusehen sind. Durch die Steuerung der Volumenströme des Polymers im Vergleich zum Volumenstrom von Wasser und Tensid können die **Polymerkonzentration  $c_p$**  variiert und die Eigenschaften der Tensidlösung beeinflusst werden. Da das Polymer der Tensidlösung zugeführt wird, ist sowohl die Polymerkonzentration  $c_p$  als auch die Tensidkonzentration  $c_f$  für alle Schaumlanzen gleich.

Die Volumenströme der Luft und der Tensidlösung beeinflussen sowohl den **Volumenstrom des Schaums  $Q_F$**  als auch die **FER** (vgl. Gleichung 2.21). Die Volumenströme des Schaums können z. B. im Durchschnitt bis zu 400 l/min, in Einzelfällen bis zu 900 l/min betragen, während die FER üblicherweise zwischen 8 und 25 schwanken kann (vgl. Tabelle 3-4).

#### *Einflüsse infolge von maschinentechnischen Einstellungen*

Die **Drücke der Fördermedien** von Wasser, Tensid und Luft im Leitungssystem zählen zu den maschinentechnischen Einflüssen. Die Drücke sind mithilfe von Druckreglern auf der Schildmaschine veränderbar und lassen sich an den zu erwartenden Stützdruck während des Vortriebs anpassen. Da die Geschwindigkeit der Schaumingredienzien vom Druck abhängig ist, kann der jeweilige Förderdruck Einfluss auf die Geschwindigkeit der Schaumingredienzien und so auch auf den Durchmischungsgrad in der Schaumlanze haben.

Die **Länge der Förderleitung** kann aufgrund der Transportzeit und der Wandrauigkeit die Eigenschaften des Schaums beeinflussen.

Die Durchmischung von Luft und Tensidlösung ist von der **Art und dem Aufbau der Schaumlanzen (SL)** abhängig. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass in einem vorderen Bereich Luft und Tensidlösung vermischt und anschließend durch einen Störkörper geführt werden, dessen Aufbau unterschiedlich ausgebildet sein kann. In Abbildung 4-1 sind Schemata und Fotos von zwei unterschiedlichen, auf Erddruckschilden bereits eingesetzten Schaumlanzen dargestellt.

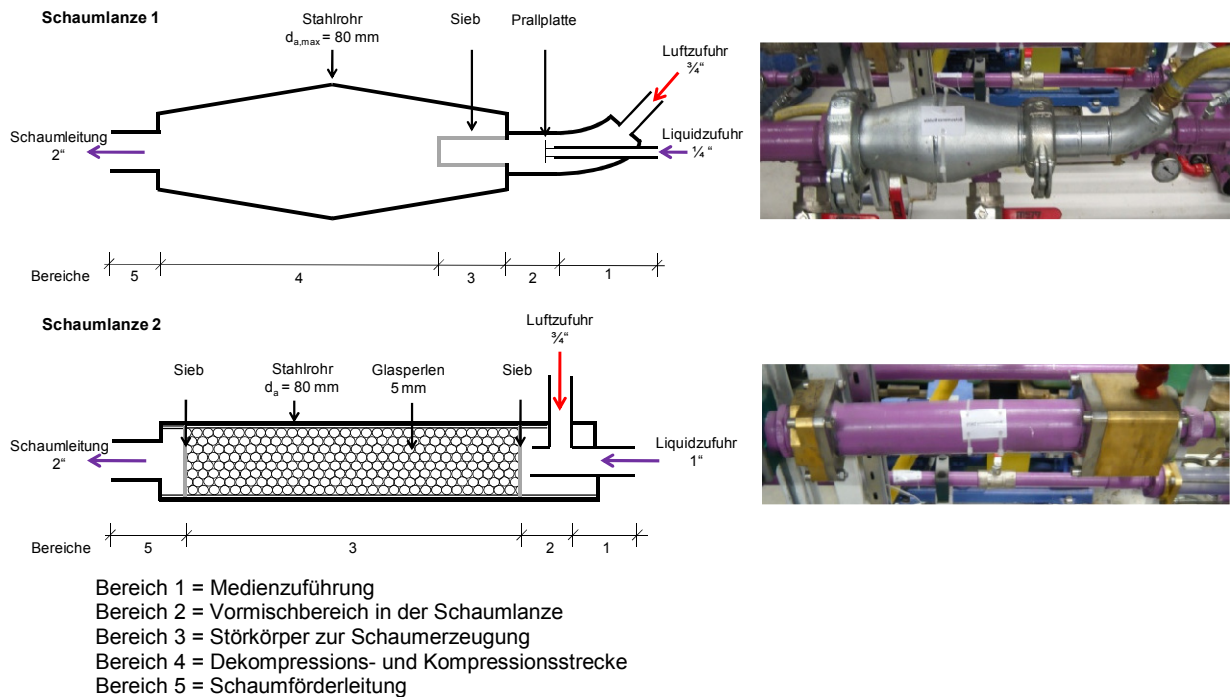


Abbildung 4-1: Schemata und Fotos zweier unterschiedlicher Schaumlanzen

Bei Schaumlanze 1 wird das Liquid durch eine  $\frac{1}{4}''$  Zuführung eingebracht und trifft dort auf eine Prallplatte, von der sich die Tensidlösung radial verteilt. Die zugeführte und an der Prallplatte vorbeigeführte Luft ermöglicht die Mitnahme der liquiden Partikel bis zu einem Sieb. Das Sieb verursacht Verwirbelungen, so dass Schaumbblasen entstehen. Zur möglichen Qualitätsverbesserung durchströmt der Schaum eine durch eine Querschnittsvergrößerung und -verringerung verursachte Dekompressions- bzw. Kompressionsstrecke und wird anschließend mit einem Leitungssystem von  $2''$  Innendurchmesser zur Austrittsöffnung gefördert.

Bei Schaumlanze 2 werden Luft und Liquid im vorderen Bereich zusammengemischt und beide Medien anschließend durch ein Sieb und eingebrachte Glaskugeln mit einem Durchmesser von  $5 \text{ mm}$  geführt. Diese verursachen Verwirbelungen, so dass Schaum entstehen kann. Der Schaum wird danach durch ein die Glaskugeln zurückhaltendes Sieb und eine  $2''$  Leitung transportiert. Das Prinzip der Schaumlanze 2 ähnelt dem Prinzip der Schaumlanzen, die in der Literatur [108, 122] beschrieben sind.

#### 4.1.2. Eigenschaften von Schäumen

Zur Qualitätsbestimmung von im Tunnelbau eingesetzten Tensidschäumen werden bislang keine allgemein angewandten Standardverfahren genutzt, so dass Schäume üblicherweise hinsichtlich verschiedener Eigenschaften zu charakterisieren sind.

Der Schaum sollte eine Dichte entsprechend der eingestellten Volumenanteile seiner Komponenten besitzen, so dass die Tensidlösung und die Luft vollständig vermischt werden. Die Untersuchungen von [123] zeigten jedoch bei gleichen Einstellungen große Unterschiede im

Aufschäumverhalten auf, die ggf. in der Nutzung verschiedener Tenside begründet sein könnten.

Es ist erforderlich, dass die konditionierten Lockergesteine und auch die hergestellten Tensidschäume für die Dauer des Aufenthalts in der Abbaukammer eine ausreichende Stabilität aufweisen. Nach der Förderung aus der Abbaukammer sollen die Schäume möglichst zeitnah drainieren und in die Ausgangsstoffe der Dispersion, Luft und Tensidlösung, übergehen, um dadurch das Volumen des konditionierten Bodens zu reduzieren.

Durch die Drainage des Liquids und das Trennen von flüssigen und gasförmigen Schaumbestandteilen kann das aus Schaumbläschen bestehende Volumen abnehmen. Auf diese Weise ist auch das Kompressionsverhalten von Schäumen beeinflussbar.

Um Volumenschwankungen des mit Schaum konditionierten Stützmediums ausgleichen zu können, sollte der Schaum eine homogene Struktur hinsichtlich der Schaumbläschen mit geringer Größe aufweisen (vgl. [105]).

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Anforderungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Tensidschäumen ableiten:

- Ermittlung der **Dichte** des Schaums, um die prozentualen Volumenanteile der Ausgangsstoffe Luft und Tensidlösung zu bestimmen und so eine Aussage zum Aufschäumverhalten zu erhalten.
- Bestimmung des **Drainageverhaltens**, um Aussagen zur zeitabhängigen Stabilität und Drainage des Schaums treffen zu können.
- Ermittlung des **Kompressionsverhaltens**, um das druckabhängige Volumen des Schaums zu ermitteln.
- Bestimmung der **Durchmesser der Schaumbläschen** zur Beurteilung einer homogenen Struktur des Schaums.

#### 4.1.3. Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen

Für die Untersuchungen zur Bestimmung der Einflüsse von maschinentechnischen Parametern auf die Eigenschaften der Schäume ist eine realitätsnahe Abbildung der Verfahrenstechnik der Schaumherstellung mit Volumenströmen und Schaumlanzen wie auf einem Erddruckschild notwendig. Aus diesem Grund erfolgt in den eigenen Versuchen die Nutzung einer Schaumanlage, die einen annähernd gleichen Aufbau und ähnliche Einstellungsmöglichkeiten wie eine Schaumanlage auf Erddruckschildmaschinen hat. Mit der in Abbildung 4-2 dargestellten Schaumanlage sind Untersuchungen zur Bestimmung der Einflüsse auf Schäume infolge der Variation der Bestandteile der Schaumingredienzien und der maschinentechnischen Parameter durchführbar.



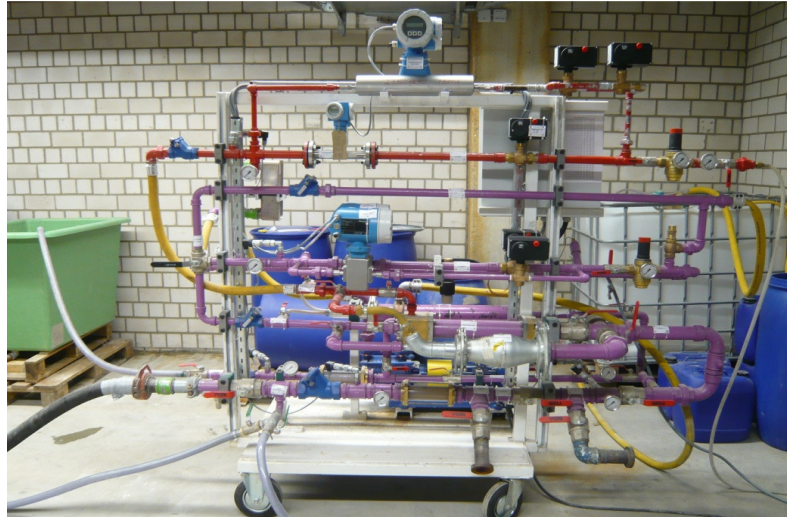
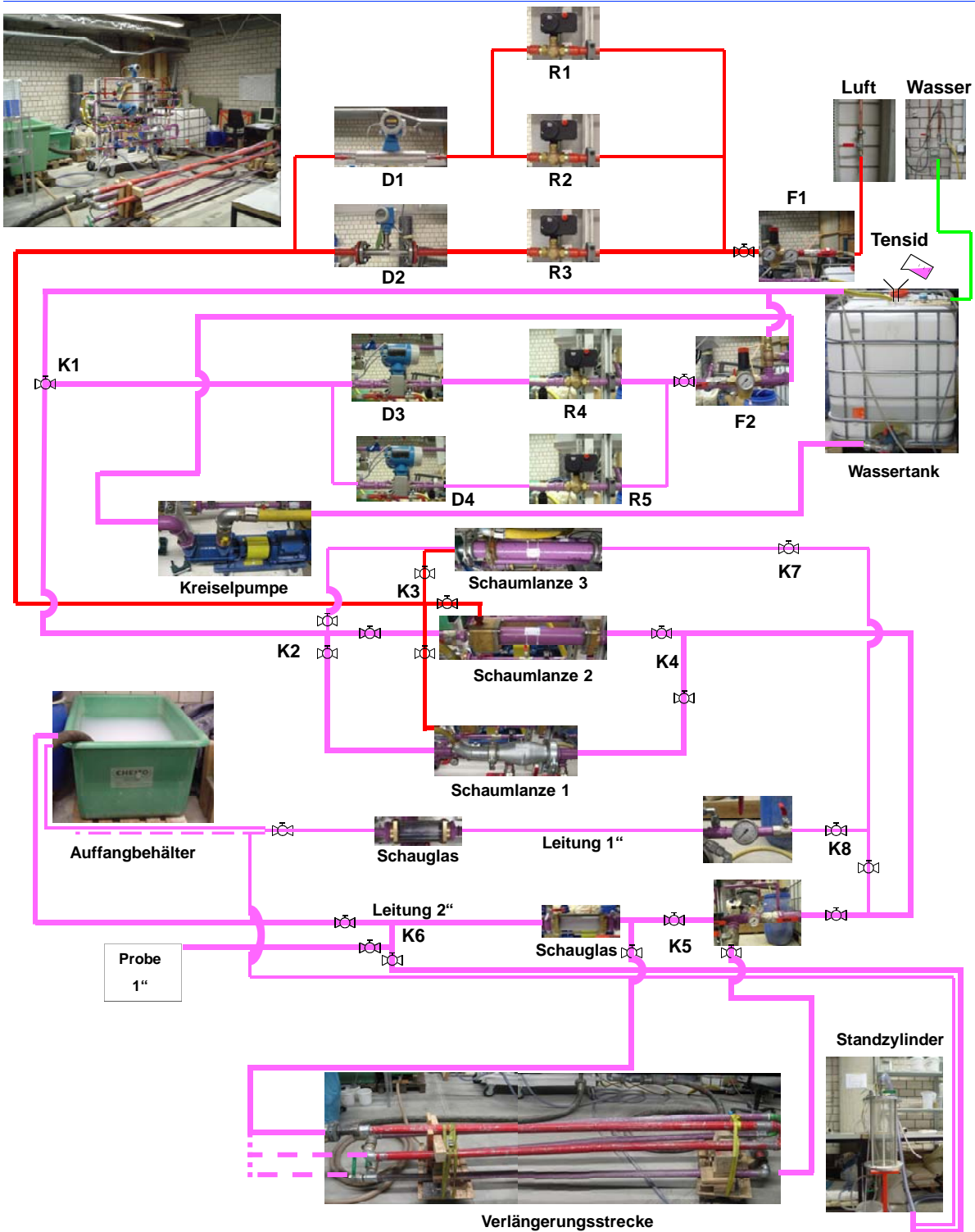


Abbildung 4-2: Darstellung der im Labor des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum genutzten Schaumanlage [26]

Mit den in der Praxis eingesetzten Lanzen 1 und 2 ließen sich auf der eigenen Schaumanlage Volumenströme bis zu  $Q_F = 650 \text{ l/min}$  erreichen. Zudem wurde eine Labor-Schaumlanze (Schaumlanze 3) installiert, die sich für Volumenströme bis  $Q_F = 70 \text{ l/min}$  eignet. Durch Regelungsventile können je eine von den drei Schaumlanzen genutzt und die erforderlichen Durchflüsse und Drücke eingestellt werden. Für die Förderstrecke der Schaumlanze 3 wurden aufgrund geringerer Volumenströme auch kleinere Leitungsquerschnitte installiert. Tabelle 4-2 zeigt verschiedene Einstellungsmöglichkeiten von Schaumanlagen auf Erddruckschilden sowie die Randbedingungen der im Labor genutzten Schaumanlage.

Tabelle 4-2: Übliche Einstellungsmöglichkeiten von Schaumanlagen auf Erddruckschilden und Randbedingungen der in Versuchen verwendeten Schaumanlage

Schaumlanze	Erddruckschild	Labor	
	1 und 2	1 und 2	3
Tensidkonzentration $c_f$	bis 7 %	bis 7 %	bis 7 %
Schaumvolumenstrom $Q_F$	bis 900 l/min	bis 650 l/min	bis 70 l/min
FER	bis ca. 35	bis ca. 30	bis ca. 30
Förderdruck	bis 5 bar	bis 5 bar	bis 5 bar
Leitungsquerschnitt	2"	2"	1"
Förderlänge	zwischen 15 und 30 m	0 bis 30 m	0 m
Visuelle Kontrolle	Schaugläser	Schaugläser	Schaugläser



D = Durchflussmesser, F = Förderdruckregler, R = Regelventile, K = Kugelhähne

Abbildung 4-3: Schemata der im Labor verwendeten Schaumanlage in Anlehnung an [64]

Abbildung 4-3 zeigt schematisch den Aufbau der genutzten Schaumanlage. Die Herstellung der Tensidlösung erfolgt bei dieser Schaumanlage im Unterschied zur Herstellung auf einer Schildmaschine diskontinuierlich.

Wasser und Tensid werden in einem ausgewählten Verhältnis (gemäß Gleichung 2.20) in einen 1.000 l fassenden Tank (in Abbildung 4-3 rechts oben) gegeben und anschließend über eine Kreiselpumpe mit einer Leistung von max. 5,5 kW und einem maximalen Volumenstrom von bis zu 125 l/min ca. 10 Minuten in den Behälter zurückgepumpt, bis eine ausreichende Durchmischung erreicht wird. Zur Förderung der Tensidlösung saugt die Pumpe das Material an und fördert dieses durch einen Förderdruckregler (Bezeichnung F2) sowie in Abhängigkeit der Durchflussmengen durch eine der parallel verlaufenden Leitungen mit installierten Regelventilen (R4 und R5) und magnetisch-induktiven Durchflussmessern (D3 und D4). Dabei dient die 1“ Leitung für die Herstellung eines Schaums mit den Schaumlanzen 1 und 2, während die ½“ Leitung für die Schaumherstellung mit Laborschaumlanze 3 vorgesehen ist. Abhängig von der Einstellung des Hebels (K1) wird die Tensidlösung zurück in den Wassertank oder zu den Schaumlanzen 1 bis 3 gepumpt.

Die Druckluftzufuhr zur Schaumanlage erfolgt durch das Leitungsnetz der Versuchshallen, dessen Betriebsdruck zwischen 6 und 7 bar beträgt. Mithilfe des Druckreglers (F1) kann der Luftdruck verändert werden. In Abhängigkeit der ausgewählten Schaumlanze sind die jeweiligen Leitungen, Regelventile (R1 bis R3) und Durchflussmesser (D1 und D2) zu nutzen. Durch Öffnen und Verschließen der Ventile (K2 und K3) können die Volumenströme von Luft und Tensidlösung den jeweiligen Schaumlanzen zugeführt werden.

Die Funktionsweise der Schaumlanzen 1 und 2 wurden bereits in Abschnitt 4.1.1 erläutert. Bei Schaumlanze 3 ist ein Austausch des Störkörpermateriale möglich. Zudem kann durch Variation der Länge des Störkörpers sowie des Abstandshalters das Volumen des Störkörpers verändert werden. Der Aufbau dieser Schaumlanze 3 ähnelt dem Aufbau von Schaumlanze 2 und ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

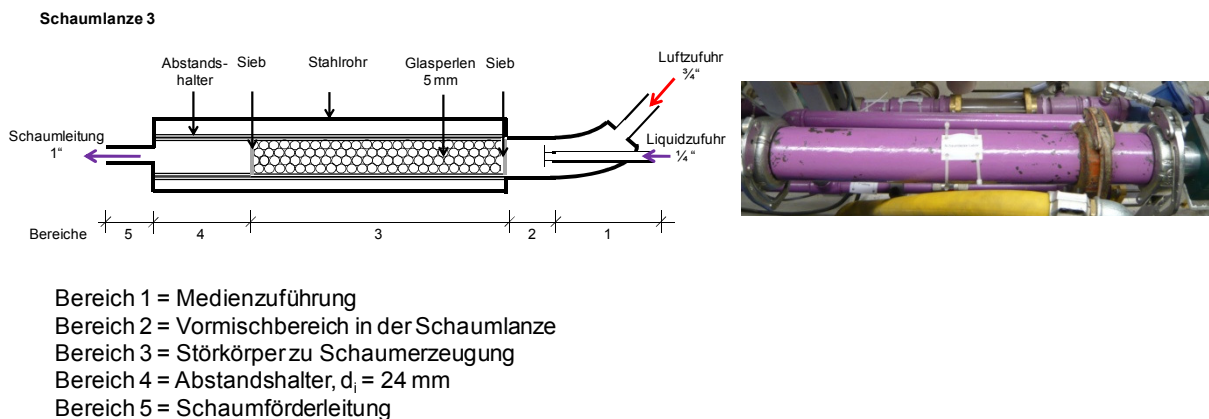


Abbildung 4-4: Schemata und Foto der installierten Schaumlanze 3

Für die Förderung des Schaums sind bei der genutzten Schaumanlage wie auf einer Erd-druckschildmaschine Stahlleitungen mit einem 2“ Durchmesser installiert. Um eine realitätsnahe Förderlänge von bis zu 30 m abzubilden, stehen eine Verlängerungsstrecke mit insgesamt fünf Mal vier Metern Stahlleitung sowie zwei Schläuche mit einer Länge von je fünf Metern zur Verfügung. Die Verlängerungsstrecke kann durch Öffnen und Verschließen von Ku-

gelhähnen auf 0, 14 bzw. 22 m verkürzt werden. Zusätzlich wurde die Stahlleitung mit dem Querschnitt von 1" für Schaumlanze 3 ohne Verlängerungsstrecke installiert.

Die Entnahme von Schaum aus dem Leitungssystem ist an unterschiedlichen Stellen möglich. Sowohl die 1" als auch die 2" Leitung haben am Ende einen Gewebeschlauch jeweils des gleichen Durchmessers, durch den Schaumproben entnommen werden können. Zusätzlich bietet ein Anschluss (im Bereich von K6) an der 2" Leitung die Möglichkeit, Schaum über einen Gewebeschlauch mit dem Durchmesser von 1" zu entnehmen oder in einen angeschlossenen Standzylinder zu fördern.

Für die Untersuchungen zur Dichte, Drainagezeit und Bläschengröße (vgl. Abschnitt 4.1.4) werden Schaumproben am Ende des jeweiligen Gewebeschlauchs entnommen. Für die Kompressionsversuche wird der Schaum in den Standzylinder eingebracht.

Während der Regulierung der Durchflüsse von Tensidlösung und Luft entsteht Schaum, der nicht untersucht werden soll, da dieser nicht den Anforderungen hinsichtlich der FER entspricht. Der Schaum wird in Auffangbehälter mit einem Fassungsvermögen von 550 Litern gefördert.

Zur Variation der Tenside während der Schaumherstellung wurden vier Produkte ausgewählt, die bereits häufig zur Schaumherstellung auf Erddruckschilden im Einsatz waren. Die genutzten Produkte sind nachfolgend als Produkt 1, Produkt 2, Produkt 3 und Produkt 4 bezeichnet. Das erste Produkt ist nach Herstellerangabe mit einer  $c_f$  von 1,0 bis 5,0 % für den Einsatz in wassergesättigten Lockergesteinen geeignet. Bei einer Konzentration zwischen 2,0 und 6,0 % kann Produkt 2 als polymerbasiertes Tensid genutzt werden, um die Wasserdurchlässigkeit zu reduzieren und eine ausreichende Verarbeitung des Bodens zu gewährleisten. Produkt 3 ist nach Information des Herstellers vor allem für die Injektion in feinkörnigen Böden mit einer Tensidkonzentration zwischen 0,5 und 3,0 % zu verwenden. Das vierte Produkt ist bei einer Konzentration bis 3,0 % in allen Lockergesteinen einsetzbar.

Die Tensidkonzentration  $c_f$  liegt bei den ausgewählten Produkten im Bereich von 0,5 bis 6,0 %. Da die Kosten des Tensids die Kosten des Wassers pro Liter deutlich übersteigen, bietet sich aus ökonomischen Gründen i. d. R. die Nutzung einer niedrigen Tensidkonzentration bei Gewährleistung der erforderlichen Eigenschaften des Schaums und des konditionierten Lockergesteins an. Für Vergleiche zwischen den Konditionierungsmitteln wird eine einheitliche Konzentration von 3,0 % festgelegt, da diese  $c_f$  in der für alle vier Tenside empfohlenen Bandbreite liegt.

Die Auswertungen in Abschnitt 3.3.1 haben gezeigt, dass während eines Vortriebs vereinzelt Schaumvolumenströme bis zu  $Q_F = 900$  l/min und durchschnittlich bis zu  $Q_F = 400$  l/min pro Schaumlanze zu erzielen sind. Für die Auslegung von  $Q_F$  bei den eigenen Untersuchungen wurde der Mittelwert aus durchschnittlichem und maximalem Volumenstrom zu 650 l/min bestimmt, so dass die meisten Produktionsraten des Schaumvolumenstroms während des Vortriebs abgedeckt werden können. Die untere Grenze des Volumenstroms des Schaums ist in den Untersuchungen in Abhängigkeit der Schaumlanze zu bestimmen. Für Schaumlanze 3 sind Volumenströme zwischen  $Q_F = 40$  und 70 l/min angesetzt.

Bei Vortrieben mit EPB-Schilden werden üblicherweise Werte für die FER zwischen 8 und 25 genutzt und nur vereinzelt Schäume mit höheren oder niedrigeren Werten verwendet. Aufgrund der Auswertungen in Abschnitt 3.3.1 sind für die eigenen Untersuchungen diese FER einzustellen, die in dem nach [60] empfohlenen Bereich zwischen 5 und 30 liegen.

Durch Zugabe des Polymers 1 in unterschiedlichen Konzentrationen können die Einflüsse aufgrund des Polymeranteils auf die Eigenschaften des Schaums bestimmt werden. Die Dosierung liegt entsprechend der Vorgaben der Hersteller zwischen  $c_p = 1,0 \%$  und  $c_p = 5,0 \%$ . Zur Ermittlung des qualitativen Einflusses werden die Untersuchungen mit Schaumlanze 3 durchgeführt.

Sowohl die bei der Schaumherstellung genutzten Tenside Produkt 1 bis 4 bzw. Polymer 1 als auch die in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Polymere 2 und 3 wurden anonymisiert, da im Rahmen dieser Dissertation nur die zu entwickelnde wissenschaftliche Methodik Relevanz besitzt und Veränderungen von Eigenschaften einzelner Konditionierungsmittel aufgrund einer fortschreitenden Produktentwicklung möglich waren. Im Sinne einer wissenschaftlichen Nachvollziehbarkeit der Untersuchungen wurden die Produktidentifikationen am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb an der Ruhr-Universität Bochum hinterlegt.

Die Art und der Aufbau der Schaumlanze können wesentlichen Einfluss auf die Schaumproduktion haben. Für praxisnahe Untersuchungen mit Schaumvolumenströmen bis 650 l/min werden daher die Schaumlanzen 1 und 2 genutzt, während für Volumenströme bis 70 l/min Schaumlanze 3 eingesetzt wird.

Bei Schaumlanze 3 konnte zudem das Volumen des Störkörpers bzw. das verwendete Material verändert werden. Bei einem Durchmesser des Störkörpers von  $d_{\text{innen}} = 24 \text{ mm}$  wurde die Länge zwischen 0 und 59 cm in Abständen von ca. 10 cm variiert. Als Störkörpermaterialien dienten neben den üblicherweise auf Schildmaschinen eingesetzten Glaskugeln mit einem Durchmesser von 5 mm auch Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3 und 10 mm sowie PET-Röhrchen ( $d_{\text{außen}} = 3 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{innen}} = 1 \text{ mm}$ , Länge = 4 mm) (vgl. Abbildung 4-5).



Abbildung 4-5: Störkörpermaterialien bei Schaumlanze 3

Zur Förderung des Schaums sind die Einstellungen des Drucks der Tensidlösung und der Luft von der Höhe des Stützdrucks abhängig. Eigene Auswertungen von Betriebsdaten haben ergeben, dass auf Erddruckschildmaschinen Schäume größtenteils mit einem Förderdruck von bis zu 5 bar produziert werden. Da auch der Einfluss von geringeren Förderdrü-

cken zu überprüfen ist, erfolgen Versuche bei Drücken von 5, 4, 3 und 2 bar. Für die Einstellung des Förderdrucks wird der Druckregler F1 (siehe Abbildung 4-3) genutzt.

Für die Versuche steht eine Verlängerungsstrecke der Förderleitung mit einem Durchmesser von 2“ mit den Längen von 14, 22 und 30 m zur Verfügung. So war eine Ermittlung des Einflusses bei einer realitätsnahen Förderung des Schaums möglich. Da auf Schildmaschinen keine Förderleitungen mit einem Durchmesser von 1“ im Einsatz sind, wurde auf eine Förderung durch eine Verlängerungsstrecke des mit Lanze 3 produzierten Schaums verzichtet.

In Abhängigkeit des Schaumlanzentyps ist ein Konzept erarbeitet worden, um die in Tabelle 4-1 zusammengefassten Einflüsse auf die Eigenschaften von Schäumen zu bestimmen. Dieses Konzept ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Für jede Schaumlanze sind Referenzversuche vorgesehen, deren Einstellungsparameter rote Verbindungslinien kennzeichnen. Abweichend von diesen Einstellungen wird jeweils ein Parameter verändert, um den Einfluss dieses Parameters auf die Eigenschaften des Schaums zu ermitteln.

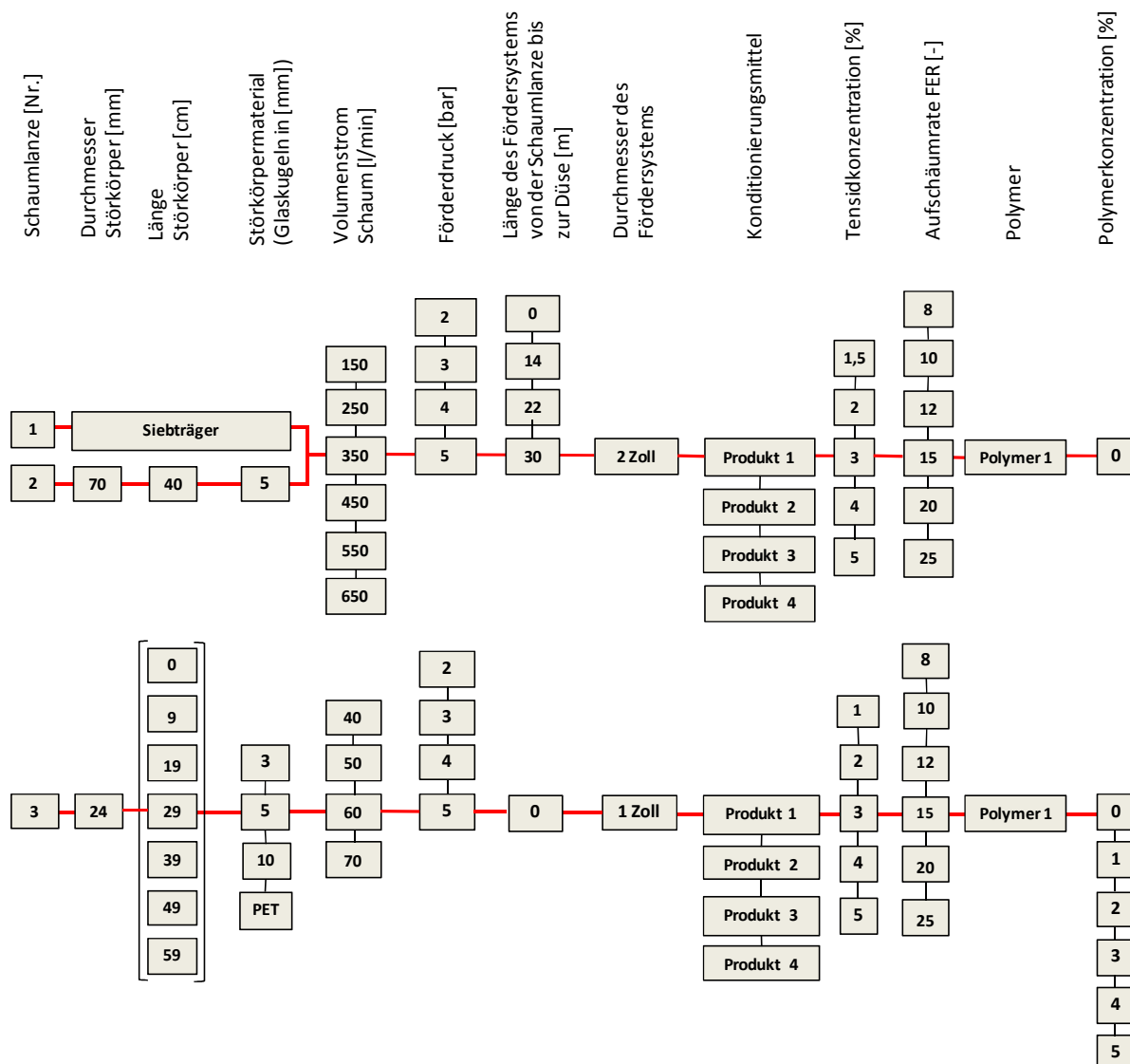


Abbildung 4-6: Konzept zur Bestimmung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Schäumen bei Nutzung unterschiedlicher Schaumlanzen (SL 1 und SL 2 oben, SL 3 unten)

#### 4.1.4. Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen

Zur Bestimmung der in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Eigenschaften von Schäumen stehen verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung, von denen einige bereits in Kapitel 3 erwähnt wurden. Die Ermittlung der Eigenschaften wird nachfolgend kurz beschrieben, wobei diese außerdem in der Anlage B ausführlich dargestellt sind.

##### *Dichte des Schaums*

Die Dichte des Schaums kann mittels Probenentnahme und Bestimmung von Gewicht und Volumen der Schaumproben hergeleitet werden. Da zwischen Dichte und FER ein direkter Zusammenhang besteht, liefert die gemessene Dichte eine Aussage zur FER und daher zum Aufschäumverhalten in Abhängigkeit der jeweiligen maschinentechnischen Einstellungen. Als ermittelte Aufschäumrate wurde die Abkürzung  $FER_{Ist}$  gemäß Gleichung 4.1 festgelegt.

$$FER_{Ist} = \frac{Q_F}{Q_L} = \frac{\rho_L}{\rho_F} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit  $FER_{Ist}$  = ermittelte Foam Expansion Ratio (engl.) = ermittelte Aufschäumrate [-]

$Q_F$  = Volumenstrom des Schaums [l/min]

$Q_L$  = Volumenstrom der Tensidlösung [l/min]

$\rho_F$  = Dichte des Schaums [kg/l]

$\rho_L$  = Dichte der Tensidlösung [kg/l]

Die Bestimmung der Schaumdichte erfolgte in ersten Versuchen mit Gefäßen mit unterschiedlichen Volumina und verschiedenen Verhältnissen zwischen Öffnungsweite und Höhe bei gleichbleibenden Einstellungen der Schaumherstellung ( $Q_F = 350$  l/min, SL 1 und 2, Verlängerungsstrecke = 0 m, Produkt 1, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %). Vor allem bei Behältern mit einem Volumen von 2,0 bis 6,0 l und einem Verhältnis vom Durchmesser zur Höhe (D/H) von 0,8 bis 1,2 ergaben sich nur geringe Abweichungen zur eingestellten Dichte. Bei Gefäßen mit großer Höhe und geringem Durchmesser wichen aufgrund sichtbarer Lufteinschlüsse die gemessenen Dichten z. T. deutlich von den Sollwerten ab. Für die Versuche zur Bestimmung der Dichte wurden daher Behälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 2,5 l und einem D/H-Verhältnis von ca. 0,9 genutzt. Ein für die Bestimmung der Schaumdichte genutzter Behälter ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

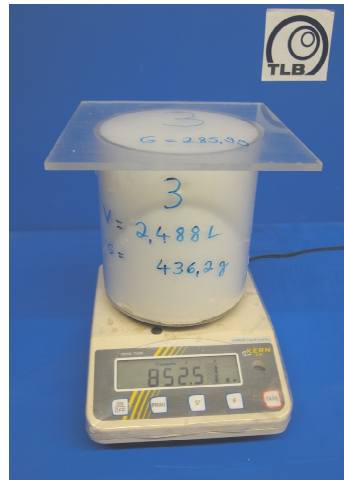


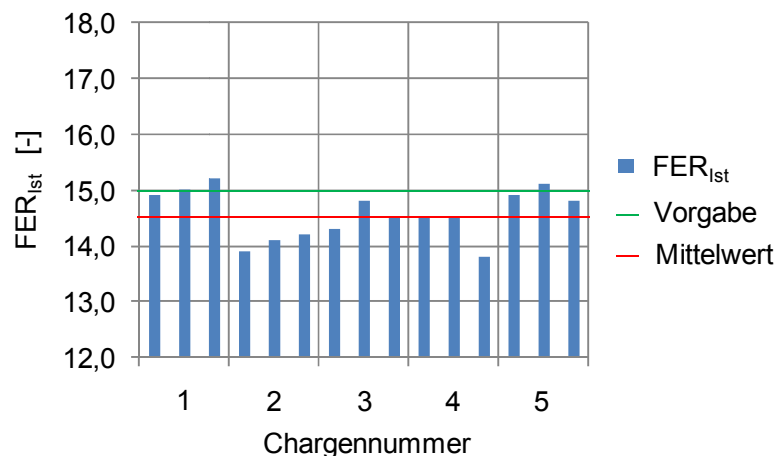
Abbildung 4-7: Behälter zur Bestimmung der Schaumdichte

Für die Bestimmung der Dichte von Schaum kann Gleichung 4.2 genutzt werden.

$$\rho_F = \frac{m_F}{V_F} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit  $m_F$  = Masse des Schaums [kg]  
 $V_F$  = Volumen des Schaums [l]  
 $\rho_F$  = Dichte des Schaums [kg/l]

Um die Streubreite der Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung der Dichte bei gleichen Parametern der Schaumproduktion ( $Q_F = 350$  l/min, SL 2, Verlängerungsstrecke = 0 m, FER 15,  $c_f = 3,0$  %, Produkt 1) zu ermitteln, erfolgten insgesamt 15 Versuche (jeweils 3 Versuche mit 5 Chargen), deren  $FER_{Ist}$  in Abbildung 4-8 dargestellt sind.



Schaum:  $Q_F = 350$  l/min, SL 2, FER 15,  $c_f = 3,0$  %, Produkt 1

Abbildung 4-8:  $FER_{Ist}$  von Schäumen

Die Werte der  $FER_{Ist}$  lagen zwischen 13,8 und 15,2 bei einem Mittelwert von 14,6. Damit ergibt sich eine maximale Streuung bei einer FER von  $\pm 0,8$  um den Mittelwert. Durch die Ermittlung der FER aus drei Einzelproben konnte die maximale Streuung auf  $\pm 0,5$  reduziert



werden. Die Standardabweichung betrug 0,4 bei einem relativen Fehler von 2,9 %. Die Differenz zwischen dem Mittelwert der vorgegebenen FER von 15,0 und dem Mittelwert der ermittelten FER von 14,6 war vermutlich auf den Aufbau und das Aufschäumvermögen der Schaumlanze zurückzuführen.

Bei den Probebehältern mit einem Volumen von ca. 2,5 l lag bei einer FER von 15,0 das theoretische Schaumgewicht bei ca. 167 g. Unter Berücksichtigung einer Messungengenauigkeit von  $\pm 2$  g während der Wägung des Behälters lässt sich der Genauigkeitsbereich der Wägung nach Gleichung 4.3 ermitteln. Auf Grundlage der angesetzten Ungenauigkeit kann die FER um  $\pm 0,2$  schwanken, so dass die zuvor ermittelten Werte der Abweichung von  $\pm 0,5$  auf Einflüsse während der Schaumherstellung hinweisen.

$$\frac{\rho_L}{\rho_F} = \frac{1000 \text{ g/l}}{\frac{167 \text{ g} + 2 \text{ g}}{2500 \text{ ml}}} = FER = 14,8 < FER = 15 = \frac{1000 \text{ g/l}}{\frac{167 \text{ g}}{2500 \text{ ml}}} < \frac{1000 \text{ g/l}}{\frac{167 \text{ g} - 2 \text{ g}}{2500 \text{ ml}}} = FER = 15,2 \quad (\text{Gl. 4.3})$$

mit  $FER =$  Foam Expansion Ratio (engl.) = ermittelte Aufschäumrate [-]  
 $\rho_F =$  Dichte des Schaums [g/l]  
 $\rho_L =$  Dichte der Tensidlösung [g/l]

#### Drainagezeit des Schaums

Der Versuch zur Bestimmung der Drainagezeit wurde in Anlehnung an [60] mit einem Trichter mit eingebauter Filterplatte durchgeführt. Die Drainagezeit beschreibt dabei die Zeitspanne zwischen dem Einfüllen von frisch hergestelltem Schaum in den Trichter und der Drainage des mit einer Waage gemessenen Gewichts der Tensidlösung aus dem Schaum in einen unterhalb des Trichters stehenden Messzylinder. Vor Zugabe von Schaum in den Trichter wurde die Filterplatte mit 50 ml Wasser gesättigt, um ein Durchströmen der Filterplatte mit dem Liquid zu gewährleisten. Unmittelbar nach der Schaumherstellung erfolgte das Einfüllen von 80 g Schaum in den Trichter und anschließend die Bestimmung der Zeiten, bis 10, 20, 30 und 40 g (bzw. 12,5 %, 25 %, 37,5 % und 50 %) der Menge der Tensidlösung aus der ursprünglichen Schaummasse drainierten. Abbildung 4-9 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Drainagezeiten mit Schaum.



Abbildung 4-9: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Drainagezeiten von Schäumen

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit dieser Untersuchung wurden insgesamt 3 Versuche mit gleichen Einstellungen (80 g Schaum, Filterplatte 1 (siehe Tabelle 4-3), SL 2,  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %) durchgeführt, deren Verläufe zur Drainagezeit in Abbildung 4-10 dargestellt sind. Die Drainagezeit für 40 g Liquid bzw. 50 % der drainierten Liquidmenge lag dabei zwischen 700 und 800 Sekunden bei einem Mittelwert von ca. 750 Sekunden. Bei einer Standardabweichung von 46 Sekunden betrug der relative Fehler durchschnittlich 9,9 %. Eine Reproduzierbarkeit im Rahmen dieser Genauigkeit ist gegeben.

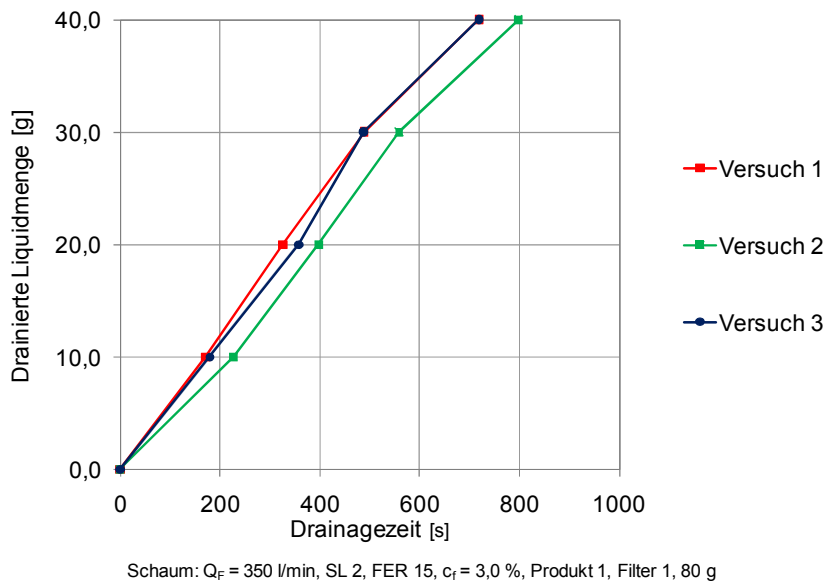


Abbildung 4-10: Drainagezeiten bei Verwendung von Filter 1 und Schaumlanze 2 sowie 80 g Schaum

In der Versuchsbeschreibung nach [60] sind keine genauen Randbedingungen z. B. hinsichtlich des Durchmessers des Trichters und der Porosität der Filterplatte angegeben. Daher wurde in Versuchen überprüft, ob die Geometrie und die Porosität einen Einfluss auf die Drainagezeit hatten. Die Eigenschaften der dafür genutzten vier Trichter sind in Tabelle 4-3 aufgeführt.

Tabelle 4-3: Eigenschaften von bei Versuchen zur Bestimmung der Drainagezeit genutzten Trichtern mit unterschiedlicher Geometrie und Porosität

Bezeichnung	Durchmesser	Höhe	Volumen	Porosität Filterplatte	Nennwerte der max. Porenweite	Kennzeichnung nach [76]
	[cm]	[cm]	[l]	[-]	[ $\mu$ m]	
Trichter 1	12,7	18,7	2,3	1	100 – 160	P160
Trichter 2	11,4	25,4	2,6	2	40 – 100	P100
Trichter 3	11,4	24,8	2,5	0	160 – 250	P250
Trichter 4	9,4	33,7	2,3	1	100 – 160	P160

Abbildung 4-11 zeigt jeweils die ermittelten Drainagezeiten in Abhängigkeit der genutzten Filter und Schaummengen für die mit Schaumlanze 1 produzierten Schäume (40 bzw. 80 g Schaum,  $Q_F = 350$  l/min, SL 1, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %, Produkt 1). Der gemessene Wert für 50 % der drainierten Tensidlösung von 40 g eingefülltem Schaum bei Filterplatte 2 ist aufgrund des nicht annähernd linearen Verlaufs vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen. Die

Werte der jeweiligen Drainageversuche liegen nah beieinander, so dass z. T. Unterschiede zwischen den Verläufen auf die Ungenauigkeit der Messmethode zurückzuführen sein könnten (vgl. Abbildung 4-10). Trotzdem können folgende Tendenzen bei den Verläufen festgestellt werden:

- Aufgrund der Verläufe der jeweiligen Kurven liegt ein zeitabhängiges Drainageverhalten vor.
- Die Porosität spielt bei Filterplatten gleichen Durchmessers aufgrund des Vergleichs der Ergebnisse von den Drainagezeiten z. B. mit Filterplatte 2 und 3 (jeweils 80 g eingefüllter Schaum) eine Rolle.
- Aufgrund des Vergleichs zwischen den Verläufen der Drainagezeit von 40 und 80 g Schaum muss kein linearer Zusammenhang zwischen der Schaummenge und der Drainagezeit bestehen.

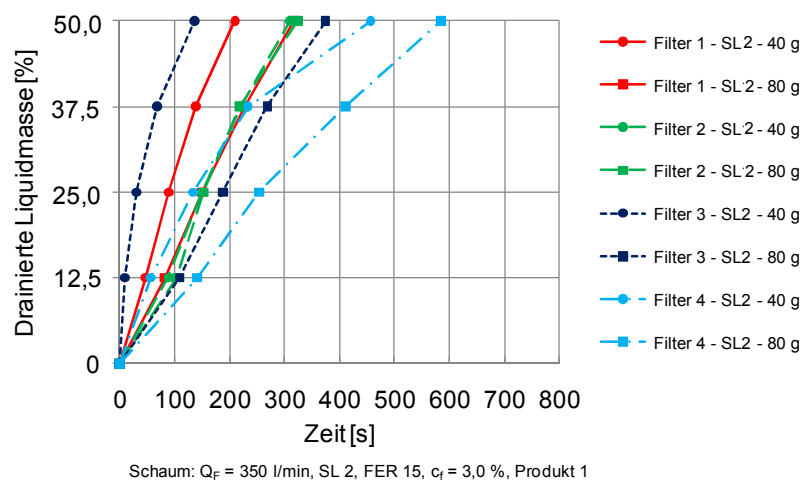


Abbildung 4-11: Drainagezeiten von mit Lanze 2 produzierten Schäumen bei Verwendung von verschiedenen Filtern sowie 40 g bzw. 80 g Schaum

In Anlehnung an [EFNARC 2005] wurde für die weiteren Versuche jeweils eine Schaummenge von 80 g genutzt. Die Verläufe der Drainagezeiten von 80 g Schaum der Filterplatte 1 und 2 bzw. 3 und 4 wiesen ähnliche Verläufe auf. Für eine einheitliche Vorgehensweise ist zur Durchführung der nachfolgenden Versuche Filter 1 gewählt worden.

#### Bestimmung des Bläschendurchmessers

Durch die Bestimmung des Durchmessers der Schaumbläschen lassen sich Zusammenhänge mit einzelnen Einstellungsparametern, wie der Wahl der Schaumlanze oder des Konditionierungsmittels, überprüfen. Die Durchmesser werden näherungsweise mit einem Risslineal oder genauer mittels Mikroskop und fotografischer Auswertung bestimmt. Abbildung 4-12 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Bläschendurchmessers mit dem Mikroskop bzw. des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Risslineal.

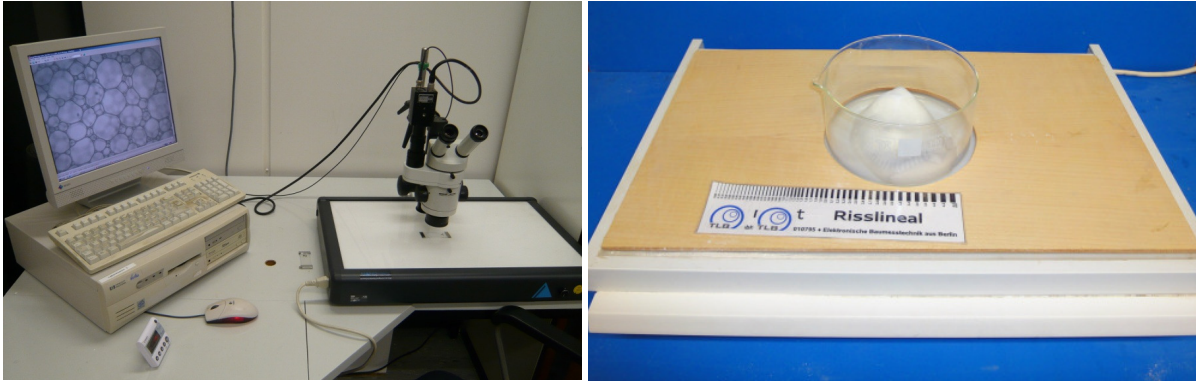
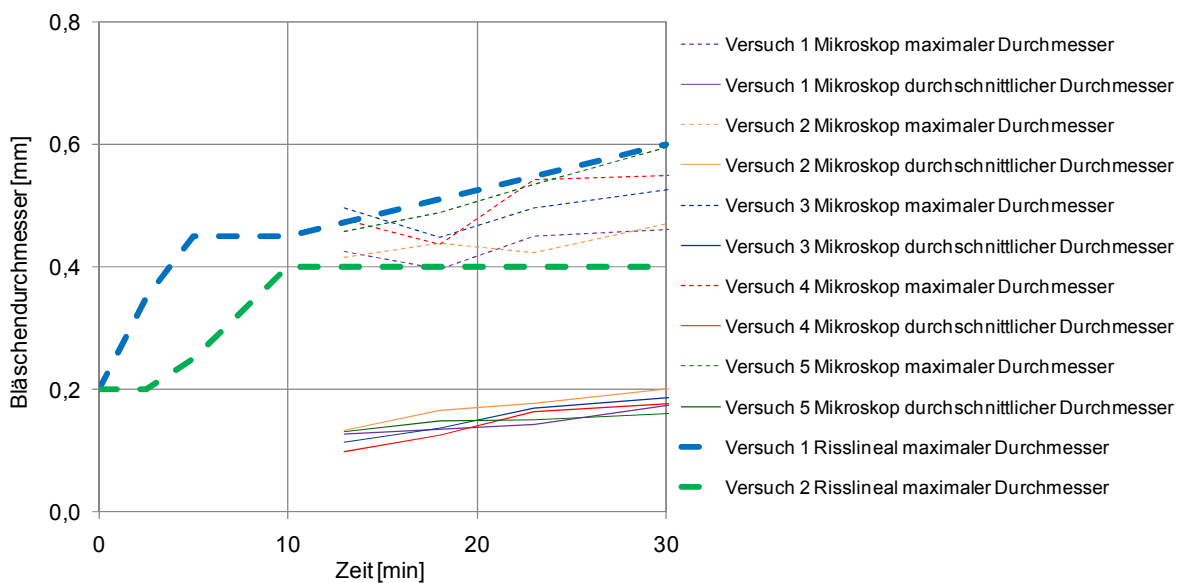


Abbildung 4-12: Versuchsaufbau zur Ermittlung des durchschnittlichen und maximalen Bläschen-durchmessers mit dem Mikroskop (links) sowie zur Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Risslineal (rechts)

Abbildung 4-13 zeigt u. a. den zeitlichen Verlauf des maximalen und durchschnittlichen Bläschendurchmessers von fünf Schäumen, die unter gleichen Parametern hergestellt wurden ( $Q_F = 350$  l/min, SL 2, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %). Da aufgrund des Transports des Schaums zum Mikroskop die erste Messung erst nach 13 Minuten erfolgte, beginnen die jeweiligen Verläufe im Diagramm ab diesem Zeitpunkt. Die durchschnittlichen, mit dem Mikroskop bestimmten Bläschendurchmesser lagen im Betrachtungszeitraum zwischen 0,1 und 0,2 mm (dünn durchgezogene Linien), während die maximalen Durchmesser (dünn gestrichelte Linien) Werte zwischen 0,4 und ca. 0,6 mm aufwiesen. Üblicherweise erfolgt eine Zunahme der Bläschendurchmesser mit der Zeit aufgrund des Drainageprozesses und der Diffusion kleinerer in größere Schaumbläschen [72]. Die Abweichung zum jeweiligen Mittelwert betrug beim maximalen Durchmesser  $\pm 0,07$  mm und beim mittleren Durchmesser  $\pm 0,02$  mm. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Ergebnisse der durchzuführenden Versuche in diesem Genauigkeitsbereich liegen.



Schaum:  $Q_F = 350$  l/min, SL 2, FER 15,  $c_f = 3,0$  %, Produkt 1

Abbildung 4-13: Bläschendurchmesser von Schäumen

Da die Nutzung eines Mikroskops zur Bestimmung des Schaumbläschendurchmessers während des Vortriebs aufgrund verschiedener Einflüsse als nicht baustellengeeignet angesehen wird, wurden Untersuchungen zum maximalen Durchmesser im Labor mit einem Risslineal durchgeführt. Weil diese Proben unmittelbar nach der Schaumproduktion untersucht werden konnten, beginnen diese Verläufe in der Abbildung 4-13 von Beginn der Untersuchungszeit an. Die Verläufe der zwei mit dem Risslineal bestimmten maximalen Bläschendurchmesser sind in der Abbildung als dicker gestrichelte Linien dargestellt. Sie umhüllen die Linien der mit dem Mikroskop bestimmten Verläufe zum maximalen Bläschendurchmesser. Bei den Untersuchungen ist ein zeitabhängiger Trend des maximalen Bläschendurchmessers zu erkennen. Außerdem ähneln sich die Verläufe der unterschiedlichen Verfahren stark. Zur Ermittlung von qualitativen Aussagen zum maximalen Durchmesser von Schaumbläschen wird bei den weiteren Untersuchungen das Risslineal genutzt.

#### *Kompressionsverhalten des Schaums*

Es besteht die Möglichkeit, das Kompressionsverhalten der hergestellten Tensidschäume in Versuchen mit einem in Abbildung 4-14 dargestellten Druckbehälter ( $d_{\text{innen}} = 16,5 \text{ cm}$ ,  $H = \text{ca. } 50 \text{ cm}$ ,  $\text{max. } p = \text{ca. } 4,0 \text{ bar}$ ) zu bestimmen. Unter Berücksichtigung des Gesetzes nach *Boyle-Mariotte* kann das theoretische Schaumvolumen unter Druck ohne Berücksichtigung einer möglichen Drainage für ein unter atmosphärischen Bedingungen in einen Behälter eingebrachtes Schaumvolumen bei konstanter Temperatur nach Gleichung 4.4 bestimmt werden.

$$V_{F,P} = \frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}} + p_{\text{supp}}} * \left( V_{F,\text{atm}} - \frac{V_{F,\text{atm}}}{FER} \right) + \frac{V_{F,\text{atm}}}{FER} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

- mit  $FER =$  Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]  
 $p_{\text{atm}} =$  atmosphärischer Druck [bar]  
 $p_{\text{supp}} =$  Druckdifferenz zwischen Stützdruck und atmosphärischem Druck [bar]  
 $V_{F,\text{atm}} =$  theoretisches Schaumvolumen unter atmosphärischen Bedingungen [l]  
 $V_{F,P} =$  theoretisches Schaumvolumen unter Druck [l]



Abbildung 4-14: Druckbehälter zur Bestimmung der Kompressibilität von Schäumen

## 4.2. Konditionierung mit Polymeren und Polymersuspensionen

Polymere können sowohl als zusätzliche Additive bei der Schaumherstellung als auch in flüssiger Form durch Suspensionen unterschiedlicher Konzentration dem Lockergestein zugeführt werden. Sowohl bei der Nutzung als Schaumadditiv als auch bei der Verwendung als Suspensionsbestandteil erfolgt der Transport der Polymere über auf der Schildmaschine installierte Leitungssysteme.

### 4.2.1. Einflussparameter bei der Anwendung von Polymeren und Polymersuspensionen

Verschiedene Parameter können die Nutzung von Polymeren bzw. Polymersuspensionen bei der Konditionierung von Böden beeinflussen. Diese Parameter sind in der Tabelle 4-4 zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Einflüsse bei der Nutzung von Polymeren bzw. Polymersuspensionen

<b>Einflüsse bei der Nutzung von Polymeren bzw. Polymersuspensionen</b>
Art des Polymers
Polymerkonzentration $c_p$
Mischzeit

Wesentliche Einflussparameter bei der Nutzung von Polymeren sind die Art und der Aufbau des eingesetzten Polymers. Da zahlreiche unterschiedliche Polymere verfügbar sind, stellen die jeweiligen Polymere unveränderliche Bestandteile dar.

Bei Verwendung von Polymersuspensionen kann die Konzentration des Polymers  $c_p$  Einfluss auf die Eigenschaften des Konditionierungsmittels haben.

Bei eigenen Vorversuchen wurde zudem ein Einfluss auf die Eigenschaften von Polymeren aufgrund unterschiedlicher Mischzeiten während des Mischprozesses festgestellt. Aus diesem Grund wird bei den Versuchen die Mischzeit variiert.

### 4.2.2. Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen

Polymere und Polymersuspensionen werden auf Schildmaschinen mit entsprechenden Pumpen gefördert. Die erforderliche Schubspannung zur Überwindung des einem Pump- oder Fließvorgang entgegenwirkenden Widerstands wird als Fließgrenze  $\tau_F$  bezeichnet. Bei thixotropen Suspensionen wie z. B. Bentonitsuspensionen ist die Viskosität von der eingebrachten Mischleistung, der Mischdauer und dem Betrachtungszeitpunkt abhängig, so dass zwischen der statischen Fließgrenze *stat.*  $\tau_F$  und der dynamischen Fließgrenze *dyn.*  $\tau_F$  zu unterscheiden ist. Für eine Gewährleistung der Pumpbarkeit sollte beim Anfahren mindestens die statische Fließgrenze des Materials zzgl. eines Reibungsanteils der Förderleitung überwunden werden, während bei kontinuierlicher Förderung mindestens die dynamische Fließgrenze inkl. eines Reibungsanteils überschritten werden muss. Zur Abschätzung der Pumpbarkeit von Polymeren bzw. Polymersuspensionen können Versuche zur statischen Fließgrenze *stat.*  $\tau_F$  und zur dynamischen Fließgrenze *dyn.*  $\tau_F$  dienen.

#### 4.2.3. Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen sind sowohl die genutzten Polymerprodukte als auch die Polymerkonzentration  $c_p$  zu verändern. Für die Ermittlung des Einflusses der in das konditionierte Material eingebrachten Arbeit auf die Eigenschaften der Polymere bzw. Polymersuspensionen wird eine Variation der Mischzeit durchgeführt.

Die Überlegungen führten zu dem in Abbildung 4-15 dargestellten und nachfolgend erläuterten Konzept zur Überprüfung der wesentlichen Eigenschaften von Polymeren oder Polymersuspensionen. Polymer 1 wurde nur für die Schaumherstellung genutzt und bei diesen Untersuchungen nicht weiter betrachtet. Bei Polymer 2 handelt es sich um ein wasserbindendes Polymer, welches üblicherweise als Konzentrat ins Lockergestein injiziert wird und keine Verdünnung benötigt. Mit diesem Polymer werden bei 100 %-iger Konzentration und den Mischzeiten von 0, 1, 5, und 10 Minuten Indexversuche zur statischen und dynamischen Fließgrenze durchgeführt. Nach Herstellerangabe ist ein Einsatz von Polymer 3 als Konzentrat, als Polymersuspension oder als Schaum-Additiv möglich. Dieses Polymer soll darüber hinaus sehr gute Eigenschaften zur Stabilisierung des Schaums besitzen. Die Mischzeiten von 0, 1, 5, und 10 Minuten sind auch mit dem Polymer 3 bei 100 %-iger Konzentration zu realisieren. Zusätzlich sollen die Eigenschaften der Suspensionen von Polymer 3 aufgenommen werden, die mit Konzentrationen von  $c_p = 50$  und  $5\%$  und mit Mischzeiten von 1, 5 und 10 Minuten hergestellt wurden.

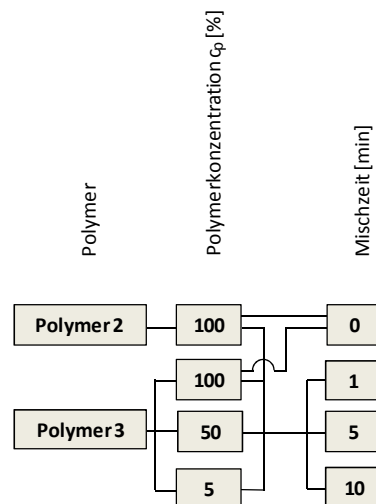


Abbildung 4-15: Konzept zur Untersuchung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Polymeren oder Polymersuspensionen

#### 4.2.4. Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen

Zur Abschätzung der dynamischen Fließgrenze *dyn.*  $\tau_F$  nach [57] kann der Versuch zur Bestimmung der Marsh-Zeit mittels Marsh-Trichter genutzt werden. Dabei wird die Auslaufzeit einer Tonsuspension in einen Trichter mit definierten Abmessungen ermittelt. Die Auslaufzeit

ist von der Fließgrenze  $\tau_F$ , der Suspensionsdichte  $\rho_{pol}$  und der Viskosität  $\eta$  abhängig. Zum Vergleich von verschiedenen Polymeren bzw. Polymersuspensionen kann der Versuch mit dem Marsh-Trichter als Indexversuch dienen. Die Beschreibungen dieses Versuchs sowie der folgenden Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen befinden sich in der Anlage B. Abbildung 4-16 zeigt sowohl den Aufbau des Versuchs zur Bestimmung der Marsh-Zeit als auch den Versuch zur Ermittlung der Kugelnummer mit der Kugelharfe für die Bestimmung von Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen.

Die Ermittlung der statischen Fließgrenze  $\tau_F$  für Bentonitsuspensionen erfolgt üblicherweise mithilfe der Kugelharfe nach von Soos [49]. Bei diesem Versuch werden an Nylonfäden befestigte Kugeln unterschiedlichen Durchmessers und Gewichts in eine Suspension eingetaucht. Da jeder Kugel in Abhängigkeit der Suspensionsdichte eine Fließgrenze zugeordnet ist, wird die niedrigste Nummer der Kugel bestimmt, die in die Suspension eintaucht. Diese Untersuchungen werden auf Polymere bzw. Polymersuspensionen übertragen, so dass dieser Versuch als Indexversuch für diese Konditionierungsmittel anzusetzen ist, da die Zuordnung der Kugelnummer nur für Tonsuspensionen spezieller Dichten erfolgt und die Dichten der Polymere bzw. Polymersuspensionen z. T. außerhalb dieser Dichten liegen.



Abbildung 4-16: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Marsh-Zeit sowie der Kugelnummer mit der Kugelharfe nach von Soos

Zur Herstellung von Bentonitsuspensionen wird üblicherweise ein Mischer mit hoher Mischleistung eingesetzt, wobei unterschiedliche Mischpaddel nutzbar sind. Für die Herstellung von Polymersuspensionen mit einem Volumen von 1,0 l und festgelegter Konzentration  $c_p$  (vgl. Gleichung 2.15) wurde ein IKA RW 20 Mischer verwendet, bei dem eine Anpassung der Drehzahl zwischen 0 und 2.000 Umdrehungen pro Minute möglich war. Die Durchmischung bei den Versuchen kann sowohl mit Ankerrührern als auch mit Dissolverscheiben bei konstanten Drehzahlen von ca. 500 U/min erfolgen.

Dissolverscheiben erzeugen beim Rühren i. d. R. hohe Scherspannungen, so dass einzelne Partikel voneinander getrennt werden. Da bei der Herstellung von Bentonitsuspensionen hohe Scherspannungen notwendig sind, werden oftmals Dissolverscheiben eingesetzt. Die Mischleistung ist bei Verwendung von Ankerrührern bei gleichen Drehzahlen hingegen übli-



cherweise geringer, so dass diese besser für die Durchmischung von langkettigen Polymeren geeignet sind. In den durchgeführten Versuchen kamen daher Ankerrührer zum Einsatz.

Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit der oben beschriebenen Versuchsmethoden auf Polymere und Polymersuspensionen wurden in Untersuchungen (Polymer 2,  $c_p = 100\%$ , Mischzeit = 0 Min) die Versuche zur Bestimmung der Marsh-Zeit und Versuche mit der Kugelharfe mehrfach wiederholt (vgl. Abbildung 4-17). Dabei lagen die Marsh-Zeiten bei einem Mittelwert von 387 Sekunden und hatten einen relativen Fehler von 5,3 %, so dass der Versuch im Rahmen dieser Abweichung als reproduzierbar für Polymersuspensionen anzusehen ist. Bei der Bestimmung der Kugelnummer der Kugelharfe wurde bei den drei durchgeführten Versuchen immer die Kugel Nr. 2 bestimmt, so dass dieser Versuch ebenfalls Eingang in das Versuchsprogramm findet.

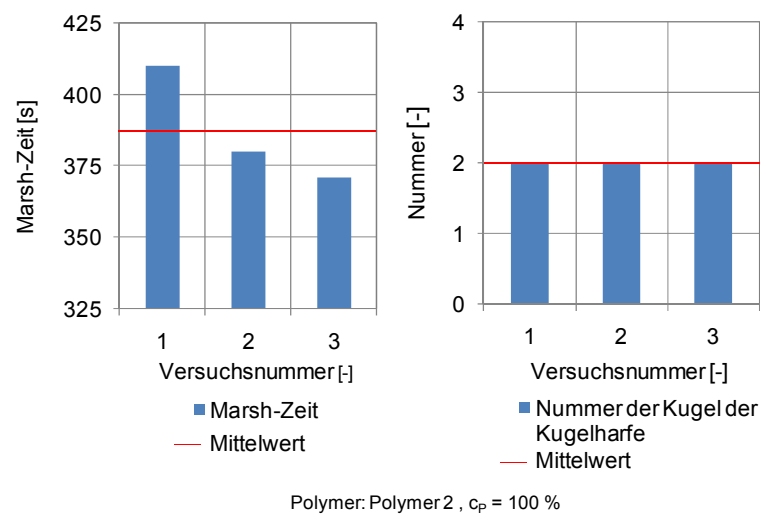


Abbildung 4-17: Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften des Polymers 2 ( $c_p = 100\%$ )

### 4.3. Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen

Für die Bodenkonditionierung eingesetzte Feinstoffsuspensionen weisen aufgrund von hohen Feststoffgehalten üblicherweise andere Eigenschaften als Bentonitsuspensionen auf. Zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen sind daher Methoden zur Untersuchung von Bentonitsuspensionen wie in Abschnitt 4.2.4 nicht adaptierbar, so dass andere Methoden erforderlich sind, um die Eigenschaften zu ermitteln.

#### 4.3.1. Einflussparameter auf die Herstellung von Feinstoffsuspensionen

Einfluss auf die Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen hat u. a. die Art des genutzten Mehlkorns mit seinen Eigenschaften, wie z. B. die mineralische Zusammensetzung und Mahlfeinheit. Zudem können die Konzentration der Feinstoffsuspension  $c_{susp}$  (vgl. Gleichung 2.10), die Mischdauer und die Wahl des Mischwerkzeugs die Eigenschaften der Feinstoffsuspension verändern. Diese Einflüsse sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Einflüsse bei der Nutzung von Feinstoffsuspensionen

<b>Einflüsse bei der Nutzung von Feinstoffsuspensionen</b>
Art des Materials
Konzentration der Feinstoffsuspension $c_{susp}$
Mischzeit
Wahl des Mischwerkzeugs

### 4.3.2. Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen

Die zu injizierende Feinstoffsuspension beeinflusst aufgrund der Menge (SIR) und der Konzentration ( $c_{susp}$ ) die Kornverteilungslinie des konditionierten Lockergesteins. Um die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials zu reduzieren, sollte ein möglichst hoher Feinstoffanteil eingebracht werden. Daher ist in Versuchen mit Feinstoffsuspensionen deren Dichte zu ermitteln. Da zudem Feinstoffsuspensionen auf Schildmaschinen bis zum Injektionsort gepumpt werden müssen, ist eine ausreichende Pumpfähigkeit des Materials zu gewährleisten.

### 4.3.3. Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen

Zur Ermittlung der in Tabelle 4-5 zusammengefassten Einflüsse bei der Nutzung von Feinstoffsuspensionen werden insgesamt vier unterschiedliche Lockergesteine genutzt, von denen eines in seiner Konzentration verändert wird. Zusätzlich erfolgt bei dieser Feinstoffsuspension eine Variation der Wahl des Mischwerkzeugs, um die Einflüsse dieser Veränderungen zu erfassen. Abbildung 4-18 (links) zeigt das Konzept zur Bestimmung der Einflüsse auf Feinstoffsuspensionen mit dem Material 1, bei dem es sich um ein Kalksteinmehl (ip330, Kalksteinmehl Werk Istein) der Fa. HeidelbergerCement AG handelt. Zur Bestimmung des Einflusses der Durchmischung wird das Material jeweils mit zwei Mischwerkzeugen (Dissolver, Anker) 5 Minuten lang vermischt. Für die Materialien 2 (Quarzmehl Mikrosil M300, Fa. Euroquarz), 3 (Quarzmehl Mikrosil M4, Fa. Euroquarz) und 4 (Bentonit B1, Fa. IBECO) wurden eine möglichst hohe, noch fließfähige Konzentration ermittelt und jeweils deren Eigenschaften bestimmt (vgl. Abbildung 4-18 (rechts)).

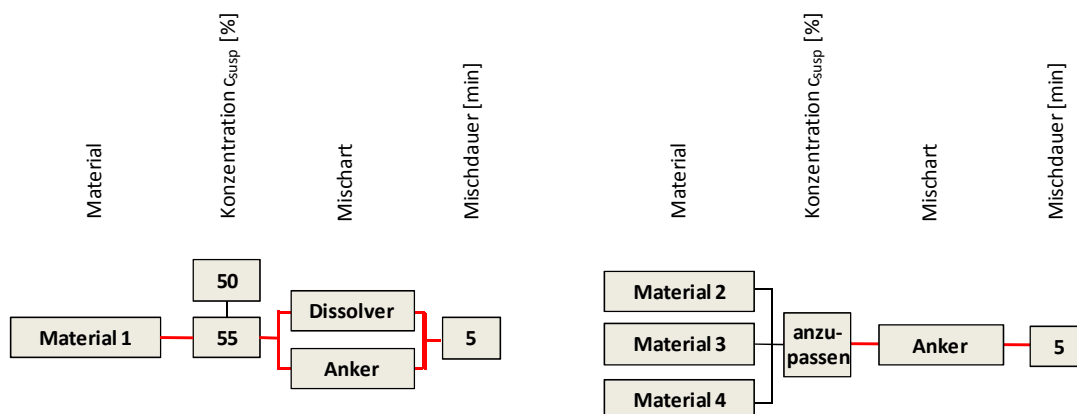


Abbildung 4-18: Konzept zur Untersuchung von Einflüssen auf die Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen

#### 4.3.4. Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen

Zur Bestimmung der Dichte von Feinstoffsuspensionen kann ein Zylinder ( $V = \text{ca. } 1,60 \text{ l}$ ,  $D/H = 0,8$ ) eingesetzt werden. Ein Behälter zur Bestimmung der Dichte ist in Abbildung 4-19 links dargestellt.

Der Versuch zur Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel mit Ermittlung des Ausbreitmaßes nach [50] wird zur Abschätzung der Pumpfähigkeit von Mörtel genutzt. Nach [145] sollte das Ausbreitmaß bei mindestens 15 cm liegen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Übertragung dieses Wertes auf die Pumpfähigkeit von Feinstoffsuspensionen. Der Ausbreitmaß zur Bestimmung des Ausbreitmaßes einer Feinstoffsuspension ist in Abbildung 4-19 rechts abgebildet.

Zur Herstellung der Feinstoffsuspensionen wird der bereits beschriebene IKA RW 20 Mischer sowohl mit einem Ankerrührer als auch mit einer Dissolverscheibe verwendet. Die Beschreibungen der Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen sind in der Anlage B aufgeführt.

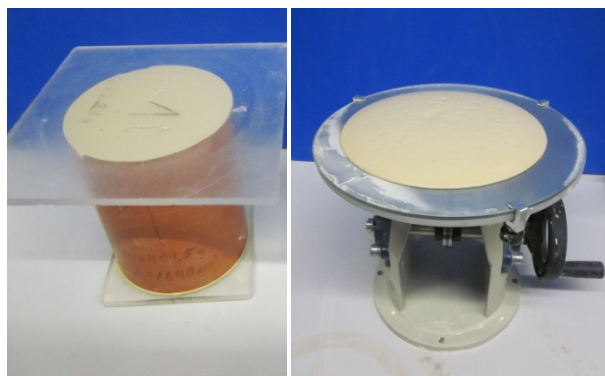


Abbildung 4-19: Versuchsmaterialien zur Bestimmung der Dichte sowie des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen

Abbildung 4-20 zeigt die Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung der Dichte und des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen, bei denen Material 1 ( $c_{\text{susp}} = 55 \%$ ) sowohl mit einem Ankerrührer als auch mit einer Dissolverscheibe 5 Minuten lang durchmischt wurde.

Bei den Versuchen zum Ausbreitmaß lag der Mittelwert aller Versuche bei 23,6 cm. Die maximale Abweichung eines Mittelwerts zum Mittelwert aller Versuche ergab sich zu 0,3 cm. Diese geringen Abweichungen ermöglichen eine ausreichend genaue Bestimmung dieser Werte von Feinstoffsuspensionen und werden daher für die nachfolgenden Untersuchungen genutzt.

Die aus zwei Versuchen gemittelten Dichten lagen bei fünf Untersuchungen im Bereich zwischen 1,94 und 1,95 g/l bei einem Mittelwert von 1,945 g/l. Dabei wurde die Bestimmung der Dichte nach dem Rüttelverfahren (vgl. Abschnitt 4.4.4, Seite 102) durchgeführt. Die maximale Abweichung der Mittelwerte der einzelnen Versuche zum Mittelwert aller Versuche betrug  $\pm 0,005 \text{ g/l}$ . Da diese Messgenauigkeit für die Untersuchungen ausreichend ist,

besteht die Möglichkeit, die Untersuchung zur Bestimmung der Dichte von Feinstoffsuspensionen mit dem gewählten Verfahren durchzuführen.

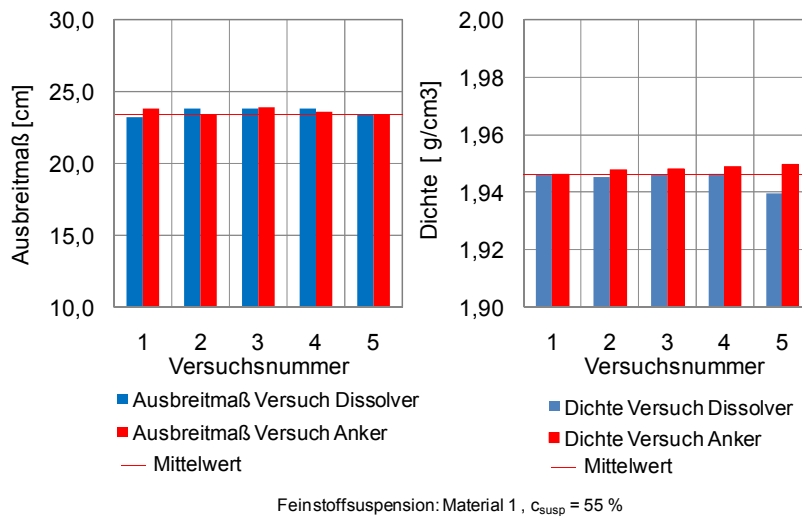


Abbildung 4-20: Ergebnisse zur Bestimmung der Dichte und des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen mit Material 1 ( $C_{susp} = 55\%$ )

#### 4.4. Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein

Nachfolgend werden zunächst die wesentlichen Einflussparameter auf die Herstellung von konditionierten Lockergesteinen beschrieben, um die maßgebenden Eigenschaften des Materials zu untersuchen. Die Entwicklung eines Konzepts zur Ermittlung dieser Eigenschaften schließt sich an. Es werden zudem Untersuchungsmethoden aufgeführt, die diese Bestimmung ermöglichen.

##### 4.4.1. Einflussparameter bei der Herstellung von konditioniertem Lockergestein

Während des Vortriebs wird dem abgebauten Material in der Abbaukammer üblicherweise kontinuierlich Konditionierungsmittel zugefügt. Dabei beeinflusst der Aufbau der Abbaukammer mit eingebauten Statoren und Rotoren die Durchmischung von Lockergestein und Konditionierungsmitteln.

Die Länge und der Füllungsgrad der Abbaukammer sowie die Vortriebsgeschwindigkeit der Schildmaschine gehen u. a. in die Berechnung der Verweilzeit des konditionierten Materials in der Abbaukammer ein (vgl. Gleichung 2.1). Daher ist bei Verwendung von Konditionierungsmitteln mit zeitabhängigen Eigenschaften, wie z. B. Schäumen, der Einfluss der Verweilzeit des konditionierten Materials in der Abbaukammer zu berücksichtigen. Durch die Rotation des Schneidrads wird Mischleistung in das konditionierte Lockergestein in der Abbaukammer eingebracht, wobei die Mischleistung die Eigenschaften der Konditionierungsmittel (vgl. Abschnitt 4.2.1) und auch die Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen beeinflussen kann.

Das Lockergestein, die Art des Konditionierungsmittels und die jeweilige Injektionsrate haben auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine großen Einfluss. Hinsichtlich des Bodens spielen vor allem die Dichte bzw. Lagerungsdichte und die Kornverteilungslinie eine wichtige Rolle.

Bei den Konditionierungsmitteln beeinflussen vor allem die Art, das jeweilige Produkt und die Injektionsmenge die Eigenschaften der konditionierten Materialien. Da Schäume ein druckabhängiges Volumen aufweisen, kann zudem der Stützdruck die Eigenschaften des Stützmediums verändern.

Die wesentlichen Einflussparameter auf die Herstellung von konditionierten Lockergesteinen sind daher:

- Der Aufbau der Abbaukammer,
- die Mischleistung in der Abbaukammer,
- die Verweilzeit in der Abbaukammer,
- bei Verwendung von Schaum zudem der Einfluss des Stützdrucks,
- die Körnungslinie des Lockergesteins und
- die Art und Menge des Konditionierungsmittels.

Der Aufbau der Abbaukammer sowie die Mischleistung in der Abbaukammer sollen nicht weiter betrachtet werden, da der Materialfluss bzw. die Durchmischung in der Abbaukammer im Detail nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Zur Bestimmung des Materialflusses in der Abbaukammer wären rheologische Untersuchungen und großformatige Versuche vorzunehmen.

Aus den Untersuchungsergebnissen von der Technischen Universität Turin sind Unterschiede zur Verweilzeit des Materials ableitbar (vgl. Abschnitt 3.3.2). Bei den durchgeführten Versuchen wurde eine Reduzierung des Setzmaßes in Abhängigkeit der Zeit ermittelt [119].

Der Einfluss des Stützdrucks auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine wird aufgrund des Aufwands nicht weiter untersucht.

Es sind hingegen Untersuchungen mit gezielt variierten grobkörnigen Lockergesteinen, unterschiedlichen Konditionierungsmitteln und verschiedenen Injektionsraten unter atmosphärischen Randbedingungen sinnvoll. Die in den durchzuführenden Untersuchungen zu ermittelnden Einflüsse sind in Tabelle 4-6 aufgeführt.

Tabelle 4-6: Einflüsse bei der Nutzung von konditionierten Lockergesteinen

<b>Einflüsse bei der Nutzung von konditionierten Lockergesteinen</b>
Körnungslinie des Materials
Art und Menge des Konditionierungsmittels

#### 4.4.2. Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein

Die Ziele der Konditionierung bei Lockergesteinen sind in Abschnitt 2.3.1 zusammengefasst. Aus den Zielen resultiert, dass vor allem

- das Fließverhalten bzw. die Verarbeitbarkeit,
- die Wasserdurchlässigkeit,
- die Kompressibilität,
- die Dichte,
- die Scherfestigkeit und
- die Stabilität

die für einen EPB-Vortrieb wesentlichen Eigenschaften des konditionierten Lockergesteins darstellen. Ergebnisse von anderen Forschungseinrichtungen zu den aufgeführten Untersuchungen sind in Abschnitt 3.3.2 aufgeführt. Das Konzept zur Bestimmung der oben genannten Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein bei gezielter Variation der Eigenschaften des Bodens oder der Konditionierungsmittel wird nachfolgend beschrieben. Erläuterungen zu den jeweiligen Versuchsdurchführungen schließen sich an.

#### 4.4.3. Konzept zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein

Zur systematischen Bestimmung der Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen unter atmosphärischen Bedingungen sind Untersuchungen mit Lockergesteinen mit gezielt variierten Kornverteilungslinien erforderlich, die mit den unterschiedlichen Konditionierungsmitteln und -mengen vermischt werden. Aufgrund des überwiegenden Einsatzes von Schaum auf EPB-Schilden beginnen die Untersuchungen mit Boden-Schaum-Gemischen sowie mit Böden, deren Konditionierung mit Polymerschäumen erfolgte. Anschließend sind Untersuchungen von mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Lockergesteinen durchzuführen, sofern Schäume bei diesen Böden nicht als Konditionierungsmittel nutzbar sind. Da Polymere i. d. R. gemeinsam mit weiteren Konditionierungsmitteln dem Boden zugeführt werden, schließt sich eine Bestimmung der Auswirkungen mehrerer Konditionierungsmittel (u. a. mit Polymeren) auf die Eigenschaften der jeweiligen Lockergesteine an.

In einem ersten Versuchsschritt erfolgt die Durchführung von Versuchen zu verschiedenen Lockergesteinen, die mit unterschiedlichen Mengen von Schaum mit gleichen Eigenschaften konditioniert wurden. Zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener FIR auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine sind bei diesen Versuchen die Randbedingungen, wie z. B. die  $c_f$  und die FER, bei der Schaumherstellung konstant zu halten. Die zuzugebende FIR ist zu verändern, bis das Setzmaß zwei zu definierende Grenzwerte annimmt (siehe Abschnitt 4.4.4).

Im zweiten Schritt sind bei Verwendung eines Lockergesteins verschiedene Parameter des Schaums zu variieren und die Eigenschaften des konditionierten Materials zu bestimmen. Bei diesen Untersuchungen werden sowohl die FIR, die FER als auch die  $c_f$  verändert, um deren Auswirkungen auf die Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische zu bestimmen.

Das Konzept zur Ermittlung der Einflüsse auf Boden-Schaum-Gemische ist in Abbildung 4-21 dargestellt. In der Darstellung sind die Versuchsschritte mit der Variation des Lockergesteins (oben) bzw. des Schaums (unten) aufgeführt. Zur Bestimmung der Auswirkung eines Parameters auf die Eigenschaften der konditionierten Böden wird in den Untersuchungen nur dieser Parameter verändert. Die jeweils roten Linien stellen Referenzversuche dar, während die vertikalen Linien Variationen der einzelnen Parameter kennzeichnen. Der Volumenstrom des Schaums wurde zur Verringerung der anfallenden Schaumvolumina bei diesen Untersuchungen von 70 l/min auf 60 l/min reduziert, wobei diese Veränderung keine großen Einflüsse auf die Schaumeigenschaften hat (vgl. Ergebnisse in Tabelle 5-1, Seite 133). Die Schaumproduktion für die Versuche erfolgte mit Schaumlanze 3 bei einem Förderdruck von 5 bar und einem Transport durch die 1" Leitung des Fördersystems.

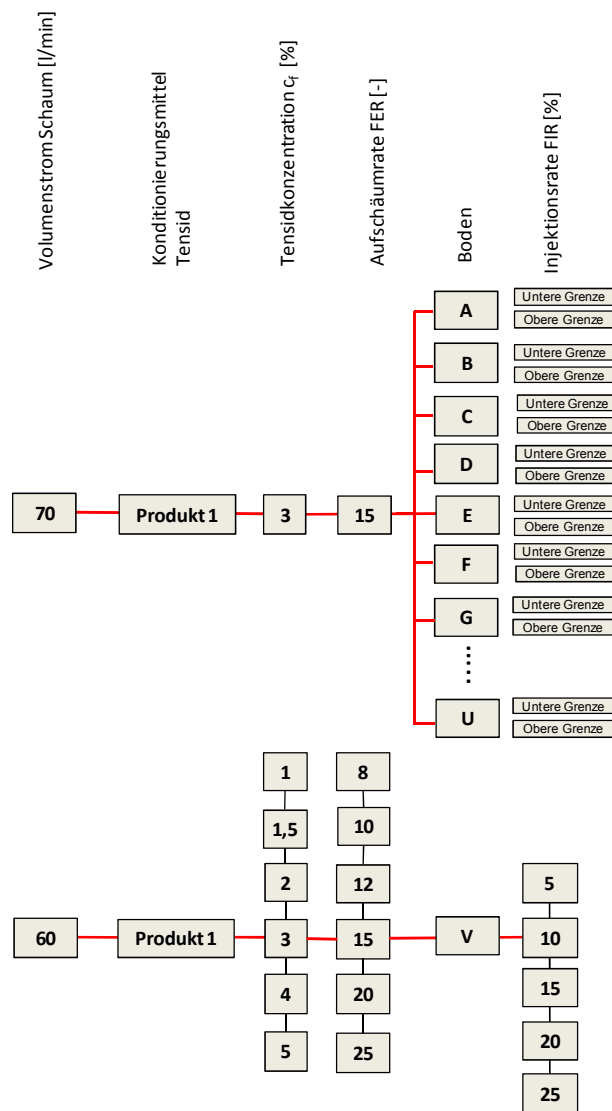


Abbildung 4-21: Konzept zur Bestimmung von Einflüssen auf Boden-Schaum-Gemische bei Variation des Lockergesteins (oben) bzw. der Schaumeigenschaften (unten)

Um den Einfluss durch die Zugabe von Polymeren bei Tensidschäumen zu ermitteln, werden zwei Lockergesteine mit Polymerschäumen aufbereitet und diese Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus Untersuchungen des mit Schaum ohne Polymerzusatz konditionierten Lo-

ckergesteins verglichen. Das Konzept zur Bestimmung der Auswirkungen durch die Zugabe von Polymerschäumen auf die Böden ist in Abbildung 4-22 dargestellt. Bei dem genutzten Polymer 1 handelt es sich um ein nach Herstellerangaben auf das Tensidprodukt 1 abgestimmtes Zusatzmittel, welches zur Stabilisierung des Schaums eingesetzt werden soll (vgl. Abschnitt 4.1.3.). Zur Ermittlung eines Einflusses aufgrund der Polymerzugabe sind die Injektionsraten aus Abbildung 4-21 (oben) zu nutzen.

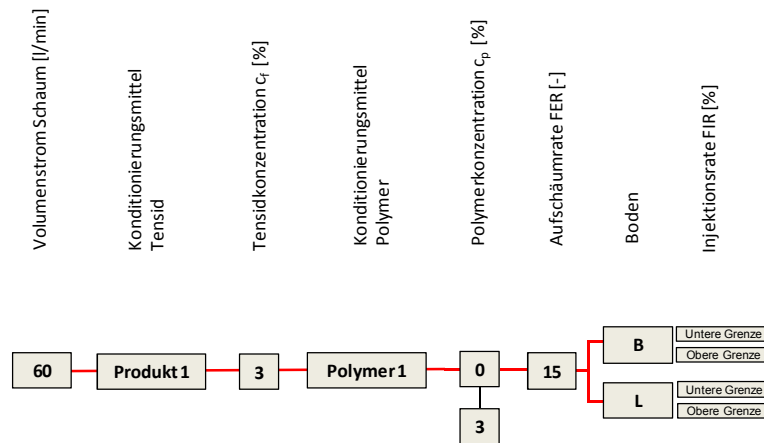


Abbildung 4-22: Konzept zur Bestimmung der Einflüsse auf konditionierte Lockergesteine unter Verwendung von Schäumen mit Polymerzusatz

Zur Bestimmung der Eigenschaften von mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Lockergesteinen wird unterschiedlichen Lockergesteinen jeweils eine Suspension mit gleichbleibenden Eigenschaften (Material 1,  $c_{susp} = 55\%$ ) zugegeben und die Injektionsrate SIR verändert. Die SIR sollten so gewählt sein, dass sowohl die untere als auch die obere Grenze beim Setzmaß erzielt werden. Das Konzept für diese Untersuchungen ist in der folgenden Abbildung 4-23 dargestellt.

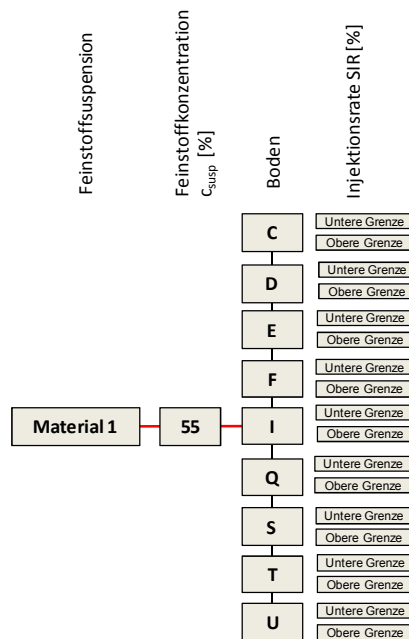


Abbildung 4-23: Konzept zur Bestimmung der Einflüsse auf mit Feinstoffsuspensionen konditionierte Lockergesteine



Zudem sind Untersuchungen durchzuführen, bei denen die Möglichkeit einer gleichzeitigen Nutzung verschiedener Konditionierungsmittel besteht. Dafür sind verschiedene Böden, die nicht mit Konditionierungsmitteln bisheriger Konzepte aufbereitet werden konnten, zu verwenden. Es sollen die Injektionsraten der verschiedenen Konditionierungsmittel in Versuchen verändert werden, bis das konditionierte Lockergestein die erforderlichen Eigenschaften aufweist. Da eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten denkbar ist, wird hier kein starres Versuchskonzept vorgegeben, sondern dieses ist aufgrund der Erkenntnisse aus den jeweiligen Untersuchungen zu variieren.

#### 4.4.4. Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein

Zur Ermittlung der wesentlichen Eigenschaften des Stützmediums werden die nachfolgend beschriebenen, u. a. aus der Betontechnologie und der Geotechnik adaptierten Methoden eingesetzt, da die bei diesen Methoden üblicherweise genutzten Materialien ein ähnliches Verhalten wie konditionierte Lockergesteine aufweisen können. Für die Versuche zur Bestimmung der Eignung dieser Methoden wurden ein Feinsand und ein Mittelsand gemäß der Zusammensetzung von Boden A und Boden B (siehe Anlage D) genutzt. In der Anlage B dieser Arbeit sind zudem detaillierte Beschreibungen zur Bestimmung der jeweiligen Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen und z. T. weitere Darstellungen des Versuchsaufbaus aufgeführt.

##### *Bestimmung der Dichte von konditionierten Lockergesteinen*

Die Bestimmung der Dichte des konditionierten Lockergesteins kann in Anlehnung an die Normen zur Bestimmung der Dichte von Mörteln [51] und Betonen [53] erfolgen. Zur Unterscheidung der Anwendung der jeweiligen Normen dient das Größtkorn des betrachteten konditionierten Lockergesteins. Für Lockergesteine mit einem Größtkorn kleiner 8 mm ist die Untersuchung wie für Mörtel [51] durchzuführen, für Lockergesteine mit einem Größtkorn zwischen 8 und 32 mm hingegen eine Untersuchung wie für Beton [53]. Unabhängig vom Größtkorn gilt, dass durch die Bestimmung des Gewichts des gefüllten und des leeren Behälters sowie seines Volumens die Dichte des konditionierten Materials nach Gleichung 4.5 ermittelt werden kann.

$$\rho_{cond\ Soil} = \frac{m_{ges} - m_{Beh}}{V_{Beh}} \quad (Gl. 4.5)$$

mit  $m_{Beh}$  = Masse des Behälters [kg]  
 $m_{ges}$  = Masse des Behälters inkl. konditioniertem Material [kg]  
 $V_{Beh}$  = Volumen des Behälters [l]  
 $\rho_{cond\ Soil}$  = Dichte des konditionierten Materials [kg/l]

Für unterschiedliche Größtkorne besteht die Möglichkeit, Probebehälter mit verschiedenen Volumina zu nutzen. Für die Bestimmung der Dichte von konditioniertem Lockergestein mit einem Größtkorn kleiner 8 mm reicht ein ca. 1,0 l fassender Behälter aus (vgl. [51]). Bei die-

sen konditionierten Lockergesteinen ist in Anlehnung an [51] zunächst das Ausbreitmaß zu ermitteln, um das Verfahren zur Bestimmung der Dichte zu wählen. Die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Dichte sind in Tabelle 4-7 in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes nach [51] aufgeführt. Die Vorgehensweise bei diesen Verfahren ist in der Anlage B beschrieben. Zur Bestimmung des Ausbreitmaßes und der Dichte wurden die in Abbildung 4-19 (Seite 95) dargestellten Versuchsmaterialien genutzt.

Tabelle 4-7: Verfahren zur Bestimmung der Dichte von konditionierten Böden in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes

<b>Ausbreitmaß</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Dichte</b>
< 14 cm	Rüttelverfahren
14 cm bis 20 cm	Rüttelverfahren oder „Schock“-Verfahren
> 20 cm	Einfüllverfahren

Für Lockergesteine mit einem Größtkorn zwischen 8 und 32 mm sollte ein Behälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 5 l genutzt werden. Bei Böden mit einem Größtkorn zwischen 32 und 64 mm ist zur Bestimmung der Dichte ein entsprechend größerer Zylinder zu verwenden. Da in den durchgeführten Versuchen zur Bestimmung der Dichte der Anteil an Lockergestein mit einem Korndurchmesser zwischen 32 und 64 mm bei maximal 10 % lag, wurde auf eine Dichtebestimmung mit einem separaten Behälter verzichtet, da dieser Einfluss als vernachlässigbar angesehen wird. Bei den Behältern sollte das D/H-Verhältnis zwischen 0,8 bis 1,2 betragen, so dass der Durchmesser des Probebehälters mindestens dem 5-fachen Durchmesser des Größtkorns des konditionierten Lockergesteins entspricht.

Feinsande (Boden A, FIR = 45 %, FER = 15,  $c_f = 3,0$ , Produkt 1,  $w = 10$  %) und Mittelsande (Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f = 3,0$ , Produkt 1,  $w = 10$  %) wurden nach der in Anlage D beschriebenen Vorgehensweise in einem Freifallmischer konditioniert und die Ausbreitmaße nach [51] mit dem Ausbreittisch bestimmt. Die durchschnittlichen Ausbreitmaße lagen für den Feinsand bei 13,75 cm und für den Mittelsand bei 17,75 cm (vgl. Abbildung 4-24). Die maximalen Abweichungen zum Mittelwert der Proben eines Bodens wiesen Werte von 0,75 cm (Feinsand) bzw. 0,25 cm (Mittelsand) auf. Die Werte des Ausbreitmaßes werden auf mit einer Genauigkeit von 0,5 cm gemessen. Diese Genauigkeit liegt annähernd im Bereich der Werte der ermittelten Abweichungen der Böden, so dass der Versuch zur Bestimmung des Ausbreitmaßes als geeignet angesehen werden kann. Da die Ausbreitmaße der untersuchten Lockergesteine Werte unter 20 cm aufwiesen, wird nach Tabelle 4-7 das Rüttelverfahren zur Bestimmung der Dichte von konditionierten Lockergesteinen mit einem Ausbreitmaß von bis zu 20 cm genutzt.

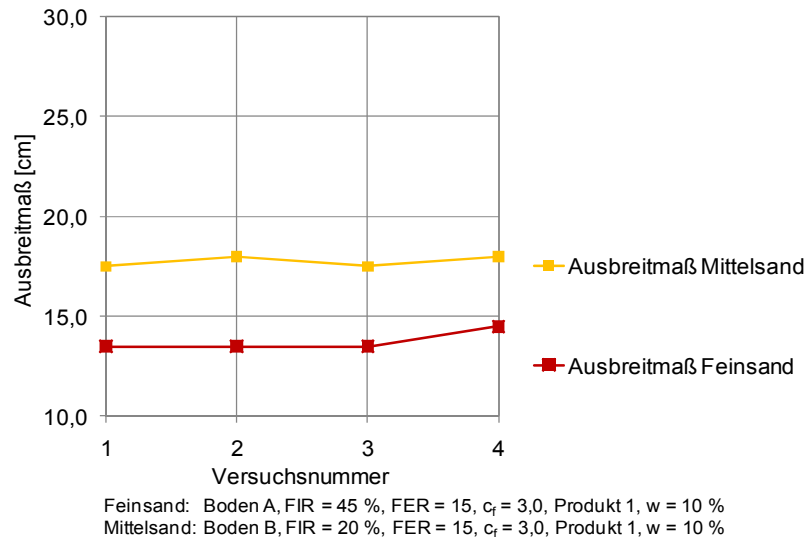


Abbildung 4-24: Ausbreitmaß von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR

Zur Bestimmung der Dichte von Boden-Schaum-Gemischen wurden verschiedene Versuche mit den oben genannten Lockergesteinen und FIR durchgeführt. Die Ergebnisse der jeweiligen Dichtemessungen mit dem Rütteltisch (Ausbreitmaß < 20 cm) sind in Abbildung 4-25 dargestellt. Die gemittelten Dichten der Versuche mit dem konditionierten Mittelsand lagen zwischen 1,28 und 1,33 g/cm<sup>3</sup> bei einem Mittelwert aller Proben von 1,30 g/cm<sup>3</sup>. Die mittlere Dichte des Feinsands aus drei Chargen lag zwischen 1,23 und 1,28 g/cm<sup>3</sup> und hat einen Mittelwert von 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Die maximale Abweichung des Mittelwerts eines Versuchs aus drei Proben zum Mittelwert aller Proben betrug sowohl für Feinsande als auch für Mittelsande  $\pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>. Aufgrund der geringen ermittelten Abweichung kann zur Bestimmung der Dichte für Boden-Schaum-Gemische das Rüttelverfahren als geeignet angesehen werden.

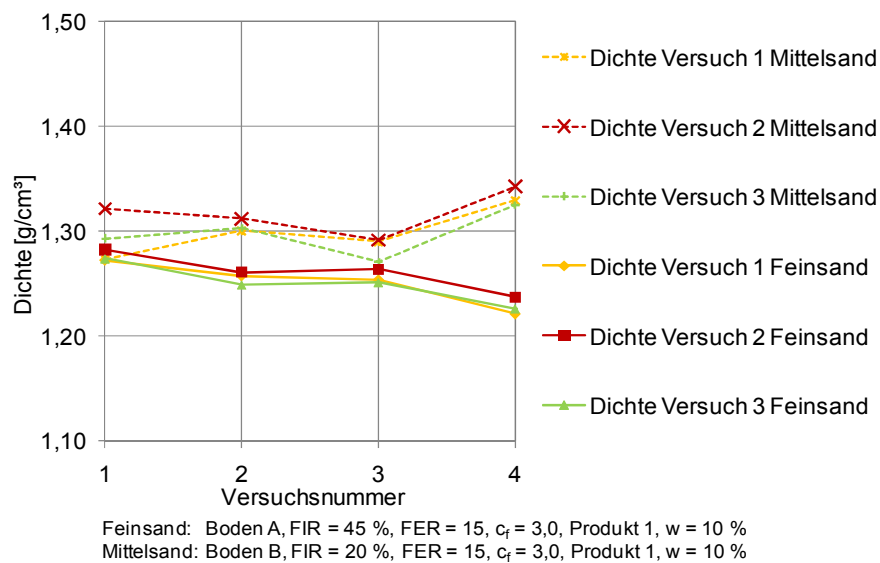


Abbildung 4-25: Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR

*Bestimmung des Setzmaßes und des Setzfließmaßes\* von konditionierten Lockergesteinen*

Die Beschreibung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Lockergesteinen mithilfe des Versuchs zur Bestimmung des Setzmaßes erfolgte in Abschnitt 3.3.2 bzw. Anlage B. Beispielhaft ist das Setzmaß und das Setzfließmaß\* eines Bodens in Abbildung 4-26 dargestellt.

Die Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung des Setzmaßes nach [52] von ausgewählten Boden-Schaum-Gemischen sind in Abbildung 4-27 dargestellt. Für die konditionierten Feinsande (Boden A, FIR = 45 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0 %, Produkt 1,  $w$  = 10 %) konnten Setzmaße zwischen 6,0 und 9,5 cm bei einem Mittelwert von 7,5 cm ermittelt werden. Die maximale Abweichung zum Mittelwert betrug 2,0 cm bei einer Standardabweichung von 1,5 cm. Für die mit Schaum konditionierten Mittelsande (Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0 %, Produkt 1,  $w$  = 10 %) lagen diese Werte zwischen 20,5 und 22,5 cm bei einem Mittelwert von 21,7 cm. Die maximalen Abweichungen ergaben sich bei diesen Boden-Schaum-Gemischen zu 1,2 cm und einer Standardabweichung für den Feinsand von 0,8 cm.

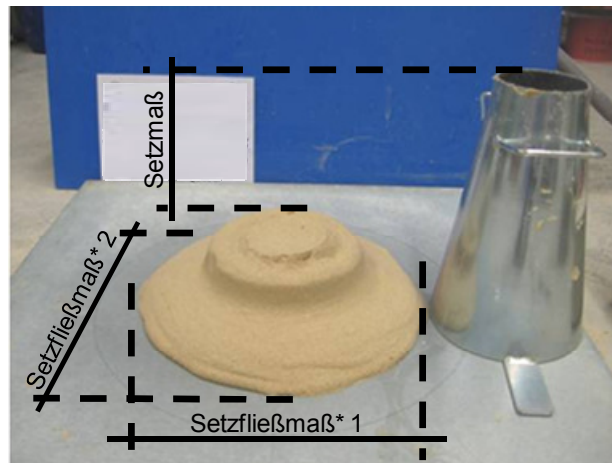


Abbildung 4-26: Versuchsmaterialien zur Bestimmung des Setzmaßes und Setzfließmaßes\* von Boden-Schaum-Gemischen

In [52] sind die maximalen Abweichungen für Betone mit einem Setzmaß zwischen 5,0 bis 8,0 cm bei Einzelmessungen unter Vergleichsbedingungen von 2,5 cm und einer Standardabweichung von 0,9 cm festgelegt. Die maximalen Abweichungen lagen für den konditionierten Feinsand innerhalb der nach [52] beschriebenen maximalen Abweichung. Für die Versuche zur Bestimmung des Setzmaßes kann auf Grundlage der Tastversuche daher davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse ausreichend genau reproduzierbar sind.

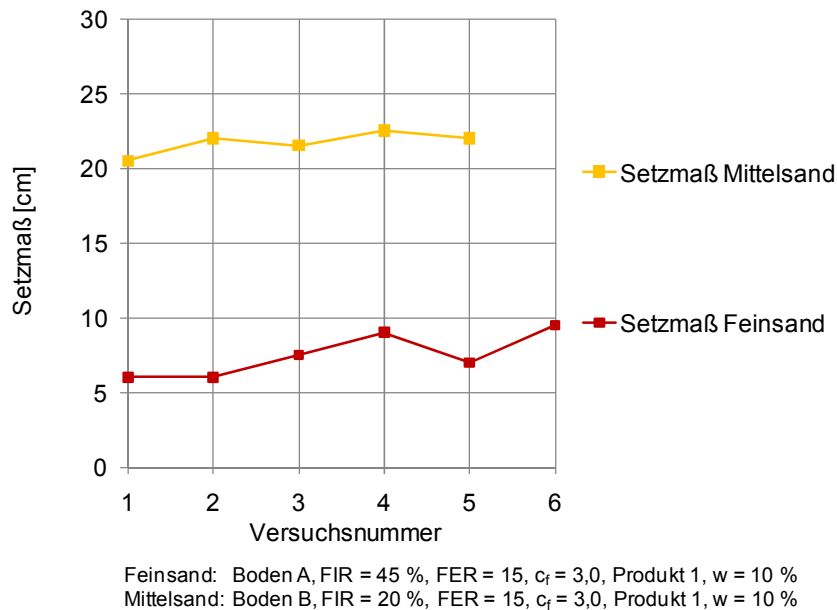


Abbildung 4-27: Setzmaße von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR

Aufgrund der Erkenntnisse der bisherigen Untersuchungen zielen die eigenen Versuche zur Bestimmung des Setzmaßes auf die Ermittlung der Zugabemittel und -mengen, um die Werte des Setzmaßes von ca. 10 bzw. 20 cm nach [52] zu erreichen. Bei diesen Setzmaßen ist eine geeignete Verarbeitbarkeit des konditionierten Materials anzunehmen (vgl. auch Abschnitt 3.3.2).

Mit dem Versuch zur Ermittlung des Setzmaßes kann auch der Durchmesser der konditionierten und verformten Bodenprobe, dem hier definierten Setzfließmaß\* (im Gegensatz zur Bestimmung des Setzfließmaßes nach [36]), aufgenommen werden. Dieses wird durch die Messung von zwei orthogonal zueinander stehenden Messungen ermittelt. Abbildung 4-26 zeigt die Bestimmung des Setzfließmaßes\*.

#### *Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von konditionierten Lockergesteinen*

Die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Lockergesteins wird mit dem Versuch nach [44] bestimmt. Dabei fließt Wasser bei konstanter Druckhöhe von unten durch das in einen Versuchszylinder eingebrachte Boden-Schaum-Gemisch und der Volumenstrom des durchströmten Wassers wird ermittelt. Um Auswaschungen zu vermeiden, werden ober- und unterhalb der eigentlichen Probe Filterböden eingesetzt, deren Zusammensetzung nach der Filterregel von *Terzaghi* festzulegen ist (vgl. [82]). Für die Versuche wurde ein 50 cm hoher Plexiglaszylinder mit einem Innendurchmesser von 16,5 cm genutzt (vgl. Abbildung 4-28). Mithilfe der Bestimmung der durchströmten Wassermenge zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit nach Gleichung 2.5. Ziel der Verwendung der Konditionierungsmittel ist eine temporäre Verringerung der Wasserdurchlässigkeit auf Werte von  $k < 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  (vgl. Abschnitt 3.1).



Abbildung 4-28: Plexiglaszylinder zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen nach [83]

Bei einem Erddruckschild ist die Länge des durchströmten Materials in Abhängigkeit des Aufbaus von Abbaukammer und Schneckenförderer zu ermitteln. Die übliche Länge der Abbaukammer beträgt zwischen 1,0 und 1,5 m bzw. die Länge des Schneckenförderers zwischen 8,80 und 16,20 m [142]. Auf Höhe des Übergangs von der Abbaukammer zum Schneckenförderer ergibt sich die minimal durchströmte Länge des konditionierten Bodens aus der Länge der Abbaukammer und der Länge des Schneckenförderers, so dass bei Ansatz der oben genannten Werte die durchströmte Länge zwischen 9,80 und 17,70 m liegen kann.

Sollte in der Förderschnecke eine höhere Wasserdurchlässigkeit als in der Abbaukammer auftreten, ist für eine Ermittlung der hydraulischen Länge des konditionierten Materials eine Anpassung erforderlich. Die reduzierte, hydraulische Länge im Schneckenförderer lässt sich unter Berücksichtigung der erhöhten Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer, der ursprünglichen Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und der Länge des Schneckenförderers in Anlehnung an [81] nach Gleichung 4.6 berechnen. Die Berücksichtigung einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke führt bei der Ermittlung des hydraulischen Gradienten aufgrund einer geringeren hydraulischen Länge zu größeren Werten und in der Folge zu höheren Wasserdurchlässigkeiten des in der Abbaukammer verbleibenden Materials. Der Ansatz einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer liegt daher auf der „sicheren Seite“.

$$L_{Schn}^* = \frac{k_{Schn}}{k_{Schn}^*} * L_{Schn} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

- mit  $k_{Schn}$  = ursprüngliche Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke [m/s]  
 $k_{Schn}^*$  = angepasste Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke [m/s]  
 $L_{Schn}$  = Länge des Schneckenförderers [m]  
 $L_{Schn}^*$  = hydraulische Länge des Schneckenförderers [m]

Bislang wurde sowohl die Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer als auch die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer nicht gemessen. Ansatzweise wird eine Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer gewählt, die doppelt so groß ist wie jene in der Abbaukammer bzw. wie die ursprüngliche Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer. *Maidl* hat

in [105] die Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer als unendlich groß bzw. die durchströmte Länge zu Null angesetzt, so dass sich die beiden Ansätze unterscheiden. Da jedoch nicht anzunehmen ist, dass das komplette Material bei einem Stillstand aus dem Schneckenförderer ausgetragen wird, soll im Schneckenförderer die doppelte Wasserdurchlässigkeit wie in der Abbaukammer angesetzt werden. Ferner besteht durch die Anordnung von Verdichtungsstrecken im Schneckenförderer auch die Möglichkeit einer Erhöhung der Dichte im Schneckenförderer und einer dadurch bedingten Verringerung der Wasserdurchlässigkeit. Dieser Fall soll jedoch nicht weiter betrachtet werden, da dieser Ansatz die anzusetzende hydraulische Probenlänge begünstigt.

Unter Berücksichtigung der reduzierten, hydraulischen Länge im Schneckenförderer ergibt sich die zur Berechnung des hydraulischen Gradienten erforderliche durchströmte Länge nach den Gleichungen 4.7 bis 4.9. Da Erddruckschilde oftmals bis 3,0 bar Wasserdruck eingesetzt werden, wird eine hydraulische Druckhöhe von 30 m gewählt. Zur Ermittlung des hydraulischen Gefälles  $i$  dient die Druckhöhe  $h$  und die reduzierte Länge  $L_{ges}^*$  (Gleichung 4.10). Für die Bestimmung der ursprünglichen Länge des Schneckenförderers wird die in [142] minimal ermittelte Länge von 8,80 m angesetzt. Der hydraulische Gradient ergibt sich so zu  $i = 5,6$  und liegt im Bereich der für Schluffe und Tone geeigneten hydraulischen Gradienten (vgl. Abschnitt 2.2). Der Wert von  $i = 5,6$  wird daher für die weiteren Versuche genutzt.

Bei Ansatz gleicher Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke würde keine Reduzierung der hydraulischen Länge erfolgen und sich der hydraulische Gradient in Anlehnung an die Gleichungen 4.9 und 4.10 zu  $i = 3,1$  ermitteln. Da dieser Wert außerhalb des für Tone geeigneten Bereichs liegt (vgl. Abschnitt 2.2), ist für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in den weiteren Versuchen der oben ermittelte hydraulische Gradient von  $i = 5,6$  zu wählen.

$$L_{ges}^* = L_{Abbau} + L_{Schn}^* \quad (\text{Gl. 4.7})$$

$$L_{ges}^* = L_{Abbau} + \frac{k_{Schn}}{k_{Schn}^*} * L_{Schn} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

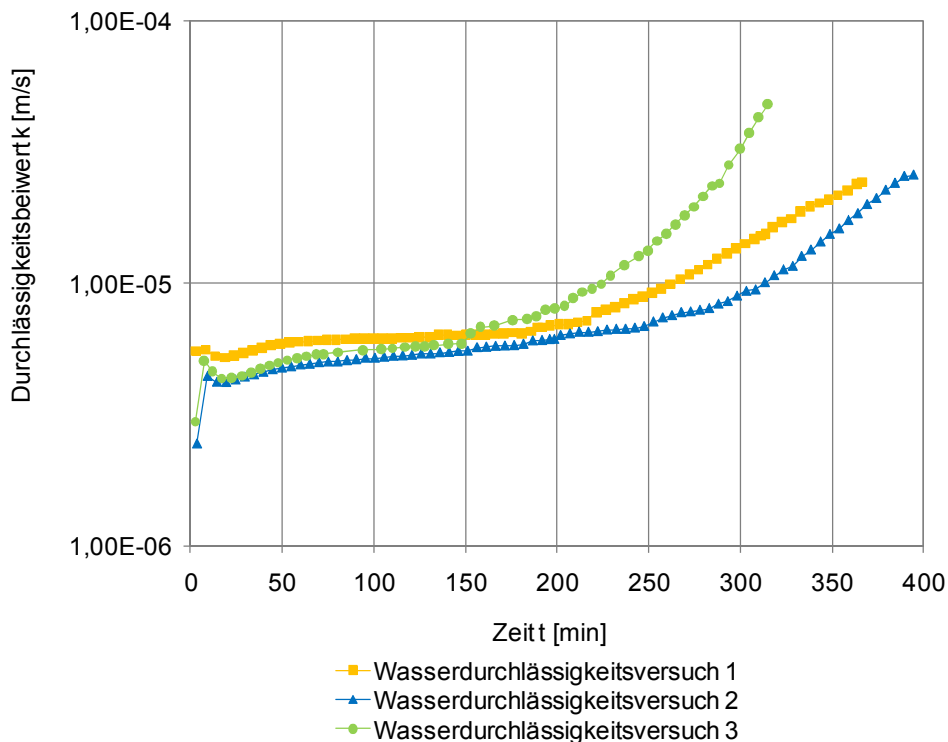
$$L_{ges}^* = 1,00 \text{ m} + \frac{1}{2} * 8,80 \text{ m} = 5,40 \text{ m} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

$$i = \frac{h_{hyd}}{l_{hyd}} = \frac{h_{hyd}}{L_{ges}^*} = \frac{30}{5,40} \approx 5,6 \quad (\text{Gl. 4.10})$$

- mit  $h_{hyd}$  = hydraulische Druckhöhe [m]  
 $i$  = hydraulischer Gradient [-]  
 $k_{Schn}$  = ursprüngliche Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke [m/s]  
 $k_{Schn}^*$  = angepasste Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke [m/s]  
 $L_{Abbau}$  = Länge der Abbaukammer [m]  
 $L_{ges}^*$  = hydraulische Länge des Schneckenförderers und der Abbaukammer [m]  
 $l_{hyd}$  = Probenlänge [m]  
 $L_{Schn}$  = Länge des Schneckenförderers [m]  
 $L_{Schn}^*$  = hydraulische Länge des Schneckenförderers [m]

Der Verlauf von drei Versuchen zur Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen (Boden B, FIR = 20%, FER = 15,  $c_f = 3,0\%$ , Produkt 1,  $w = 10\%$ ,  $i = 5,6$ ) ist in Abbildung 4-29 dargestellt. Schaum weist ein zeitabhängiges Verhalten auf (vgl. Abschnitt 4.1.4) und drainiert mit zunehmender Untersuchungszeit aus dem Boden-Schaum-Gemisch. Aufgrund der Drainage wurde ein zeitabhängiges Verhalten der Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials ermittelt.

Die dargestellten Wasserdurchlässigkeiten der Boden-Schaum-Gemische lagen zu Beginn der Untersuchungen zwischen  $k = 2 \cdot 10^{-6}$  und  $k = 6 \cdot 10^{-6}$  m/s. Bis zu einer Zeitdauer von ca. 200 Minuten nahm die Wasserdurchlässigkeit bei den drei Versuchen unwesentlich auf  $k = 6 \cdot 10^{-6}$  bis  $k = 8 \cdot 10^{-6}$  m/s zu, wobei die Verläufe sehr nah beieinander lagen. Nach diesem Zeitpunkt wiesen die Versuche veränderte Verläufe auf, da u. a. die Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht wurde. Aufgrund des zeitabhängigen Drainierens des Schaums aus dem Boden-Schaum-Gemisch können sich Umlagerungen der Bodenkörner bzw. verbleibenden Schaumblasen ergeben, die zu Unterschieden bei den Verläufen der Wasserdurchlässigkeit geführt haben. Der durchschnittliche Wert für das Erreichen einer Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s lag bei ca. 270 Minuten bei einer Standardabweichung von ca. 45 Minuten. Aus den Versuchen ergab sich ein relativer Fehler der betrachteten Boden-Schaum-Gemische von 16,6 % für die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s, der in den durchzuführenden Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit zu berücksichtigen ist.



Mittelsand: Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f = 3,0$ , Produkt 1,  $w = 10\%$ ,  $i = 5,6$

Abbildung 4-29: Wasserdurchlässigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten von Boden-Schaum-Gemischen



#### *Bestimmung der Kompressibilität von konditionierten Lockergesteinen*

Zur Bestimmung der Kompressibilität des konditionierten Lockergesteins nach *Maidl* [105] wurde dieses in einen durchsichtigen Druckzylinder eingebaut. Durch Aufbringen eines Drucks an der Oberseite und Zusammendrücken der Probe erfolgten die Ermittlung der Volumenveränderung und so die Bestimmung der Kompressibilität des Stützmediums in Bezug auf die Ausgangshöhe. Mithilfe der Kompressibilität ist abschätzbar, ob das Stützmedium bei Volumenschwankungen in der Abbaukammer zu wesentlichen Stützdruckveränderungen führt bzw. ob das Material Stützdruckveränderungen dämpfen kann. In Anlehnung an [105] wurden unterschiedliche Drücke mit Druckluft aufgebracht. Es liegt eine Beeinflussung durch das druckabhängige Volumen des injizierten Schaums auf die Kompressibilität von Boden-Schaum-Gemischen vor. Für die Versuche wurde ein ca. 50 cm hoher Plexiglaszylinder mit einem Innendurchmesser von 16,5 cm und einem maximalen Innendruck von 4 bar genutzt. Abbildung 4-30 zeigt den bei den Versuchen zur Bestimmung der Kompressibilität verwendeten Plexiglaszylinder vor Einfüllen des Materials mit abgenommenem Deckel.



Abbildung 4-30: Plexiglaszylinder mit abgenommenem Deckel zur Bestimmung der Kompressibilität nach [134]

Für die Bestimmung der Kompressibilität der konditionierten Lockergesteine kann Gleichung 4.11 genutzt werden. Die Belastungsstufen lagen bei  $\frac{1}{2}$ , 1, 2, 3 und 4 bar.

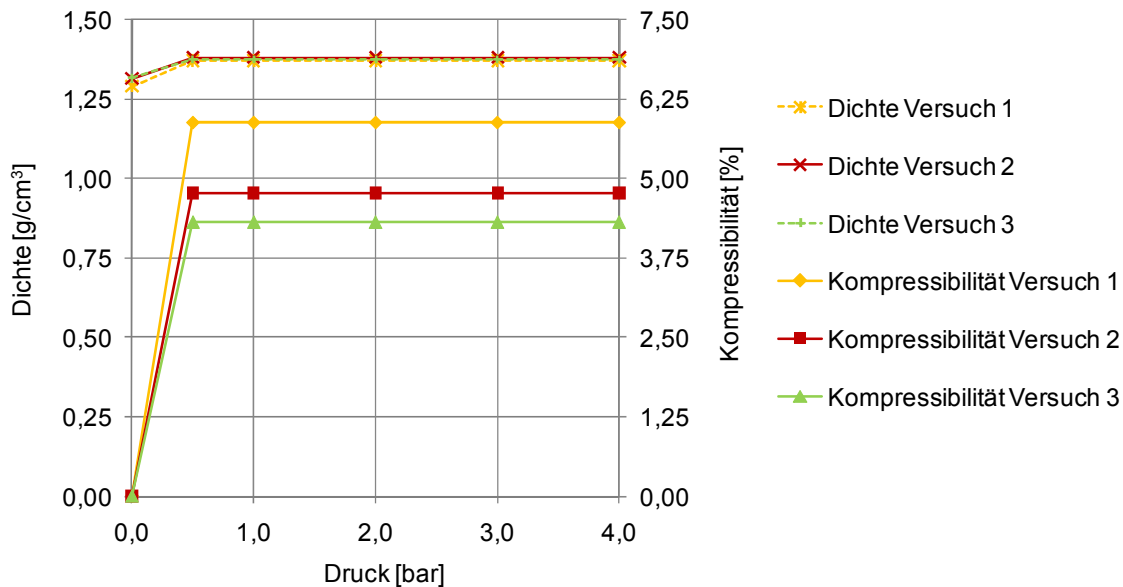
$$\text{Kompressibilität} = \frac{h_a - h_p}{h_a} * 100 \text{ [\%]} \quad (\text{Gl. 4.11})$$

mit  $h_a$  = Höhe der Probe des konditionierten Materials unter atmosphärischen Bedingungen [cm]

$h_p$  = Höhe der Probe des konditionierten Materials bei Druckbeaufschlagung [cm]

In Abbildung 4-31 sind die bei drei Versuchen ermittelten Dichten sowie die auf das Ursprungsvolumen bezogenen prozentualen Kompressibilitäten der Boden-Schaum-Gemische (Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0, Produkt 1, w = 10 %) aufgeführt. Die Dichten lagen zu Beginn der Versuche bei atmosphärischen Bedingungen zwischen 1,29 und 1,32 g/cm<sup>3</sup> und wiesen einen Mittelwert von 1,31 g/cm<sup>3</sup> auf. Der Mittelwert ist annähernd gleich dem Mittelwert zur Bestimmung der Dichte mit 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

Die Bestimmung der Kompressibilität der Böden erfolgte in drei Versuchen. Sie lag bei 0,5 bar zwischen 4,3 und 5,9 % bei einem Mittelwert von 5,0 % und blieb bis zu einer Drucksteigerung zwischen 0,5 und 4,0 bar konstant. Bei diesen Versuchen wurden Dichten von 1,37 und 1,38 g/cm<sup>3</sup> ermittelt. Aufgrund der Drucksteigerung kann ein Korn-zu-Korn-Kontakt auftreten, der zu keiner weiteren Reduzierung der Probenhöhe und daher auch zu keiner Erhöhung der Kompressibilität führt. In den eigentlichen Untersuchungen wurden daher nur die Druckstufen 0,5 bar, 1 bar und 2 bar betrachtet. Die Kompressibilität konnte mit diesem Versuchsaufbau in einem Bereich von  $\pm 1$  % ausreichend genau bestimmt werden, so dass ein Einsatz dieses Versuchs auch in den weiteren Untersuchungen möglich ist.



Mittelsand: Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f = 3,0$ , Produkt 1, w = 10 %

Abbildung 4-31: Bei Kompressionsversuchen ermittelte Dichten und Kompressibilitäten unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische

#### Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von konditionierten Lockergesteinen

Die Flügelscherfestigkeit der konditionierten Lockergesteine wird mithilfe einer Flügelsonde nach [48] ermittelt (vgl. Abbildung 4-32). Durch Drehung des Oberteils der Flügelsonde und gleichzeitigem Verharren des mit einer Feder an dem Oberteil angebrachten und in das konditionierte Lockergestein eingebrachten Flügels entsteht eine Verdrehung, der ein Drehmoment bzw. eine Flügelscherfestigkeit zugeordnet wird. Die erforderliche maximale Flügelscherfestigkeit des konditionierten Lockergesteins kann mithilfe einer auf dem Oberteil angebrachten Skala ermittelt werden. Für die Untersuchungen wurden zwei Flügelsonden mit einem Messbereich bis 38 kN/m<sup>2</sup> genutzt, mit der pro Probe jeweils drei Versuche erfolgten.



Abbildung 4-32: Flügelsonde zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von konditionierten Böden

Die Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit für konditionierte Feinsande (Boden A, FIR = 45 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0 %, Produkt 1,  $w$  = 10 %) und Mittelsande (Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0 %, Produkt 1,  $w$  = 10 %) mit einer Flügelsonde sind in Abbildung 4-33 dargestellt. Die Flügelscherfestigkeit des Feinsands lag zwischen ca. 0,9 und 1,3  $\text{kN/m}^2$  bzw. der Mittelwert aus jeweils drei Versuchen zwischen 0,9 und 1,2  $\text{kN/m}^2$ . Der Mittelwert aller Versuche ließ sich zu 1,0  $\text{kN/m}^2$  errechnen, so dass eine maximale Abweichung von  $\pm 0,2 \text{ kN/m}^2$  bei der Ermittlung der Flügelscherfestigkeit des Feinsands auftrat. Für die konditionierten Mittelsande konnten in allen Versuchen nur Werte von 0,4  $\text{kN/m}^2$  bestimmt werden, so dass der Mittelwert ebenfalls den Wert von 0,4  $\text{kN/m}^2$  hat.

Es ist davon auszugehen, dass eine geringe Flügelscherfestigkeit von z. B. 0,4  $\text{kN/m}^2$  nur geringe Abweichungen zum Mittelwert aufweist, während mit der Zunahme der Flügelscherfestigkeit auch eine Zunahme der Abweichungen einhergeht. Die Untersuchungsmethode kann für die weiteren Versuche eingesetzt werden.

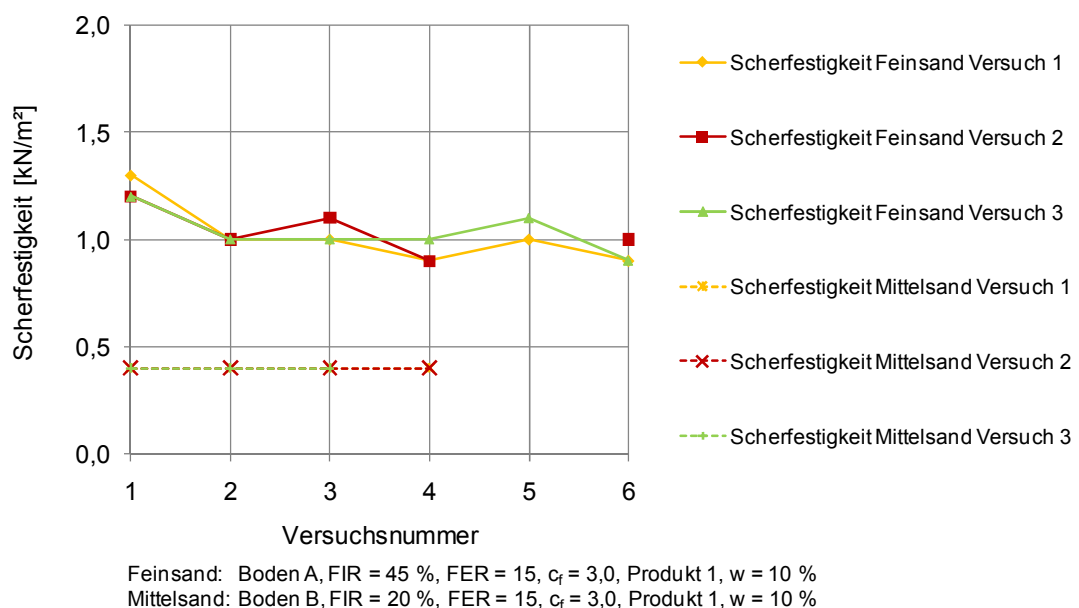


Abbildung 4-33: Flügelscherfestigkeit unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische

#### *Bestimmung der Stabilität von konditionierten Lockergesteinen*

Der Versuch zur Bestimmung der Stabilität nach [60] sieht vor, dass konditioniertes Material in einen Standzylinder eingebracht und das Volumen des Materials im Standzylinder zu unterschiedlichen Zeiten ermittelt wird. Aufgrund des Drainageprozesses des Schaums und des Entweichens der Luft ist zu erwarten, dass sich die Probenhöhe zeitabhängig verringert.

Für die Versuche erfolgte das Einfüllen des konditionierten Lockergesteins in Standzylinder mit einem Fassungsvermögen von 2,0 l und einem Durchmesser von ca. 9 cm (vgl. Abbildung 4-34). Die Probenhöhe wurde durch Ablesen von Markierungen am Zylinder unmittelbar nach dem Einfüllen sowie nach 24 Stunden bestimmt. Die Verwendung dieser Probezylinder zeigte, dass sich keine oder nur geringe Höhen- bzw. Volumenveränderungen ergaben, da das Material z. T. an der inneren Zylinderoberfläche haften blieb. Eine genaue Aussage zur Stabilität des konditionierten Lockergesteins mit dem nach [60] beschriebenen Verfahren war daher nicht möglich. Bei größeren Durchmessern der Probebehälter hätte hingegen eine mögliche Reduzierung der Probenhöhe im Bereich von Ableseungenauigkeiten liegen können.

Da sich das Materialvolumen in den Probezylindern beim Einbringen von Kräften z. T. stark reduzierte, sollte daher zur Bestimmung der Stabilität des konditionierten Materials Energie nach einem Standardverfahren eingebracht werden, um das Volumen des drainierten Materials reproduzierbar zu bestimmen. Dafür wurde der gefüllte Standzylinder auf einen in [50] beschriebenen Versuchsaufbau, den Ausbreittisch, gestellt und damit insgesamt 90 Hübe ausgeführt. Mit dieser Hubzahl konnte das Materialvolumen deutlich reduziert werden, da kein oder nur ein geringes Anhaften des Materials am Rand des Zylinders auftrat. Diese Untersuchung dient als Indexversuch.



Abbildung 4-34: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stabilität von Böden nach [83]

In Abbildung 4-35 ist die Stabilität von vier Versuchen von mit Schaum konditionierten Mittelsanden (Boden B, FIR = 20 %, FER = 15,  $c_f$  = 3,0 %, Produkt 1,  $w$  = 10 %) dargestellt. Die über das Volumen des konditionierten Bodens ermittelte Dichte des Materials lag zu Beginn des Untersuchungszeitraums zwischen 1,28 und 1,31 kg/l. Es ist zu erkennen, dass die Dichte 24 Stunden nach Untersuchungsbeginn ohne Ausführung von Hüben keine Veränderung aufwies. Das Liquid kann mit der Zeit aus dem Schaum drainieren, so dass im Porenraum des konditionierten Materials möglicherweise nur Luft zurückbleibt. Durch ausgeführte

Hübe mit dem Ausbreittisch und Umlagerung der Bodenkörner ist eine Reduzierung der Höhe der Probe möglich.

Nach 90 Hüben lag die über das Volumen der Probe ermittelte Dichte der einzelnen Versuche zwischen 1,29 und 1,33 kg/l. Die mittlere Dichte wurde auf 1,31 kg/l gesteigert. Die maximale Abweichung betrug  $\pm 0,02$  kg/l. Für die Bestimmung der Stabilität des konditionierten Materials ist daher der Versuch mit 90 Hüben nach 24 h als ausreichend genau anzusehen.

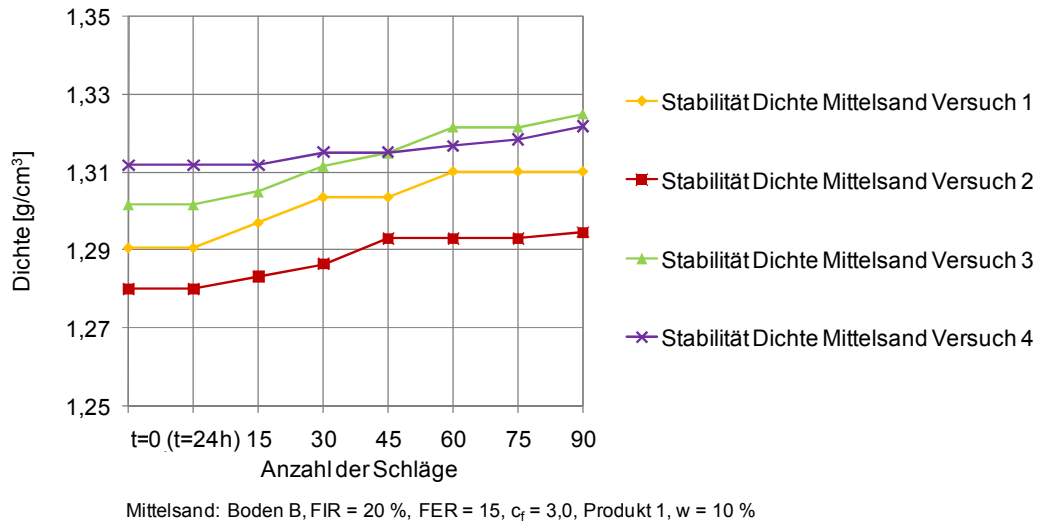


Abbildung 4-35: Stabilität unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische in Anlehnung an [134]

### Zusammenfassung

Aus den zuvor beschriebenen Versuchsmethoden kann die Übersicht in Tabelle 4-8 abgeleitet werden, die die Versuche zur Bestimmung der maßgeblichen Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen zusammenfasst. Für die Bestimmung der Dichte der konditionierten Materialien muss zunächst das Größtkorn des zu konditionierenden Bodens ermittelt werden.

Tabelle 4-8: Übersicht verschiedener Versuche zur Bestimmung der maßgeblichen Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein in Abhängigkeit des Größtkorns

Ausgangsmethode: Bestimmung des Größtkorns des zu konditionierenden Materials	
$d_{\max} < 8 \text{ mm}$	$8 \text{ mm} < d_{\max} < 32 \text{ mm}$
1a. Bestimmung des Ausbreitmaßes nach DIN EN 1015-3 (Ausbreittisch)	1. Bestimmung der Dichte nach DIN EN 12350-6
1b. Bestimmung der Dichte nach DIN EN 1015-6 in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes	
2. Bestimmung des Setzmaßes nach DIN EN 12350-2 sowie des Setzfließmaßes	
3. Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1	
4. Kompressibilität nach <i>Maidl</i>	
5. Flügelscherfestigkeit nach DIN 4094-4	
6. Stabilität mit Versuchsaufbau nach DIN EN 1015-2	

Zur Untersuchung konditionierter Lockergesteine bietet sich an, zunächst mithilfe des Versuchs zur Bestimmung des Setzmaßes erste Versuche mit unterschiedlichen Injektionsraten des gewählten Konditionierungsmittels durchzuführen, um Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit des Stützmediums zu erhalten. Wenn das Setzmaß die erforderlichen Werte annimmt, können mit den jeweiligen Injektionsraten und Konditionierungsmitteln weitere Versuche durchgeführt werden.

Da das konditionierte Lockergestein für die Aufrechterhaltung eines Stützdrucks an der Ortsbrust kompressibel sein muss (vgl. Abschnitt 3.1) eignet sich als nächster Versuch die Bestimmung der Kompressibilität des konditionierten Bodens. Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels ist zudem der Nachweis der Eignung des Stützmediums mithilfe des Versuchs zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit erforderlich. Die Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, zur Kompressibilität und zur Wasserdurchlässigkeit stellen somit die wichtigsten Untersuchungen zu konditionierten Lockergesteinen dar.

Die Bestimmung der Dichte, der Flügelscherfestigkeit und der Stabilität des Stützmediums spielen für die Wahl eines geeigneten Konditionierungsmittels eine untergeordnete Rolle, so dass diese Eigenschaften zum Abschluss einer Versuchsreihe untersucht werden können. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Versuchsreihenfolge, die in Tabelle 4-9 dargestellt ist und nach der die weiteren Untersuchungen durchgeführt wurden.

Tabelle 4-9: Versuchsreihenfolge zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften von konditioniertem Lockergestein

<b>Versuchsreihenfolge</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>
0.	Vorversuche: Bestimmung der Injektionsmengen und Konditionierungsmittel zur Gewährleistung eines Setzmaßes von 10 bzw. 20 cm
I.	Bestimmung des Setzmaßes und des Setzfließmaßes
II.	Ermittlung der Kompressibilität
III.	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit
IV.	Ermittlung der Dichte
V.	Bestimmung der Flügelscherfestigkeit
VI.	Ermittlung der Stabilität

## 5. Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse zu Schäumen, Polymeren und Polymersuspensionen sowie Feinstoffsuspensionen gemäß dem in Kapitel 4 erläuterten Konzept vorgestellt. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt eine Zusammenstellung des qualitativen Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Eigenschaften der Konditionierungsmittel. Dieses Kapitel liefert somit die Grundlage für das daran anschließende Kapitel 6, in dem die Ergebnisse der Untersuchungen mit konditionierten Lockergesteinen vorgestellt und analysiert werden.

### 5.1. Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen

Die Bestimmung der Dichte bzw. FER, der Drainagezeit, der Bläschengröße und der Kompressibilität gemäß dem entwickelten Versuchskonzept für unterschiedlich hergestellte Schäume erfolgte mit den im Abschnitt 4.1.4 erläuterten Methoden. Alle Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Anlage C aufgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse in Abhängigkeit der jeweiligen Eigenschaften der Schäume erläutert und ausgewählte Ergebnisse präsentiert.

#### 5.1.1. Bestimmung der Dichte von Schäumen

Abbildung 5-1 zeigt die Ergebnisse der über die Bestimmung der Dichte ermittelten FER ( $FER_{ist}$ ) in Abhängigkeit der jeweils **eingestellten FER**. Die Ergebnisse sind für die drei in Abschnitt 4.1 beschriebenen Lanzen aufgeführt. Neben den punktuell dargestellten Ergebnissen ist sowohl eine Gerade mit den theoretisch zu ermittelnden Werten („Soll“) als auch die untere und die obere Grenze der Messgenauigkeit der FER eingetragen. Die Messgenauigkeit wurde in Abschnitt 4.1.4 bei einer FER von 15 zu  $\pm 0,5$  ermittelt. Daher haben die untere und die obere Grenze der Messgenauigkeit einen Abstand von 0,5 zur Sollgeraden.

Die  $FER_{ist}$  bei Schaumlanze 1 lagen überwiegend unterhalb der Sollgeraden, wie z. B. die ermittelte FER von 23,4 bei einem eingestellten Wert von 25. Vor allem die Werte der  $FER_{ist} > 10$  lagen außerhalb der Grenzen der oben angegebenen Messgenauigkeit. Der Abstand der ermittelten Werte nimmt mit höher eingestellter FER zu den Sollwerten zu. Bei einem prozentualen Fehler von 2,9 % (vgl. Abschnitt 4.1.4) könnte bei einer eingestellten FER von 25 ein Wert von 24,3 noch im Rahmen dieses Fehlers liegen. Da bei dieser FER jedoch ein Wert von 23,4 erzielt wurde, ist von einer Abweichung außerhalb der Messgenauigkeit auszugehen. Um die erforderlichen  $FER_{ist}$  zu erzielen, sind daher vor allem bei höheren Werten entsprechend größere FER einzustellen.

Bei den Versuchen mit Schaumlanze 2 lagen die Werte der  $FER_{ist}$  fast alle im Bereich der Messgenauigkeit. Die zwei Untersuchungen mit einer FER von 15 wiesen annähernd gleiche Werte auf.

Mit der Schaumlanze 3 waren bei einem Volumenstrom von 60 l/min nur Aufschäumraten zwischen  $FER = 12$  und  $25$  herstellbar, da die maximale Liquidzugabe bei diesem Volumenstrom keine weitere Reduzierung der  $FER_{ist}$  ermöglichte. Die Werte der  $FER_{ist}$  wiesen annähernd gleiche Werte wie die eingestellte  $FER$  auf und lagen innerhalb der Grenzen der Messgenauigkeit.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei Schaumlanze 1 aufgrund ihres Aufbaus eine Nachjustierung der Werte bei hohen zu erzielenden  $FER$  erforderlich ist. Das Aufschäumverhalten bei Schaumlanze 2 und 3 entspricht weitestgehend den Einstellungen der  $FER$ . Die Abweichungen der ermittelten Werte dieser Lanzen liegen größtenteils im Rahmen der Messgenauigkeit.

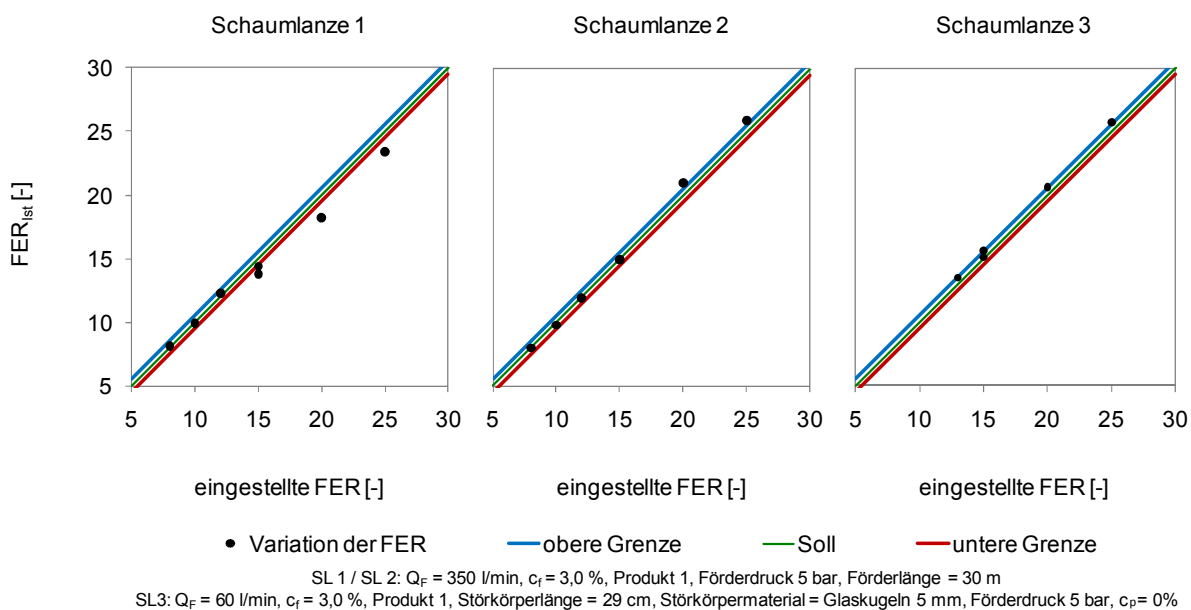


Abbildung 5-1:  $FER_{ist}$  von Schäumen bei Variation der eingestellten  $FER$  bei unterschiedlichen Schaumlanzen

In Abbildung 5-2 sind für die drei Schaumlanzen die  $FER_{ist}$  in Abhängigkeit der jeweiligen **Schaumvolumenströme  $Q_F$**  dargestellt. Bei einer  $FER$  von 15 wurde bei Schaumlanze 1 der Volumenstrom zwischen 150 und 650 l/min verändert. Der minimale kontinuierliche Schaumvolumenstrom lag bei Schaumlanze 1 bei 100 l/min. Bei Versuchen mit dieser Schaumlanze zeigte sich, dass mit zunehmendem Volumenstrom die  $FER_{ist}$  stiegen. So konnte eine Zunahme der  $FER_{ist}$  von 13,8 bei  $Q_F = 250$  l/min auf eine  $FER$  von 15,8 bei  $Q_F = 650$  l/min bestimmt werden. Allerdings wich die ermittelte  $FER$  bei  $Q_F = 150$  l/min mit 16,2 deutlich von den eingestellten Werten ab. Durch die Nutzung eines Siebes als Störkörper in Schaumlanze 1 wurden die Geschwindigkeiten bei der Durchströmung des Siebs mit steigendem Volumenstrom erhöht. Auf diese Weise kann eine veränderte Durchmischung von Liquid und Luft erfolgt sein, die zu einer höheren  $FER$  führte.

Liegt die  $FER_{ist}$  oberhalb der Messgenauigkeit des eingestellten Werts, muss zusätzliche Luft im Dichtebehälter vorhanden sein. Da dies aufgrund der eingestellten Luftvolumenströme während der Schaumproduktion nicht möglich war, könnten sich während der Proben-



entnahme Luft einschlüsse im Behälter gebildet haben, die von außen nicht zu erkennen waren. Vor allem bei einem Schaumvolumenstrom von 650 l/min war eine hohe Austrittsgeschwindigkeit des Schaums zu beobachten, welche das Befüllen der Behälter zur Bestimmung der Dichte erschwerte. Dadurch könnten sich von außen nicht sichtbare Luft einschlüsse gebildet haben, so dass die  $FER_{Ist}$  oberhalb des eingestellten Werts lag.

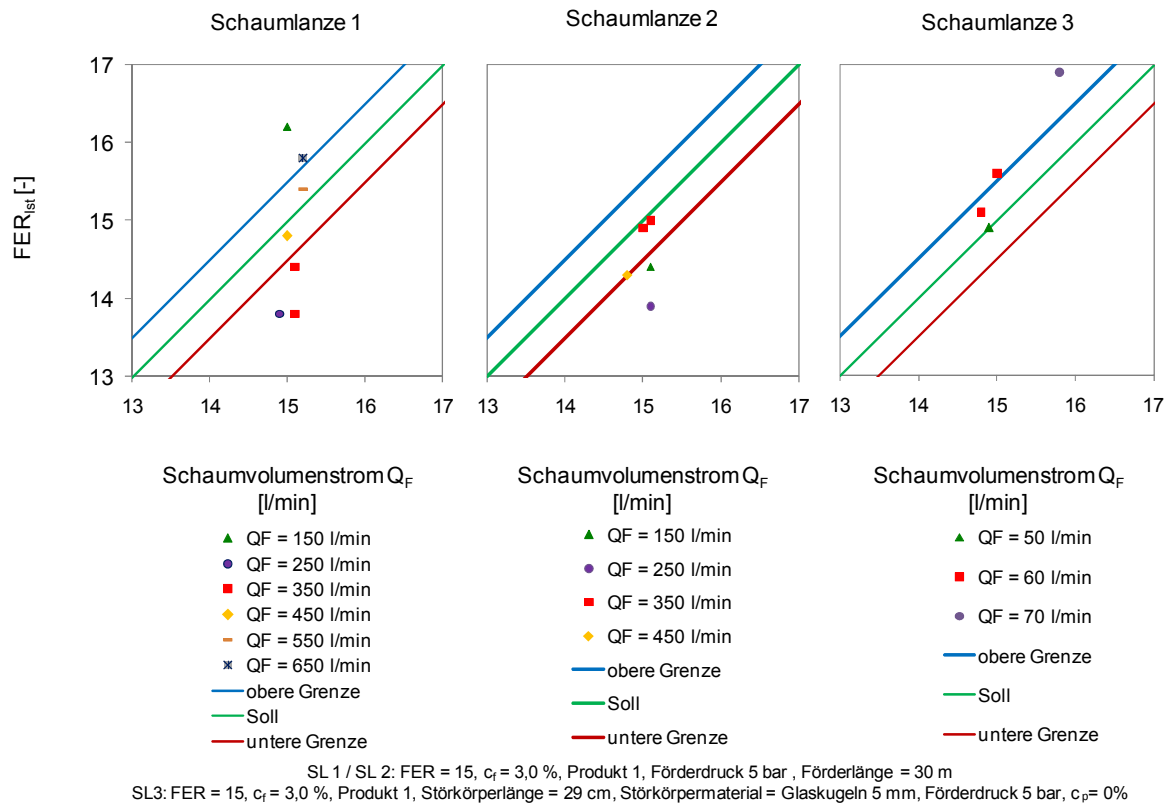


Abbildung 5-2:  $FER_{Ist}$  von Schäumen bei Variation des Schaumvolumenstroms  $Q_F$  bei unterschiedlichen Schaumlanzen

Mit Lanze 2 konnten bei einer  $FER$  von 15 nur Schäume mit einem Volumenstrom zwischen  $Q_F = 150$  und  $450$  l/min hergestellt werden. Ein Schaumvolumenstrom von 550 oder 650 l/min war bei dieser  $FER$  nicht zu erreichen, da zwar eine Steigerung des Volumenstroms der Luft, jedoch keine gleichzeitige Erhöhung des Volumenstroms der Tensidlösung möglich war. Der minimale, kontinuierliche Schaumvolumenstrom lag bei 75 l/min. Da bei Schaumlanze 1 ein Schaumvolumenstrom von 550 und 650 l/min bei einer  $FER$  von 15 im Gegensatz zu Schaumlanze 2 erreicht werden konnte, liegt die Begrenzung des Volumenstroms der Tensidlösung im Aufbau der Schaumlanze begründet. Vermutlich verhindern Turbulenzen im Bereich der Zusammenführung von Tensidlösung und Luft sowie die Nutzung von Glaskugeln als Störkörper die Erhöhung des Schaumvolumenstroms von 550 und 650 l/min. Bei den Versuchen lagen die  $FER_{Ist}$  bei  $Q_F$  zwischen = 150 und 450 l/min unterhalb der  $FER$  von 15 (minimaler Wert 13,9 bei  $Q_F = 250$  l/min). Ein einheitlicher Trend ist bei dieser Untersuchung nicht festzustellen.

Der einzustellende Schaumvolumenstrom bei Schaumlanze 3 lag im Bereich zwischen  $Q_F = 50$  und  $70$  l/min für eine  $FER$  von 15. Höhere Werte bei gleicher  $FER$  konnten nicht realisiert

werden, da zwar der Volumenstrom der Luft, aber nicht gleichzeitig der Volumenstrom der Tensidlösung zu erhöhen war. Niedrigere Werte als  $Q_F = 50$  l/min konnten bei einer FER von 15 nicht eingestellt werden, da für die Justierung der Steuerungsventile ein minimaler Volumenstrom der Tensidlösung erforderlich war. Bei Schaumlanze 3 lagen die Werte der  $FER_{ist}$  im Bereich der Messgenauigkeit der eingestellten Werte. Lediglich der Wert bei  $Q_F = 70$  l/min wich mit 16,9 deutlich von der vorgegebenen FER von 15 bzw. einer eingestellten FER von 15,8 ab. Möglicherweise haben von außen nicht sichtbare Luft einschüsse bei diesem Versuch zu einer ermittelten FER geführt, die höher als der eingestellte Wert war.

Aufgrund der ermittelten Werte der  $FER_{ist}$  beeinflusst der Volumenstrom des Schaums  $Q_F$  nur bei Schaumlanze 1 die eingestellte FER, so dass dieser Aspekt bei den Einstellungen der FER zu berücksichtigen ist.

Die Untersuchungen zur Abhängigkeit der  $FER_{ist}$  von der **Tensidkonzentration**  $c_f$  haben ergeben, dass die Veränderung der Tensidkonzentration nur eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. Diagramme in der Anlage C). Die Dichte lag bei den Versuchen mit unterschiedlichen Schaumlanzen im jeweiligen Bereich der FER von  $c_f = 3,0$  %. Lediglich bei Tensidkonzentrationen von  $c_f = 1,5$  % wiesen die  $FER_{ist}$  bei Schaumlanze 2 und 3 höhere Werte als die eingestellte FER auf. Da diese Erhöhung der FER nicht bei niedrigen  $c_f$  der Schaumlanze 1 auftrat, könnte dieser Einfluss auf den Aufbau der Schaumlanze zurückzuführen sein. Abgesehen von diesen Abweichungen haben die Variationen der Tensidkonzentration nur einen geringen Einfluss auf die Dichte bei den drei betrachteten Schaumlanzen gezeigt.

Die  $FER_{ist}$  war bei Veränderung der **eingesetzten Produkte** weitestgehend unabhängig vom jeweiligen Konditionierungsmittel, da bei allen Produkten mit den jeweiligen Schaumlanzen annähernd gleiche Dichten erreicht wurden und sich damit nur ein geringer Einfluss des Produkts auf die FER feststellen ließ (vgl. Anlage C). Die ermittelten FER von mit Schaumlanze 1 hergestellten Schäumen lagen mit Werten zwischen 13,6 und 14,4 unterhalb des Bereichs der Messgenauigkeit. Für mit Lanze 2 und 3 produzierte Schäume konnten Werte der FER im Bereich der Messgenauigkeit ermittelt werden.

Diese Ergebnisse stellen wesentliche Unterschiede zu den von [123] ermittelten Erkenntnissen dar, bei denen deutliche Differenzen bei der Bestimmung der FER in Abhängigkeit des Konditionierungsmittels nachgewiesen wurden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Möglicherweise sind bei Untersuchungen von [123] Konditionierungsmittel genutzt worden, die sich in ihrer Zusammensetzung und so auch hinsichtlich des Aufschäumvermögens gravierend von den eingestellten Werten unterschieden.

Aus den Untersuchungen zur Variation des eingebrachten **Förderdrucks** durch Einstellen des Druckreglers F1 (vgl. Abbildung 4-3) konnten keine Einflüsse auf die Dichte der Schäume ermittelt werden (siehe Anlage C). Lediglich ein Wert bei Schaumlanze 3 wich mit einem Wert von 16,6 vom eingestellten Wert von 15,8 ab.

Die Ergebnisse zur Variation der **Länge des Fördersystems** haben gezeigt, dass dieser Parameter keinen Einfluss auf die  $FER_{ist}$  hat (vgl. Anlage C). Die Variation erfolgte mit den Schaumlanzen 1 und 2.

Bei Schaumlanze 3 (vgl. Abbildung 4-4) bestand die Möglichkeit einer Veränderung **der Art des Störkörpers**. Abbildung 5-3 (links) zeigt die Veränderung der FER aufgrund unterschiedlicher Materialien des Störkörpers bei einer Störkörperlänge von 29 cm. Neben Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3, 5 und 10 mm wurden PET-Röhrchen in die Schaumlanze eingesetzt. Durch den Einsatz der Glaskugeln, die einen Durchmesser von 3 mm hatten, wurde kein Schaum mit einer FER von 15 hergestellt, da der Volumenstrom des Liquids für diese FER nicht ausreichend hoch eingestellt werden konnte. Die Werte der  $FER_{ist}$  von Schäumen, die mit Glaskugeln von einem Durchmesser von 5 mm hergestellt wurden, wiesen geringere Abweichungen auf als jene, die mit Glaskugeln mit einem Durchmesser von 10 mm oder PET-Röhrchen hergestellt wurden. Bei letzteren trat eine maximale Abweichung von 1,0 auf.

In der Mitte der Abbildung 5-3 ist die Abhängigkeit der FER aufgrund unterschiedlicher **Längen des Störkörpers** dargestellt. Zwei Untersuchungen für eine Länge des Störkörpers von 29 cm dienten als Referenzwerte, während für die anderen Längen der Störkörper ein Versuch durchgeführt wurde. Für die Längen des Störkörpers zwischen 0 und 49 cm lag die  $FER_{ist}$  im Bereich der eingestellten FER von 15. Bei einer Länge von 0 cm bestand der Störkörper nur aus zwei Sieben. Für eine Störkörperlänge von 59 cm war die Produktion von Schaum mit einer FER von 15 nicht möglich, da der erforderliche Volumenstrom des Liquids nicht eingebracht werden konnte. Die Begrenzung des Volumenstroms des Liquids entsteht vermutlich aufgrund unterschiedlicher Druckbedingungen im Bereich der Zusammenführung von Luft und Liquid sowie infolge der Länge des Störkörpers. Es konnten keine Zusammenhänge zwischen den Schaumlanzenlängen und der ermittelten FER bestimmt werden.

Zur Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen **Polymerkonzentrationen** wurden insgesamt 17 Versuche mit Schaumlanze 3 durchgeführt. Bei den Untersuchungen traten zum Teil hohe Streuungen von Werten der FER von bis zu 2,6 bei einer Polymerkonzentration  $c_p = 3\%$  auf, während bei Schäumen mit einer Polymerkonzentration von  $c_p = 0\%$  nur geringe Schwankungen der  $FER_{ist}$  festgestellt wurden. Möglicherweise können die Nutzung eines Polymers und die dadurch bedingte Veränderung der Zusammensetzung der Tensidlösung zu größeren Abweichungen hinsichtlich der Bestimmung der FER führen. Die Polymerkonzentration  $c_p$  hatte keinen systematischen Einfluss auf die ermittelten Dichten.

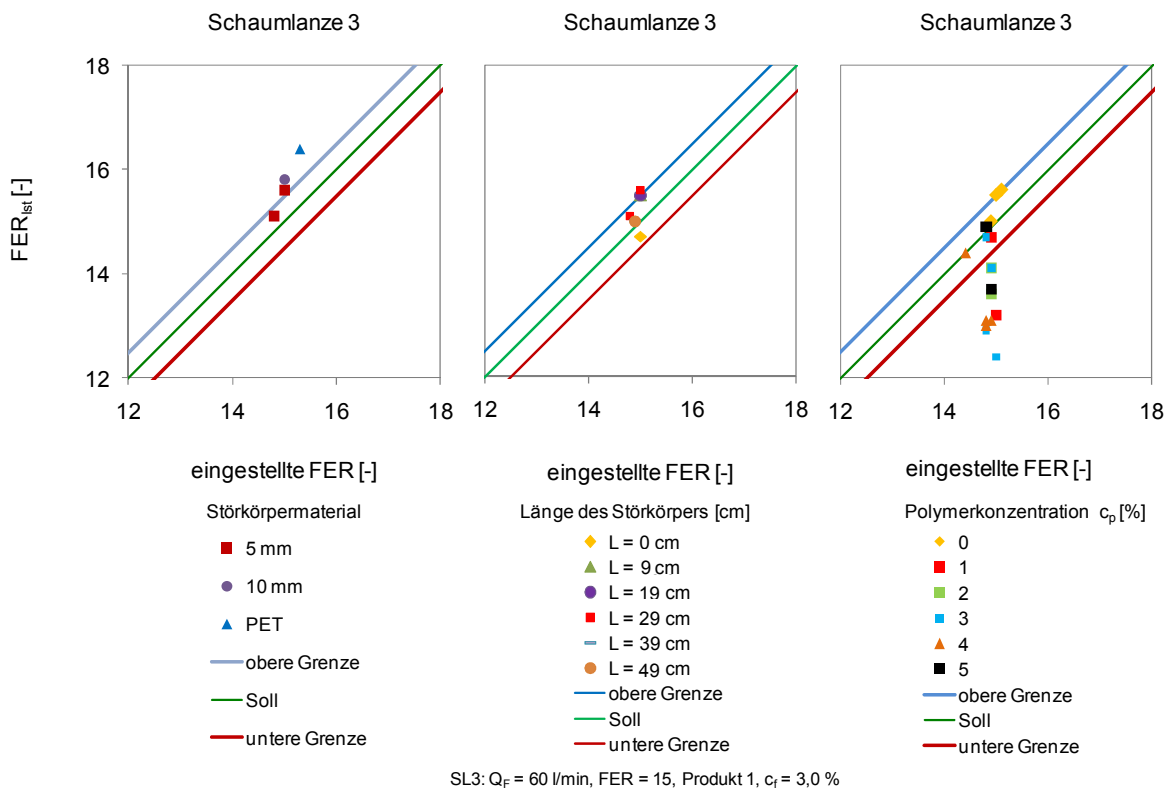


Abbildung 5-3:  $FER_{ist}$  von Schäumen bei Variation des Materials (links), der Länge des Störkörpers (Mitte) und der Polymerkonzentration (rechts) bei Schaumlanze 3

Bei einer kompletten Vermischung von Liquid und Luft sollte die ermittelte Dichte der Schäume der Dichte aufgrund der eingestellten Werte der Volumenströme von Luft und Tensidlösung entsprechen. Vereinzelt wurden in den Untersuchungen Werte ermittelt, die höher als die eingestellten FER waren. Mögliche Lufteneinschlüsse könnten diese Abweichungen hervorgerufen haben.

Der unterschiedliche Aufbau der Schaumlanzen verursachte systematische Abweichungen bei den  $FER_{ist}$ . So lagen die ermittelten FER von mit Schaumlanze 1 hergestellten Schäumen größtenteils unterhalb der  $FER_{ist}$  von mit Lanze 2 und 3 produzierten Schäumen. Es zeigte sich auch, dass zur Erzielung einer hohen FER bei Schaumlanze 1 höhere FER als bei Schaumlanze 2 oder Lanze 3 einzustellen sind (vgl. Abbildung 5-1). Bei Schaumlanze 1 können die ermittelten FER von dem Volumenstrom des Schaums abhängig sein, was auf den Aufbau der Schaumlanze zurückzuführen ist. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass Parameter, wie z. B. die Länge des Fördersystems, die Tensidkonzentration oder das gewählte Produkt, keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die ermittelten Dichten hatten.

### 5.1.2. Drainageverhalten von Schäumen

In Abbildung 5-4 sind die Drainagezeiten verschiedener Schäume in Abhängigkeit der **eingestellten FER** und der Art der Schaumlanze dargestellt. Bei den Versuchen wurden jeweils 80 g Schaum in den Filter 1 eingebracht und die Drainagezeiten von 10, 20, 30 und 40 g

bestimmt. Die Verläufe der Drainagezeiten der gleichen FER haben in den Diagrammen die gleichen Farben.

Bei Schaumlanze 1 lagen die ermittelten Drainagezeiten für 40 g Schaum mit eingestellten FER von 8 bis 20 zwischen 200 und 500 Sekunden. Der Wert der eingestellten FER von 25 wich mit über 900 Sekunden stark davon ab. Bei den Untersuchungen zur Bestimmung der Drainagezeit konnte ein relativer Fehler von ca. 10 % ermittelt werden (vgl. Abschnitt 4.1.4) Obwohl die Ergebnisse im Bereich dieses Fehlers schwanken können, zeigte sich bei den Drainagezeiten die Tendenz, dass Schäume mit niedriger FER geringe Drainagezeiten aufwiesen und mit steigender FER ein Anstieg der Drainagezeit zu verzeichnen war. Dieses Verhalten kann bei gleichbleibender Bläschengröße mit der zunehmenden Breite der Schaumlamellen bei sinkender FER begründet werden. Aufgrund der größeren Lamellenbreiten nimmt die Liquidmenge zwischen den Lamellen zu, so dass infolge dessen die Drainagegeschwindigkeiten steigen bzw. die Drainagezeiten abnehmen.

Die Drainagezeiten der mit Lanze 2 hergestellten Schäume waren bei den jeweiligen FER ungefähr doppelt so groß wie bei denen der Lanze 1 und wiesen eine Abhängigkeit von der eingestellten FER auf. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Drainagezeiten von den mit Lanze 1 und 2 produzierten Schäumen kann gefolgert werden, dass bei gleicher FER die mit der Schaumlanze 2 produzierten Schäume aufgrund der geringeren Drainagezeit Blasen mit geringeren Durchmessern aufweisen. Auf diesen Zusammenhang wird in Abschnitt 5.1.3 näher eingegangen.

Die Untersuchungen der Schäume von Lanze 3 wiesen größtenteils Drainagezeiten auf, die zwischen den Drainagezeiten der Schäume der Lanzen 1 und 2 lagen. Die Streuung der Drainagezeiten in Abhängigkeit der FER war bei Schäumen der Lanze 3 geringer als bei Schäumen der Lanzen 1 und 2. Wie bei den Drainagezeiten der anderen Lanzen ist auch hier eine Tendenz zu steigenden Drainagezeiten bei Erhöhung der FER zu erkennen.

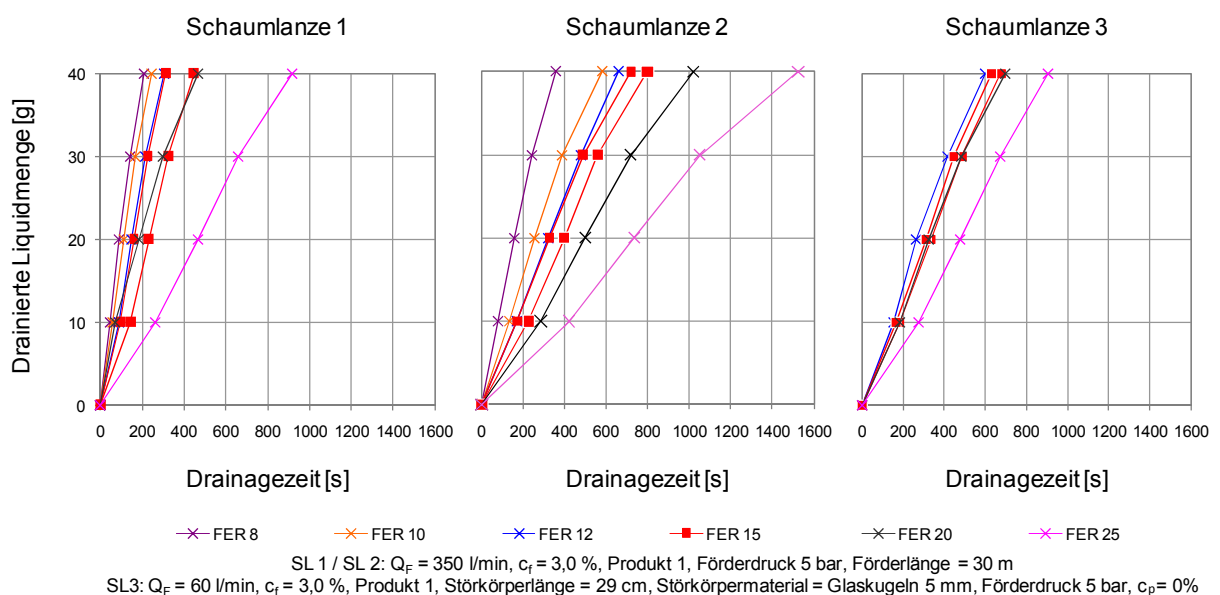


Abbildung 5-4: Drainagezeiten von Schäumen bei Variation der FER

Bei der Herstellung von Schäumen mit einer FER von 15 mit Schaumlanze 1 und Variation des **Schaumvolumenstroms**  $Q_F$  konnte ermittelt werden, dass mit zunehmendem Volumenstrom die Drainagezeit von 40 g Tensidlösung von ca. 300 Sekunden bei  $Q_F = 150$  l/min auf 500 Sekunden bei  $Q_F = 650$  l/min zunahm (vgl. Anlage C).

Mit Schaumlanze 2 wurden bei Volumenströmen zwischen 150 und 450 l/min Schäume mit einer FER von 15 produziert. Die Schäume wiesen Drainagezeiten für 40 g Tensidlösung zwischen 500 und 900 Sekunden auf. Auch bei Lanze 2 stiegen mit zunehmendem Volumenstrom des Schaums die Drainagezeiten, lediglich der Wert des Schaumvolumenstroms von  $Q_F = 250$  l/min wich von dieser Tendenz ab. Die Bandbreite der Drainagezeiten der mit Lanze 1 und 2 produzierten Schäume war annähernd gleich.

Bei Schaumlanze 3 wurden Volumenströme zwischen 50 und 70 l/min realisiert. Dabei zeigte sich die Tendenz, dass die Drainagezeiten bei niedrigen Schaumvolumenströmen geringer waren als bei hohen Schaumvolumenströmen. Die Drainagezeiten für 40 g Tensidlösung lagen zwischen 500 und 700 Sekunden und somit im Bereich der Werte von Schaumlanze 2.

Aus den Untersuchungen mit Variation des Volumenstroms konnte ermittelt werden, dass  $Q_F$  Einfluss auf die Drainagezeiten der Schäume hat. Dies kann bei annähernd gleichen FER (vgl. Abschnitt 5.1.1) im Aufbau der Schäume begründet sein. Durch die höheren Volumenströme könnten Schäume mit kleineren Bläschendurchmessern hergestellt werden, die eine höhere Drainagezeit aufweisen. Auf den Zusammenhang von Volumenstrom und Bläschen-durchmesser wird in Abschnitt 5.1.3 weiter eingegangen.

Abbildung 5-5 zeigt die Drainagezeit von Schäumen bei Variation unterschiedlicher **Tensidkonzentrationen**  $c_f$  im Bereich von 1,5 bis 5,0 %. Bei Schaumlanze 1 wiesen die Drainagezeiten von 40 g Liquid Werte zwischen 300 und 500 Sekunden auf. Eine genaue Aussage zur Abhängigkeit der Drainagezeit von der Tensidkonzentration war aufgrund der geringen Werte der Drainagezeiten und möglicher Messungenauigkeiten nicht möglich.

Bei den mit Lanze 2 produzierten Schäumen konnte hingegen eine Abhängigkeit zwischen der Drainagezeit und der Tensidkonzentration ermittelt werden. Die mit dieser Lanze produzierten Schäume wiesen Drainagezeiten zwischen 400 und 1.100 Sekunden mit deutlich größeren Bandbreiten der Ergebnisse auf. Schäume mit niedrigen Tensidkonzentrationen hatten geringe Drainagezeiten, während die Drainagezeiten für Schäume mit höheren Tensidkonzentrationen stiegen.

Bei den mit Lanze 3 hergestellten Schäumen lagen die Werte der Drainagezeit zwischen 400 und 1.000 Sekunden und zeigten ansatzweise einen Zusammenhang zwischen Tensidkonzentration und Drainageverhalten. Der Abbildung 5-5 ist zu entnehmen, dass Schäume mit höheren Tensidkonzentrationen tendenziell auch höhere Drainagezeiten aufweisen können, jedoch eine Steigerung der Konzentration nicht immer in einem linearen Zusammenhang mit einer Erhöhung der Drainagezeit steht (vgl. Steigerung von  $c_f = 2,0$  % zu  $c_f = 3,0$  % oder von  $c_f = 4,0$  % zu  $c_f = 5,0$  %).

Während die Tensidkonzentration keinen Einfluss auf die Dichte des Schaums hat (vgl. Abschnitt 5.1.1), spielt die  $c_f$  bei den Drainagezeiten der mit den Lanzen 2 und 3 hergestellten Schäume eine wichtige Rolle. Mit zunehmender Tensidkonzentration wird die Oberflächen-

spannung der Schaumblasen reduziert (vgl. Abschnitt 2.3.5) und der Drainageprozess durch die zusätzlichen Moleküle und deren Verbindungen beeinflusst, so dass die Drainagezeiten steigen können. Vor allem bei den Schaumlansen 2 und 3 wird der Einfluss der Tensidkonzentration  $c_f$  deutlich, da im Gegensatz zur Schaumlanze 1 die als Störkörper genutzten Glasperlen zu stärkeren Verwirbelungen und einer stärkeren Durchmischung von Tensidlösung und Luft führen können.

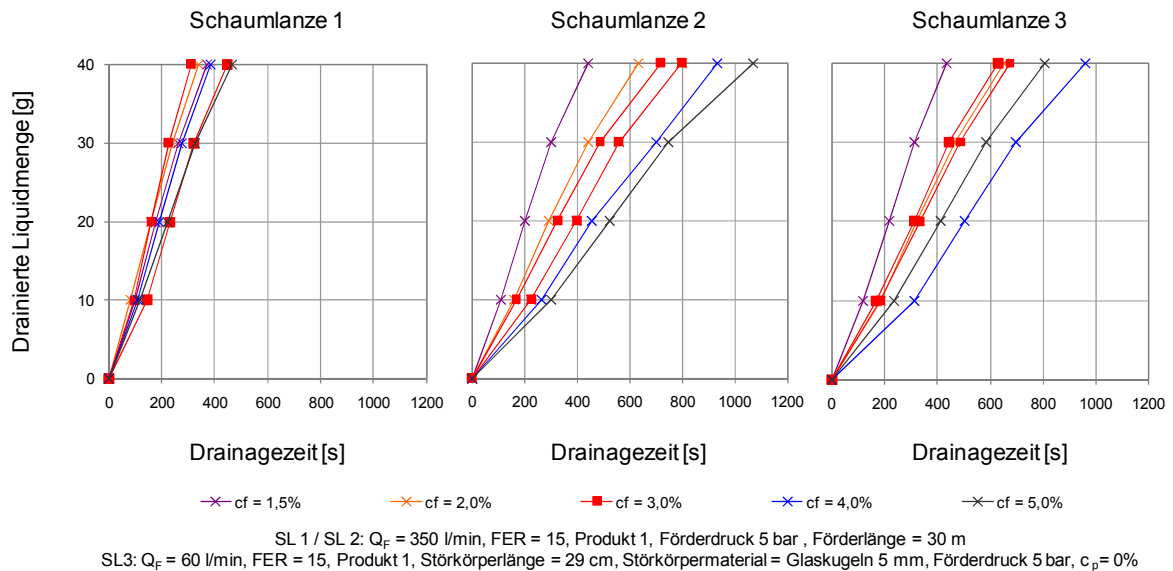


Abbildung 5-5: Drainagezeiten von Schäumen bei Variation der Tensidkonzentration  $c_f$

Abbildung 5-6 zeigt die Drainagezeiten von Schäumen bei Verwendung unterschiedlicher **Konditionierungsmittel**. Bei mit Lanze 1 produzierten Schäumen lagen die Drainagezeiten für 40 g Tensidlösung zwischen 100 und 500 Sekunden. Die Drainagezeiten der mit verschiedenen Produkten hergestellten Schäumen unterschieden sich, wobei durch die vergleichsweise kurze Drainagedauer die Ergebnisse der mit Lanze 1 produzierten Schäume nicht klar abgegrenzt werden können. Bei Produkt 2 wurden geringe Drainagezeiten um 100 Sekunden ermittelt, während die anderen Produkte Drainagezeiten zwischen 300 und 500 Sekunden aufwiesen.

Die Untersuchungen zu den Drainagezeiten der Schäume von Lanze 2 ergaben eine klare Differenzierung. Die Schäume der Produkte 2 und 3 hatten bei dieser Lanze verhältnismäßig geringe Drainagezeiten von 200 bis 400 Sekunden. Die Drainagezeiten der zwei Versuche mit Produkt 1 lagen im Bereich von 700 bzw. 800 Sekunden, während für Schäume mit Produkt 4 Drainagezeiten von ca. 1.200 Sekunden ermittelt wurden.

Eine ähnliche Abgrenzung der Ergebnisse mit unterschiedlichen Produkten wie bei Schaumlanze 2 konnte bei Schaumlanze 3 festgestellt werden, da die Werte des Schaums mit dem Produkt 1 im Bereich zwischen 600 und 700 Sekunden lagen und der Schaum des Produkts 4 mit ca. 900 Sekunden den höchsten Wert ergab. Die Produkte 2 und 3 wiesen mit Werten unter 200 Sekunden nur sehr geringe Drainagezeiten auf.

Vor allem bei den Lanzen 2 und 3 wird der große Einfluss des Konditionierungsmittels auf die Drainagezeit des Schaums deutlich. Bei unterschiedlicher Wahl von verschiedenen Schaumlanzen und Konditionierungsmitteln kann sich die Drainagezeit von 40 g Schaum um das 10-fache unterscheiden.

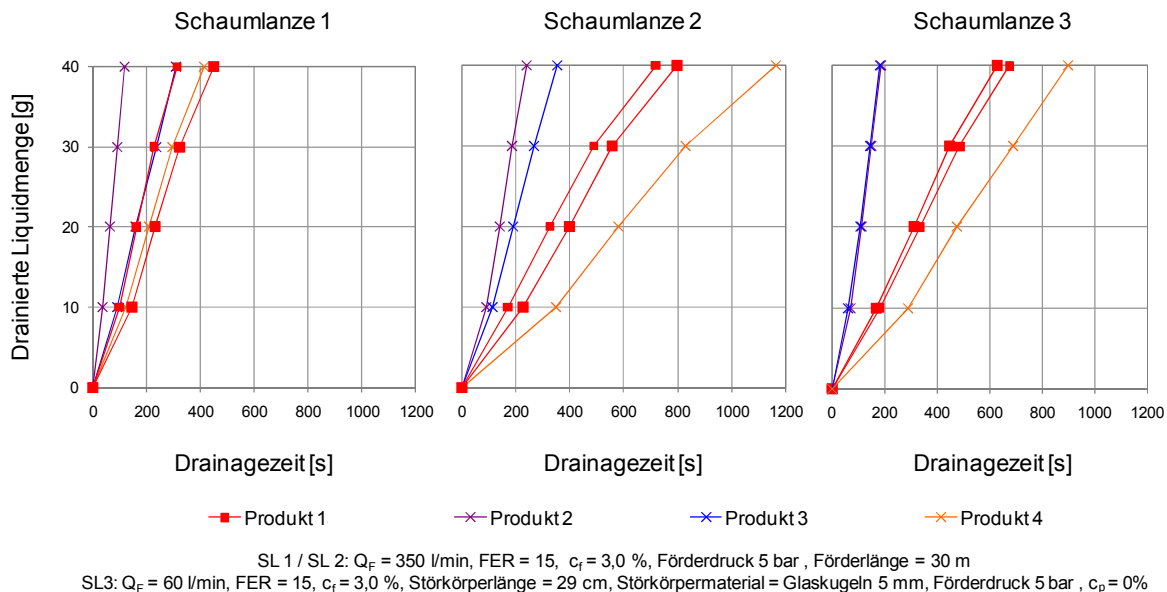


Abbildung 5-6: Drainagezeiten von Schäumen bei Variation des Produkts

Bei **Variation des Förderdrucks** bei Schaumlanze 1 konnte dieser für die kontinuierliche Schaumproduktion bis auf 2 bar reduziert werden, wobei die Verringerung des Förderdrucks zu einer Reduzierung der Drainagezeit für 40 g Tensidlösung führte (siehe Anlage C). So betrug die Drainagezeit für 40 g Tensidlösung eines mit einem Förderdruck von 2 bar hergestellten Schaums ca. 100 Sekunden, während die Drainagezeit von Schäumen, die mit Förderdrücken von 5 bar erzeugt wurden, bei über 400 Sekunden lag.

Bei Schaumlanze 2 konnte der Zusammenhang zwischen reduzierter Drainagezeit mit sinkendem Förderdruck nicht ermittelt werden. Bei dieser Schaumlanze zeigte sich vielmehr, dass die mit niedrigem Förderdruck hergestellten Schäume eine höhere Drainagezeit als die mit hohem Förderdruck produzierten Schäume aufwiesen. Auch bei Schaumlanze 3 konnte dieser Zusammenhang festgestellt werden. Die Drainagezeiten der mit 5 bar hergestellten Schäume waren geringfügig niedriger als die Drainagezeiten des mit 4 bar Förderdruck produzierten Schaums.

Infolge der Variation des Förderdrucks konnte bei den verschiedenen Lanzen kein einheitlicher Trend hinsichtlich der Drainagezeit ermittelt werden. Allerdings besteht bei Schaumlanze 1 ein Zusammenhang zwischen niedriger Drainagezeit und niedrigem Förderdruck. Die Drainagezeiten der mit Lanze 2 und 3 hergestellten Schäume wiesen hingegen höhere Drainagezeiten bei niedrigeren Förderdrücken auf. Der Grund für diese Unterschiede liegt vermutlich im Aufbau der jeweiligen Schaumlanze.

Für die mit den Lanzen 1 und 2 produzierten Schäume wurde die Drainagezeit in Abhängigkeit der **Förderlänge** bestimmt (vgl. Anlage C). Bei Schaumlanze 1 betrug die ermittelte



Drainagezeit für den Referenzschaum mit je 30 m Förderlänge ca. 300 bzw. 500 Sekunden. Zwischen den Verläufen dieser Versuche lagen die Werte der Versuche mit Förderlängen von 0, 14 und 22 m. Aufgrund des begrenzten Wertebereichs war daher keine Abhängigkeit der Drainagezeit von der Förderlänge feststellbar. Die Drainagezeiten der Schaumlanze 2 wiesen bei Variation der Förderlänge Werte zwischen 700 und 900 Sekunden auf. Eine lineare Abhängigkeit der Drainagezeit von der Förderlänge konnte nicht ermittelt werden.

Die Drainagezeiten von mit **unterschiedlichen Materialien** hergestellten Schäumen mit Schaumlanze 3 sind in Abbildung 5-7 (links) dargestellt. Die Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3 mm konnten nicht für die Herstellung einer FER von 15 genutzt werden (vgl. Abschnitt 5.1.1). Mit steigendem Durchmesser der verwendeten Glaskugeln sanken die Drainagezeiten der Schäume, die bei Glaskugeln mit einem Durchmesser von 5 mm bei ca. 700 Sekunden und bei Glaskugeln mit einem Durchmesser von 10 mm bei 500 Sekunden lagen (vgl. Abbildung 5-7 links). Aufgrund des höheren Widerstands bei kleinen Durchmessern ist zu vermuten, dass mehr Verwirbelungen erzeugt werden. Dadurch kann der Schaum kleinere Blasen aufweisen, was zu höheren Drainagezeiten führte. Alternativ kann sich durch die zusätzliche Verwirbelung eine veränderte und dadurch verbesserte Anordnung der Tensidmoleküle am Übergang zwischen Luft und Liquid ergeben haben, die zu einer längeren Drainagezeit führte. Ein Vergleich zwischen Drainagezeit und Bläschengröße erfolgt in Abschnitt 5.1.3. Die Drainagezeiten von Schäumen, die mithilfe von PET-Röhrchen produziert wurden, lagen bei 500 Sekunden und waren mit denen der Glaskugeln mit einem Durchmesser von 10 mm vergleichbar.

Die Drainagezeiten in Abhängigkeit der **Länge des Störkörpers** lagen zwischen 350 und 850 Sekunden (vgl. Abbildung 5-7 Mitte). Es ist zu erkennen, dass die Drainagezeit mit steigender Länge des Störkörpers zunahm. Durch die zunehmende Länge des Störkörpers erhöhte sich der Widerstand in der Schaumlanze, so dass Schaum mit kleineren Bläschen durchmessern produziert werden konnte, was die Drainagezeiten ansteigen ließ. Bei den Untersuchungen bildeten lediglich die Drainagezeiten des Schaums, der mit einer Länge von 39 cm hergestellt wurde, eine Ausnahme. Es ist ein klarer Zusammenhang zwischen Störkörperlänge und Drainagezeit zu erkennen.

Zudem wurden für Schäume der Schaumlanze 3 die Einflüsse auf die Drainagezeit aufgrund der **Polymerkonzentration  $c_p$**  untersucht. Der Schaum wurde dafür mit Produkt 1 und Polymer 1 hergestellt. Wie Abbildung 5-7 (rechts) zu entnehmen ist, lagen die Zeiten für die Drainage von 40 g Tensidlösung mit Werten zwischen 480 und 550 Sekunden dicht beieinander. Es war kein Zusammenhang zwischen Drainagezeit und Polymerkonzentration festzustellen.

Die Drainagezeit des Schaums ohne Polymerzusatz betrug bei diesen Versuchen ca. 500 Sekunden (vgl. Abbildung 5-7 rechts), während die Drainagezeiten der Referenzschäume bei gleichen Herstellparametern zuvor Werte über 600 Sekunden ergaben (vgl. Abbildung 5-7 links / Mitte). Da zwischen den Versuchen ungefähr eine Zeitspanne von einem Jahr lag, ist zu vermuten, dass die Schaumlanze oder der genutzte Trichter trotz regelmäßiger Reinigung und Wartung Veränderungen durch die stetige Nutzung erfahren hat, was zu diesen Abweichungen geführt haben könnte.

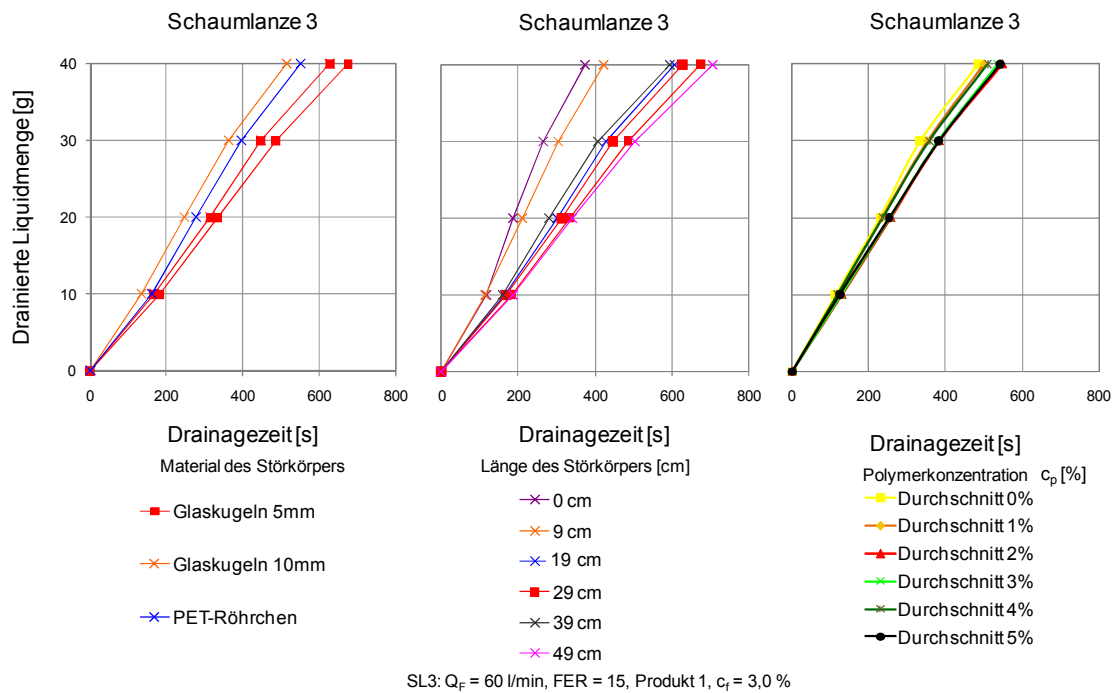


Abbildung 5-7: Drainagezeiten von Schäumen bei Variation des Materials (links), der Länge des Störkörpers (Mitte) und der Polymerkonzentration (rechts) bei Schaumlanze 3

### 5.1.3. Bläschengröße von Schäumen

Abbildung 5-8 zeigt die maximalen, mit dem Risslineal gemessenen Durchmesser von Schaumblasen in Abhängigkeit der unterschiedlich **eingestellten FER**. Bei den Schäumen der Lanze 1 ist zu erkennen, dass die maximalen Bläschendurchmesser zu Beginn der Messung zwischen 0,8 und 1,4 mm lagen und mit der Zeit üblicherweise zunahm. Zwischen den Werten der FER und der Bläschengröße konnte bei Schaumlanze 1 kein direkter Zusammenhang ermittelt werden. Es ist aber festzuhalten, dass vor allem hohe FER üblicherweise größere Bläschendurchmesser hervorgerufen haben. Mit zunehmender Versuchszeit wurden bei den Untersuchungen größere Bläschendurchmesser ermittelt, so dass nach 30 Minuten die Durchmesser zwischen 1,2 und 1,8 mm lagen.

Im Vergleich zu Lanze 1 wurden mit Schaumlanze 2 deutlich kleinere Schaumbläschen erzeugt. Die maximalen Bläschendurchmesser lagen zu Beginn der Untersuchungen zwischen 0,1 und 0,4 mm bzw. am Ende der Untersuchungen zwischen 0,2 und 0,8 mm. Ähnlich wie bei Schaumlanze 1 konnte auch bei Schaumlanze 2 keine eindeutige Zuordnung von großen Bläschendurchmessern zu höheren FER festgestellt werden. Jedoch wiesen die entsprechenden Verläufe auf diesen Zusammenhang hin.

Die mit Lanze 3 produzierten Schäume hatten zu Beginn der Untersuchungen Bläschendurchmesser zwischen 0,2 und 0,8 mm und nach 30 Minuten Werte zwischen 0,4 und 0,7 mm. Über die Dauer des Betrachtungszeitraums wurde bei Schäumen mit FER 20 und 25 eine Reduzierung des Bläschendurchmessers ermittelt. Allerdings könnte durch das Zerplatzen von größeren Schaumblasen der maximale Durchmesser der Bläschen mit der Zeit abgenommen haben. Bei Betrachtung aller Untersuchungen zur Bestimmung des Bläschen-

durchmessers sind mit zunehmender Zeit nur sehr selten geringere Durchmesser festgestellt worden.

Zwischen den maximalen Bläschendurchmessern der mit den jeweiligen Lanzen produzierten Schäume waren deutliche Unterschiede festzustellen, die u. a. zu veränderten Drainagezeiten führten (vgl. Abschnitt 5.1.2).

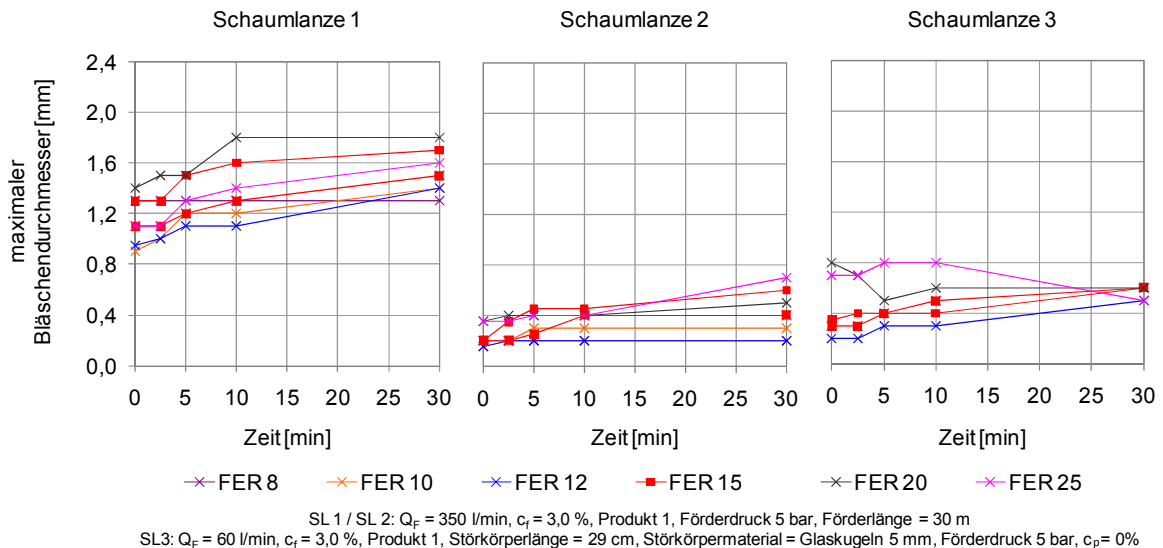


Abbildung 5-8: Bläschengröße von Schäumen bei Variation der FER

Abbildung 5-9 zeigt die Entwicklung der Bläschengröße von Schäumen bei Variation des **Schaumvolumenstroms**  $Q_F$ . Mit Lanze 1 hergestellte Schäume hatten zu Beginn der Untersuchungen einen Bläschendurchmesser zwischen 0,8 und 2,0 mm. Am Ende des Untersuchungszeitraums lagen die maximalen Durchmesser zwischen 1,0 und 2,2 mm. Ein hoher Schaumvolumenstrom scheint auf eine Reduzierung des Bläschendurchmessers hinzuweisen, da die hohen Volumenströme zu stärkeren Verwirbelungen in der Schaumlanze und zu kleineren Bläschendurchmessern führten. In den Versuchen konnte diese Erkenntnis ansatzweise bestätigt werden. Mit der Veränderung der Bläschengröße ging ein Wechsel der Drainagezeit einher (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Die Bläschen der mit Lanze 2 hergestellten Schäume wiesen zu Beginn des Untersuchungszeitraums Durchmesser zwischen 0,2 und 0,4 mm und nach 30 Minuten Durchmesser zwischen 0,2 und 0,7 mm auf. Bei diesen Versuchen konnte nur ansatzweise ein Einfluss des Schaumvolumenstroms auf die Bläschengröße ermittelt werden. Diese Erkenntnis gilt auch für die Ergebnisse der Untersuchungen mit Schaumlanze 3. Bei dieser Schaumlanze wurden zu Beginn maximale Bläschendurchmesser zwischen 0,2 und 0,4 mm und am Ende der Versuchszeit zwischen 0,2 und 0,7 mm festgestellt. Ein Zusammenhang zwischen  $Q_F$  und dem maximalen Bläschendurchmesser ließ sich bei Schaumlanze 3 nicht ermitteln.

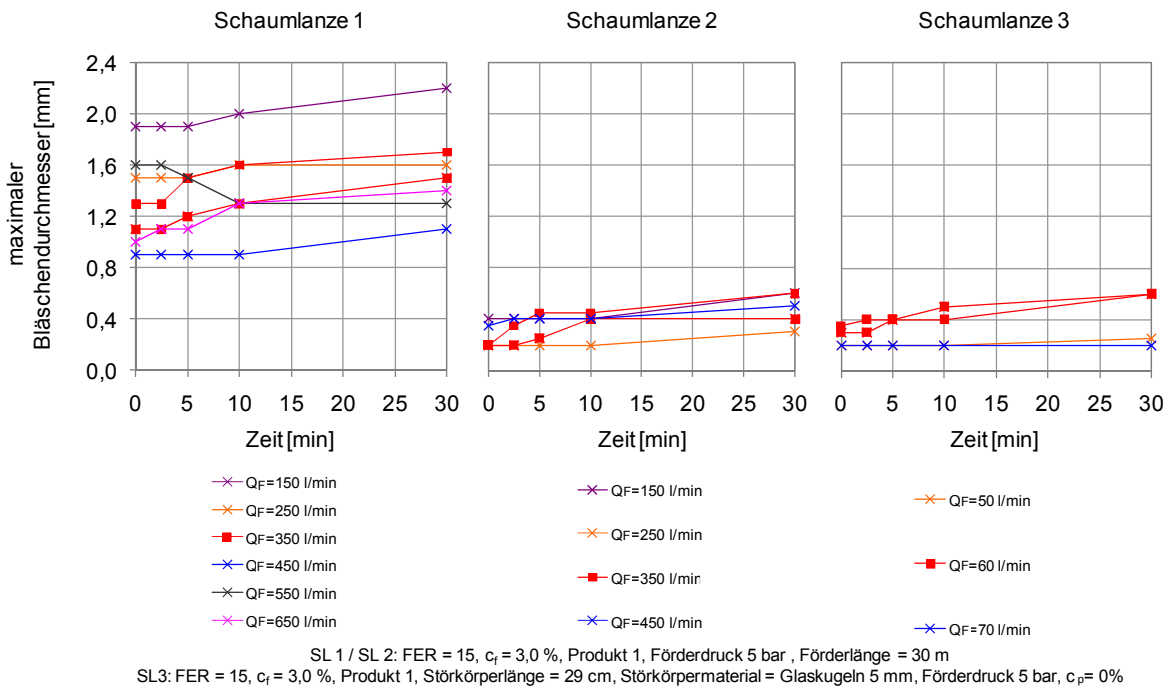


Abbildung 5-9: Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Volumenstroms des Schaums

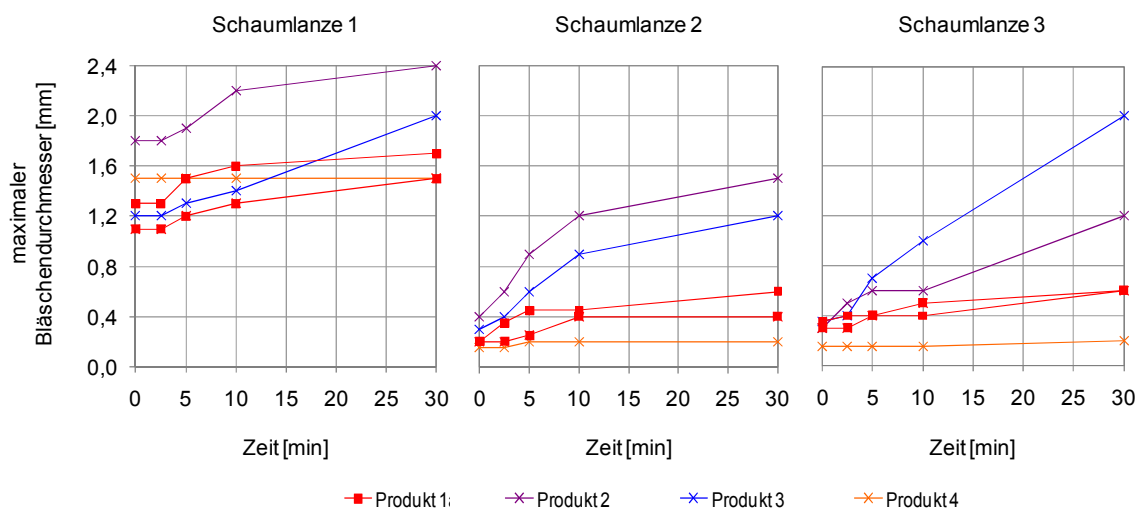
Aus den Untersuchungen zum Einfluss der **Tensidkonzentration** auf die maximale Bläschengröße waren für alle Schaumlanzen weder zu Beginn noch am Ende des Untersuchungszeitraums keine Abhängigkeiten auszumachen (vgl. Anlage C). Durch die Steigerung der Tensidkonzentration wird zwar nicht der maximale Bläschendurchmesser beeinflusst,  $c_f$  hat aber Auswirkungen auf das Drainageverhalten (vgl. Abschnitt 5.1.2). Daraus ist zu schließen, dass die Steigerung der Drainagezeit von der Anzahl der Tensidmoleküle und nicht von einem veränderten Bläschendurchmesser abhängig ist.

Die Bläschengrößen von Schäumen, die mit unterschiedlichen **Konditionierungsmitteln** hergestellt wurden, sind in der Abbildung 5-10 dargestellt. Bei Schaumlanze 1 erfolgte die Herstellung von Schäumen mit einem Durchmesser von 1,1 bis 1,8 mm. Mit zunehmender Untersuchungszeit stieg vor allem die Bläschengröße der mit den Produkten 2 und 3 hergestellten Schäume auf bis zu 2,4 mm an. Durch die Steigerung des Durchmessers verringerten sich die Breiten der Schaumlamellen und die Drainagezeiten sanken (vgl. Abschnitt 5.1.2). Die Bläschengrößen der Schäume des Produkts 1 nahmen während der Untersuchungszeit nicht so stark wie die der Produkte 2 und 3 zu. Das Produkt 4 wies hingegen während des Versuchszeitraums einen konstanten Bläschendurchmesser auf.

Die mit Schaumlanze 2 produzierten Schäume hatten zu Beginn der Versuche höchstens einen maximalen Bläschendurchmesser von 0,4 mm. Wie bei den Schäumen mit Schaumlanze 1 nahmen auch die Bläschendurchmesser der mit den Produkten 2 und 3 hergestellten Schäume während des Untersuchungszeitraums mit bis zu 1,2 bzw. 1,5 mm am stärksten zu. Die Bläschendurchmesser der Schäume mit Produkt 1 erhöhten sich nur geringfügig, während der Schaum mit Produkt 4 einen fast konstanten, maximalen Bläschendurchmesser hatte.

Ein ähnliches Verhalten wie bei den mit Lanze 2 produzierten Schäumen war bei den mit Lanze 3 hergestellten Schäumen zu erkennen. Vor allem die maximalen Bläschendurchmesser von Produkt 2 und 3 stiegen während des Untersuchungszeitraums von ca. 0,4 mm auf bis zu 2,0 mm an. Die zeitlichen Verläufe des Bläschendurchmessers der Produkte 1 und 4 wiesen ähnliche Verläufe wie bei Schaumlanze 2 auf.

Die Untersuchungen mit den Schaumlanzen zeigten, dass die Bläschengröße des hergestellten Schaums durch das jeweilige Produkt stark beeinflusst werden kann. Diese Erkenntnisse gehen mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur Drainagezeit einher (vgl. Abschnitt 5.1.2).



SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %, Förderdruck 5 bar, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0\%$

Abbildung 5-10: Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Produkts

Bei den Untersuchungen zur Bläschengröße lagen die Ergebnisse der einzelnen Versuche der jeweiligen Schaumlanzen infolge der **Variation des Förderdrucks** verhältnismäßig nah beieinander (vgl. Anlage C). Aus den Ergebnissen konnte kein Einfluss der Förderdrücke auf die Bläschengröße des Schaums festgestellt werden.

Die Untersuchungen zum Einfluss der **Förderlänge** auf den Durchmesser der Schaumblasen wurden mit den Schaumlanzen 1 und 2 durchgeführt. Die mit Lanze 1 hergestellten Schäume wiesen bei einer Förderlänge zwischen 14, 22 und 30 m am Anfang maximale Bläschendurchmesser von 1,0 bis 1,4 mm und am Ende des Untersuchungszeitraums zwischen 1,4 und 1,8 mm auf (vgl. Anlage C). Lediglich die Bläschendurchmesser der Schäume, die über eine Förderlänge von 0 m transportiert wurden, lagen mit Werten zwischen 0,6 und 0,8 mm unterhalb dieses Bereichs. Die Verläufe der maximalen Bläschendurchmesser der mit Lanze 2 produzierten Schäume wiesen zu Beginn Werte im Bereich zwischen 0,2 und 0,4 mm und am Ende des Untersuchungszeitraums zwischen 0,4 und 0,8 mm auf. Es konnten keine Abhängigkeiten zur Förderlänge festgestellt werden. Aus den Untersuchungen ist zu schließen, dass die Länge des Fördersystems nur eine untergeordnete Rolle spielt und kaum Einfluss auf die maximale Bläschengröße der Schäume hat.

In Abbildung 5-11 (links) sind die Bläschendurchmesser von mit Lanze 3 produzierten Schäumen bei Variation des **Störkörpermateri- als** dargestellt. Dabei zeigte sich, dass die Bläschendurchmesser, der mit Glaskugeln mit einem Durchmesser von 5 mm produzierten Schäume, ähnliche Werte aufwiesen, wie jene Schäume, für deren Produktion Glaskugeln von 10 mm oder PET-Röhrchen zum Einsatz kamen. Die sich aufgrund der verschiedenen Materialien gering unterscheidenden Drainagezeiten der Schäume (vgl. Abschnitt 5.1.2) könnten auf die nur unwesentlich unterschiedlichen maximalen Bläschendurchmesser zurückzuführen sein.

Abbildung 5-11 (Mitte) zeigt die Bläschendurchmesser von Schäumen, die mit unterschiedlichen **Störkörperlängen** hergestellt wurden. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass sich mit zunehmender Länge des Störkörpers eine Verringerung des Bläschendurchmessers ergibt. Vor allem zum Abschluss des Untersuchungszeitraums von 30 Minuten ist zu erkennen, dass eine Abhängigkeit der Bläschendurchmesser zur Störkörperlänge besteht. Die Länge des Störkörpers von 29 cm bewirkte dabei eine wesentliche Reduzierung des Bläschendurchmessers, wobei größere Längen den Bläschendurchmesser nur geringfügig verminderten. Die Verringerung des Bläschendurchmessers mit steigender Länge des Störkörpers führte zu einer Erhöhung der Drainagezeiten (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Da die Bläschendurchmesser der **Schäume mit Polymerzusatz** nur unmittelbar nach Schaumherstellung bestimmt wurden, konnten keine Verläufe ermittelt werden. Der maximale, mit dem Risslineal ermittelte Bläschendurchmesser des Schaums lag unmittelbar nach der Schaumherstellung zwischen 0,30 – 0,60 mm und damit annähernd im Bereich der für diese Einstellungen ermittelten Bläschendurchmesser von Schäumen ohne Polymerzusatz.

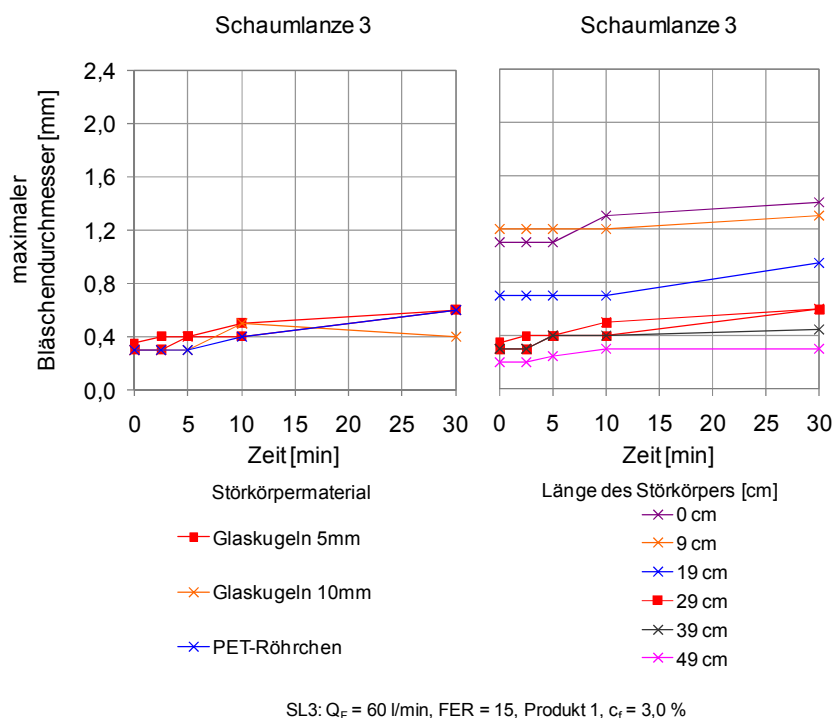


Abbildung 5-11: Bläschengröße von Schäumen bei Variation des Störkörpermateri- als (links) und der Länge des Störkörpers (rechts)

Grundsätzlich ist es sinnvoll, Schäume bei gleicher FER mit geringen, maximalen Bläschen-durchmessern herzustellen, da diese Schäume im Vergleich zu Schäumen mit größeren Bläschen-durchmessern längere Drainagezeiten aufweisen. Zudem können die Bläschen-durchmesser durch Parameter, wie z. B. die Tensidkonzentration oder den Volumenstrom beeinflusst werden.

In Abbildung 5-12 sind die in allen Versuchen ermittelten maximalen Bläschen-durchmesser unmittelbar nach Schaumherstellung den jeweiligen Drainagezeiten für 40 g Liquid gegenübergestellt. Die in den Untersuchungen bestimmten Werte sind den Schaumlanzen jeweils einheitlich farblich zugeordnet und die entsprechende Mittelwerte schwarz markiert.

Die mit Lanze 1 produzierten Schäume wiesen unmittelbar nach deren Herstellung größtenteils einen maximalen Bläschen-durchmesser zwischen 0,8 und 2,0 bei einer Drainagezeit für Liquid zwischen 100 und 500 Sekunden auf. Der Mittelwert der mit Lanze 1 produzierten Schäume lag bei 1,3 mm maximalem Bläschen-durchmesser bzw. ca. 370 Sekunden Drainagezeit. Vor allem die Drainagezeit aufgrund einer FER von 25 wich mit einem Wert von ca. 900 Sekunden wesentlich von diesem Mittelwert ab. Die mit Lanze 2 hergestellten Schäume hatten einen maximalen Bläschen-durchmesser zum Untersuchungszeitpunkt von 0,4 mm und wiesen eine Drainagezeit für 40 g Liquid zwischen 200 und größtenteils ca. 1.200 Sekunden auf. Der Mittelwert bei Schäumen dieser Lanze lag bei 0,3 mm maximalem Bläschen-durchmesser bzw. etwa 760 Sekunden Drainagezeit. Auch hier wich die Drainagezeit des Schaums mit einer FER von 25 mit über 1.500 Sekunden vom Mittelwert ab. Die Schäume der Lanze 3 wiesen Drainagezeiten für 40 g Liquid zwischen 200 und 1.000 Sekunden sowie einen maximalen Bläschen-durchmesser zwischen 0,15 und 1,2 mm auf. Der Mittelwert dieser Untersuchungen lag bei 0,4 mm maximalem Bläschen-durchmesser und 615 Sekunden Drainagezeit. Die großen maximalen Bläschen-durchmesser sind vor allem aufgrund einer hohen FER und einer geringen Störkörperlänge hervorgerufen worden.

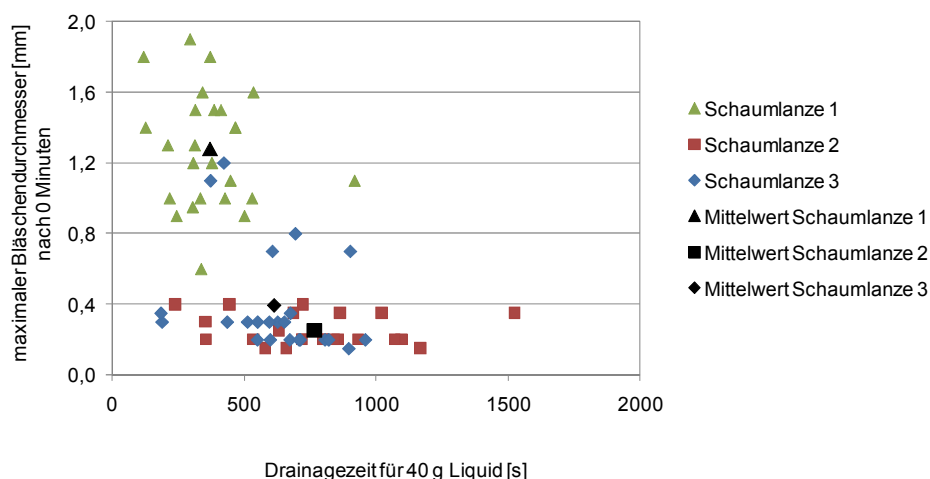


Abbildung 5-12: Maximaler Bläschen-durchmesser in Abhängigkeit der Drainagezeit für 40 g Liquid und der Art der Schaumlanze

Diese Auswertung zeigt, dass vor allem die Wahl der Schaumlanze die Bläschen-größe und die Drainagezeit beeinflusst. Schäume, die mit Schaumlanze 1 hergestellt wurden, wiesen

eine vergleichsweise geringe Drainagezeit und einen großen Bläschendurchmesser auf. Die mit Lanze 2 produzierten Schäume hatten hingegen nur einen geringen Durchmesser und eine hohe Drainagezeit. Die Werte der mit Schaumlanze 3 hergestellten Schäume lagen meist zwischen diesen Werten. Zudem ist zu erkennen, dass kein direkter Zusammenhang zwischen maximalem Bläschendurchmesser und Drainagezeit bestehen muss. Vielmehr können z. B. die Wahl einer eingestellten FER, des Konditionierungsmittels oder auch bei Schaumlanze 3 die Länge des Störkörpers die Werte beeinflussen (vgl. dazu auch Abschnitt 5.1.2).

#### 5.1.4. Kompressibilität von Schäumen

Die Kompressibilität der Schäume wurde mit unterschiedlichen Drücken bis 2,0 bar getestet. Die Bestimmung des jeweiligen Schaumvolumens erfolgte in Abhängigkeit des Drucks.

Abbildung 5-13 zeigt die prozentualen Volumina von mit unterschiedlichen Lanzen produzierten Schäumen (Referenzversuche). Bei den mit gleicher FER hergestellten Schäumen wurde das theoretische Schaumvolumen nach dem Gesetz von *Boyle-Mariotte* ermittelt und im Diagramm dargestellt. Bei Betrachtung der jeweiligen Volumina der Schäume ist festzustellen, dass die Verläufe der einzelnen Versuche nur unwesentlich von dem theoretischen Verlauf der mittleren Schaumhöhe nach *Boyle-Mariotte* abweichen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Kompressibilität der Schäume unabhängig von der Schaumlanze ist.

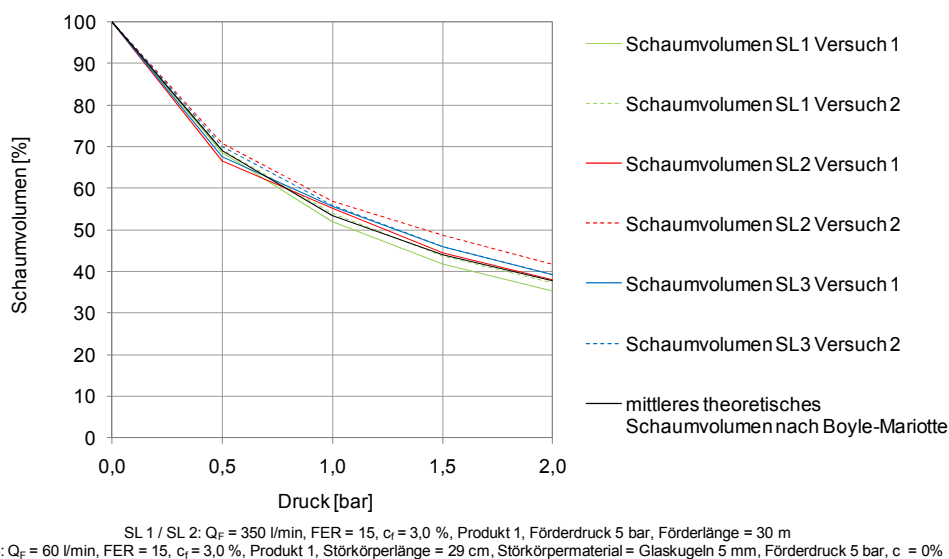


Abbildung 5-13: Kompressibilität von verschiedenen Schäumen im Vergleich zum mittleren theoretischen Schaumvolumen

In weiteren Untersuchungen wurden verschiedene Parameter variiert. Aus den Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass bei Berücksichtigung von Mess- und Ableseungenauigkeiten die Schaumvolumina der untersuchten Schäume nach dem Gesetz von *Boyle-Mariotte* bestimmt werden können und von den untersuchten Einflüssen unabhängig sind. Es ist daher kein Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Kompressibilität feststellbar.



### 5.1.5. Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Schäume

Aus den zuvor beschriebenen Untersuchungsergebnissen zur Bestimmung der Eigenschaften von im Tunnelbau genutzten Schäumen wurden die jeweiligen qualitativen Einflüsse auf die Schaumeigenschaften herausgearbeitet und in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Für die Parameter der untersuchten Schaumlanzen sind die Einflussfaktoren in die qualitativen Kategorien „kein oder kaum Einfluss“, „mittlerer Einfluss“ und „großer Einfluss“ unterteilt.

Tabelle 5-1: Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Schäume

		Einfluss auf			
		Dichte	Drainagezeit	Bläschengröße	Kompressibilität
Schaumlanze		o	++	++	o
Aufschäumrate FER	SL1 / SL2 / SL3	+ / o / o	+ / + / +	+ / + / +	o / o / o
Volumenstrom des Schaums $Q_F$	SL1 / SL2 / SL3	+ / o / o	+ / + / +	+ / + / +	o / o / o
Tensidkonzentration $c_f$	SL1 / SL2 / SL3	o / o / o	o / + / +	+ / + / +	o / o / o
Konditionierungsmittel	SL1 / SL2 / SL3	o / o / o	++ / ++ / ++	++ / ++ / ++	o / o / o
Förderdruck	SL1 / SL2 / SL3	o / o / o	+ / + / +	o / o / o	o / o / o
Länge des Fördersystems	SL1 / SL2 / SL3	o / o / x	o / o / x	o / o / x	o / o / x
Störkörpermaterial	SL3	o	+	o	o
Störkörperlänge	SL3	o	++	++	o
Polymerkonzentration $c_p$	SL3	o	o	o	o

SL1 = Schaumlanze 1  
SL2 = Schaumlanze 2  
SL3 = Schaumlanze 3

o = kein oder kaum Einfluss  
+ = mittlerer Einfluss  
++ = großer Einfluss  
x = nicht ermittelt

Aus der Übersicht geht hervor, dass die Dichte der untersuchten Schäume von den einzelnen Parametern nur geringfügig beeinflusst wird. Lediglich die Schaumlanze 1 hat aufgrund des Volumenstroms und der Aufschäumrate FER einen mittleren Einfluss auf die ermittelte Schaumdichte.

Vor allem die Schaumlanze (Aufbau, Material und Länge des Störkörpers) und die genutzten Konditionierungsmittel beeinflussen die Drainagezeit des Schaums z. T. stark. Des Weiteren spielen der Volumenstrom des Schaums, der Förderdruck, die Aufschäumrate und ggf. die Tensidkonzentration bei der Bestimmung der Drainagezeit von Schäumen eine wichtige Rolle.

Viele Parameter haben den gleichen Einfluss auf die Drainagezeit und auf die Bläschengröße. Einzelne Unterschiede liegen z. T. beim Förderdruck und beim Störkörpermaterial. Die Kompressibilität der Schäume wird von keinem der untersuchten Faktoren wesentlich beeinflusst.

Zwischen den mit den Schaumlanzen 1 und 2 hergestellten Schäumen konnten wesentliche Unterschiede vor allem in Bezug auf die Drainagezeit und die Bläschengröße ermittelt werden. Die mit Schaumlanze 1 hergestellten Schäume wiesen verhältnismäßig niedrige Drainagezeiten auf.

nagezeiten und große maximale Bläschendurchmesser auf, während bei Schaumlanze 2 hohe Drainagezeiten und kleinere Durchmesser der Schaumblasen bestimmt wurden.

Die Polymerkonzentration  $c_p$  hatte keinen Einfluss auf die Eigenschaften der Schäume. Möglicherweise können die Inhaltsstoffe des Polymers jedoch bei der Bodenconditionierung eine Veränderung der Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen verursachen. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen von mit Polymerschäumen konditionierten Lockergesteinen durchgeführt und die Ergebnisse in Kapitel 6 vorgestellt.

## 5.2. Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen

Für die Untersuchungen von im Tunnelbau als Konditionierungsmittel genutzten Polymeren erfolgte die Verwendung der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Polymere 2 und 3. Polymer 1 wurde hingegen nicht untersucht, da es sich um ein Produkt handelt, welches nur bei der Schaumherstellung eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.1.3). Für die Durchmischung der Polymere bzw. Polymersuspensionen wurde der Mischer IKA RW 20 eingesetzt, wobei dieser aufgrund des Widerstands von Polymeren eine maximale Drehzahl von ca. 400 bis 800 U/min erreichte. Die Untersuchungen mit Polymer 2 bei 50 %-iger Konzentration und unterschiedlichen Mischzeiten waren nicht durchführbar, da es zu einer Flockenbildung kam und die Herstellung einer homogenen Suspension entgegen der Produktbeschreibung nicht möglich war.

### 5.2.1. Marsh-Zeit von Polymeren und Polymersuspensionen

Die Ergebnisse zu den Marsh-Zeiten von Polymeren und Polymersuspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen und Mischzeiten sind in Abbildung 5-14 dargestellt. Die Marsh-Zeiten des ungemischten Polymers 2 lagen zwischen 370 und 410 Sekunden und verringerten sich bei einer maximalen Mischzeit von 10 Minuten auf bis zu 340 Sekunden.

Das Polymer 3 mit einer Konzentration von  $c_p = 100 \%$  hatte eine Marsh-Zeit von ca. 1.500 Sekunden. Mit zunehmender Mischzeit nahm die Marsh-Zeit deutlich ab, so dass bei einer Mischdauer von 10 Minuten die Marsh-Zeit lediglich 420 Sekunden betrug.

Der Wert der 1 Minute lang durchmischten 5 %-igen Suspension lag bei nur 32 Sekunden und damit deutlich unterhalb des unverdünnten Polymers mit einer Konzentration von  $c_p = 100 \%$ . Da die Marsh-Zeit des Polymers 3 mit einer  $c_p = 5 \%$  annähernd im Bereich der Marsh-Zeit von Wasser mit 28 Sekunden lag, wurden keine weiteren Untersuchungen mit dieser Polymersuspension durchgeführt, da diese geringe Marsh-Zeit auch für andere Mischzeiten angesetzt werden kann.

Die Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Wahl des Polymers als auch dessen Konzentration  $c_p$  einen großen Einfluss auf die Marsh-Zeit haben. Die verschiedenen Zusammensetzungen der Polymere bzw. Polymersuspensionen führen zu diesen Unterschieden. Zudem ist sowohl bei Polymer 2 als auch bei Polymer 3 ein Einfluss der Mischzeit auf die Marsh-Zeit zu erkennen. Die Reduzierung der Marsh-Zeit mit steigender Mischzeit resultiert vermutlich

aus einer möglichen Trennung langkettiger Polymere während der Durchmischung. Durch die Trennung von Polymerketten kann die Viskosität des Polymers reduziert werden, so dass die Marsh-Zeit sinkt.

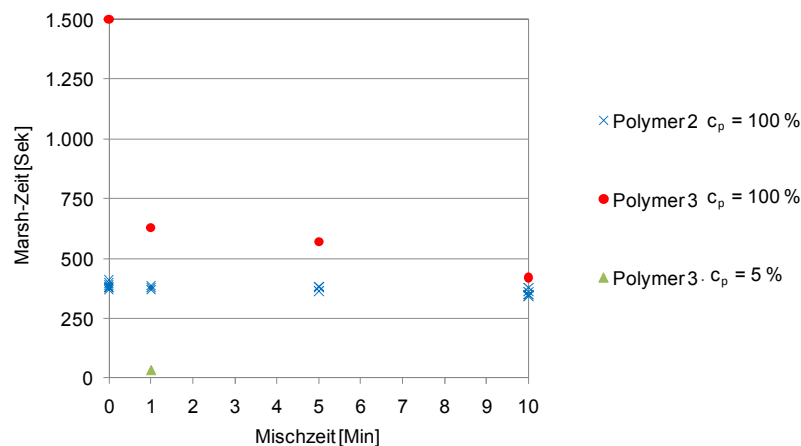


Abbildung 5-14: Marsh-Zeit von verschiedenen Polymeren bzw. Polymersuspensionen in Abhängigkeit von Mischzeit und Konzentration

Bentonitsuspensionen, die u. a. als Stützmedium bei flüssigkeitsgestützten Vortrieben genutzt werden, können Marsh-Zeiten von bis zu 75 Sekunden aufweisen [73]. Sofern ähnliche Pumpen wie bei der Förderung von Bentonitsuspensionen zur Förderung von Polymersuspensionen genutzt werden, ist es sinnvoll, dass die Marsh-Zeit der Suspensionen zwischen 30 und 75 Sekunden liegt. Sofern höhere Marsh-Zeiten und eine damit verbundene höhere Viskosität des Konditionierungsmittels erreicht werden, ist die Förderungstechnik entsprechend anzupassen.

### 5.2.2. Kugelharfenversuche nach von Soos für Polymere und Polymersuspensionen

In der Abbildung 5-15 ist die in Versuchen mit der Kugelharfe ermittelte Kugelnummer für unterschiedliche Polymere mit verschiedenen Konzentrationen in Abhängigkeit der Mischzeit aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass für Polymer 2 die ermittelte Kugelnummer unabhängig von der Mischzeit ist.

Bei Polymer 3 und einer  $c_p = 100\%$  wurde eine von der Mischzeit abhängige Kugelnummer bestimmt. Während für das nicht durchmischte Polymer die Kugelnummer 2 ermittelt wurde, sank die Nummer mit zunehmender Mischdauer. Bei einer Mischzeit von 1 Minute war mit der Kugelharfe nur noch die Kugel Nr. 1 zu ermitteln. Nach 5 Minuten Mischzeit versanken alle Kugeln im Polymer. Bei der Konzentration  $c_p = 5\%$  des Produkts 3 konnte bei der Mischdauer von 1 Minute bereits keine Kugel mehr gehalten werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die zu ermittelnde Kugelnummer der Polymersuspensionen mit Polymer 3 stark von der Konzentration und der Mischdauer abhängig sein können. Zudem haben die Einflüsse auf die Bestimmung der Kugelnummer eine ähnliche Qualität wie jene auf die Bestimmung der Marsh-Zeit. Bei beiden Untersuchungen spielen die gewählten

Polymere und ihre Konzentrationen eine wesentliche Rolle, während die Mischdauer nur z. T. Einfluss auf die jeweiligen Versuche hat.

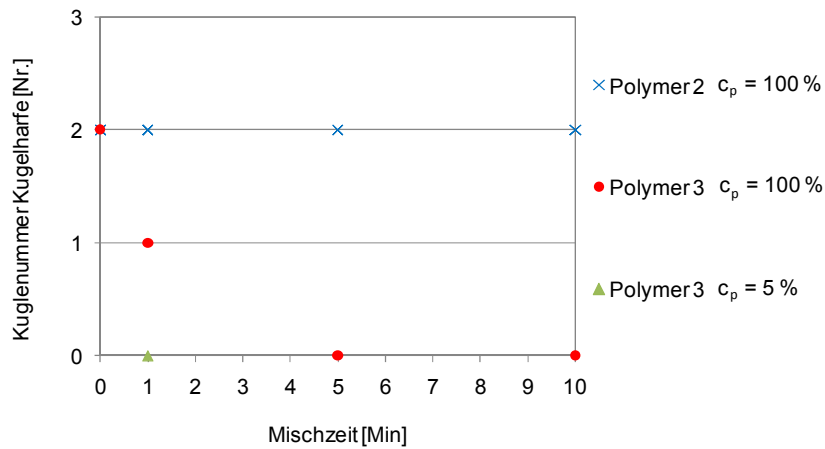


Abbildung 5-15: Kugelnnummern von verschiedenen Polymeren bzw. Polymersuspensionen in Abhängigkeit der Mischzeit und Konzentration

### 5.2.3. Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Polymere und Polymersuspensionen

Die nachfolgende Tabelle 5-2 zeigt eine Übersicht zum qualitativen Einfluss von verschiedenen Herstellungsparametern auf die Eigenschaften der Polymere bzw. Polymersuspensionen. Aus den Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass die Mischzeit nur mittleren Einfluss auf die Marsh-Zeit und den Versuch mit der Kugelharfe hatte. Das Polymerprodukt und die Polymerkonzentration hingegen können großen Einfluss auf die Marsh-Zeit und die Kugelnummer haben.

Tabelle 5-2: Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Polymere bzw. Polymersuspensionen

	Einfluss auf	
	Marsh-Zeit	Kugelharfe
Mischzeit	+	+
Polymerkonzentration	++	++
Polymerprodukt	++	++

o = kein oder kaum Einfluss  
 + = mittlerer Einfluss  
 ++ = großer Einfluss

### 5.3. Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen

Für die Herstellung von Feinstoffsuspensionen wurde das in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Konzept zur Bestimmung der Dichte und des Ausbreitmaßes der Suspension durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Materialien, Konzentrationen und Mischverfahren genutzt.

### 5.3.1. Dichtebestimmung von Feinstoffsuspensionen

Die Herstellung von Feinstoffsuspensionen erfolgte u. a. mit Kalksteinmehl, das eine Konzentration von  $c_{\text{susp}} = 50$  und  $55$  % aufwies. Dafür wurde die erforderliche Menge Wasser in einen Behälter gegeben und das Kalksteinmehl bei laufendem Mischer innerhalb einer Minute sukzessive zugeführt. Nach Zugabe des gesamten Kalksteinmehls fand eine Durchmischung der Feinstoffsuspension über die zuvor festgelegte Mischdauer von 5 Minuten statt.

Abbildung 5-16 (links) zeigt die Dichten von mit Kalksteinmehl hergestellten Suspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen. Die maximal mit dem genutzten Mischer herstellbare Feinstoffkonzentration lag bei  $c_{\text{susp}} = 55$  %. Die Dichte stieg bei zunehmender Feinstoffkonzentration und lag zwischen  $1,85$  kg/l ( $c_{\text{susp}} = 50$  %) und  $1,95$  kg/l ( $c_{\text{susp}} = 55$  %). Zwischen den Ergebnissen der mit der Dissolverschleibe oder dem Ankerrührer hergestellten Suspensionen war kein großer Unterschied festzustellen.

Auf der rechten Seite der Abbildung 5-16 sind die Ergebnisse von Untersuchungen zur Dichte von Feinstoffsuspensionen bei Verwendung unterschiedlicher Materialien dargestellt, die unter Einsatz des Ankerrührers hergestellt wurden. Die mit dem Mischer maximal herstellbaren Feinstoffkonzentrationen lagen beim Mikrosil M300 bei  $c_{\text{susp}} = 45$  %, beim Mikrosil M4 bei  $c_{\text{susp}} = 55$  % und beim Kalksteinmehl bei  $c_{\text{susp}} = 55$  %. Dabei wurden Dichten zwischen  $1,80$  und  $2,00$  kg/l erreicht. Bei jeweils höheren Konzentrationen war keine Durchmischung mehr möglich. Für das Bentonit B1 wurde eine maximale Feinstoffkonzentration von  $c_{\text{susp}} = 10$  % festgestellt.

Die unterschiedlichen Materialien und Konzentrationen können zu verschiedenen Dichten der Feinstoffsuspension führen. Für eine Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit eines Stützmediums sollte der Anteil an Feinstoffen im konditionierten Lockergestein erhöht werden. Aus diesem Grund eignet sich als Konditionierungsmittel eine Feinstoffsuspension mit möglichst hoher Konzentration  $c_{\text{susp}}$ .

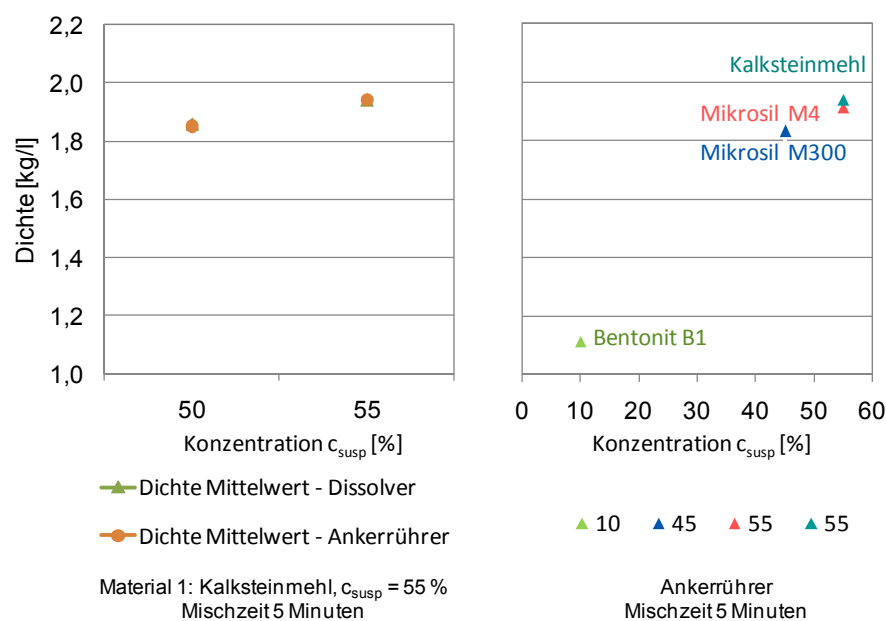


Abbildung 5-16: Dichte von Feinstoffsuspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen und Materialien

### 5.3.2. Pumpfähigkeit von Feinstoffsuspensionen

Als übliche Anforderung zur Pumpbarkeit von Ringspaltmörteln ist ein Ausbreitmaß von 15 cm erforderlich (vgl. Abschnitt 4.3.4). Diese Randbedingung wird auf die Pumpbarkeit von Feinstoffsuspensionen übertragen, so dass die Untersuchungen zur Pumpbarkeit von Feinstoffsuspensionen darauf zielen, Ausbreitmaße größer als 15 cm zu erhalten.

Mit zunehmender Konzentration sank die Umdrehungszahl des Mixers aufgrund des Widerstands des Materials, so dass diese von ursprünglich 500 U/min auf geringere Werte während des Mischvorgangs angepasst werden musste. In Abbildung 5-17 (links) sind die Ergebnisse der mit Kalksteinmehl hergestellten Feinstoffsuspensionen mit den Konzentrationen von  $c_{\text{susp}} = 50$  und 55 % dargestellt. Bei zunehmender Feinstoffkonzentration sanken die Ausbreitmaße von 30,0 cm auf ca. 24,0 cm. Es bestanden annähernd keine Unterschiede durch die Wahl der Mischwerkzeuge.

Neben dem Kalksteinmehl wurden zusätzlich Untersuchungen mit Mikrosil M300, Mikrosil M4 und Bentonit B1 durchgeführt. Die maximalen, durch den genutzten Mixer herstellbaren Feinstoffkonzentrationen sind in Abschnitt 5.3.1 aufgeführt. Das Ausbreitmaß des Bentonits B1 ( $c_{\text{susp}} = 10$  %) lag bei 12,5 cm. Das Ausbreitmaß des Mikrosils M300 ( $c_{\text{susp}} = 45$  %) als auch des Mikrosils M4 ( $c_{\text{susp}} = 55$  %) lag beim maximalen, mit diesem Versuch bestimmbaren Wert von 30,0 cm. Mit dem Kalksteinmehl wurde bei 55 %-iger Konzentration ein Ausbreitmaß von 24,0 cm ermittelt.

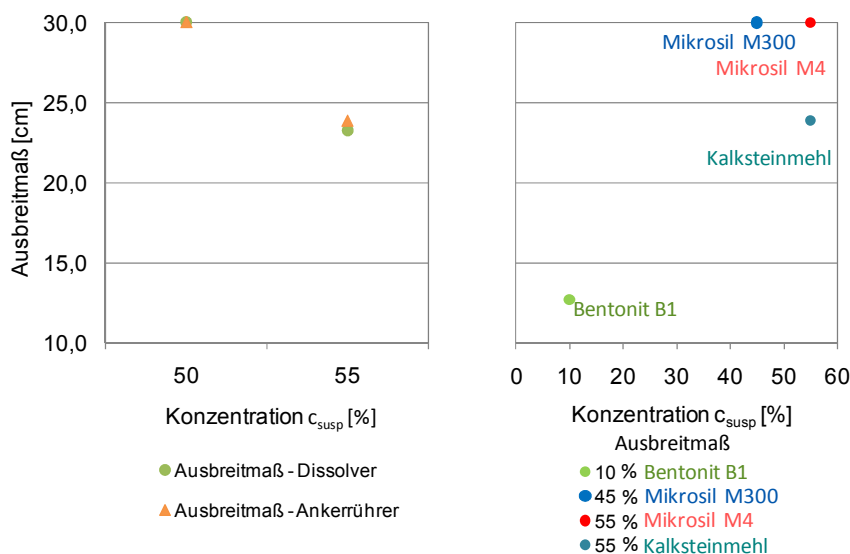


Abbildung 5-17: Ausbreitmaß von Feinstoffsuspensionen mit unterschiedlichen Konzentrationen und Materialien

Das Ausbreitmaß der Feinstoffsuspension mit Bentonit B1 lag mit 12,5 cm unterhalb des beschriebenen Richtwerts zur Pumpbarkeit von 15 cm. Aus diesem Grund eignet sich das Bentonit B1 in dieser Konzentration nicht als pumpfähiges Konditionierungsmittel. Die Reduzierung von  $c_{\text{susp}}$  kann eine Erhöhung des Ausbreitmaßes ermöglichen, so dass das veränderte Material pumpbar sein sollte. Allerdings reduziert sich durch die Verminderung der Feinstoffkonzentration auch die absolute Menge an einzubringendem Feinstoff. Die Suspensionen mit den anderen Feinstoffen sollten hingegen eine Pumpbarkeit gewährleisten.

### 5.3.3. Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Feinstoffsuspensionen

Die Ergebnisse zum qualitativen Einfluss auf Feinstoffsuspensionen aufgrund der durchgeführten Versuche sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Die Feinstoffkonzentration  $c_{\text{susp}}$  sowie das Material der Feinstoffsuspension haben einen großen Einfluss auf die Dichte und Pumpbarkeit der Suspensionen.

Tabelle 5-3: Qualitativer Einfluss verschiedener Herstellungsparameter auf die Eigenschaften der Feinstoffsuspensionen

	Einfluss auf	
	Dichte	Pumpbarkeit
Feinstoffkonzentration	++	++
Material	++	++

o = kein oder kaum Einfluss

+ = mittlerer Einfluss

++ = großer Einfluss

### 5.4. Wahl der Konditionierungsmittel für die weiteren Untersuchungen

Nachfolgend wird erläutert, welche Konditionierungsmittel in der weiteren Forschung genutzt werden.

#### *Schäume*

Die jeweils ermittelten Werte der Schaumlanze 3 wiesen i. d. R. Werte zwischen denen der Schaumlanzen 1 und 2 auf. Da die Eigenschaften der mit Laborlanze 3 produzierten Schäume im Bereich der Schaumlanze 1 und 2 lagen, wurde Schaumlanze 3 für die weiteren Untersuchungen aufgrund des geringen Entsorgungsvolumens für die Produktion von Schaum zur Bodenkonditionierung eingesetzt. Aufgrund der Ergebnisse der mit Lanze 3 hergestellten Schäume wurden für die Konditionierung von verschiedenen Lockergesteinen in Kapitel 6 Schäume mit Tensid 1, einer  $c_f = 3,0\%$  und einer FER = 15 genutzt. Es erfolgte eine Anpassung der FIR. Bei den Untersuchungen zu Boden V wurde neben der FIR auch die  $c_f$  und die FER verändert.

Generell sind die genutzten Konditionierungsmittel ein Hilfsmittel, um die Lockergesteine aufzubereiten und auf sie die erforderlichen Eigenschaften zu übertragen. Eine Beschreibung der Anforderungen an die Eigenschaften von Schäumen erfolgte bislang nicht, da für einen effizienten Vortrieb die Eigenschaften des konditionierten Lockergesteins wesentlich sind. Aus diesem Grund wurden für die Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Schäume auf die Eigenschaften eines konditionierten Bodens (Boden V) entsprechende Untersuchungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 6.3). Bei diesen Untersuchungen ergaben sich verschiedene Boden-Schaum-Gemische, die für die Nutzung als Stützmedium in Betracht kommen können. Basierend auf den Ergebnissen bei diesen Untersuchungen werden die Anforderungen an Schäume in Abschnitt 6.3 beschrieben und zusammengefasst.

### *Polymere und Polymersuspensionen*

Im Rahmen der Untersuchungen zu konditionierten Lockergesteinen soll überprüft werden, ob z. B. Erddruckschilde in grobkörnigen Lockergesteinen unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt werden können. Beim Polymer 2 handelt es sich nach Herstellerangaben um ein wasserbindendes Polymer, so dass dieses für die Konditionierung von Lockergesteinen unterhalb des Grundwasserspiegels geeignet sein sollte. Zudem werden sowohl das Tensid zur Schaumherstellung (Produkt 1) als auch das Polymer 2 vom gleichen Hersteller produziert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Produkte aufeinander abgestimmt sind. Daher wird das Polymer 2 mit einer Polymerkonzentration von  $c_p = 100 \%$  für die Untersuchungen zu konditionierten Lockergesteinen in Kapitel 6 genutzt.

Die für die durchgeführten Versuche genutzten Untersuchungsmethoden werden u. a. bei Vortrieben mit Hydroschilden zur Bestimmung der Eigenschaften von Suspensionen eingesetzt, so dass diese Methoden auch für die Abschätzung der Eigenschaften von Polymeren oder Polymersuspensionen bei Erddruckschilden genutzt werden können. Da eine direkte Übertragung der Ergebnisse aufgrund anderer Suspensionseigenschaften nicht gegeben ist, stellen diese Untersuchungen bei Erddruckschilden Indexversuche dar, um die Konditionierungsmittel untereinander zu vergleichen. Zudem gilt, dass bei Nutzung von Pumpen, wie bei der Förderung von Bentonitsuspensionen, die Marsh-Zeit zwischen 30 und 75 Sekunden liegen sollte. Für das gewählte Polymer 2 mit einer  $c_p = 100 \%$  ist eine geeignete Förderungstechnik nachzuweisen.

### *Feinstoffsuspensionen*

Aus den Ergebnissen zu den durchgeführten Untersuchungen können die Anforderungen an die Feinstoffsuspensionen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Feinstoffsuspensionen sollten einen hohen Feinstoffanteil haben, um dem zu konditionierenden Boden in Relation zum injizierten Suspensionsvolumen möglichst viel Feinkorn hinzuzufügen, um so die Wasserdurchlässigkeit zu reduzieren.
- Die vom verwendeten Material abhängige Feinstoffkonzentration  $c_{\text{susp}}$  lag bei den Untersuchungen bei bis zu  $c_{\text{susp}} = 55 \%$ .
- Das als Richtwert für eine ausreichende Pumpbarkeit anzusehende Ausbreitmaß von mindestens 15 cm wurde in den Versuchen von fast allen hergestellten Suspensionen übertroffen.

Um den Anteil an Feinstoffen im konditionierten Lockergestein zu erhöhen und gleichzeitig eine Pumpbarkeit des Materials zu gewährleisten, eignen sich von den untersuchten Feinstoffsuspensionen alle, außer jene mit Bentonit B1. Für die weiteren Untersuchungen zur Konditionierung von Lockergestein (siehe Kapitel 6) wurde die Kalksteinsuspension mit einer  $c_{\text{susp}} = 55 \%$  ausgewählt, da diese den Eintrag eines hohen Anteils an Feinstoffen ermöglicht. Zudem sollte die Pumpbarkeit der Kalksteinsuspension gegeben sein, da das Ausbreitmaß mit 24,0 cm größer als das Ausbreitmaß des Richtwerts von 15 cm war.



## **6. Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von konditioniertem, grobkörnigen Lockergestein**

Von den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Konditionierungsmitteln werden für Vortriebe mit Erddruckschildmaschinen in kohäsionslosen Lockergesteinen üblicherweise Schäume eingesetzt. Vereinzelt werden zusätzlich Polymere oder Polymersuspensionen und Feinstoffsuspensionen genutzt. Da in der Praxis regelmäßig ein Einsatz von Schäumen erfolgt, stellen in den eigenen Untersuchungen die Erkenntnisse von mit Schäumen konditionierten Böden die Basis für neue Versuche dar. Zunächst werden in diesem Kapitel die Ergebnisse von Untersuchungen zur Herstellung von konditionierten Lockergesteinen vorgestellt und die Ergebnisse der Versuche von mit Schaum vermischten Böden beschrieben. Dabei wird gemäß dem Konzept aus Abschnitt 4.4.3 in einem ersten Schritt ein bei gleichen Einstellungen hergestellter Schaum mit unterschiedlichen Böden vermischt. In einem zweiten Schritt erfolgt die Variation der Schaumparameter FIR, FER und  $c_f$  bei gleichbleibenden Bodeneigenschaften. Eine Darstellung der Ergebnisse der mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Lockergesteine und die Auswertungen der Versuche von Böden, die mit mehreren Konditionierungsmitteln vermischt wurden, schließt sich an. Auf Basis der Ergebnisse ist eine Abschätzung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden bei Verwendung der jeweiligen Konditionierungsmittel möglich.

### **6.1. Untersuchungsergebnisse zur Herstellung von konditioniertem Lockergestein**

Bei Nutzung eines mit gleichen Einstellungen produzierten Schaums können vor allem der Wassergehalt, die Wahl des Mixers und die Mischzeit Einfluss auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine haben. Aus diesem Grund erfolgen zunächst Untersuchungen mit veränderten Wassergehalten, verschiedenen Mixern und unterschiedlichen Mischdauern, um Einflüsse auf die Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen zu ermitteln.

#### **6.1.1. Herstellung von Versuchsböden**

Als Ausgangsmaterialien für die Untersuchungen von konditionierten Lockergesteinen ist die Nutzung von Böden möglich, die z. B. bei Tunnelbauprojekten durch Schürfen gewonnen werden. Dabei sollten die Eigenschaften des gewonnenen Materials mit den Eigenschaften des Bodens, welcher im Bereich der Tunneltrasse anzutreffen ist, weitestgehend übereinstimmen. Mögliche Schwankungen der Eigenschaften (z. B. der Kornverteilungslinie) durch unterschiedliche Proben können die Reproduzierbarkeit der in Versuchen bzw. Versuchsreihen zu nutzenden Böden einschränken, so dass sich durch Schürfen gewonnenen Materialproben nicht eignen.

Als Untersuchungsmaterial bieten sich viel mehr Böden an, die aus unterschiedlich abgestuften Kornbereichen gezielt zusammengesetzt werden, so dass eine systematische Variation der Korngrößenverteilung möglich ist. Für die Herstellung der unterschiedlichen Versuchs-

böden wurden die in der Tabelle 6-1 aufgeführten Körnungen der Firma EUROQUARZ GmbH genutzt. Die Datenblätter dieser Körnungen befinden sich in der Anlage D.

Tabelle 6-1: Übersicht über bei Versuchen genutzte Körnungen von Böden

Kürzel	Kornbereich [mm]	Bezeichnung
a	0,001 - 0,1	Feinkorn (Microsil M 300)
b	0,063 - 0,25	größtenteils Feinsand
c	0,2 - 0,6	Mittelsand
d	0,5 - 1,0	größtenteils Grobsand
e	1,0 - 2,0	Grobsand
f	2,0 - 4,0	Feinkies
g	5,6 - 8,0	Fein- und Mittelkies
h	8,0 - 16,0	Mittelkies
i	16,0 – 32,0	Mittel- und Grobkies

Tabelle 6-1 zeigt, dass einzelne Kornbereiche (zwischen 0,063 und 0,1 mm; 0,2 und 0,25 mm; 0,5 und 0,6 mm) von zwei lieferbaren Körnungen (Kürzel a und b; b und c; c und d) abgedeckt wurden. Für den Bereich zwischen 4,0 und 5,6 mm standen hingegen keine Körnungen zur Verfügung. Die jeweiligen Körnungen können jedoch Über- und Unterkörnungen aufweisen, welche die Kornverteilungslinie beeinflussen. Aus diesem Grund wurden Siebanalysen durchgeführt, mit denen eine Ermittlung der Anteile der jeweiligen Körnungen entsprechend der Siebeinteilung stattfand. Die Ergebnisse der Siebanalysen gingen in die in Abbildung 6-1 dargestellte Matrix zur Berechnung der Kornverteilungslinien von künstlich zusammengestellten Böden in Anlehnung an [95] ein. Das Vorgehen dieser Berechnung wird nachfolgend beschrieben.

Die ersten beiden Spalten der Matrix zeigen die Kürzel und die Bandbreiten der jeweils lieferbaren Körnungen. Die Ergebnisse der Siebanalyse wurden für jede Körnung in die gelb hinterlegten Zeilen in M-% eingetragen. Die vorletzte Spalte fasst die Summe der jeweiligen Körnung zusammen.

Die Zusammenstellung von Böden aus bestimmten Körnungen erfolgt auf Basis der Zugabeanteile (letzte Spalte). Mithilfe der Siebanalyse und des Zugabeanteils kann der Anteil jeder Körnung für die entsprechende Siebeinteilung an der Kornverteilungslinie ermittelt werden. Diese Werte sind für jede Körnung unterhalb der gelb hinterlegten Anteile in den orangen Feldern aufgeführt (vgl. Berechnungsgang gemäß dem blauen Pfeil).

Die Summen der Anteile jeder Siebeinteilung stehen in der vorletzten Zeile (Berechnungsgang gemäß dem grünen Pfeil) bzw. die kumulierten Anteile in der letzten Zeile (Berechnungsgang gemäß dem gelben Pfeil), so dass aus diesen Angaben eine Kornverteilungslinie ermittelt werden kann. In den beiden Zellen rechts unten sind zur Überprüfung die Summen sowohl der Zugabeanteile als auch der Gesamtanteile dargestellt, die jeweils 100 % ergeben müssen. Durch die Veränderung der Zugabeanteile der jeweiligen Körnungen in der letzten Spalte kann eine Anpassung der daraus resultierenden Kornverteilungslinie erfolgen.

Kürzel	Körnung [mm]	Bezeichnung	Siebeinteilung										Summe pro Körnung [M-%]	Zugabeanteile [M-%]
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
			< 0,063 mm	0,063-0,25 mm	0,25 - 0,5 mm	0,5 - 1,0 mm	1,0 - 2,0 mm	2,0 - 4,0 mm	4,0 - 8,0 mm	8,0 - 16,0 mm	16,0 - 32,0 mm	32,0 - 64,0 mm		
a	0,001 - 0,1	Siebanalyse [M-%]	97,3	2,7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
b	0,063 - 0,25	Siebanalyse [M-%]	0	92,8	7,2	0	0	0	0	0	0	0	100	5
		Anteil Körnung [M-%]	0	4,6	0,4	0	0	0	0	0	0	0	5	
c	0,2 - 0,6	Siebanalyse [M-%]	0	29,6	69,6	0,8	0	0	0	0	0	0	100	10
		Anteil Körnung [M-%]	0	3	7	0,1	0	0	0	0	0	0	10	
d	0,5 - 1,0	Siebanalyse [M-%]	0	0,2	7,8	90,7	1,3	0	0	0	0	0	100	20
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	1,6	18,1	0,3	0	0	0	0	0	20	
e	1,0 - 2,0	Siebanalyse [M-%]	0	0	0,3	2,2	97,3	0,2	0	0	0	0	100	30
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0,1	0,7	29,2	0,1	0	0	0	0	30	
f	2,0 - 4,0	Siebanalyse [M-%]	0	0	0	0	0,3	88,3	11,4	0	0	0	100	20
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0	0	0,1	17,7	2,3	0	0	0	20	
g	5,6 - 8,0	Siebanalyse [M-%]	0	0	0	0	0	0,7	96,2	3,1	0	0	100	10
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0	0	0	0,1	9,6	0,3	0	0	10	
h	8,0 - 16,0	Siebanalyse [M-%]	0	0	0	0	0	0	2,5	95	2,5	0	100	5
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0	0	0	0	0,1	4,8	0,1	0	5	
i	16,0 - 32,0	Siebanalyse [M-%]	0	0	0	0	0	0	0	0,8	72,8	26,4	100	0
		Anteil Körnung [M-%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anteil [M-%]			0,0	7,6	9,0	18,9	29,5	17,8	12,0	5,1	0,1	0,0	∑ Zugabeanteile	100
Gesamtanteil [M-%]			0,0	7,6	16,6	35,5	65,0	82,8	94,8	99,9	100,0	100,0	∑ Gesamtanteil	100

Abbildung 6-1: Matrix zur Berechnung der Kornverteilungslinie eines künstlich zusammengestellten Bodens in Anlehnung an [95]

### 6.1.2. Einfluss des Wassergehalts

Der Wassergehalt eines Boden-Schaum-Gemischs kann Einfluss auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine haben (vgl. Abschnitt 3.3.2). Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zum Setzmaß von mit unterschiedlichen Mengen an Schaum konditionierten Böden L durchgeführt. Die Eigenschaften des Bodens und die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind in der Anlage D aufgeführt.

Die Ergebnisse der Versuche wurden in einem Diagramm aufgetragen, in dem die Wassergehalte den FIR gegenübergestellt sind (vgl. Abbildung 6-2). Die Einteilung der Ergebnisse erfolgte entsprechend der Anforderung, dass die Setzmaße zwischen ca. 10 und 20 cm liegen sollten. Die Setzmaße mit einem Wert kleiner als 10 cm sind rot dargestellt. Die für Erdruckschilde geeigneten Setzmaße zwischen 10 und 20 cm sind grün eingefärbt, während Setzmaße größer als 20 cm braun markiert wurden. Sofern keine homogenen Bodenproben ermittelt wurden, sind diese Kombinationen schwarz markiert. Bei geringen Wassergehalten und einer gleichzeitig niedrigen FIR lagen die Setzmaße unterhalb von 10 cm, da das Boden-Schaum-Gemisch wenig plastisch verformbar war. Bei hohen Wassergehalten in Kombination mit hohen FIR ließen die konditionierten Böden hingegen Verformungen zu, so dass die Setzmaße Werte größer als 20 cm annahmen. Bei einigen Kombinationen vor allem mit sehr niedrigen oder sehr hohen Wassergehalten konnten keine Setzmaße von homogenen Bodenproben bestimmt werden. Auf Grundlage der Ergebnisse ergibt sich ein Bereich, bei

dem die Verarbeitbarkeit des Stützmediums als gegeben erscheint. Aus diesem Grund sollte während des Vortriebs versucht werden, Einstellungen bei einer FIR und dem Wassergehalt zu erzielen, die in diesem Bereich liegen.

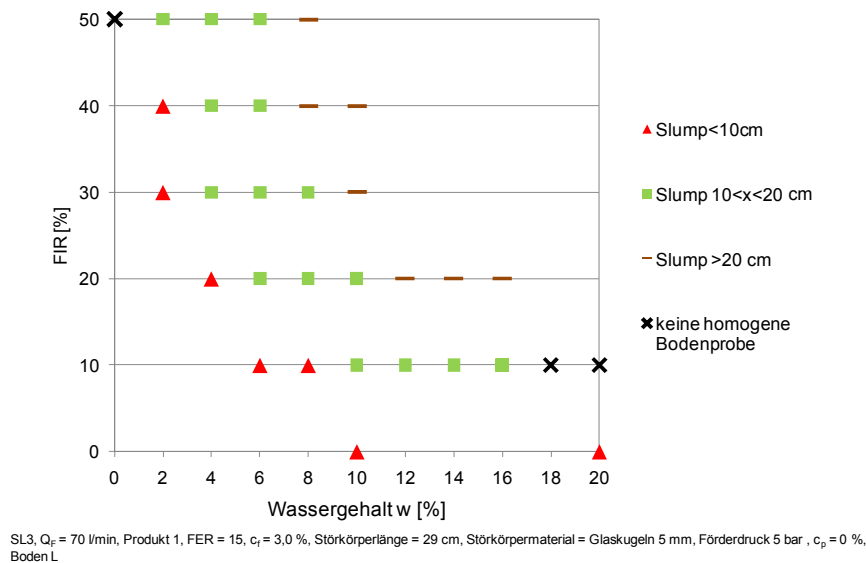


Abbildung 6-2: Einteilung des Setzmaßes von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen FIR und Wassergehalten

Das Porenwasser des konditionierten Bodens kann durch die Schaumzugabe in den Boden vor der Ortsbrust gedrückt werden, so dass theoretisch die effektive  $FER_S$  der tatsächlichen FER entspricht (vgl. Abschnitt 3.3.2). Sofern der Schaum das freie Porenwasser aus dem Korngerüst verdrängt, kann an den Bodenkörnern noch anhaftendes Porenwasser verbleiben. Das Volumen des freien Porenwassers wird durch die effektive Porosität  $n_{eff}$  und das Volumen des im Boden verbleibenden Wassers durch die Retention-Porosität  $n_r$  der jeweiligen Lockergesteine beeinflusst. [30] hat für verschiedene kohäsionslose Böden Bandbreiten der Porosität und der effektiven Porosität aufgeführt, aus denen die Retention-Porosität ermittelt werden kann (vgl. Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Übersicht zur Porosität, effektiven Porosität und Retention-Porosität von kohäsionslosem Lockergestein nach [30]

Bodenart	Korndurchmesser [mm]	Hohlraumanteil [Vol-%]						
		Porosität n		Porosität $n_{eff}$		Ø Porosität		Ø Porosität $n_r$
		niedrig	hoch	niedrig	hoch	n	$n_{eff}$	
Feinsand	0,06 - 0,2	25	38	6	14	31,5	10,0	21,5
Mittelsand	0,20 - 0,6	28	40	11	19	34,0	15,0	19,0
Grobsand	0,60 - 2,0	25	42	21	30	33,5	25,5	8,0
<b>Mittelwert</b>	<b>0,06 - 2,0</b>					<b>33,0</b>	<b>16,8</b>	<b>16,2</b>

Üblicherweise werden Schäume als Konditionierungsmittel in Sanden eingesetzt, in denen die durchschnittliche Retention-Porosität gemäß den in Tabelle 6-2 dargestellten Daten 16,2 Vol.-% beträgt. Die durchschnittliche Trockendichte kann als Mittelwert der durch Versuche

ermittelten und in der Anlage D aufgeführten Trockendichten von Fein-, Mittel- und Grobsand zu 1,66 kg/l berechnet werden. Bei Ansatz dieser Trockendichte entspricht die Retention-Porosität des Bodens einem Wassergehalt von  $w = 10$  M-%. Aus diesem Grund wurde bei den Untersuchungen mit gleichbleibenden Eigenschaften des Schaums und Variation der Böden der Wassergehalt dieser Böden mit  $w = 10$  M-% angesetzt.

Mit dem Boden V erfolgten Versuche zur Bestimmung des Einflusses unterschiedlich hergestellter Schäume bei Variation der FIR, FER und  $c_f$  auf die Eigenschaften des Boden-Schaum-Gemischs (Zusammenstellung vgl. Anlage D). Bei diesem Boden wurde aufgrund von Ergebnissen aus Vorversuchen zu Setzmaßen ein Wassergehalt von  $w = 6$  % festgelegt.

### 6.1.3. Einfluss infolge der Durchmischung

#### *Einfluss der Mischart und Mischdauer*

Für die Variation der Mischart wurden zwei verschiedene Geräte ausgewählt. Beim ersten Mischer handelte es sich um ein in [60] beschriebenes Gerät mit Planetenrührwerk der Firma Hobart (Typ N50, 120 W). Dieser in Abbildung 6-3 links dargestellte Mischer hat drei unterschiedliche Mischgeschwindigkeiten, auswechselbare Mischwerkzeuge und ein Fassungsvermögen des Behälters von ca. 5,0 l. Für die Vorbereitung zur Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen wird in [60] die Durchmischung von 1,5 kg trockenem Sand mit 45 ml destilliertem Wasser auf niedrigster Stufe des Mischers (139 U/min) mit einem Flachrührer für 3 Minuten empfohlen. Der Wassergehalt des unkonditionierten Lockergesteins liegt mit  $w = 3$  % somit unterhalb eines für diese Böden möglicherweise erforderlichen Wassergehalts von  $w = 10$  %, der über die Retention-Porosität von Sanden bestimmt werden kann (vgl. dazu Abschnitt 6.1.2). Wird dem Lockergestein mit einem Wassergehalt von  $w = 3$  % Schaum zugegeben, kann daher im Schaum enthaltenes Liquid für die Oberflächenbenetzung der Körner erforderlich sein, so dass einzelne Schaumblasen zerplatzen (vgl. Abschnitt 2.3.5). Aus diesem Grund ist bei einem Sand mit einem Wassergehalt von  $w = 3$  % eine höhere FIR erforderlich als z. B. bei einem ausgewählten Sand mit einem Wassergehalt von  $w = 10$  %.

Nach Durchmischung des Bodens mit Wasser sollen nach [60] die Schaumherstellung und das Vermischen des Schaums mit dem Boden so lange erfolgen, bis der Schaum komplett untergemischt ist und eine homogene Mixtur entsteht. Durch die subjektive Bestimmung des Zeitpunkts einer ausreichenden Durchmischung kann jedoch keine genaue Mischzeit bestimmt werden und dadurch die Größe des Eintrags von Energie in das konditionierte Lockergestein variieren.

Der zweite genutzte Mischer war ein Freifallmischer des Typs BM 125 S der Firma Atika (vgl. Abbildung 6-3 rechts). Dieser Freifallmischer hat einen maximalen Trommelinhalt von 125 l, eine installierte Leistung von 550 W und eine Umdrehungszahl von 28 U/min. Zwar konnte die Drehzahl nicht angepasst werden, eine Veränderung der Neigung der Mischtrommel ermöglichte jedoch eine Anpassung des Mischverhaltens. Zur Durchmischung des Materials sind im Inneren des Freifallmischers Eisenwinkel fest angebracht, so dass eine Veränderung der Neigung der Trommel auch zu einer Änderung der eingebrachten Mischarbeit führte. Bei den Versuchen mit dem Freifallmischer wurde eine gleichbleibende Neigung von ca. 70°

gegenüber der Vertikalen angesetzt und die Zusammensetzung des Bodens bzw. sein Volumen konstant gehalten, so dass keine Einflüsse aufgrund der Veränderung des Füllstands möglich waren.



Abbildung 6-3: Bei Untersuchungen genutzte Planetenmischer (links, Fa. Hobart GmbH) und Freifallmischer (rechts, Fa. Atika GmbH & Co. KG)

Die Versuche erfolgten unter Nutzung eines Sands (Boden L) bei einem Wassergehalt von  $w = 10\%$ , da mit diesem Sand eine gute Konditionierung erreicht werden konnte. Zur einheitlichen Vorbereitung des Bodens wurden ca. 23 kg Bodenmaterial bei entsprechendem Wassergehalt 5 Minuten mit dem Freifallmischer vermischt und anschließend 3 kg des vorbereiteten Bodens in den Planetenmischer eingebracht. Nach Zugabe der erforderlichen Schaummenge und anschließender Durchmischung im Freifallmischer fanden die Untersuchungen zur Bestimmung der Dichte statt. Um einheitliche Randbedingungen hinsichtlich des Ausgangsbodens zu haben, wurde die untersuchte Bodenprobe nach der Dichtebestimmung dem jeweiligen Material im Mischer wieder zugegeben. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Dichte des bislang unkonditionierten Materials im Planetenmischer nach Zugabe von Schaum und anschließender Durchmischung.

Zur Bestimmung der erforderlichen Schaummasse  $m_F$  kann Gleichung 6.1 genutzt werden, deren Herleitung sich in der Anlage befindet. Als Dichte des trockenen Bodens wurde dabei die Dichte bei dichtester Lagerung gewählt.

$$m_F = m_d * \frac{\rho_L}{\rho_d} * \frac{FIR/100}{FER} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

mit  $FER =$  Foam Expansion Ratio [-]  
 $FIR =$  Foam Injection Ratio [%]  
 $m_d =$  Masse des trockenen Bodens [kg]  
 $m_F =$  Masse des Schaums [kg]  
 $\rho_d =$  Dichte des trockenen Bodens [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_L =$  Dichte der Tensidlösung [kg/m<sup>3</sup>]

Zur Bestimmung des Einflusses der Mischzeit und der Mischart wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Proben der Boden-Schaum-Gemische (Boden L, FIR = 20 %) genommen und deren Dichten ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Anhand des Verlaufs der Dichten von mit dem Freifallmischer und Planetenmischer hergestellten Boden-Schaum-Gemischen ist der Einfluss einer zunehmenden Mischdauer zu erkennen. Die Dichte sank von ca. 1,78 kg/l (ohne Konditionierungsmittel) zu Beginn der Untersuchungen auf 1,22 bzw. 1,09 kg/l nach 20 Minuten Mischzeit, wobei vor allem zu Beginn der Mischdauer eine starke Abnahme der Dichte zu erkennen war. Die Dichten der mit den Planetenmischern hergestellten Boden-Schaum-Gemische lagen bereits nach 30 Sekunden wesentlich unterhalb der Dichten der mit dem Freifallmischer hergestellten Boden-Schaum-Gemische.

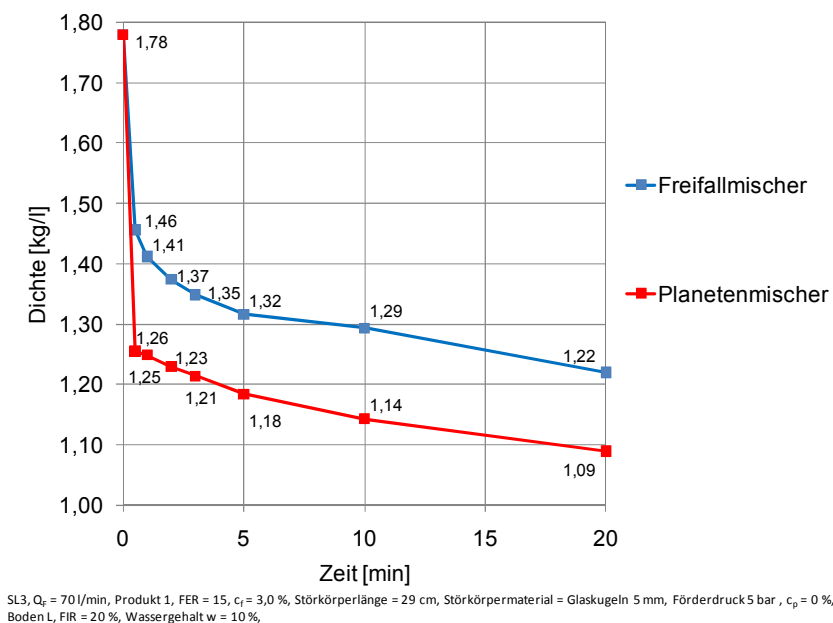


Abbildung 6-4: Dichte von mit unterschiedlichen Mixern hergestellten Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der Mischdauer

Es zeigte sich bei den Versuchen, dass durch den Mischvorgang und den damit verbundenen Eintrag von Arbeit aufgrund der Durchmischung die Dichte mit steigender Mischdauer sank. Für die Abnahme der Dichte mit steigender Mischdauer ist bei Versuchen unter atmosphärischen Bedingungen der durch den Mischvorgang verursachte Lufteintrag in das Boden-Schaum-Gemisch verantwortlich. Da mit dem Planetenmischer augenscheinlich mehr Arbeit und somit mehr Luft eingetragen wurden, sank die Dichte der so hergestellten Boden-Schaum-Gemische stärker als die Dichte der mit Freifallmischern produzierten Materialien.

Bei einem Erddruckschild steht in der Abbaukammer während der Konditionierung des Bodenmaterials mit Schaum im geschlossenen Modus keine Luft für eine zusätzliche Aufschäumung des Boden-Schaum-Gemischs zur Verfügung. Eine Verringerung der Dichte des konditionierten Materials durch zusätzlichen Lufteintrag ist in situ nur bei einer teilgefüllten Abbaukammer möglich.

Um die Randbedingungen des Vortriebs mit einem Erddruckschild im geschlossenen Modus auf die Versuche zu übertragen, ist der Einfluss eines zusätzlichen Aufschäumens während der Versuche unter atmosphärischen Bedingungen zu begrenzen und daher die Mischleistung und Mischdauer gering zu halten. Aus diesem Grund sollten die jeweiligen Boden-Schaum-Gemische möglichst geringer Mischleistung ausgesetzt werden, die aber wiederum ausreicht, um das Material homogen zu durchmischen. Daher wurden die erforderlichen Schaummassen den mit Wasser vorgemischten Böden hinzugegeben und das Material 2 x 15 Sekunden durchmischt. Zwischen den zwei Mischvorgängen erfolgte ein Unterheben von nicht vermischtem Schaum innerhalb von 30 Sekunden von Hand. In Versuchen konnte festgestellt werden, dass dieses Vorgehen eine Durchmischung gewährleistet. Dies wurde z. B. durch die annähernd gleichen Dichten bei den Untersuchungen zur Bestimmung der Dichte in Abschnitt 4.4.4 gezeigt.

Für die Versuche zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine werden große Volumina an Boden-Schaum-Gemischen benötigt. So erfordert u. a. der Versuch zur Bestimmung des Setzmaßes ca. 6,0 l konditioniertes Bodenmaterial. Da mit dem Planetenmischer mit ca. 1,5 bis 2,0 kg Lockergestein und bei einer angesetzten Dichte von ca. 1,3 kg/l ungefähr 1,3 bis 1,5 l Boden hergestellt werden können, ist für die Herstellung einer für den Versuch zum Setzmaß ausreichenden Probenmenge das chargenweise Anmischen des Materials nötig. Aufgrund der dann unterschiedlichen Herstellungszeitpunkte der Boden-Schaum-Gemische bei Nutzung eines Planetenmischers können sich die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine verändern. Aus diesem Grund wurde zur Herstellung der konditionierten Böden bei den weiteren Untersuchungen der Freifallmischer mit einer Mischzeit von insgesamt 30 Sekunden gewählt.

#### *Einfluss der Durchmischung auf die Dichte*

Für die unkonditionierten Böden erfolgte u. a. die Bestimmung der geotechnischen Parameter der lockersten und dichtesten Lagerung (vgl. Anlage D). Zudem wurden mithilfe des in Abschnitt 4.4.4 beschriebenen Verfahrens zur Dichtebestimmung des konditionierten Bodens auch die Dichten der unkonditionierten Lockergesteine bestimmt. Die auf diese Weise ermittelten Werte lagen jeweils im Bereich der Dichte bei der dichtesten Lagerung.

Die Ermittlung der theoretischen Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs ist u. a. vom Porenraum des Bodens, vom Wassergehalt und von der Injektionsrate des Schaums abhängig. Anhand von zwei Situationen im Baugrund während der Konditionierung mit Schaum sollen die Einflüsse auf die theoretische Dichte erläutert werden. Diese Situationen sind beispielhaft in Abbildung 6-5 dargestellt und im Anschluss daran beschrieben.



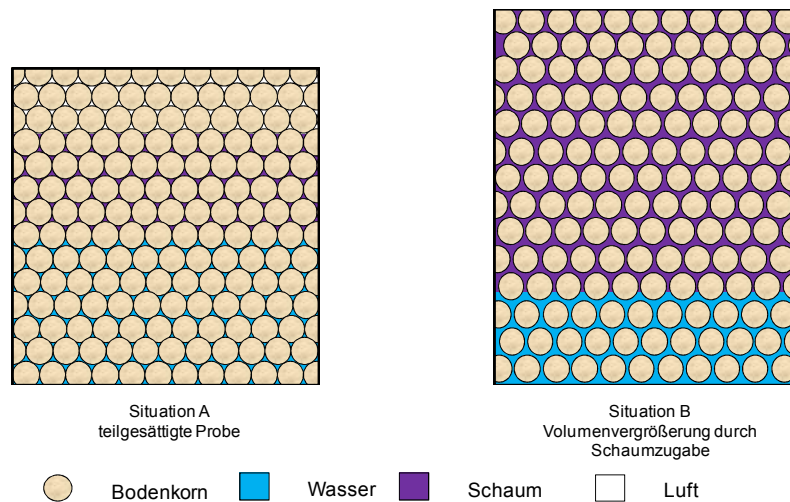


Abbildung 6-5: Darstellung von zwei möglichen Situationen hinsichtlich der Sättigung bei Boden-Schaum-Gemischen

Bei Situation A (Abbildung 6-5 links) weist der Boden die höchste Lagerungsdichte auf. Im Porenraum befindet sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens die entsprechende Wassermenge. Sollte eine niedrige FIR gewählt worden sein, kann bei Vortrieben oberhalb des Grundwasserspiegels neben Schaum auch noch Luft im Porenraum verbleiben, so dass von einer teilgesättigten Bodenprobe ausgegangen werden kann. Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels wäre dieser Porenraum mit Wasser gefüllt, so dass auch der Wassergehalt im Boden-Schaum-Gemisch steigt.

Bei den eigenen Versuchen wurde ein Wassergehalt  $w$  (vgl. Abschnitt 6.1.2) vorgegeben und die Schauminjektionsrate variiert. Aus diesem Grund kann der Porenraum Wasser, Schaum und Luft enthalten.

Mit steigender FIR wird eine Injektionsrate erreicht, bei der bei dichtester Lagerung des Bodens alle Poren mit Wasser und Schaum ausgefüllt sind. Es ist dann von einer vollständigen Sättigung des Porenraums durch Wasser und Schaum auszugehen. Durch weitere Erhöhung der FIR kann die lockerste Lagerung des Bodens erreicht werden, bei der bei noch vorhandenem Korn-zu-Korn-Kontakt eine maximale Schaummenge in den Porenraum eingebracht wird. Durch weitere Steigerung des Schaumvolumens wird der Korn-zu-Korn-Kontakt der Bodenkörner aufgehoben und das Volumen des Boden-Schaum-Gemischs nimmt zu (siehe Situation B, Abbildung 6-5 rechts). Die Übertragung eines möglichen Stützdrucks erfolgt in diesem Fall mithilfe des Porendrucks.

Bei Annahme, dass keine Schaumblasen beim Kontakt mit den Bodenkörnern zerstört werden und eine vollständige Durchmischung des Materials erfolgt, können die theoretischen Dichten der Boden-Schaum-Gemische bei den jeweiligen Situationen wie folgt ermittelt werden:

Bei Situation A mit  $n > n_w + n_F = n_w + \text{FIR}$  gilt:

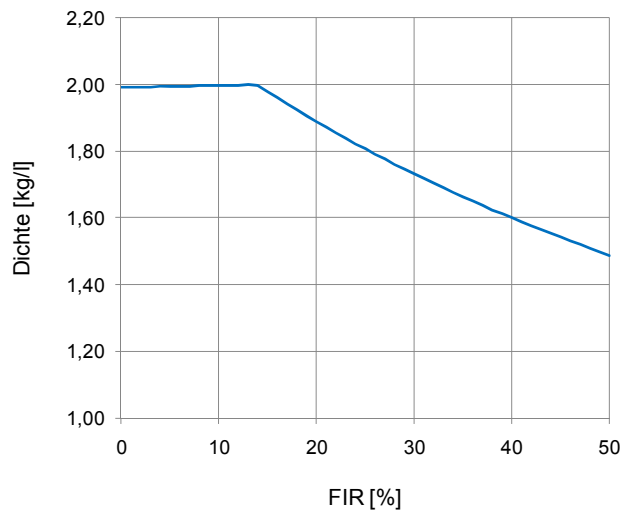
$$\rho_{\text{Soil},A} = \frac{m_d + m_w + m_F}{V_d} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Bei Situation B mit  $n \leq n_w + n_F = n_w + \text{FIR}$  gilt:

$$\rho_{\text{Soil},B} = \frac{m_d + m_w + m_F}{V_d \cdot \left(1 + \frac{n_w + n_F - n}{100}\right)} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

mit	$\text{FIR}$	=	Foam Injection Ratio [%]
	$m_d$	=	Masse des trockenen Bodens [kg]
	$m_F$	=	Masse des Schaums [kg]
	$m_w$	=	Masse des Wassers [kg]
	$n$	=	Porenanteil des Bodens [%]
	$n_F$	=	Porenanteil des Schaums [%]
	$n_w$	=	Porenanteil des Wassers [%]
	$V_d$	=	Volumen des trockenen Bodens [l]
	$\rho_{\text{Soil},A}$	=	Dichte des konditionierten Bodens [kg/m <sup>3</sup> ] (Situation A)
	$\rho_{\text{Soil},B}$	=	Dichte des konditionierten Bodens [kg/m <sup>3</sup> ] (Situation B)

Abbildung 6-6 zeigt den Verlauf der theoretischen Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs (Boden L,  $w = 10\%$ ,  $n = 32\%$ ) in Abhängigkeit der FIR. Bis zu einer Steigerung der FIR = 14 % ( $n_F = n - n_w$ ) wird der Porenraum des Bodens mit Schaum aufgefüllt, so dass aufgrund der enthaltenen Liquidmenge die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs steigt. Nach Sättigung des Porenraums mit Wasser und Schaum führt die weitere Schaumzugabe durch Steigerung des Schaumvolumens zu einer Reduzierung der Dichte. So kann beispielhaft bei einer FIR = 50 % die theoretische Dichte von 1,49 kg/l ermittelt werden.



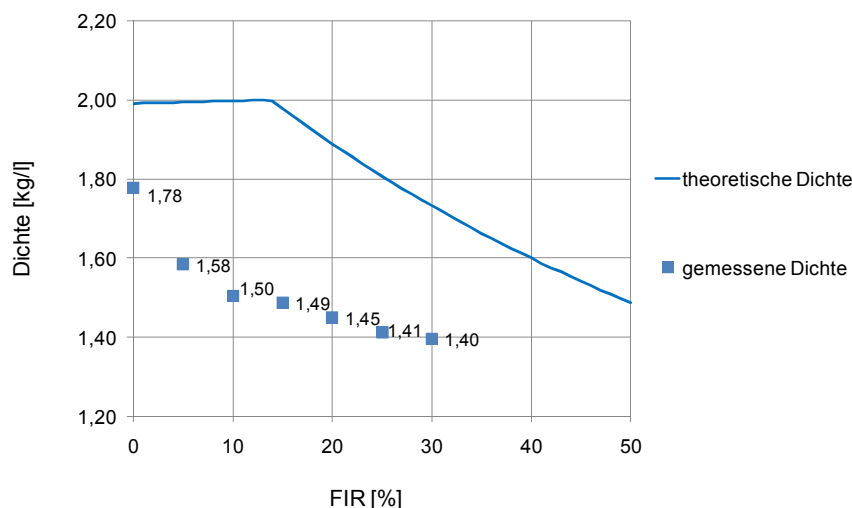
FER = 15, Boden mit Dichte bei dichtester Lagerung = 1,81 kg/l,  $n = 32\%$ , Wassergehalt  $w = 10\%$

Abbildung 6-6: Theoretische Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs in Abhängigkeit der FIR

Eine in Versuchen ermittelte Dichte kann von der theoretischen Dichte abweichen. Sollte beispielsweise die Kornoberfläche nicht ausreichend benetzt sein, ist weitere Flüssigkeit erforderlich. Bei Zugabe von Schaum kann das Liquid aus dem Schaum für die Benetzung genutzt werden und Luft aus den Schaumblasen entweichen. Das Einbringen von Liquid in

den Porenraum und das Zerstören der Schaumbläschen ermöglichen daher eine höhere Dichte als die theoretisch bestimmte Dichte.

Durch eine hohe Mischleistung und Mischzeit kann das Tensid hingegen zusätzlich aufgeschäumt und die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs reduziert werden (vgl. Abbildung 6-4). In Untersuchungen wurde der Boden L bei einem Wassergehalt von  $w = 10\%$  mit verschiedenen FIR konditioniert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 6-7 dargestellt und werden im Anschluss daran beschrieben.



FER = 15, Boden L, Dichte bei dichtester Lagerung = 1,81 kg/l,  $n = 32\%$ , Wassergehalt  $w = 10\%$

Abbildung 6-7: Theoretische und gemessene Dichte eines Boden-Schaum-Gemischs (Boden L) in Abhängigkeit der FIR

Bei einer FIR = 0 % wurde eine Dichte des Bodens mit einem Wassergehalt von  $w = 10\%$  von 1,78 kg/l ermittelt. Die theoretische Dichte bei dichtester Lagerung hatte hingegen einen Wert von 1,99 kg/l. Die theoretische Dichte bei lockerster Lagerung unter Berücksichtigung der Wassermenge wies einen Wert von 1,68 kg/l auf. Es ist daher davon auszugehen, dass infolge der Wasserzugabe und des Mischvorgangs das Material nicht mehr in die dichteste Lagerung des Bodens überführt werden konnte.

Durch die Schaumzugabe und das anschließende Durchmischen wurde bereits ab einer FIR = 5 % die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs reduziert, die mit steigender Schaumzugabe sank (vgl. Abbildung 6-7). Die gewählte Methode zur Bestimmung der Dichte ermöglichte eine ausreichend genaue Reproduzierbarkeit (vgl. Abschnitt 4.4.4).

Der Verlauf der ermittelten Dichte in Abhängigkeit der FIR unterscheidet sich vom Verlauf der theoretischen Dichte des Materials. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Volumen des konditionierten Materials aufgrund des Aufschäumens des im Schaum enthaltenen Tensids zunahm und so für eine Reduzierung der Dichte ursächlich war.

Die eigenen Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen werden unter atmosphärischen Randbedingungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.4.1). Aus diesem Grund lässt sich nicht vermeiden, dass das Tensid während des Durchmischens zusätzlich aufschäumt. Da für die Herstellung eines homogen konditionierten Lockergesteins ein Mischvorgang erforderlich ist, sollte der Einfluss aufgrund der Durchmi-

schung auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine gering gehalten werden. Daher wurde das Material mit einem Freifallmischer und einer Mischzeit von 2 x 15 Sekunden aufbereitet (s. o.).

### *Einfluss des Aufschäumverhaltens während der Durchmischung*

Der Einsatz von verschiedenen Mixern unter atmosphärischen Bedingungen hat eine Zuführung von Luft verursacht und dadurch eine Reduzierung der Dichte hervorgerufen. Daher fand eine Überprüfung statt, in wieweit die Zugabe von Liquid anstelle von Schaum die Dichte verändern kann. Bei diesen Versuchen wurde dem Boden das gleiche Gewicht an Liquid zugegeben wie das in den vorangegangenen Versuchen zugeführte Gewicht an Schaum, die Materialien anschließend durchmischt und die Dichte der Boden-Liquid-Gemische bestimmt. Abbildung 6-8 zeigt die Dichte von mit dem Freifallmischer hergestellten Boden-Schaum- bzw. Boden-Liquid-Gemischen.

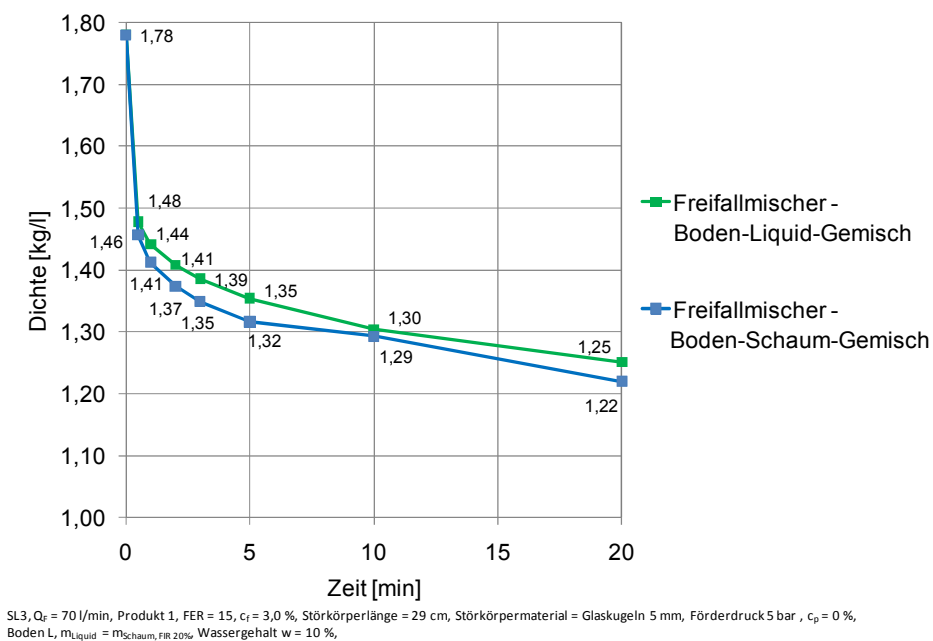


Abbildung 6-8: Dichte von mit dem Freifallmischer hergestellten Boden-Schaum- und Boden-Liquid-Gemischen in Abhängigkeit der Mischdauer

Der Verlauf der Dichte des hergestellten Boden-Liquid-Gemischs ähnelt dem Verlauf der Dichte des Boden-Schaum-Gemischs. Die Dichten des Boden-Liquid-Gemischs lagen mit Werten zwischen 0,01 kg/l und 0,04 kg/l nur unwesentlich oberhalb der Dichten des Boden-Schaum-Gemischs. Auch beim Boden-Liquid-Gemisch sank die Dichte mit steigender Mischdauer, so dass von einem Aufschäumen aufgrund des Mischprozesses ausgegangen werden kann. Bei dem gewählten Mischverfahren scheint daher die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs unabhängig von der Zugabe der im Schaum enthaltenen Luft und nur abhängig von der Menge des enthaltenen Tensids zu sein. Da aber ggf. die Eigenschaften der mit der Schaumanlage hergestellten Schäume, wie z. B. die Drainagezeit und die Bläschengröße, die Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische im Gegensatz zu den Eigen-

schaften der Boden-Liquid-Gemische beeinflussen können, wurde in den weiteren Untersuchungen Schaum als Konditionierungsmittel benutzt.

#### 6.1.4. Schlussfolgerungen aus den Versuchen

Aus den Versuchen zu Einflüssen auf mit Schaum konditionierte Lockergesteine können die nachfolgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Für die reproduzierbare Herstellung und gezielte Variation von Kornverteilungslinien eignen sich aus verschiedenen Kornfraktionen zusammengestellte Böden.
- Die Art des Mixers kann aufgrund der jeweiligen Mischleistung einen erheblichen Einfluss auf die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs haben.
- Die Mischdauer hat unter atmosphärischen Bedingungen großen Einfluss auf die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs.
- Eine Veränderung des Wassergehalts  $w$  beeinflusst die Eigenschaften des Boden-Schaum-Gemischs, wie z. B. das Setzmaß.
- Bei den meisten Böden wurde ein Wassergehalt von  $w = 10 \%$  festgelegt, da dieser der arithmetisch gemittelten Retention-Porosität der genutzten Sande entspricht.
- Bei atmosphärischen Bedingungen und Nutzung eines Freifallmischers weisen die Dichten der Boden-Schaum-Gemische ähnliche Werte wie die Dichten der Boden-Liquid-Gemische auf.
- Für die weiteren Untersuchungen wurde die Zugabe von Schaum bei Herstellung der konditionierten Böden in einen Freifallmischer und einer Durchmischungszeit von insgesamt  $2 \times 15$  Sekunden festgelegt.

#### 6.2. Untersuchungsergebnisse von mit Schaum konditionierten, grobkörnigen Böden

Die Nutzung der Körnungen a bis i (vgl. Tabelle 6-1) ermöglichte die systematische Variation von Kornverteilungslinien der zu untersuchenden Böden. Die Bereiche der kohäsionslosen Lockergesteine Sand und Kies werden üblicherweise in die Kornfraktionen Feinsand, Mittelsand und Grobsand bzw. Feinkies, Mittelkies und Grobkies unterteilt (vgl. Abbildung 6-9). Mithilfe der genutzten Körnungen konnten Kornverteilungslinien erstellt werden, deren überwiegender Anteil in einer der sechs Kornfraktionen lag. Diese Kornverteilungslinien sind in Abbildung 6-9 blau dargestellt (vgl. [151]). Durch die Kombination der Kornfraktionen erfolgte die Herstellung von 15 weiteren grobkörnigen Böden, deren unterschiedliche Kornverteilungslinien in Abbildung 6-9 eingezeichnet sind. Die Zusammensetzung der jeweiligen Böden sowie weitere geotechnische Parameter sind in der Anlage D aufgeführt. Die Anzahl der für die Linie erforderlichen Kornfraktionen hat dabei die gewählte Farbe der jeweiligen Kornverteilungslinie beeinflusst (vgl. Legende der Abbildung).

Aufgrund der möglichen Konditionierung der 21 unterschiedlichen, kohäsionslosen Böden sowie der Bestimmung ihrer Eigenschaften können die Einsatzbereiche von Erddruckschilden abgeschätzt werden. Dazu erfolgte in einem ersten Schritt (Abschnitt 6.2) die Konditionierung der dargestellten Böden mit Schaum. Sofern die konditionierten Lockergesteine

Setzmaße gemäß den Anforderungen aufwiesen, wurden die weiteren Eigenschaften dieser Materialien bestimmt. Die so konditionierten Lockergesteine stellen dann die Basis für den Einsatzbereich von Erddruckschilden mit Schaumkonditionierung dar.

In weiteren Schritten (Abschnitt 6.4 bis 6.6) werden die Eigenschaften von Böden bestimmt, die mit Polymerschäumen, Feinstoffsuspensionen bzw. verschiedenen Konditionierungsmitteln aufbereitet wurden. Basierend auf diesen Erkenntnissen sind dann die entsprechenden Einsatzgrenzen zu ermitteln. Bei diesen Untersuchungen werden jeweils ausgewählte Böden verwendet, die mithilfe des zuvor genutzten Konditionierungsmittels hinsichtlich des Setzmaßes nicht ausreichend aufbereitet werden konnten. Auf diese Weise ist eine Erweiterung der Einsatzgrenzen von Erddruckschilden bei Verwendung von verschiedenen bzw. mehreren Konditionierungsmitteln möglich.

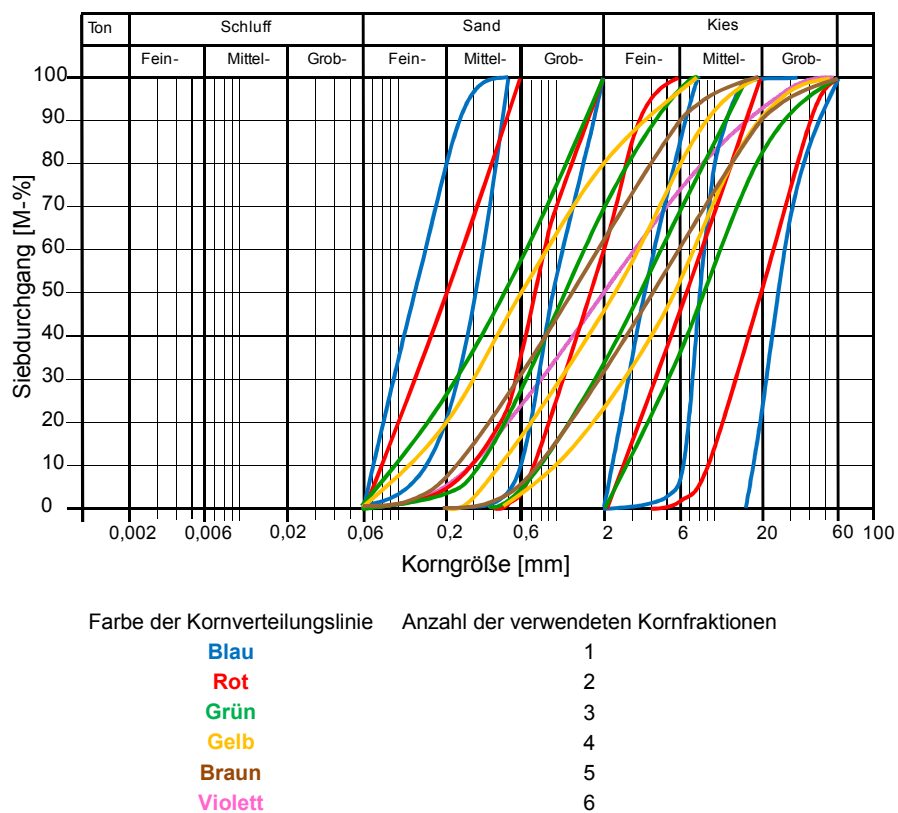


Abbildung 6-9: Kornverteilung der untersuchten Böden

Bei den in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnissen wurde für die Konditionierung des Lockergesteins Schaum (SL 3, Produkt 1,  $Q_F = 70$  l/min, FER = 5,  $c_f = 3,0$  %, Störkörperlänge 29 cm, Störkörpermaterial: Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar) genutzt. Die Ermittlung der Zugabemenge an Schaum erfolgte bei Ansatz der dichtesten Lagerung der unkonditionierten Böden.

### 6.2.1. Bestimmung der Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische bei unterschiedlichen Bodeneigenschaften

In einem ersten Schritt zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische wurden Untersuchungen zum Setzmaß der mit unterschiedlichen FIR konditionier-

ten Böden durchgeführt, um die erforderlichen Werte von ca. 10 und 20 cm zu erreichen. Die Veränderungen der FIR erfolgen ungefähr in 5 %-Schritten. Bei diesen Versuchen ist zudem die Ermittlung des Setzfließmaßes\* sowie eine Beschreibung der Qualität des konditionierten Materials vorgenommen worden (siehe Anlage D).

Als Beispiel für gut konditionierte Böden können die in Abbildung 6-10 (oben) aufgeführten, konditionierten Lockergesteine (Fein- und Mittelsande, Boden G, vgl. Anlage D) angesehen werden, da bei diesen kein Wasser- oder Schaumaustritt zu verzeichnen war. Die in der Abbildung unten aufgeführten Versuche zeigen nicht ausreichend konditionierte Böden (Grobsand – Feinkies, Boden I), da in diesem Fall Wasser oder Schaum austrat bzw. die ursprüngliche Bodenprobe ungleichmäßig auseinanderfiel.

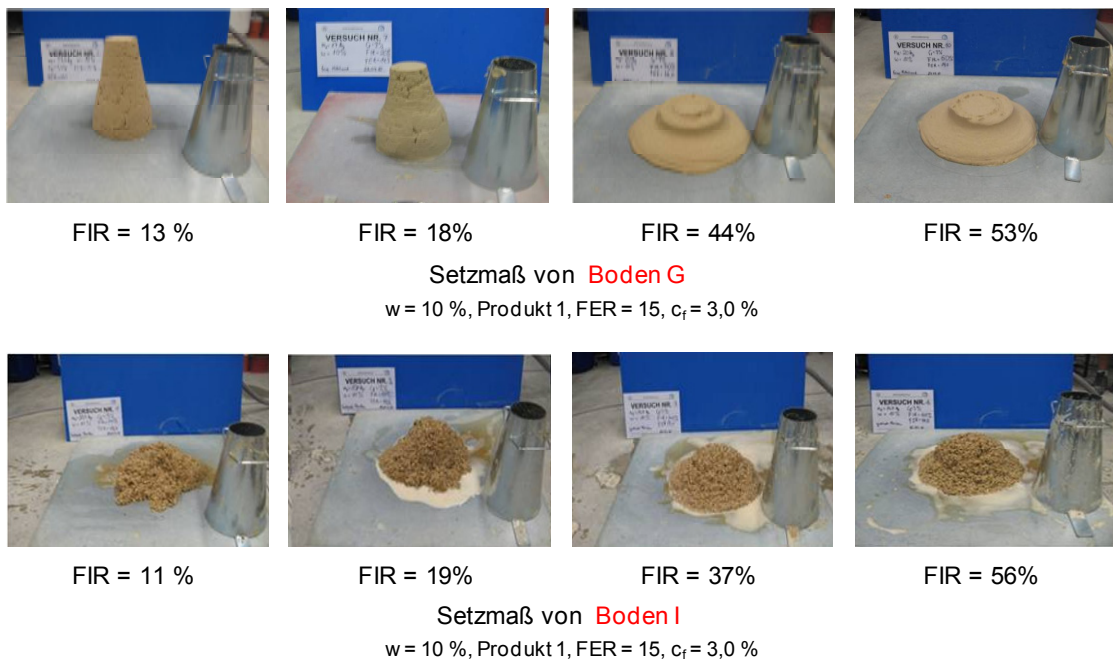


Abbildung 6-10: Versuche zur Bestimmung des Setzmaßes von Boden-Schaum-Gemischen in Anlehnung an [134]

Durch geringe Veränderungen der Zugabemengen an Schaum konnten bei verschiedenen Böden zum Teil stark veränderte Setzmaße ermittelt werden, so dass durch die gewählten Variationen der FIR nicht immer die erforderlichen Setzmaße zu erzielen waren. Für die weiteren Untersuchungen wurden dann die Werte der FIR genutzt, die annähernd zu den erforderlichen Setzmaßen einer gut konditionierten Bodenprobe führten. Anschließend wurden für die mit den entsprechenden FIR konditionierten Lockergesteine Untersuchungen zur Kompressibilität, zur Wasserdurchlässigkeit, zur Dichte, zur Scherfestigkeit und zur Stabilität gemäß dem in Abschnitt 4.4.3 erläuterten Konzept durchgeführt. Die bei den Versuchen gewonnenen Ergebnisse werden nachfolgend erläutert und diskutiert.

### Setzmaß

Die Ergebnisse zum Setzmaß der mit unterschiedlichen FIR konditionierten Böden sind in der Anlage D aufgeführt und in Abbildung 6-11 dargestellt. Von den untersuchten Lockerge-

steinen konnte bei neun Böden eine gute Konditionierung erzielt werden. Die Farben der Markierungen der jeweiligen Böden entspricht dabei den Farben gemäß der Anzahl der Kornfraktionen aus Abbildung 6-9. Es ist zu erkennen, dass die Werte für ein Setzmaß von ca. 10 cm zwischen einer FIR von 5 % und 44 % und für ein Setzmaß von ca. 20 cm zwischen einer FIR von 5 % und 65 % lagen. Bei einigen konditionierten Böden konnten nur Setzmaße von ca. 20 cm ermittelt werden, weil eine weitere Reduzierung der FIR in Schritten von ca. 5 % nicht möglich war (Boden C und Boden M) oder durch Verringerung der FIR das Material nicht ausreichend gut konditioniert werden konnte (Boden S). In diesen Fällen wurden die weiteren Untersuchungen nur mit einer FIR durchgeführt. Generell ist zu erkennen, dass mit steigender FIR das Setzmaß infolge der Reduzierung der inneren Reibung zunimmt.

Die Bandbreite der zu injizierenden FIR war vor allem bei enggestuften Böden mit geringem Korndurchmesser groß, wie z. B. zwischen FIR = 39 % und 65 % bei Boden A. Die Bandbreite nahm mit größerem Korndurchmesser bei gleicher Anzahl an Kornfraktionen ab (vgl. z. B. Boden B), was bei Betrachtung der Markierungen mit gleicher Farbe deutlich wird. Mit steigender Anzahl an Kornfraktionen war üblicherweise eine geringere Bandbreite der zu injizierenden FIR erforderlich, sofern die kleinste Bodenfraktion identisch war (vgl. Markierungen mit gleicher Kontur).

Bei einigen Böden waren durch nur geringe Veränderungen bei der FIR stark unterschiedliche Setzmaße möglich (vgl. Boden B, FIR = 4 % und 9 % bzw. Boden L, FIR = 5 % und 10 %). Bei diesen Böden wären daher für die Konditionierung mit Schaum auf einer Schildmaschine mit möglicherweise schwankenden FIR innerhalb der Abbaukammer die Einstellungen sehr genau zu wählen.

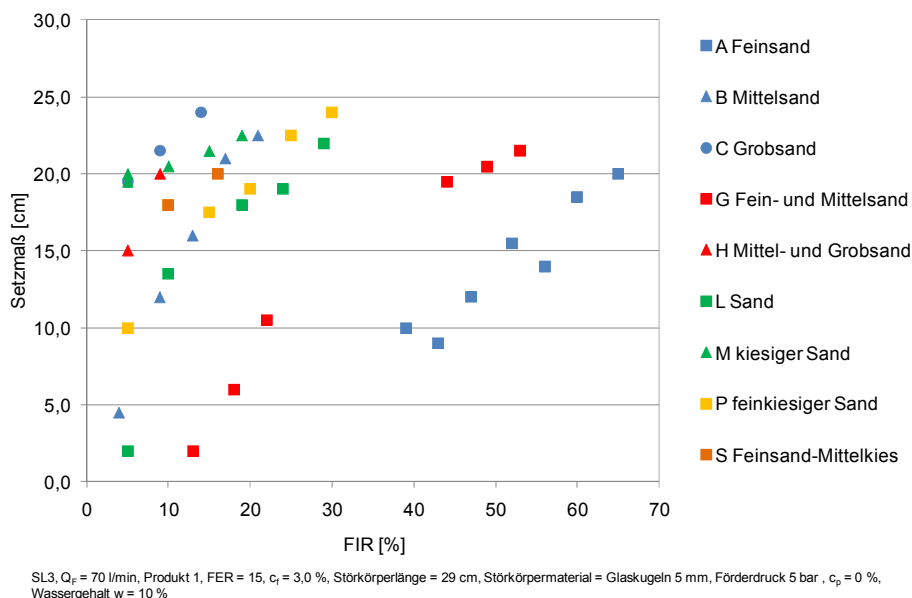


Abbildung 6-11: Setzmaße von Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der FIR

Durch den Vergleich von Setzmaßen gut konditionierter Böden mit gleicher Anzahl von Fraktionen (gleiche Farbe in Abbildung 6-11) kann geschlossen werden, dass bei Böden mit grö-



ßerem Korndurchmesser eine geringere FIR erforderlich ist, um annähernd gleiche Setzmaße zu erzielen. Dies wird z. B. bei Boden A und Boden B mit einem Setzmaß von 10 cm und den FIR von 39 % bzw. 12 % deutlich. Dieses Ergebnis bedeutet jedoch nicht, dass generell Böden ohne oder einer niedrigen FIR ausreichend gut zu konditionieren sind bzw. geeignete Eigenschaften aufweisen.

Bei Böden mit gleicher Anzahl an Kornfraktionen ist für annähernd gleiche Setzmaße die erforderliche, zuzugebende FIR bei Lockergesteinen mit größeren Korndurchmessern niedriger als bei Lockergesteinen mit geringeren Korndurchmessern (z. B. Boden A und B bei einem Setzmaß von 20 cm). Dies kann damit begründet werden, dass bei Böden mit geringeren Korndurchmessern die Retention-Porosität größer als bei Böden mit größeren Korndurchmessern ist (vgl. Tabelle 6-2). Die Verwendung des gleichen Wassergehalts in den Versuchen kann bei Böden mit größeren Korndurchmessern eine geringere Zugabe von Schaum ermöglichen, um das annähernd gleiche Setzmaß einer gut konditionierten Probe zu erhalten.

Bei Böden, die aus zwei Kornfraktionen zusammengestellt waren, lag die FIR zur Erzielung eines festgelegten Setzmaßes zwischen den Injektionsraten, die benötigt wurden, um bei den einzelnen Kornfraktionen dieses Setzmaß zu erreichen. Dies wird z. B. bei einem Setzmaß von ca. 10 cm und 20 cm mit den Böden A und B bzw. G sowie einem Setzmaß von ca. 20 cm mit den Böden B und C bzw. H deutlich (vgl. Abbildung 6-11).

Für Böden, deren Kornverteilungslinien die gleiche kleinste Kornfraktion aufwiesen, sank mit zunehmender Anzahl der Kornfraktionen die erforderliche FIR (vgl. Abbildung 6-11). Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Steigung der Kornverteilungslinie und FIR zu ermitteln, wurde in Abbildung 6-12 die FIR in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl  $C_u$  aufgetragen. Die Markierungen der unterschiedlichen kleinsten Kornfraktionen sind mit gleicher Kontur dargestellt, während die jeweiligen Setzmaße von ca. 10 cm bzw. 20 cm die gleichen Farben aufweisen.

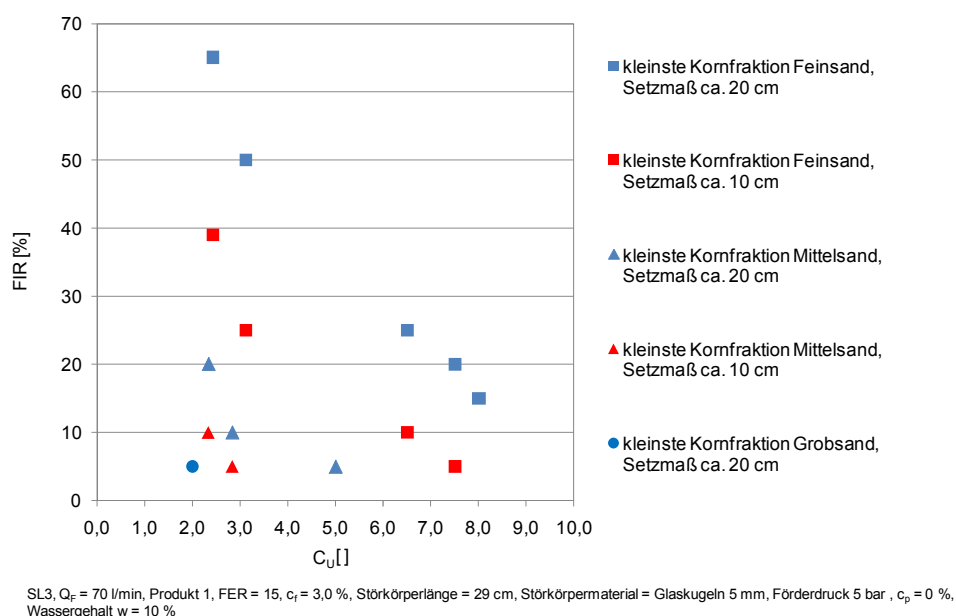
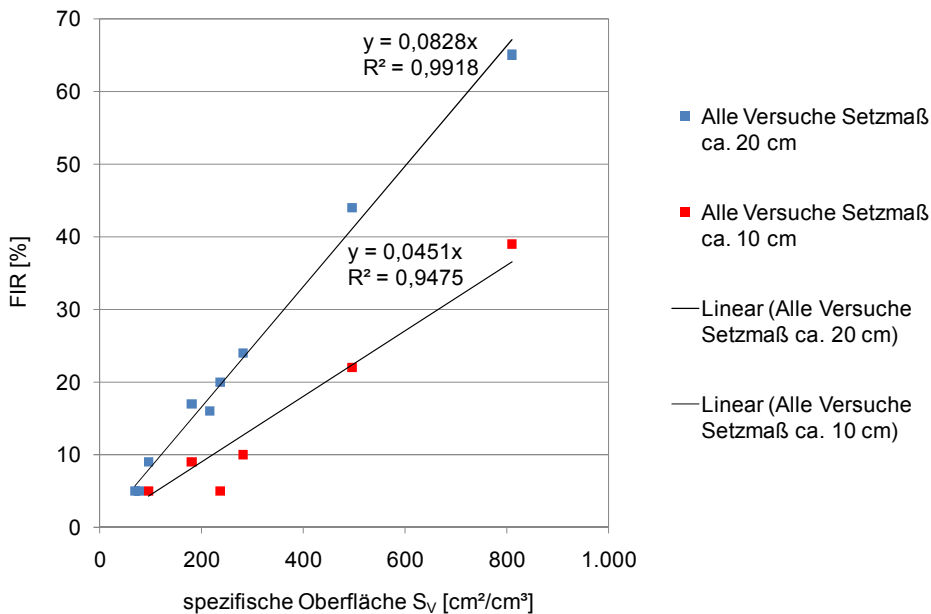


Abbildung 6-12: Darstellung der erforderlichen FIR für verschiedene Setzmaße in Abhängigkeit der Kornfraktion des Bodens

Für die jeweiligen kleinsten Kornfraktionen sank die erforderliche FIR mit zunehmender Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$ . Zudem nahmen bei annähernd gleichen Ungleichförmigkeitszahlen die Injektionsraten mit zunehmendem Korndurchmesser der kleinsten Kornfraktion ab. So war zur Erzielung eines Setzmaßes von annähernd 20 cm bei einer Ungleichförmigkeitszahl  $C_U \approx 2,0$  eine Bandbreite der FIR zwischen 5 % bei kleinster Kornfraktion als Grobsand und FIR = 65 % bei kleinster Kornfraktion als Feinsand möglich. Ein Einfluss der Steigung der Kornverteilungslinie ist daher gegeben.

Da die Kornverteilung auch die spezifische Oberfläche eines Bodens beeinflusst, wurde die Abhängigkeit der erforderlichen FIR von der spezifischen Oberfläche der Böden überprüft. In [113] sind volumenabhängige spezifische Oberflächen  $S_V$  von Bodenkörnern für unterschiedliche Korndurchmesser angegeben. Auf Grundlage dieser Angabe wurde die durchschnittliche spezifische Oberfläche pro Volumen für die mit Schaum erfolgreich konditionierten Böden bestimmt. Die ermittelten spezifischen Oberflächen für verschiedene Körnungen bzw. Böden sind in der Anlage D zusammengestellt.

Abbildung 6-13 zeigt die FIR, die bei unterschiedlichen Böden für ein Setzmaß von ca. 10 bzw. 20 cm zugegeben wurden, in Abhängigkeit der jeweiligen spezifischen Oberflächen  $S_V$  der Böden. Die erforderliche FIR ist sowohl zur Gewährleistung eines Setzmaßes von etwa 10 cm als auch zur Gewährleistung eines Setzmaßes von ungefähr 20 cm von der spezifischen Oberfläche  $S_V$  des Bodens abhängig. Anhand der angegebenen Regressionsgeraden, dem Bestimmtheitsmaß und der Steigung der Geraden wird diese lineare Abhängigkeit verdeutlicht.



SL3,  $Q_F = 70$  l/min, Produkt 1, FER = 15,  $c_t = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0$  %, Wassergehalt  $w = 10$  %

Abbildung 6-13: FIR in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche  $S_V$  für verschiedene Boden-Schaum-Gemische

Zur Gewährleistung der erforderlichen Setzmaße war eine von der spezifischen Oberfläche abhängige FIR notwendig. Um diese Werte zu erreichen, ist eine ausreichende Benetzung

der Kornoberfläche erforderlich (vgl. auch Abschnitt 2.3.5). Da mit steigender FIR auch die Menge der zuzugebenden Tensidlösung zunimmt, kann eine größere Kornoberfläche benetzt werden, so dass das Erreichen der jeweiligen Setzmaße möglich ist.

Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen der jeweiligen spezifischen Oberfläche  $S_V$  und der in Abhängigkeit des Setzmaßes erforderlichen FIR können die Gleichungen 6.4 und 6.5 zur Abschätzung der  $FIR_{10}$  und  $FIR_{20}$  bei kohäsionslosen Böden mit einem Wassergehalt von  $w = 10\%$  genutzt werden. Die  $FIR_{10}$  bzw.  $FIR_{20}$  gibt bei den untersuchten Böden die FIR an, die erforderlich ist, um ein Setzmaß von ca. 10 bzw. 20 cm zu erreichen.  $FIR_{10}$  bzw.  $FIR_{20}$  sind von der volumenbezogenen spezifischen Oberfläche  $S_V$  linear abhängig.

$$FIR_{10} = 0,045 * S_V \quad (\text{Gl. 6.4})$$

$$FIR_{20} = 0,083 * S_V \quad (\text{Gl. 6.5})$$

mit  $FIR_{10} =$  Foam Injection Ratio für ein Setzmaß von ca. 10 cm [%]  
 $FIR_{20} =$  Foam Injection Ratio für ein Setzmaß von ca. 20 cm [%]  
 $S_V =$  volumenbezogene spezifische Oberfläche [ $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ]

Da bei kohäsionslosen Böden zwischen spezifischer Oberfläche und Kornverteilungslinie eine Abhängigkeit besteht (vgl. [113]), wurden für die kohäsionslosen Kornfraktionen Feinsand, Mittelsand, Grobsand und Feinkies die durchschnittlichen Werte von  $S_V$  ermittelt (siehe Anlage D). Basierend auf der Auswertung zur spezifischen Oberfläche in Abhängigkeit vom prozentualen Siebdurchgang kann für einen der untersuchten, grobkörnigen Böden die volumenbezogene spezifische Oberfläche nach Gleichung 6.6 näherungsweise ermittelt werden. Die in der Gleichung aufgeführten Faktoren für die unterschiedlichen Kornfraktionen resultieren dabei aus der Auswertung zur spezifischen Oberfläche. Die durchschnittliche spezifische Oberfläche für Kornfraktionen mit einem Siebdurchgang größer 6 mm ist im Vergleich zu den anderen spezifischen Oberflächen sehr gering, so dass diese im Weiteren unberücksichtigt bleiben.

$$S_V = 8,10 * m_{0,2} + 1,80 * (m_{0,6} - m_{0,2}) + 0,68 * (m_2 - m_{0,6}) + 0,20 * (m_6 - m_2) \quad (\text{Gl. 6.6})$$

mit  $m_{0,2} =$  prozentualer Siebdurchgang bei  $d = 0,2$  mm [M-%]  
 $m_{0,6} =$  prozentualer Siebdurchgang bei  $d = 0,6$  mm [M-%]  
 $m_2 =$  prozentualer Siebdurchgang bei  $d = 2$  mm [M-%]  
 $m_6 =$  prozentualer Siebdurchgang bei  $d = 6$  mm [M-%]  
 $S_V =$  volumenbezogene spezifische Oberfläche [ $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ]

#### **Setzfließmaß\***

Da das Volumen der Bodenprobe gleich bleibt, nimmt mit steigendem Setzmaß üblicherweise das Setzfließmaß\* zu. Die ermittelten Ergebnisse der Versuche zum Setzfließmaß\* sind in der Anlage D aufgeführt und in Abbildung 6-14 den jeweiligen Setzmaßen gegenübergestellt. Aufgrund der geometrischen Abmessungen beim Versuchskonus zur Bestimmung des Setzmaßes liegt der minimale Wert des Setzfließmaßes\* bei 20 cm und die Obergrenze des

Setzmaßes bei 30 cm. Neben den Ergebnissen ist in der Abbildung eine logarithmische Regressionskurve in schwarz eingetragen.

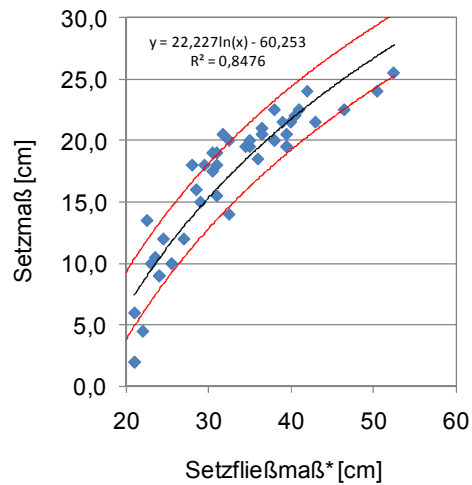


Abbildung 6-14: Setzmaße und Setzfließmaße\* verschiedener Boden-Schaum-Gemische

Bei Betonen können bei Setzmaßen zwischen 5 und 8 cm die ermittelten Werte bei Einzelmessungen um 2,5 cm abweichen (vgl. Abschnitt 4.4.4). Bei Übertragung dieses Ansatzes auf die Setzmaße der konditionierten Böden ergeben sich die in der Abbildung 6-14 um Setzmaße von 2,5 cm parallel zur Regressionskurve verschobenen Linien als obere und untere Grenze bei Einzelmessungen. Die überwiegenden Markierungen der jeweiligen Werte liegen innerhalb der rot dargestellten Grenzen. Aus diesem Grund besteht bei den untersuchten Materialien ansatzweise der in der Abbildung und in Gleichung 6.7 aufgeführte Zusammenhang zwischen Setzmaß  $s^\#$  und Setzfließmaß  $s^*$ .

$$s^\# = 22,227 * \ln(s^*) - 60,253 \quad (\text{Gl. 6.7})$$

mit  $s^* =$  Setzfließmaß\* [cm]

$s^\# =$  Setzmaß [cm]

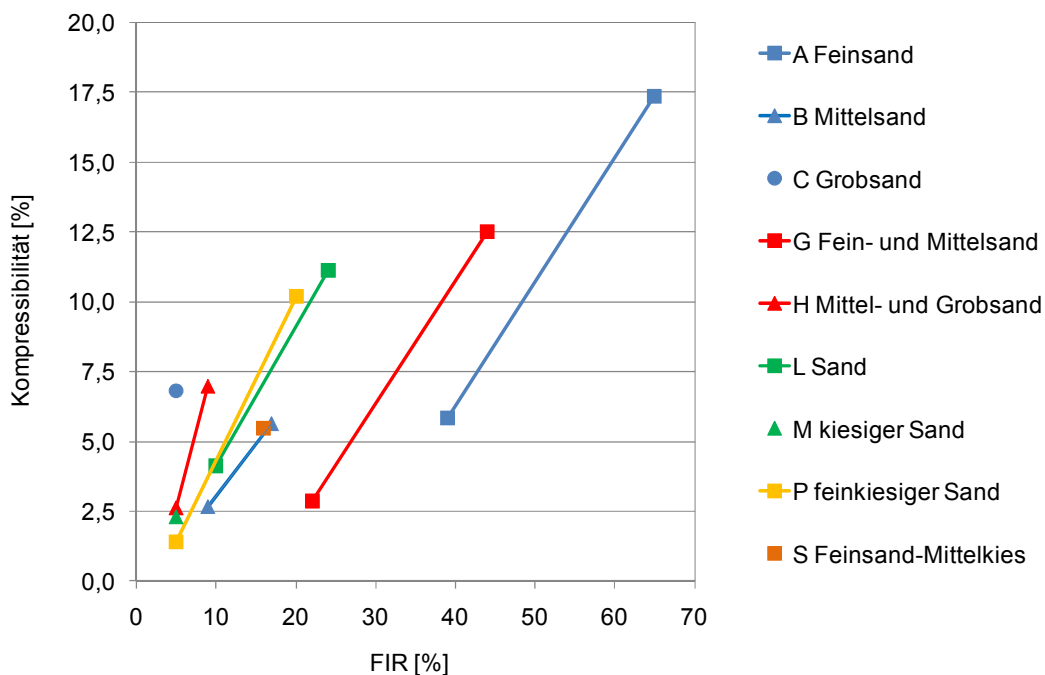
Aufgrund möglicher Abweichungen ist die Bestimmung des Setzmaßes nur mithilfe der Ermittlung des Setzfließmaßes\* und der Gleichung 6.7 nicht geeignet. Daher sollte das Setzmaß durch die Messung der Höhe der verformten Bodenprobe ermittelt werden. Da der Aufwand für diese Messung gering ist, sollte auch die Bestimmung des Setzfließmaßes\* ausgeführt werden, um mögliche grobe Fehler bei der Dokumentation der Ergebnisse zur Bestimmung des Setzmaßes feststellen zu können.

### Kompressibilität

Aufgrund der Zugabe von Schaum und der darin enthaltenen Luft sind Boden-Schaum-Gemische kompressibel, sofern durch eine Druckerhöhung eine Volumenreduzierung des Schaums sowie eine dadurch bedingte Veränderung der Lagerung einzelner Bodenkörner ermöglicht wird. Die jeweilige Kompressibilität wurde mittels der Ausgangshöhe und Proben-

höhe bei Belastung ermittelt (vgl. Gleichung 4.11). Vor allem bei der Belastungsstufe von 0,5 bar waren signifikante Volumenänderungen zu verzeichnen. Bei Belastungen von größer als 0,5 bar konnte größtenteils keine Steigerung der Kompressibilität ermittelt werden, da aufgrund des Korn-zu-Korn-Kontakts keine Veränderung der Lage der Bodenkörner und so keine weitere Reduzierung der Probenhöhe möglich war. Aus diesem Grund wurden in Abbildung 6-15 die Werte der Untersuchungen zur Kompressibilität bei Drücken von 0,5 bar den jeweiligen FIR gegenübergestellt. Die jeweiligen Werte sind auch in Tabelle 6-3 (vgl. Seite 170) zusammengefasst. Diese lagen zwischen 1,4 % und 17,4 % und wiesen wegen des hohen Luftvolumens bei Böden mit großen FIR entsprechend hohe Werte in Bezug auf die Kompressibilität auf.

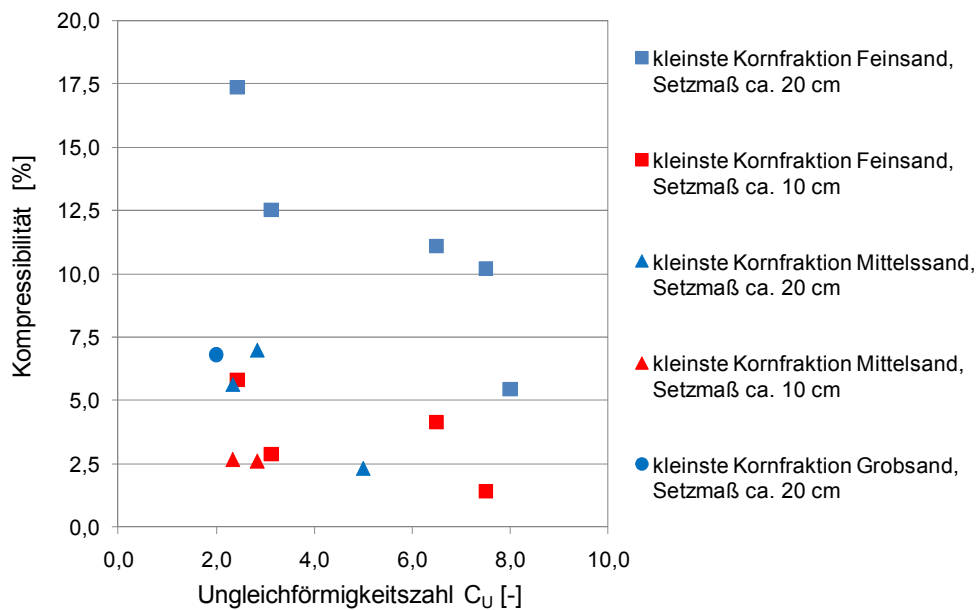
Verlängert man die Verläufe der meisten Böden, würden diese annähernd durch den Koordinatenursprung verlaufen, so dass von einem elastischen kompressiblen Boden-Schaum-Gemisch auszugehen ist. Die Verläufe der Böden A und G würden hingegen die Ordinate deutlich unterhalb der Kompressibilität von 0 % schneiden. Da bei einer FIR von 0 % die Kompressibilität von 0 % vorhanden sein muss, ist daraus zu schließen, dass die Verläufe der Kompressibilität dieser Böden mit niedrigerer FIR nicht linear verlaufen. Beide betrachteten Böden haben einen hohen Anteil an Feinsand, der wiederum eine hohe volumenbezogene spezifische Oberfläche  $S_V$  aufweist. Im Falle einer erforderlichen Oberflächenbenetzung der Bodenkörner durch die Tensidlösung des Schaums können die Schaumblasen zerplatzen, so dass Luft aus dem Boden-Schaum-Gemisch entweichen kann. Daher würde vor allem bei geringer FIR das konditionierte Material weniger kompressible Luft aufweisen, so dass die tatsächliche Kompressibilität niedriger als erwartet und der Verlauf der Kompressibilität der Böden A und G nicht linear wäre.



SL3,  $Q_F = 70$  l/min, Produkt 1, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0$  %, Wassergehalt  $w = 10$  %

Abbildung 6-15: Kompressibilität verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR bei Drücken von 0,5 bar

Die jeweilige Kompressibilität der Boden-Schaum-Gemische wurde in Abbildung 6-16 der Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  gegenübergestellt. Anhand der jeweiligen Markierungen ist zu erkennen, dass üblicherweise mit zunehmender Ungleichförmigkeitszahl die Kompressibilität der Boden-Schaum-Gemische sinkt. Ein Grund für die Reduzierung der Kompressibilität ist in der Kornverteilungslinie des Bodens zu sehen, da bei weitgestuften Böden mit hoher Ungleichförmigkeitszahl i. d. R. das Volumen des Porenraums geringer ist als bei enggestuften Böden mit niedriger Ungleichförmigkeitszahl. Infolge des geringen Porenraums ist auch die Injektionsrate zur Gewährleistung eines Setzmaßes von ca. 10 bzw. 20 cm geringer als bei Böden mit niedrigerer Ungleichförmigkeitszahl.



SL3,  $Q_F = 70$  l/min, Produkt 1, FER = 15,  $c_r = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermateriale = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0$  %, Wassergehalt  $w = 10$  %

Abbildung 6-16: Kompressibilität verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit von  $C_U$

Auf Grundlage der Überlegungen zur Kompressibilität in Abschnitt 3.1 konnte eine erforderliche Kompressibilität des Boden-Schaum-Gemischs von 1,9 % pro 0,5 bar ermittelt werden. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass dieser Wert bei den Boden-Schaum-Gemischen bis auf den Boden P mit einer FIR = 5 % gegeben ist. Für die erfolgreich konditionierten Böden sollte eine Volumenschwankung von 1,9 % zu keiner größeren Stützdruckschwankung als 0,5 bar führen. Falls geringere Stützdruckschwankungen einzuhalten sind, wird eine entsprechende Kompressibilität bei der jeweiligen Druckdifferenz erforderlich.

### Wasserdurchlässigkeit

Zur besseren Übersicht erfolgt die Erläuterung der zeitabhängigen Verläufe zur Wasserdurchlässigkeit der konditionierten Lockergesteine anhand von zwei Abbildungen. Zunächst werden die Verläufe der Wasserdurchlässigkeit der Boden-Schaum-Gemische vorgestellt, die einen Feinsandanteil aufweisen, anschließend die Verläufe der konditionierten Lockergesteine ohne Feinsandanteil.

Die Verläufe der Wasserdurchlässigkeit der untersuchten Boden-Schaum-Gemische mit Feinsandanteil sind in Abbildung 6-17 dargestellt. Zudem ist die Wasserdurchlässigkeit von unkonditionierten Böden, die über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten bestimmt wurden, abgebildet. Da die Wasserdurchlässigkeit der nicht konditionierten Böden als konstant angesehen werden kann, sind die Werte nach diesem Zeitraum in der Abbildung als gestrichelte horizontale Linien dargestellt. Diese Wasserdurchlässigkeiten wiesen Werte zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s im Bereich der in Abbildung 3-1 dargestellten Wasserdurchlässigkeiten auf.

Die Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen lag üblicherweise wesentlich unterhalb der Wasserdurchlässigkeit von unkonditionierten Böden und stieg mit zunehmender Untersuchungsdauer (vgl. Abbildung 6-17). Bei Boden-Schaum-Gemischen ist aufgrund der Drainage des Liquids eine Verdrängung des Schaums aus dem Porenraum sowie eine Veränderung des Porengefüges möglich. Daher wurden bei konditionierten Lockergesteinen z. T. Werte der Wasserdurchlässigkeiten erreicht, die oberhalb der Werte der Wasserdurchlässigkeit nicht konditionierter Böden lagen.

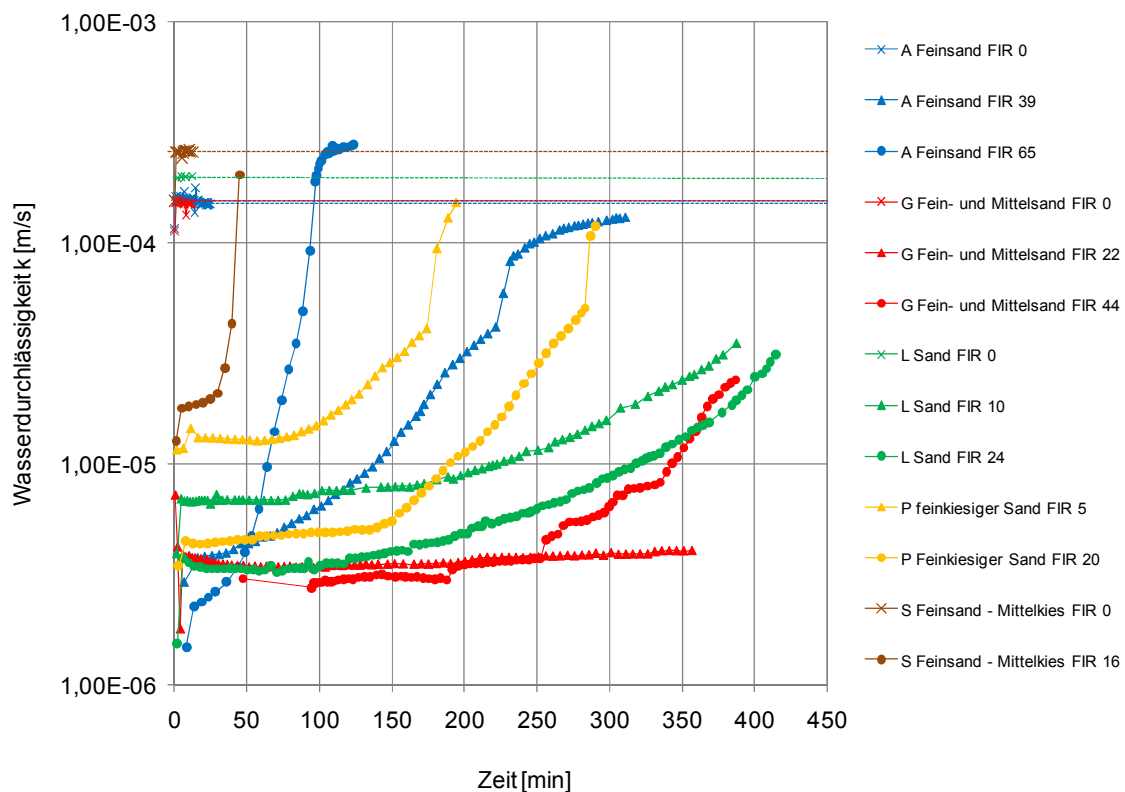


Abbildung 6-17: Wasserdurchlässigkeit  $k$  verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit kleinster Kornfraktion Feinsand in Abhängigkeit der Zeit

Bei den jeweiligen Boden-Schaum-Gemischen mit annähernd gleichem Setzmaß konnte mit Ausnahme des Feinsands (Boden A) ein Zusammenhang zwischen Ungleichförmigkeitszahl bzw. Anzahl der in der Bodenprobe enthaltenen Kornfraktionen und Verlauf der Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden. Bei jeweils annähernd denselben Setzmaßen (gleiche

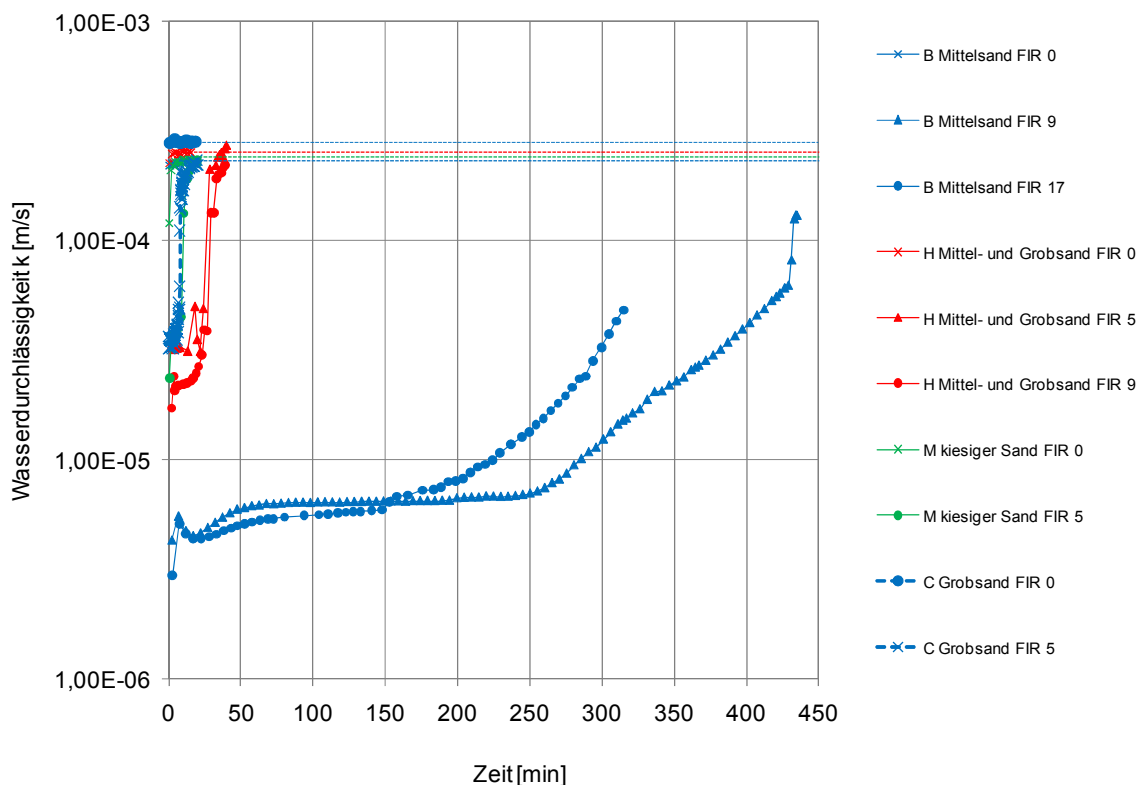
Konturen der Markierung) lag zu gleichen Zeitpunkten die Wasserdurchlässigkeit von Böden mit hoher  $C_U$  oberhalb der Wasserdurchlässigkeit von Böden mit niedriger  $C_U$ . Mit steigender Ungleichförmigkeitszahl nahm auch die Injektionsrate ab. Die vergleichsweise hohe Wasserdurchlässigkeit des Feinsands kann ggf. durch die hohen FIR beeinflusst worden sein.

Für Boden-Schaum-Gemische mit geringen FIR und den Böden G, L und P lagen die Werte der Wasserdurchlässigkeit größtenteils oberhalb der Werte der mit hohen FIR konditionierten Böden. Bei den mit hohen FIR (65 bzw. 44%) konditionierten Böden A und G konnte zudem ermittelt werden, dass die Wasserdurchlässigkeit von Böden mit hoher FIR zunächst geringer war als die von Böden mit niedrigen Injektionsraten. Zu bestimmten Zeitpunkten wurden bei den Böden A und G jedoch höhere Wasserdurchlässigkeiten als bei Böden mit niedriger FIR ermittelt. Dies lässt die Vermutung zu, dass aufgrund der hohen FIR eine schnellere Drainage des Schaums aus dem Boden-Schaum-Gemisch erfolgte und so die jeweiligen Wasserdurchlässigkeiten zeitnah zunahmen.

Aufgrund der Anforderung, dass bei Vortrieben mit Erddruckschilden die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials geringer als  $k < 10^{-5}$  m/s sein soll, eignen sich verschiedene Boden-Schaum-Gemische über unterschiedliche Zeiträume für den Einsatz als Stützmedium unterhalb des Grundwasserspiegels. Die Eignung von Boden-Schaum-Gemischen als Stützmedium aufgrund unterschiedlicher Parameter wird zusammenfassend am Ende dieses Abschnitts beschrieben.

Die Wasserdurchlässigkeiten der Böden B, H und M, deren kleinste Kornfraktion Mittelsand ist, sowie die Wasserdurchlässigkeit des Grobsands (Boden C) sind in Abbildung 6-18 dargestellt. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeiten der Böden H, M und C lagen zu Beginn der Untersuchungen bereits bei  $k > 1 \cdot 10^{-5}$  m/s und somit in einem für Erddruckschilde nicht geeigneten Bereich. Die Wasserdurchlässigkeit dieser konditionierten Materialien erreichte nach maximal ca. 40 Minuten die Wasserdurchlässigkeit des unkonditionierten Bodens. Für den konditionierten Boden B (Mittelsand) konnte die Wasserdurchlässigkeit hingegen reduziert werden und lag bis mindestens 200 Minuten nach Beginn der Untersuchung in einem Bereich von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s.





SL3,  $Q_F = 70$  l/min, Produkt 1, FER = 15,  $c_f = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermateriale = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0$   
Wassergehalt  $w = 10$  %

Abbildung 6-18: Wasserdurchlässigkeit  $k$  verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit kleinster Fraktion Mittelsand oder Grobsand in Abhängigkeit der Zeit

Die untersuchten Böden H, M und C wiesen aufgrund der jeweiligen Kornverteilungslinie bei Ungleichförmigkeitszahlen zwischen  $C_U = 1,8$  und  $4,3$  einen größeren durchschnittlichen Korndurchmesser als Boden B auf. Aufgrund eines vergrößerten Korndurchmessers besteht die Möglichkeit, dass die jeweiligen Porenräume größer als bei kleineren Korndurchmessern sind. Eine Drainage des Schaums bzw. des Liquids im Schaum kann dadurch bei zu großen Korndurchmessern begünstigt werden.

### Dichte

Die Dichten der Boden-Schaum-Gemische sind u. a. vom jeweils verwendeten Boden und der Injektionsrate des Schaums abhängig. Die in den Versuchen ermittelten Dichten lagen zwischen  $1,0$  und  $1,7$  kg/l und nahmen mit steigender FIR ab (vgl. Abbildung 6-19). Für die Bodenarten sind hinsichtlich des Kriteriums der Verarbeitbarkeit mit Setzmaßen von ca. 10 und 20 cm Dichten mit Unterschieden bis zu  $0,2$  kg/l möglich. Böden mit großen Korndurchmessern oder hoher Ungleichförmigkeitszahl  $C_U$  wiesen aufgrund der geringen Bandbreiten bei der FIR nur einen begrenzten Bereich von für den Vortrieb geeigneten Dichten auf. Eine gezielte Steuerung der Dichte außerhalb dieser Bereiche wäre durch eine Veränderung der Schaumzugabe möglich, beeinflusst aber auch die jeweiligen Setzmaße, so dass u. U. die Verarbeitbarkeit des konditionierten Lockergesteins nicht mehr gegeben ist.

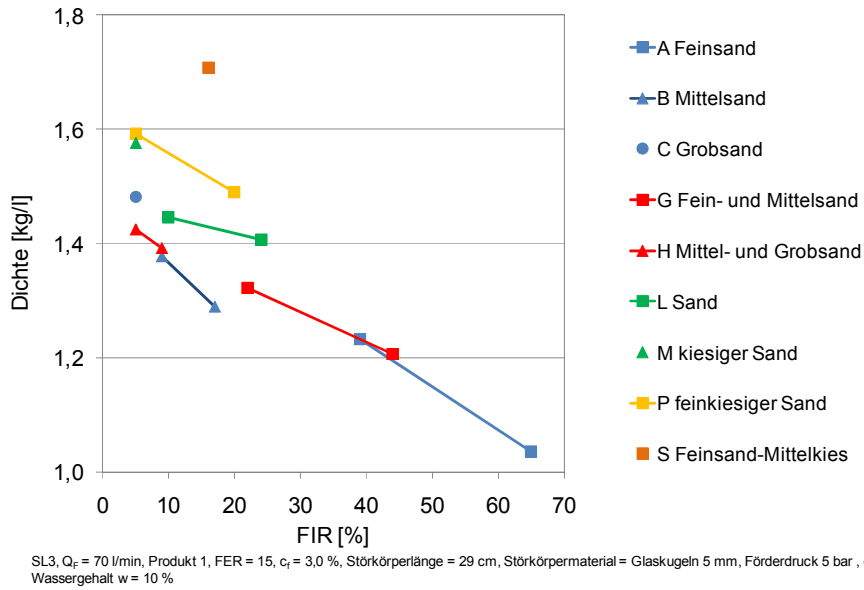


Abbildung 6-19: Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR

Um den Einfluss der jeweiligen Bodenarten auf die Dichte zu ermitteln, wurden in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl die Dichten von kohäsionslosen Böden aufgetragen (vgl. Abbildung 6-20). Bei den untersuchten Böden nahmen mit zunehmender Ungleichförmigkeitszahl die Differenzen zwischen der maximalen und der minimalen Dichte ab. Eine Ausnahme bildet Boden P, welcher die Bodenfraktion Feinsand beinhaltet und eine  $C_U$  von ca. 7 aufweist, da eine veränderte Dichte von ca. 0,1 kg/l in Abhängigkeit der Schaumzugabe ermittelt wurde. Da die Zugabemenge an Schaum für Böden mit steigender Ungleichförmigkeitszahl verringert wird, kann die steigende Dichte bei hohen  $C_U$  üblicherweise auf die geringen FIR zurückgeführt werden.

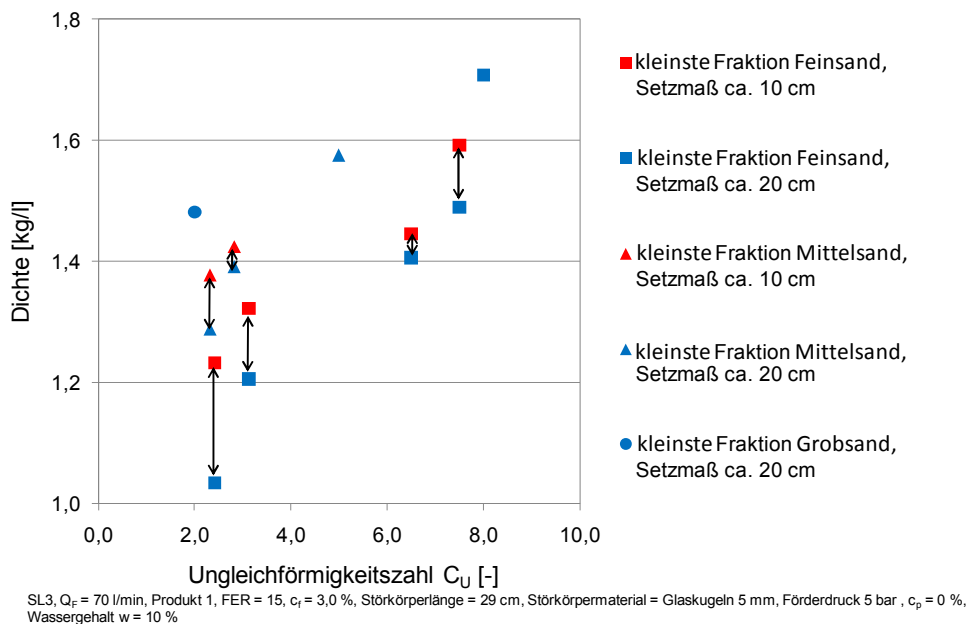


Abbildung 6-20: Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit von  $C_U$  und der kleinsten Kornfraktion

Auf einer Erddruckschildmaschine erfolgt z. T. die Bestimmung der Dichte des konditionierten Materials in der Abbaukammer mithilfe der in der Druckwand auf unterschiedlichen Höhen installierten Erddruckmessdosen. Aufgrund der in den Untersuchungen ermittelten Ergebnisse zur Abhängigkeit der Dichte von der Kornverteilungslinie ist ein pauschaler Ansatz zur Beschreibung einer geeigneten Dichte, wie z. B. zwischen 1,2 und 1,4 kg/l, nicht möglich. Bei einer Aussage über die Eignung des konditionierten Materials als Stützmedium sollte vielmehr auch die Kornverteilungslinie betrachtet werden. So wäre es z. B. möglich, die Ungleichförmigkeitszahl und die kleinste Bodenfraktion bei einem Projekt zu ermitteln und die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs anhand der in Abbildung 6-20 aufgeführten Werte abzuschätzen.

### Flügelscherfestigkeit

Die in den Versuchen ermittelten Werte der Flügelscherfestigkeit der unkonditionierten Böden lagen zwischen 8,0 und 10,0 kN/m<sup>2</sup> (vgl. Anlage D). Durch die Schaumzugabe konnte eine wesentliche Reduktion der Scherfestigkeit ermittelt werden. So wies die aus drei Messungen durchschnittlich ermittelte Flügelscherfestigkeit der mit Schaum konditionierten Böden, mit denen Setzmaße von etwa 10 bzw. 20 cm erreicht wurden, Werte zwischen 0,3 und 1,6 kN/m<sup>2</sup> auf. Die konditionierten Materialien mit größerer Anzahl an Bodenfraktionen erreichten bei annähernd gleicher FIR üblicherweise höhere Flügelscherfestigkeiten als Böden mit geringer Anzahl an Bodenfraktionen.

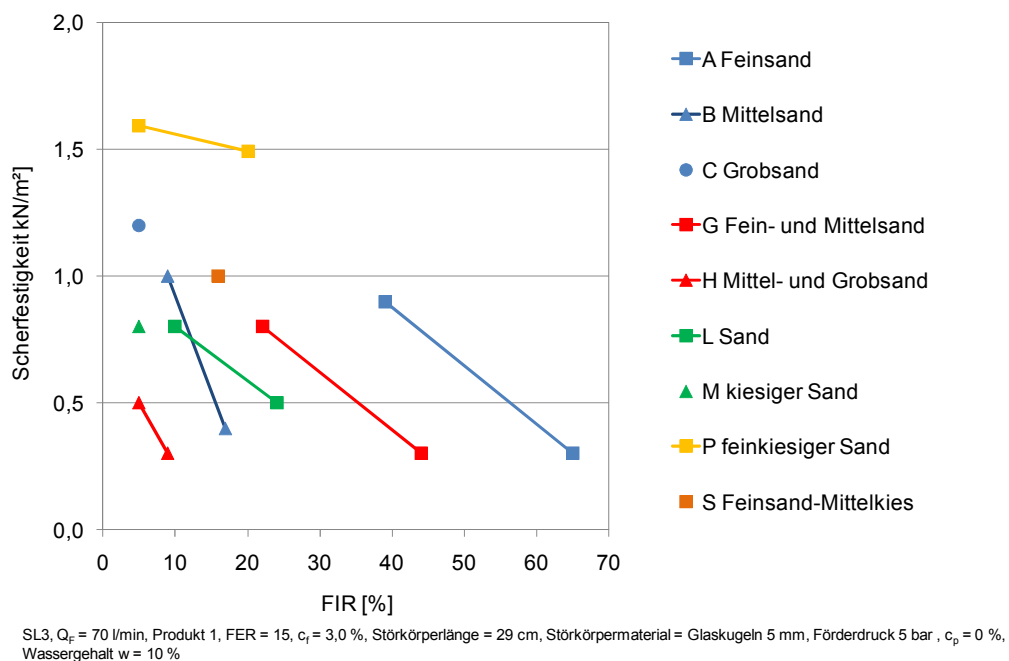
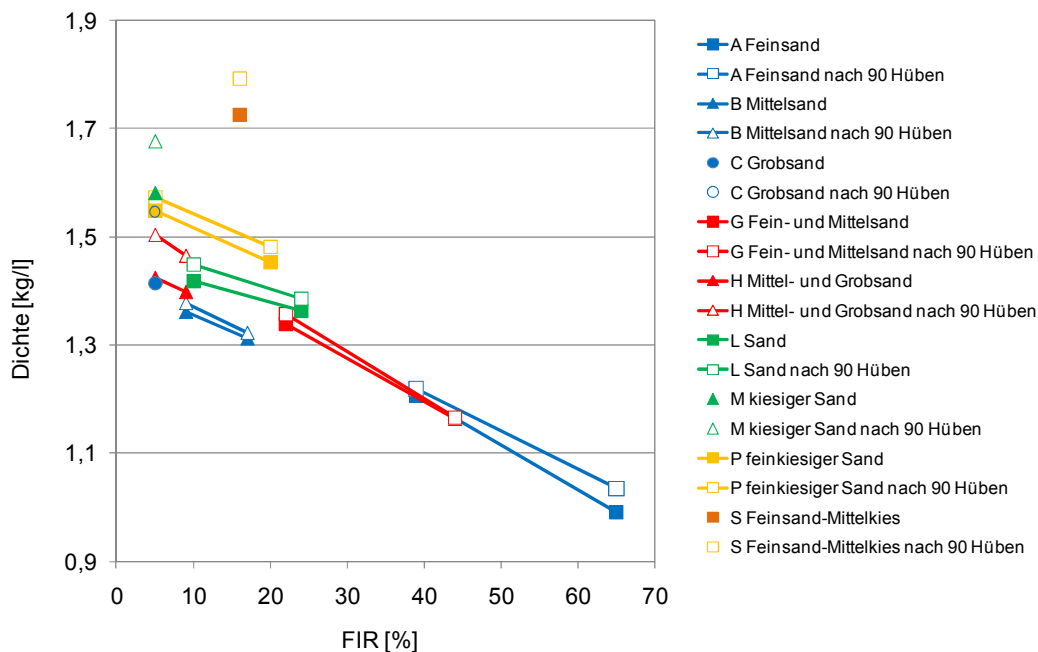


Abbildung 6-21: Flügelscherfestigkeit verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR

**Stabilität**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Stabilität (vgl. Abschnitt 4.4.4) sind in Abhängigkeit der FIR in Abbildung 6-22 dargestellt. Die mit dem Verfahren erzielten Dichten wichen um durchschnittlich 0,03 kg/l und maximal 0,07 kg/l von den beim Versuch zur Bestimmung der Dichte ermittelten Werten ab (vgl. Tabelle 6-3, S. 170). Durch 90 Hübe mit dem Ausbreittisch wurden bis zu 0,13 kg/l höhere Dichten bestimmt.

Bei gleicher Anzahl an Bodenfraktionen (Markierungen mit gleicher Farbe) wiesen die Böden mit größerem Korndurchmesser üblicherweise größere Unterschiede zwischen der Dichte ohne und mit Ausführung der 90 Hübe mit dem Ausbreittisch auf. Da bei den Böden mit größerem Korndurchmesser i. d. R. geringere FIR eingebracht wurden, wäre zu erwarten gewesen, dass aufgrund des Drainageprozesses des Schaums Luft entweichen kann und vor allem große Dichteunterschiede in Abhängigkeit der FIR durch den Energieeintrag erfolgen. Zudem wäre zu vermuten gewesen, dass ein Boden, der mit unterschiedlichen FIR vermischt wurde, nach dem Energieeintrag annähernd die gleiche Dichte aufweist. Diese Zusammenhänge konnten jedoch nicht ermittelt werden, da vermutlich Luft im konditionierten Material zurückblieb und eine weitere Verdichtung des Materials nicht möglich war.



SL3, Q<sub>F</sub> = 70 l/min, Produkt 1, FER = 15, c<sub>r</sub> = 3,0 %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar, c<sub>p</sub> = 0 %, Wassergehalt w = 10 %

Abbildung 6-22: Bei Stabilitätsuntersuchungen ermittelte Dichten verschiedener Boden-Schaum-Gemische in Abhängigkeit der FIR

**Zusammenfassung**

Bei den durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Böden bei gleichbleibenden Schaumeigenschaften zeigte sich, dass für Lockergesteine mit den in Abbildung 6-23 aufgeführten Kornverteilungslinien eine geeignete Konditionierung mit Schaum hinsichtlich des Setzmaßes erreicht werden konnte.

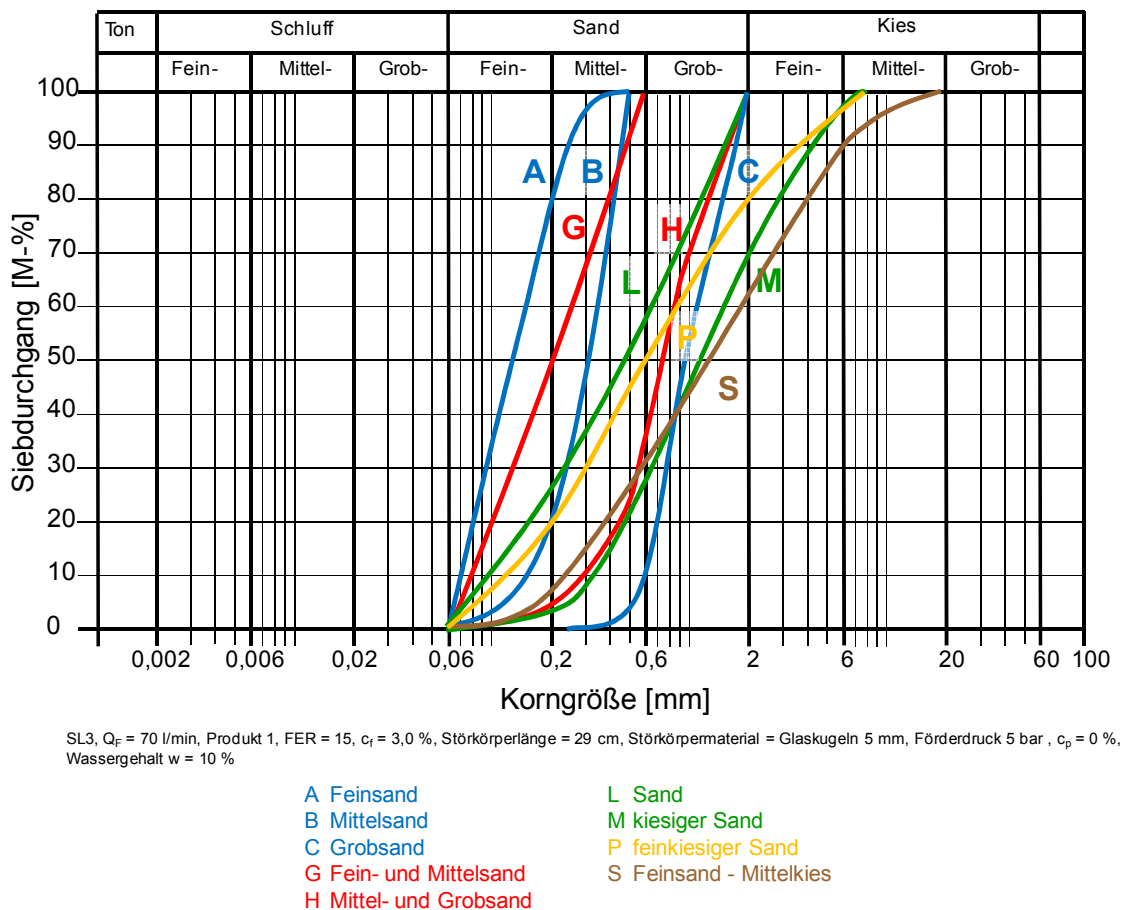


Abbildung 6-23: Kornverteilungen von Böden, bei denen durch Konditionierung mit Schaum Setzmaße von ca. 10 cm bzw. 20 cm erreicht wurden

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den jeweiligen Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine fasst Tabelle 6-3 zusammen. In den ersten beiden Spalten sind die genutzten Böden sowie ihre Kürzel in der Farbe der jeweiligen Kornfraktion dargestellt. Für die in der dritten Spalte aufgeführten FIR wurden die Setzmaße (4. Spalte) und die Setzfließmaße\* (5. Spalte) bestimmt, wobei die Setzmaße annähernd den geforderten Werten von ca. 10 und 20 cm entsprachen. Anschließend folgen gemäß der Versuchsreihenfolge die Ergebnisse zur Kompressibilität, Wasserdurchlässigkeit, Dichte, Flügelscherfestigkeit und Stabilität. Zur Beschreibung der Wasserdurchlässigkeit ist in der Tabelle die Zeit aufgeführt, die während der Untersuchung gemessen wurde, bis der jeweilige Verlauf der Wasserdurchlässigkeit verschiedene Werte erreichte. Als Werte wurden  $k = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s,  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s festgelegt. Die aus dieser Tabelle entwickelten Einsatzbereiche von Erddruckschilden werden im folgenden Abschnitt erläutert.

Tabelle 6-3: Übersicht zu Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation der Bodeneigenschaften

Boden		FIR	Setzmaß	Setzfließmaß*	Kompressibilität			Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von				Dichte	Flügelstabilität	Stabilität: Dichte nach 24 h und	
					bei 0,5 bar	bei 1,0 bar	bei 2,0 bar	5*10 <sup>-6</sup> m/s	1*10 <sup>-5</sup> m/s	5*10 <sup>-5</sup> m/s	1*10 <sup>-4</sup> m/s			0 Hüben	90 Hüben
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[min]	[min]	[min]	[min]	[kg/l]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kg/l]	[kg/l]
A	Feinsand	39	10,0	25,5	5,8	5,8	5,8	72	137	222	245	1,23	0,9	1,21	1,22
		65	20,0	38,0	16,3	17,4	17,4	55	64	90	96	1,04	0,3	0,99	1,04
B	Mittelsand	9	12,0	24,5	2,7	2,7	2,7	27	280	412	431	1,38	1,0	1,36	1,38
		17	21,0	36,5	5,6	5,6	5,6	48	224	315	> 315	1,29	0,4	1,31	1,32
C	Grobsand	5	19,5	34,5	6,8	6,8	6,8	0	0	7	8	1,48	1,2	1,42	1,55
G	Fein- und Mittelsand	22	10,5	23,5	2,9	2,9	2,9	> 356	> 356	> 356	> 356	1,32	0,8	1,34	1,36
		44	19,5	39,5	12,5	12,5	12,5	265	342	> 387	> 387	1,21	0,3	1,16	1,17
H	Mittel- und Grobsand	5	15,0	29,0	2,6	2,6	2,6	0	0	24	25	1,43	0,5	1,42	1,50
		9	20,0	38,0	7,0	7,0	7,0	0	0	20	26	1,39	0,3	1,40	1,46
L	Sand	10	10,0	22,5	4,1	4,1	4,1	0	170	> 290	> 290	1,45	0,8	1,42	1,45
		24	19,0	30,5	10,2	11,1	11,1	123	250	> 300	> 300	1,41	0,5	1,36	1,39
M	kiesiger Sand	5	20,0	35,0	2,3	2,3	2,3	0	0	9	10	1,58	0,8	1,58	1,68
P	feinkiesiger Sand	5	10,0	23,0	1,4	1,4	1,4	0	0	174	180	1,59	1,5	1,55	1,57
		20	19,0	31,0	9,8	10,2	10,2	120	190	280	286	1,49	0,5	1,45	1,48
S	Feinsand - Mittelkies	16	20,0	32,5	5,5	5,5	5,7	0	0	40	42	1,71	1,0	1,73	1,79

SL 3; Q<sub>F</sub> = 70 l/min, Produkt 1, FER 15, c<sub>r</sub> = 3,0 %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck = 5 bar, c<sub>p</sub> = 0 % Wassergehalt w = 10 %

## 6.2.2. Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Boden-Schaum-Gemischen als Stützmedium

Auf Grundlage der in Tabelle 6-3 dargestellten Ergebnisse lassen sich die Einsatzbereiche für Erddruckschilde ableiten, bei denen Schaum als Konditionierungsmittel nutzbar ist. Für Böden mit definierten Kornverteilungskurven (vgl. Abbildung 6-23) konnten mit dem genutzten Schaum Setzmaße im Bereich von ca. 10 bzw. 20 cm ermittelt werden (vgl. Tabelle 6-3). Die so konditionierten Böden wiesen daher Verarbeitbarkeiten auf, die für Erddruckschilde als geeignet angesehen werden können.

Das Stützmedium sollte zudem kompressibel sein, um Volumenschwankungen in der Abbaukammer ohne übermäßige Stützdruckschwankungen auszugleichen. Der Grenzwert kann in Abhängigkeit der geometrischen Abmessungen bzw. Parameter der Schildmaschinensteuerung variieren und lag bei dem gewählten Beispiel bei 1,9 % bei einem Druckunterschied von 0,5 bar (vgl. Abschnitt 3.1). Diese Kompressibilität wurde von fast allen Böden und Injektionsraten mit Ausnahme des Bodens P bei einer FIR = 5 % erreicht. Dies bedeutet, dass für alle Böden mindestens eine FIR besteht, die eine ausreichende Kompressibilität des Boden-Schaum-Gemischs gewährleistet.

Die Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums bei Erddruckschilden sollte aufgrund empirischer Erfahrungen bei  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s liegen. Möglicherweise werden bei einzelnen Projekten höhere oder auch niedrigere Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeiten gestellt. Aus diesem Grund wurden in Tabelle 6-3 die Zeiten bis zum Erreichen der verschiedenen Wasserdurchlässigkeiten angegeben. Sofern sich diese Zeiten wesentlich unterscheiden, könnten sich andere Einsatzgrenzen ergeben.

Zu Beginn eines Projektes kann nach [102] die Dauer für einen Ringbau zwischen 60 und 90 Minuten liegen. Innerhalb dieses Zeitraums ist generell eine Zugabe von Schaum in die Abbaukammer möglich, um dort z. B. den Druck des Stützmediums zu erhöhen (vgl. [144]). Die Zugabe der Konditionierungsmittel erfolgt jedoch meist nur in Einzelfällen. Als Zeitspanne für die Gewährleistung einer erforderlichen Wasserdurchlässigkeit von z. B.  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s in der Abbaukammer ohne erneute Schaumzugabe werden daher 90 Minuten angesetzt. Aus der Tabelle 6-3 wird ersichtlich, dass bei den konditionierten Böden A, B, G, L und P für eine oder für beide FIR die Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s erst nach über 90 Minuten erreicht wurde. In diesem Fall kann daher von einer geeigneten Konditionierung hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit ausgegangen und der Einsatz eines Erddruckschildes aufgrund dieser Randbedingung als möglich erachtet werden.

Sollte bei einem Projekt eine höhere Wasserdurchlässigkeit als  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s, wie z. B.  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  oder  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s zulässig sein, würden sich die Einsatzgrenzen der Erddruckschilde nicht verschieben, da keine weiteren konditionierten Böden für den Zeitraum von 90 Minuten eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Eine projektspezifische Anforderung mit einer verringerten Wasserdurchlässigkeit auf z. B.  $k < 5 \cdot 10^{-6}$  m/s würde hingegen die Einsatzgrenzen von Erddruckschilden verändern, da nur die konditionierten Böden G, L und P hinsichtlich dieser Anforderung ausreichende Werte gewährleisten.

Die ermittelten Dichten können für die Stützdruckermittlung angesetzt werden, die Flügelscherfestigkeiten von unkonditioniertem und konditioniertem Material können zur Abschätzung der Reduktion des erforderlichen Drehmoments des Schneidrads dienen und die Stabilität kann zur Ermittlung des zu entsorgenden Volumens geeignet sein. Diese Parameter beeinflussen jedoch die generellen Einsatzgrenzen der Erddruckschilde nicht.

Abbildung 6-24 zeigt die Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Schaumkonditionierung in Abhängigkeit der in Abbildung 6-23 dargestellten Kornverteilungslinien und speziellen Randbedingungen.

Im Bereich A ist in den Untersuchungen eine geeignete Verarbeitbarkeit, eine ausreichende Kompressibilität und eine Wasserdurchlässigkeit von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s durch Schaumzugabe möglich. Liegen die Kornverteilungslinien von kohäsionslosen Böden innerhalb dieses Bereiches, kann daher der Einsatz von Erddruckschilden unterhalb des Grundwasserspiegels bei einer Konditionierung mit Schaum als möglich erachtet werden.

Der Bereich B gibt die Kornverteilung von Böden an, die aufgrund ihrer Wasserdurchlässigkeiten von  $k > 1 \cdot 10^{-5}$  m/s nur für Vortriebe oberhalb des Grundwassers bei Verwendung von Schäumen als Konditionierungsmittel in Frage kommen. Für Böden, deren Kornverteilungslinien in Bereich B liegen bzw. die Kornverteilungslinien durch die Bereiche A und B verlaufen, können bei geeigneter Konditionierung eine ausreichende Verarbeitbarkeit und Kompressibilität erreicht werden.

Liegen Kornverteilungslinien von Böden teilweise oder vollständig außerhalb der Bereiche A und B, ist aufgrund der Versuchsergebnisse davon auszugehen, dass eine Konditionierung

der kohäsionslosen Böden nur mit Schaum nicht ausreicht, um die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, die Kompressibilität und die Wasserdurchlässigkeit zu gewährleisten.

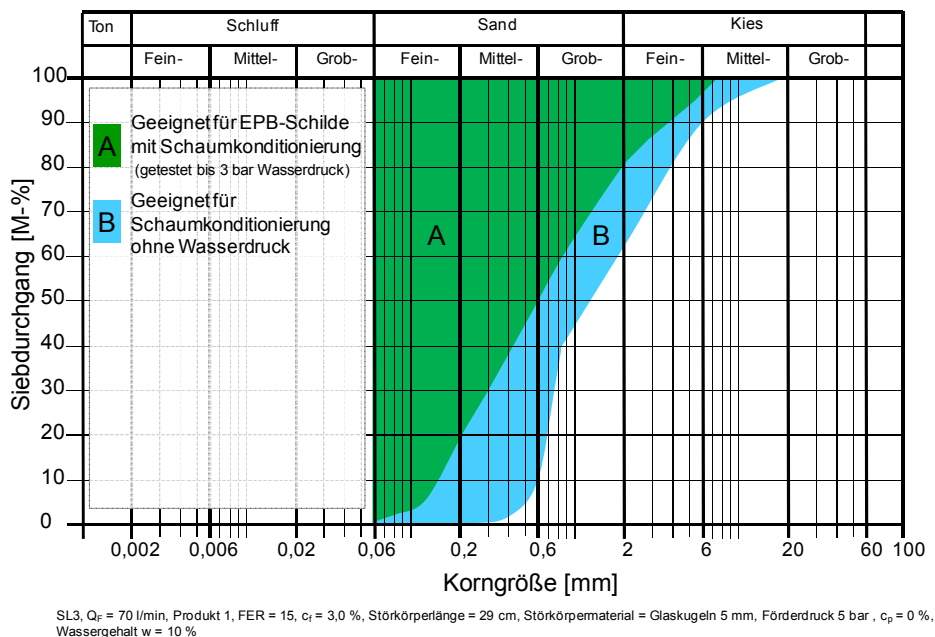


Abbildung 6-24: Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Schaum als Konditionierungsmittel

### 6.3. Untersuchungsergebnisse von mit unterschiedlichen Schäumen konditioniertem Boden

Neben den Untersuchungen mit Variation der Böden bei einheitlich hergestellten Schäumen (Abschnitt 6.2) wurden Versuche durchgeführt, bei denen eine Veränderung der Parameter FIR, FER und  $c_f$  bei der Konditionierung eines Bodens erfolgte, um die Einflüsse unterschiedlicher Schäume auf die Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische zu ermitteln. Für diese Versuche wurde der Boden V ausgewählt, der einen Feinanteil von 5 % aufwies (vgl. Kornverteilungslinie in Abbildung 6-25) und dessen Eigenschaften in der Anlage D aufgeführt sind. Die Kornverteilungslinie dieses Bodens verläuft sowohl durch die Bereich A und B der Abbildung 6-24, so dass bei entsprechenden Eigenschaften hinsichtlich des Setzmaß, der Kompressibilität und der Wasserdurchlässigkeiten möglicherweise eine Erweiterung der Einsatzgrenzen von Erddruckschilden unterhalb des Grundwasserspiegels erreicht werden kann.

Als Parameter für die Referenzversuche wurden ein Wassergehalt von  $w = 6$  %, die Schaumlanze 3, eine  $Q_F = 60$  l/min, das Produkt 1, eine Störkörperlänge von 29 cm, als Störkörpermaterial Glaskugeln mit 5 mm Durchmesser, ein Förderdruck von 5 bar, die  $c_f = 3,0$  %, eine FER = 15 sowie die FIR = 10 % gewählt, da diese Einstellungen ein Setzmaß von annähernd 20 cm ermöglichten. Bei den Untersuchungen fand eine Veränderung der Parameter FIR, FER und  $c_f$  statt, so dass in den Versuchen Setzmaße auch außerhalb der Grenzen von 10 und 20 cm ermittelt wurden. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen sind größtenteils in Anhängigkeit der Variation der FIR, der FER und von  $c_f$  jeweils in einzelnen Diagrammen dargestellt.



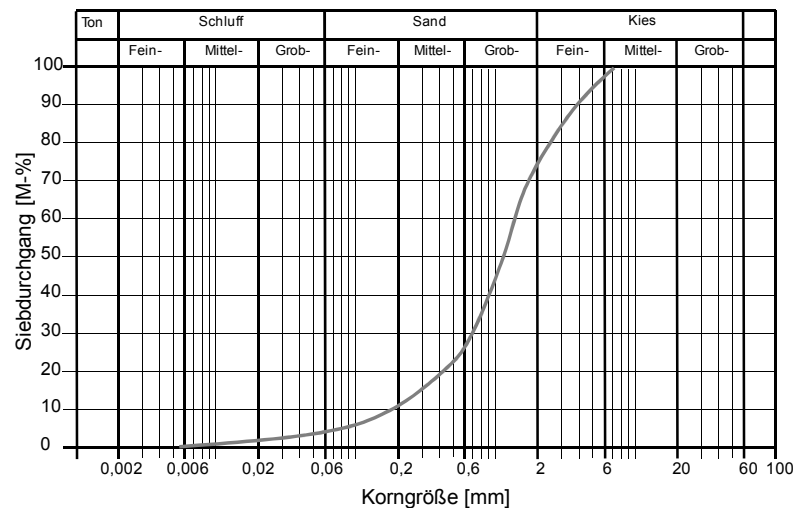


Abbildung 6-25: Kornverteilungslinie des Bodens V

### 6.3.1. Bestimmung der Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische bei unterschiedlichen Schaumeigenschaften

#### Setzmaß

Bei den bisherigen Untersuchungen ist eine Steigerung des Setzmaßes mit zunehmender FIR bei den Boden-Schaum-Gemischen ermittelt worden (vgl. Abschnitt 6.2.1). Dieses Erkenntnis hat sich auch bei dem betrachteten Boden V bestätigt (vgl. Abbildung 6-26 links). Bei einer FIR = 5 % bzw. 10 % wurden mit Setzmaßen von 9 cm bzw. 20,5 cm annähernd die Werte für eine geeignete Verarbeitbarkeit erreicht. Die Injektionsrate wurde bis FIR = 25 % erhöht, bis mit 25,5 cm keine Zunahme des Setzmaßes mehr erfolgte.

Mit steigender FER zwischen 8 und 25 sank bei konstanter FIR von 15 % das Setzmaß von 24,0 auf 15,5 cm, wobei zwischen den Ergebnissen bei FER 15 und 20 keine Reduzierung festzustellen war. Aufgrund der erhöhten Menge an Liquid bei niedrigen Werten der FER stand mehr Flüssigkeit für eine mögliche Benetzung an den Bodenkörnern zur Verfügung. Zudem konnte durch den hohen Tensidanteil ein zusätzliches Aufschäumen erfolgen, so dass das Setzmaß zunahm. Die Beeinflussung des Setzmaßes ist im betrachteten Bereich geringer als der Einfluss der FIR.

Mit steigender Tensidkonzentration zwischen  $c_f = 1,0$  % und 5,0 % ist eine Zunahme des Setzmaßes von 13,0 cm auf 25,5 cm festzustellen. Mit Steigerung der  $c_f$  wurde mehr Tensid in das Boden-Schaum-Gemisch eingebracht. Aufgrund der Benetzung der Kornoberflächen bzw. eines möglichen Tensidfilms an den Bodenkörnern ist die Erhöhung des Setzmaßes möglich. Zudem kann bei hoher  $c_f$  das konditionierte Material weiter aufschäumen. Der Einfluss des Setzmaßes durch die untersuchten Tensidkonzentrationen lag zwischen der Beeinflussung des Setzmaßes durch die FIR und die FER.

Für eine Veränderung des Setzmaßes können auf Erddruckschildmaschinen sowohl die FIR als auch die FER und die  $c_f$  genutzt werden. Im Falle einer Steigerung des Setzmaßes durch die Erhöhung der FIR oder  $c_f$  bzw. durch eine Reduzierung der FER wird der Tensidverbrauch erhöht. Aus ökonomischen Gründen ist bei Gewährleistung der erforderlichen Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische jedoch ein niedriger Tensidverbrauch

anzustreben. Da vor allem die Veränderungen der FIR großen Einfluss auf die Eigenschaften des konditionierten Materials haben, wird in der Praxis häufig dieser Parameter verändert, um eine Steigerung des Setzmaßes zu erreichen. Jedoch sollte auch die Anpassung von FER und  $c_f$  in Betracht gezogen werden, um die Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen zu verändern.

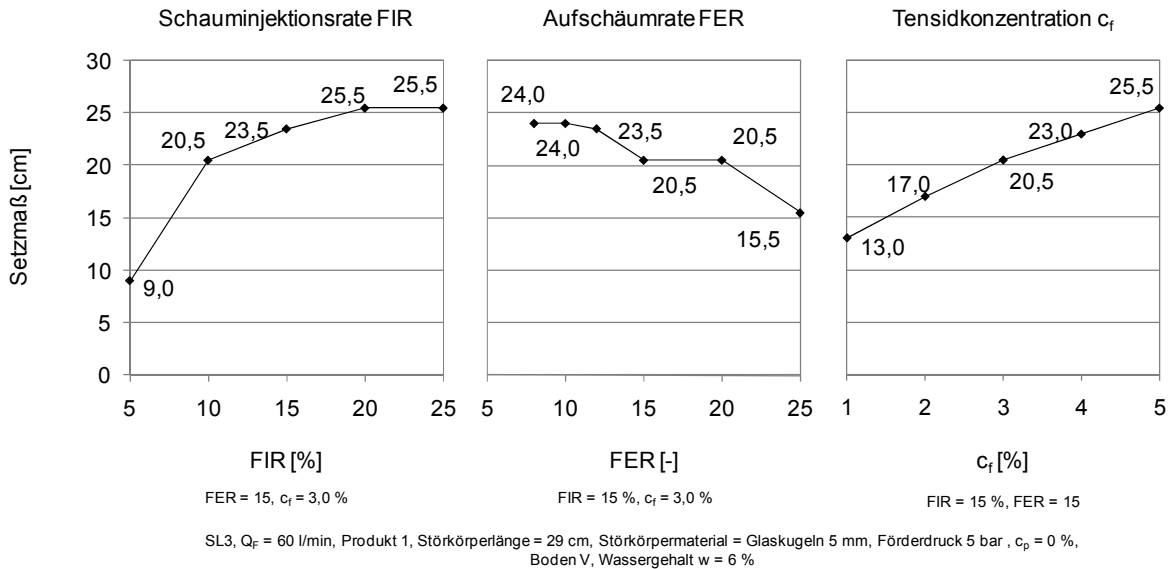


Abbildung 6-26: Setzmaß von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

**Setzfließmaß\***

Neben den Setzmaßen erfolgte bei diesen Untersuchungen ebenfalls eine Bestimmung der Setzfließmaße\*. Mit steigendem Setzmaß nahmen die Setzfließmaße\* üblicherweise zu und lagen zwischen 23,5 und 51,5 cm (vgl. Tabelle 6-4, siehe Seite 182). In Abbildung 6-26 sind die Setzmaße in Abhängigkeit der Setzfließmaße\* dargestellt, wobei der Zusammenhang dieser beiden Größen nach der in der Abbildung aufgeführten Gleichung 6.8 abgeschätzt werden kann.

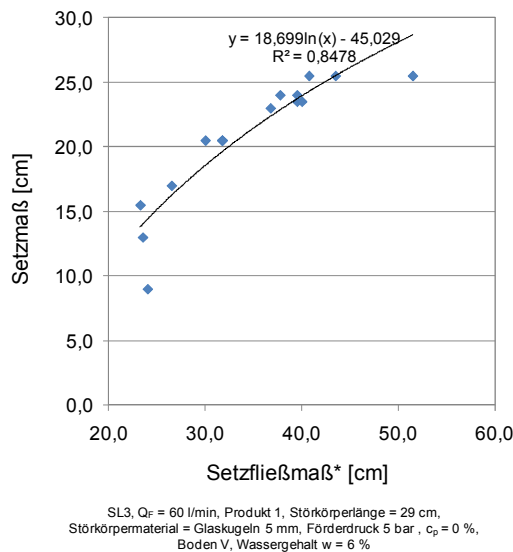


Abbildung 6-27: Setzfließmaß\* von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

$$s^{\#} = 18,699 * \ln(s^*) - 45,029 \quad (\text{Gl. 6.8})$$

mit  $s^* =$  Setzfließmaß\* [cm]  
 $s^{\#} =$  Setzmaß [cm]

Gleichung 6.8 unterscheidet sich von der in Abschnitt 6.2.1 angegebenen Gleichung 6.7. Für niedrige Setzfließmaße\*, wie z. B.  $s^* = 25$  cm, beträgt die Differenz der mit beiden Gleichungen ermittelten Setzmaße ca. 4,0 cm. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse aller bisheriger Untersuchungen (Abschnitt 6.2.1 und 6.3.1) zum Setzmaß und Setzfließmaß\* der mit Schaum konditionierten Lockergesteine ausgewertet. Zwischen diesen beiden Größen sollte daher der Zusammenhang nach Gleichung 6.9 abgeschätzt werden können.

$$s^{\#} = 20,757 * \ln(s^*) - 54,282 \quad (\text{Gl. 6.9})$$

mit  $s^* =$  Setzfließmaß\* [cm]  
 $s^{\#} =$  Setzmaß [cm]

### *Kompressibilität*

Die Kompressibilität der Boden-Schaum-Gemische stieg mit zunehmender FIR von ca. 1,5 % (FIR = 5 %) auf ca. 14,5 % (FIR = 25 %) bei 0,5 bar Belastung (vgl. Abbildung 6-28 links). Zwischen den Belastungen von 0,5 und 1,0 bar ließ sich hingegen noch eine geringe Zunahme der Kompressibilität ermitteln, während bei Belastungen größer 1,0 bar keine deutliche Veränderung festzustellen war. Wie bei den Ergebnissen in Abbildung 6-15 aus Abschnitt 6.2.1 erläutert, ist ein Zusammenhang zwischen zunehmender FIR und steigender Kompressibilität feststellbar.

Die Ergebnisse zur Kompressibilität in Abhängigkeit der FER zeigten, dass für niedrige FER die Kompressionen die höchsten Werte annahmen und mit steigender FER die Kompressionen dagegen abnahmen. Aufgrund der Volumina der Ausgangsmaterialien der Schäume war dieses Verhalten nicht zu erwarten. Es ist daher zu vermuten, dass das höhere Volumen an Tensidlösung und Tensid bei niedrigerer FER zu einem zusätzlichen Durchmischen geführt hat. Möglicherweise war die bei einer hohen FER im Schaum enthaltene geringe Liquidmenge für eine Benetzung der Kornoberfläche erforderlich, so dass die eigentlichen Schaumblasen zerplatzten und Luft entweichen konnte und eine reduzierte Kompressibilität des Boden-Schaum-Gemischs die Folge war. Zudem besteht die Möglichkeit, dass das Liquid zu einem zusätzlichen Aufschäumen geführt hat. Anhand der Ergebnisse ist festzustellen, dass eine höhere Kompressibilität vom Volumen des Liquids abhängig zu sein scheint. Der Einfluss der untersuchten FER auf die Kompressibilität des konditionierten Lockergesteins ist geringer als der Einfluss der Variation der FIR.

Anhand der Verläufe der Kompressibilität mit veränderten Tensidkonzentrationen ist zu erkennen, dass mit steigenden Werten von  $c_f$  die Kompressionen bis zu ca. 8 % stiegen. Wie die Ergebnisse der Versuche zeigen, besteht ein Zusammenhang zwischen steigender  $c_f$  und hoher Kompressibilität. Im Gegensatz zu den Variationen der FER blieb bei diesen Untersuchungen das Volumen des Liquids gleich. Deshalb ist von einem zusätzlichen Auf-

schäumen aufgrund eines höheren Volumens an Tensid bzw. höherer Tensidkonzentration auszugehen.

Aus den Untersuchungen kann geschlossen werden, dass vor allem die FIR wesentlichen Einfluss auf die Kompressibilität hat bzw. dass sich der Anteil der Tenside im Schaum auf die Ergebnisse zur Kompressibilität der Boden-Schaum-Gemische auswirkt.

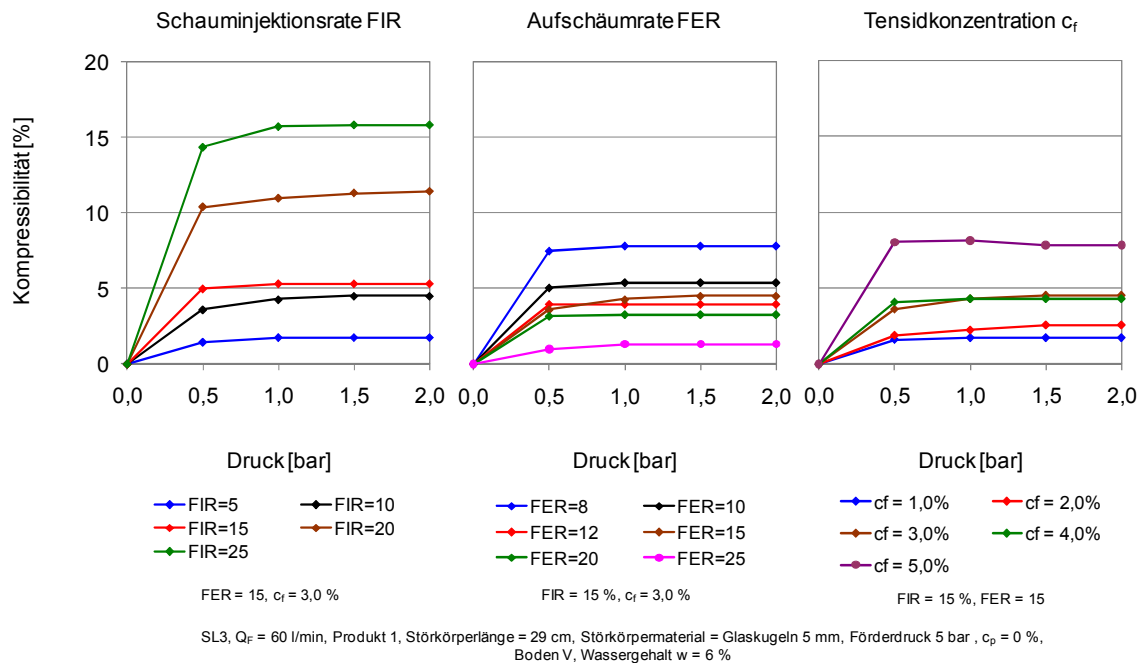


Abbildung 6-28: Kompressibilität von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

### Wasserdurchlässigkeit

Die Verläufe der Wasserdurchlässigkeit der mit Schaum konditionierten Böden sind in Abbildung 6-29 dargestellt. Bei den Boden-Schaum-Gemischen mit variiertem FIR ist mit Ausnahme des Verlaufs der FIR von 25 ein Zusammenhang zwischen der FIR und der Wasserdurchlässigkeit zu bestimmten Zeitpunkten zu erkennen. Mit zunehmender FIR nimmt die Zeit bis zum Erreichen einer bestimmten Wasserdurchlässigkeit ab.

Der Boden V weist mit  $C_U = 12,5$  eine höhere Ungleichförmigkeitszahl als die in Abschnitt 6.2.1 untersuchten Böden mit  $C_U$  zwischen 1,83 und 8 auf (vgl. Anlage D). Aufgrund der hohen Ungleichförmigkeitszahl des Bodens V kann bereits eine geringe Zugabe von Schaum zu einer ausreichenden Verarbeitbarkeit führen. Zum Setzmaße von ca. 10 bzw. 20 cm war bei Boden V eine FIR von 5 bzw. 10 % erforderlich, die eine ausreichende Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s ermöglichte. Durch Steigerung der FIR wurde mit Erhöhung des Setzmaßes der Abstand zwischen den Bodenkörnern vergrößert. Deshalb konnte bei den Untersuchungen mit steigender FIR der Schaum schneller aus dem Porenraum ausgespült werden, was zu einer Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit führte.

Bei den Untersuchungen zu unterschiedlichen Böden bei konstanten Schaumeigenschaften (Abschnitt 6.2.1) wurden hingegen Böden nur mit den FIR untersucht, die zu Setzmaßen von ca. 10 und 20 cm führten. Eine weitere Steigerung der FIR bei den Untersuchungen mit vari-

ierten Bodeneigenschaften würde hingegen zu einer Verringerung der Wasserdurchlässigkeit führen können, da der Schaum schneller aus den Boden-Schaum-Gemischen mit hoher FIR drainieren könnte. Aus diesem Grund weisen die Wasserdurchlässigkeiten bei den verschiedenen Untersuchungen unterschiedliche Verläufe auf.

Bei den Untersuchungen zur Variation der FER ist kein einheitliches Verhalten zu erkennen, da die größten Wasserdurchlässigkeiten bei Aufschäumraten von 10 und 12 ermittelt und die geringsten Wasserdurchlässigkeiten bei FER von 15 und 20 bestimmt wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur FER 8 und 25 entsprechen hingegen nicht dieser Annahme. Für die Böden, die bei der gewählten FER von 15 bis 25 ein Setzmaß zwischen 10 und ca. 20 cm aufwiesen (vgl. Abbildung 6-26), lag die Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s bei größer als 90 Minuten. Die auf diese Weise konditionierten Böden können daher auch als Stützmedium für Erddruckschilde unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt werden.

Bei Variation der Tensidkonzentration  $c_f$  wurde ermittelt, dass die Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen bei Betrachtung desselben Untersuchungszeitraums üblicherweise mit zunehmender Konzentration stieg. Während die Verläufe der Wasserdurchlässigkeit von mit Schaum bei einer Konzentration von  $c_f = 1,0$  und  $2,0$  % konditionierten Böden niedrig war, nahm sie bei einer Konzentration mit  $3,0$  % geringfügig zu, bei einer Konzentration von  $c_f = 4,0$  und  $5,0$  % hingegen stark. Wie bei den Untersuchungen mit Variation der FER wurde bei Variation der  $c_f$  für die Böden, bei denen die Schaumzugabe ein Setzmaß von zwischen 10 und ca. 20 cm ermöglichte, über einen Zeitraum von mindestens 90 Minuten eine Wasserdurchlässigkeit von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s erreicht.

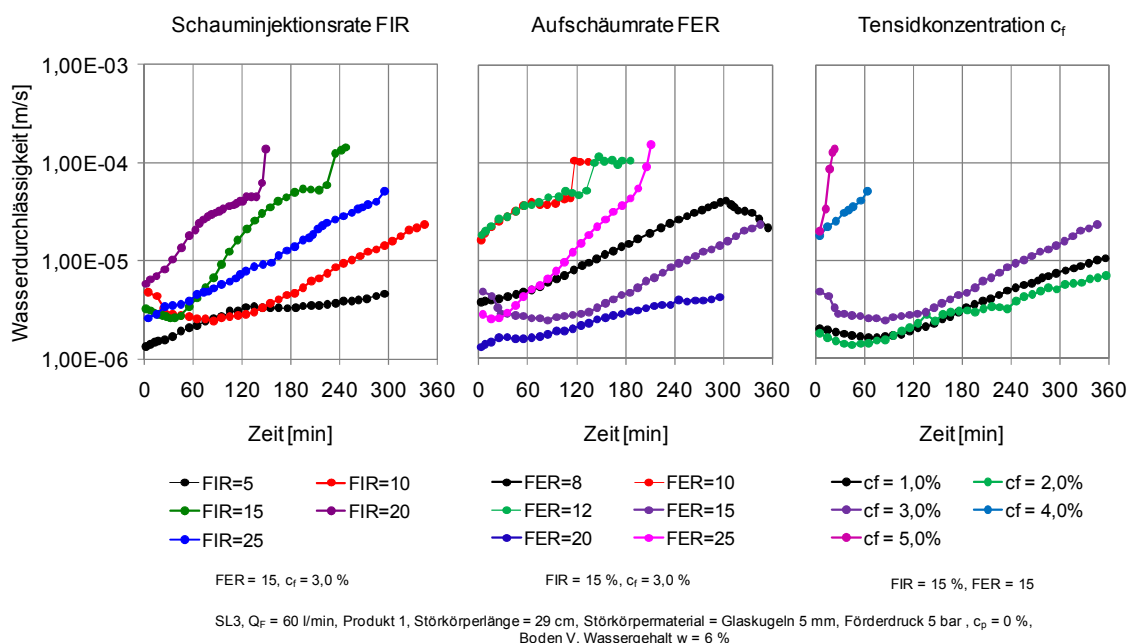


Abbildung 6-29: Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

### *Dichte*

Die Dichten der Boden-Schaum-Gemische sind in Abhängigkeit der jeweiligen Variation in Abbildung 6-30 dargestellt. Durch die Erhöhung der FIR von 5 % auf 25 % erfolgte eine Reduzierung der Dichte von etwa 1,7 kg/l auf ca. 1,5 kg/l. Da mit steigender FIR üblicherweise die Dichte sinkt (vgl. Abbildung 6-7), ist es möglich, dass die Dichte bei einer FIR = 20 % nicht zutreffend ist.

Da mit steigender FER bei konstanter FIR der Anteil der Luft zu- und der Anteil der Tensidlösung im Boden-Schaum-Gemisch abnimmt, wäre aufgrund der Volumina der Ausgangsstoffe eine Reduzierung der Dichte mit steigender FER zu erwarten gewesen. Bei den Versuchen wurde aber ermittelt, dass die Dichte mit zunehmender FER von 1,56 auf 1,66 kg/l anstieg. Die Ergebnisse mit Variation der FER bestätigten daher nicht die theoretische Annahme. Eine Begründung kann darin liegen, dass mit abnehmender FER die Menge an Tensid im Boden-Schaum-Gemisch steigt, die die Dichte wesentlich beeinflusst. Durch den Durchmischungsvorgang mit dem Freifallmischer von 2 x 15 Sekunden wurde unter atmosphärischen Randbedingungen bei Böden, die mit Schäumen mit niedriger FER vermischt wurden, zusätzliche Luft in das Boden-Schaum-Gemisch eingebracht. Daher sank die Dichte von Böden, die mit Schaum mit niedrigeren FER aufbereitet wurden, stärker als die von mit hoher FER konditionierten Lockergesteinen. Sofern die Oberflächen von den Bodenkörnern nicht vollständig benetzt sind, kann bei Zugabe von Schaum enthaltenes Liquid entzogen werden, wodurch Schaumbläschen zerplatzen. Da die Liquidmenge bei niedrigen FER größer als bei hohen FER ist, wären bei Verwendung eines Schaums mit niedriger FER mehr Schaumbläschen im Boden-Schaum-Gemisch enthalten, so dass die Dichte stärker reduziert wird. Die Menge der Tensidlösung hatte daher bei Versuchen unter atmosphärischen Randbedingungen wesentlichen Einfluss auf die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs, während die eingebrachte Luftmenge nur eine untergeordnete Rolle spielte.

Die Tensidkonzentration  $c_f$  hat ebenfalls Einfluss auf die Dichte des Materials, da in den Untersuchungen mit steigender Tensidkonzentration eine Reduzierung der Dichte von 1,76 und ca. 1,56 kg/l erreicht wurde. Der Wert von  $c_f = 4,0$  % weicht dabei vom steten Verlauf ab. Der Grund für die sinkende Dichte bei steigender Konzentration liegt beim Volumen des Tensids und seines Aufschäumverhaltens, da bei gleicher Liquidmenge aber einer höheren Konzentration  $c_f$  bei der Durchmischung unter atmosphärischen Bedingungen mehr Luft eingetragen wird und daher eine Reduzierung der Dichte erfolgte.

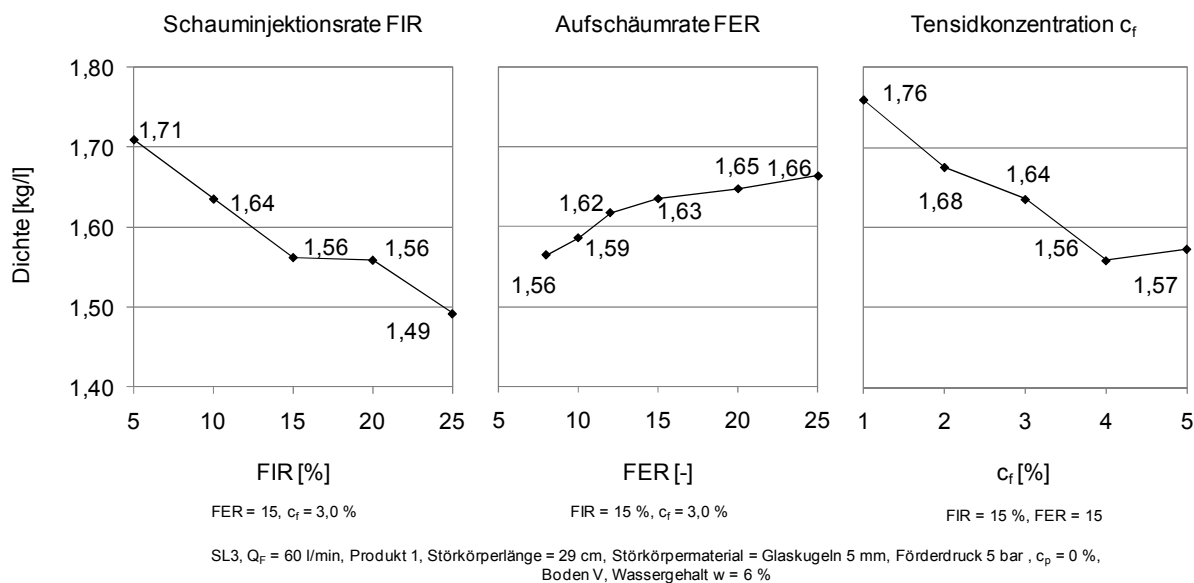


Abbildung 6-30: Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

### Flügelscherfestigkeit

Die Flügelscherfestigkeiten der untersuchten Boden-Schaum-Gemische sind in Abbildung 6-31 in Abhängigkeit der variierten Parameter dargestellt. Mit zunehmender FIR sank die Flügelscherfestigkeit der Boden-Schaum-Gemische von 2,0 auf 0,0 kN/m<sup>2</sup>, so dass ab einer FIR von 20 % keine Flügelscherfestigkeit mehr festzustellen war. Für die Boden-Schaum-Gemische, bei denen Setzmaße von ca. 10 bzw. 20 cm erreicht wurden, lagen die Flügelscherfestigkeiten zwischen 1,9 und 0,9 kN/m<sup>2</sup>. In den Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Messmethode in Abschnitt 4.4.4 wurde bei konditionierten Mittelsanden mit einer durchschnittlichen Flügelscherfestigkeit von ca. 1,0 kN/m<sup>2</sup> eine Genauigkeit von  $\pm 0,2$  kN/m<sup>2</sup> ermittelt. Aus diesem Grund können die mit Boden V bestimmten Ergebnisse als ausreichend genau betrachtet werden.

Bei Variation der FER wies der Verlauf der Flügelscherfestigkeit mit zunehmenden Werten einen un stetigen Anstieg von 0,3 auf 1,2 kN/m<sup>2</sup> auf. Dabei wichen die Werte der FER von 10 und 15 bzw. von 12 und 20 von dem ansteigenden Verlauf ab, wobei die jeweiligen Unterschiede im Bereich der Ungenauigkeiten der Messmethode von  $\pm 0,2$  kN/m<sup>2</sup> lagen. Wie bei den meisten anderen Untersuchungen wirkte sich die Veränderung der FER auch hier nicht so stark wie die FIR auf den jeweiligen Untersuchungsparameter aus.

Da der konditionierte Boden mit zunehmender  $c_f$  ein verformbareres Verhalten aufwies (vgl. Erkenntnisse zum Setzmaß), sollte mit steigender Tensidkonzentration eine Reduzierung der Scherfestigkeit erfolgen. Die Versuche bestätigten diese Annahme, da eine Reduktion der Scherfestigkeit von 2,2 kN/m<sup>2</sup> bei einer  $c_f$  = 1,0 % auf 0 kN/m<sup>2</sup> bei einer  $c_f$  = 4,0 % ermittelt wurde. Die Ergebnisse zu  $c_f$  = 2,0 oder 3,0 % können eine fehlerhafte Messung darstellen, da ansonsten kein stetiger Verlauf auszumachen wäre und die Differenzen der jeweiligen Werte außerhalb der Messgenauigkeit von  $\pm 0,2$  kN/m<sup>2</sup> liegen.

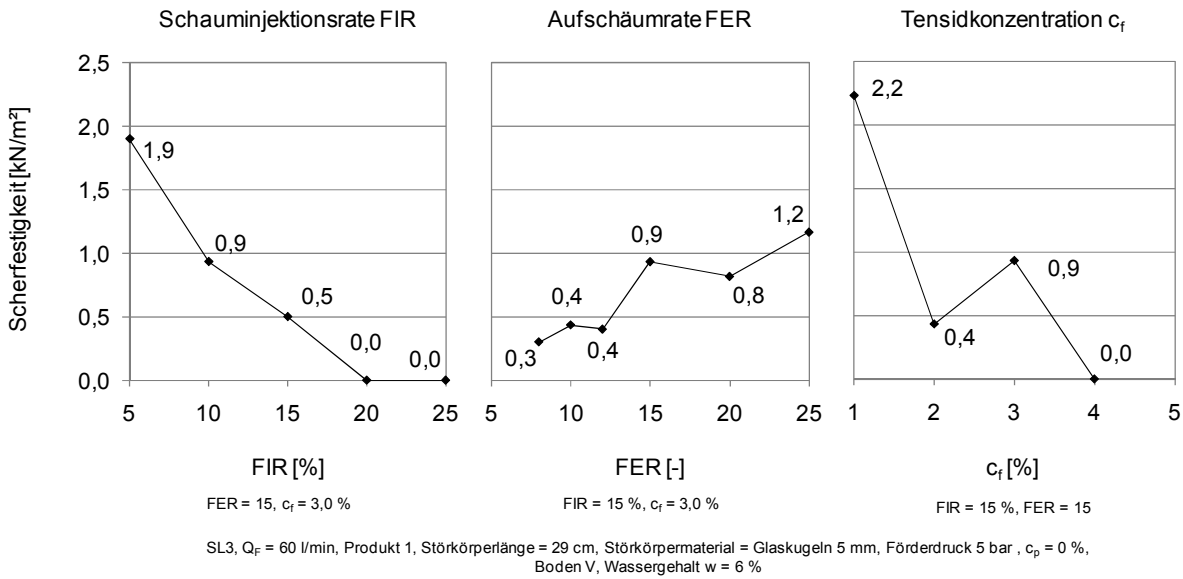


Abbildung 6-31: Flügelscherfestigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

**Stabilität**

Die Dichten unterschiedlicher Boden-Schaum-Gemische wurden mit und ohne Ausführung der 90 Hübe mit dem Ausbreittisch ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-4 aufgeführt. Aus den angegebenen Dichten wurde die prozentuale Veränderung des Bodenvolumens infolge der Hübe mit dem Ausbreittisch errechnet. Mit steigender FIR nahmen – bis auf die FIR = 20 % – die Veränderungen aufgrund des Energieeintrags der 90 Hübe von 7,3 bis auf 27,8 % zu. Die Veränderungen entsprechen dabei annähernd dem prozentualen Volumen des zur Konditionierung genutzten Schaums.

Bei Variation der FER konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen FER und prozentualer Veränderung des Bodenvolumens durch die Ausführung von 90 Hüben mit dem Ausbreittisch bestimmt werden. Die Werte der prozentualen Veränderung lagen zwischen 7,8 und 14,3 % und wiesen damit eine deutlich geringere Bandbreite als die Werte bei Variation der FIR auf.

Mit steigender Tensidkonzentration c<sub>f</sub> nahmen die Veränderungen des Bodenvolumens zu. So wurde bei einer c<sub>f</sub> = 1,0 % ein Wert von 4,7 % und bei c<sub>f</sub> = 5 ein Wert von 16,7 % ermittelt. Aufgrund erhöhter Tensidkonzentrationen konnten i. d. R. geringere Dichten (vgl. Abbildung 6-30) und infolge dessen höhere prozentuale Veränderungen ermittelt werden.



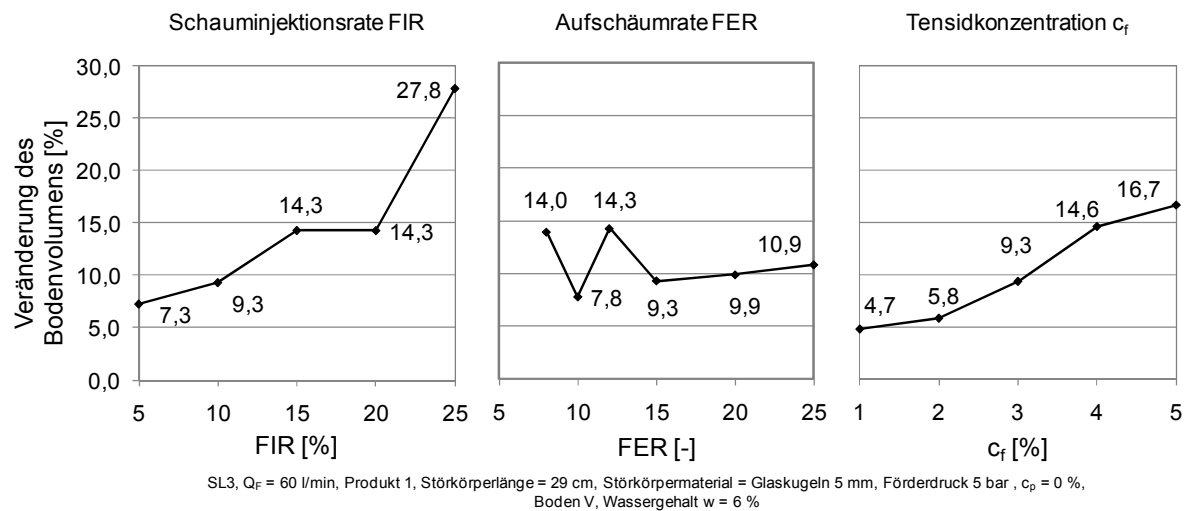


Abbildung 6-32: Prozentuale Veränderung des Volumens von Boden-Schaum-Gemischen infolge von 90 Hübem mit dem Ausbreittisch bei Variation von unterschiedlichen Herstellungsparametern des Schaums

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der untersuchten Boden-Schaum-Gemische wurden in Abhängigkeit der jeweiligen Parameter in Tabelle 6-4 zusammengefasst. Die Versuche sind nach den Variationen FIR, FER und  $c_f$  sortiert, wobei der Referenzversuch mit FIR = 10 %, FER = 15 und  $c_f = 3,0$  % für eine bessere Vergleichbarkeit mehrfach aufgeführt ist. Neben den jeweiligen Schaumparametern sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zum Setzmaß und zum Setzfließmaß\* dargestellt. Zudem ist die jeweilige Kompressibilität bei den Belastungsstufen von 0,5, 1,0 und 2,0 bar angegeben. Aufgrund der Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit wurden die erforderlichen Zeiten, bis die Wasserdurchlässigkeit von verschiedenen Werten erreicht ist, ermittelt. Ferner sind die Ergebnisse zur Dichte, Flügelscherfestigkeit und Stabilität angegeben. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Parameter FIR, FER und  $c_f$  wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine haben.

Tabelle 6-4: Übersicht zu Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen mit Variation der Schaumeigenschaften

Boden		FIR	FER	c <sub>f</sub>	Setzmaß	Setzflussmaß*	Kompressibilität			Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von				Dichte	Flügelstehfestigkeit	Stabilität: Dichte nach 24 h und	
							bei 0,5 bar	bei 1,0 bar	bei 2,0 bar	5*10 <sup>-6</sup> m/s	1*10 <sup>-5</sup> m/s	5*10 <sup>-5</sup> m/s	1*10 <sup>-4</sup> m/s			0 Hüben	90 Hüben
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[-]	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[min]	[min]	[min]	[min]	[kg/l]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kg/l]	[kg/l]
V	Boden V	5	15	3,0	9,0	24,0	1,4	1,7	1,7	>295	>295	>295	>295	1,71	1,9	1,74	1,87
		10	15	3,0	20,5	31,8	3,6	4,3	4,5	190	255	>345	>345	1,64	0,9	1,65	1,81
		15	15	3,0	23,5	39,5	5,0	5,3	5,3	75	95	195	225	1,56	0,5	1,57	1,79
		20	15	3,0	25,5	43,5	10,4	11,0	11,4	0	25	137	115	1,56	0,0	1,51	1,72
		25	15	3,0	25,5	51,5	14,4	15,7	15,8	78	165	285	>295	1,49	0,0	1,44	1,84
		10	8	3,0	24,0	39,5	7,4	7,8	7,8	55	135	>354	>354	1,56	0,3	1,57	1,79
		10	10	3,0	24,0	37,8	5,0	5,4	5,4	0	0	112	112	1,59	0,4	1,59	1,72
		10	12	3,0	23,5	40,0	4,0	4,0	4,0	0	0	107	142	1,62	0,4	1,62	1,85
		10	15	3,0	20,5	31,8	3,6	4,3	4,5	190	255	>345	>345	1,64	0,9	1,65	1,81
		10	20	3,0	20,5	30,0	3,1	3,2	3,2	>295	>295	>295	>295	1,65	0,8	1,65	1,81
		10	25	3,0	15,5*	23,3	1,0	1,3	1,3	55	105	195	205	1,66	1,2	1,66	1,84
		10	15	1,0	13,0*	23,5	1,6	1,7	1,7	235	345	>355	>355	1,76	2,2	1,79	1,88
		10	15	2,0	17,0	26,5	1,9	2,2	2,6	>285	>355	>355	>355	1,68	0,4	1,69	1,79
		10	15	3,0	20,5	31,8	3,6	4,3	4,5	190	255	>345	>345	1,64	0,9	1,65	1,81
		10	15	4,0	23,0	36,8	3,6	4,3	4,5	0	0	64	~68	1,56	0,0	1,62	1,86
		10	15	5,0	25,5	40,8	4,0	4,3	4,3	0	0	12	17	1,57	n.e.	1,60	1,86

SL 3; Q<sub>F</sub> = 60 l/min, Produkt 1, FER 15, c<sub>f</sub> = 3,0 %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermateriale = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck = 5 bar, c<sub>p</sub> = 0 %  
 Wassergehalt w = 6 %

\* Probe leicht gekippt  
 Setzmaß < als angegebener Wert

n.e. =  
 nicht ermittelt

Für konditionierte Lockergesteine gelten die bereits zuvor beschriebenen Anforderungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, der Kompressibilität und der Wasserdurchlässigkeit. Aufgrund des Einflusses der jeweiligen Variationen erfüllen drei unterschiedlich konditionierte Böden diese Anforderungen. Dazu zählt der Referenzversuch mit FIR = 10 %, FER = 15 und einer c<sub>f</sub> = 3,0 % bzw. Variationen davon mit einer FER = 20 oder einer c<sub>f</sub> = 2,0 %. Die drei auf diese Weise konditionierten Böden ermöglichen einen Vortrieb, bei dem eine ausreichende Verarbeitbarkeit und Kompressibilität des Materials erreicht wird und die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Bodens über eine Zeitdauer von 90 Minuten geringer als k = 1 \* 10<sup>-5</sup> m/s ist. In Abbildung 6-33 sind die geeigneten Herstellungsparameter zur Gewährleistung der Schaumeigenschaften für eine ausreichende Konditionierung des Bodens V dargestellt.

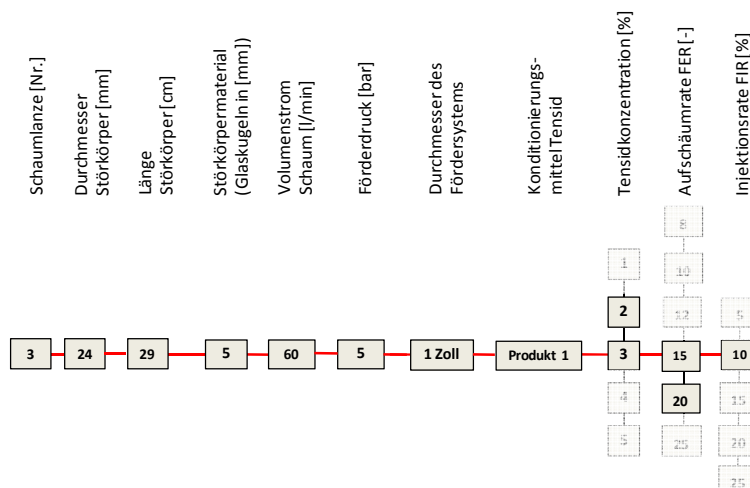


Abbildung 6-33: Übersicht der Herstellungsparameter zur Gewährleistung der Schaumeigenschaften für eine geeignete Konditionierung des Bodens V

Die für die Konditionierung des Bodens V produzierten Schäume mit veränderten Herstellungsparametern wurden bereits in Abschnitt 5.1 untersucht. Dabei zeigte es sich, dass vor allem die Drainagezeit und die Bläschengröße für eine Beschreibung der Eigenschaften von Schäumen geeignet sind. Für eine geeignete Konditionierung des Bodens V können Schäume genutzt werden, deren Eigenschaften in Tabelle 6-5 zusammengefasst sind. Dabei sind sowohl die Drainagezeit für 40 g Liquid als auch die maximalen, mit dem Risslineal ermittelten Bläschengrößen aufgeführt.

Tabelle 6-5: Drainagezeit und maximale Bläschengröße von Schäumen, die eine ausreichende Konditionierung des Bodens V ermöglichten

<b>FIR</b>	<b>FER</b>	<b>c<sub>f</sub></b>	<b>Drainagezeit für 40 g Liquid</b>	<b>Maximale Bläschengröße</b>
[%]	[-]	[%]	[Sek]	[mm]
10	15	3,0	ca. 600 - 700	0,3 – 0,4
10	20	3,0	ca. 700	0,8
10	15	2,0	ca. 650	0,3

Für die Konditionierung des Bodens V sollte die Drainagezeit des Liquids zwischen ca. 600 und 700 Sekunden liegen und der Schaum nach Herstellung eine maximale Bläschengröße zwischen 0,3 und 0,8 mm aufweisen. Mit Schäumen, bei denen Werte außerhalb dieser Bereiche lagen, wurden keine ausreichenden Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische ermittelt. Die Dichte der Schäume lag im Bereich der Dichte der eingestellten Volumenströme von Luft und Liquid bzw. im Bereich der Genauigkeit der Messmethode. Diese Randbedingungen sollen als Orientierung zur Abschätzung der erforderlichen Eigenschaften von Tensidschäumen dienen. Vor allem die mit Lanze 2 hergestellten Schäume wiesen ähnliche Eigenschaften auf wie die Schäume, die mit Schaumlanze 3 hergestellt wurden (vgl. Abschnitt 5.1). Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schaumlanze 2 und 3 besser für die Konditionierung des oben beschriebenen Bodens eignen.

### 6.3.2. Einflüsse der Parameter FIR, FER und c<sub>f</sub> auf die Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen

Aus den oben beschriebenen Untersuchungsergebnissen kann der Einfluss der Parameter FIR, FER und c<sub>f</sub> auf die jeweiligen Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische qualitativ abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Qualitative Einflüsse auf verschiedene Parameter von Boden-Schaum-Gemischen in Abhängigkeit der FIR, FER und c<sub>f</sub>

Parameter	FIR [%]	FER [-]	c <sub>f</sub> [%]
Setzmaß	++	+	++
Kompressibilität	++	+	+
Wasserdurchlässigkeit	++	++	++
Dichte	++	+	+
Flügelscherfestigkeit	+	+	++
Stabilität	+	o	+

o = kein oder kaum Einfluss

+ = mittlerer Einfluss

++ = großer Einfluss

Durch eine Variation der FIR werden sowohl das Setzmaß, die Kompressibilität, die Wasserdurchlässigkeit und die Dichte des Boden-Schaum-Gemischs wesentlich beeinflusst. Zudem hat die Veränderung der FIR Einfluss auf die Flügelscherfestigkeit und die Stabilität des konditionierten Materials.

Eine Veränderung der FER kann großen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit des Materials haben. Durch eine angepasste FER werden zudem Setzmaß, Kompressibilität, Dichte und Flügelscherfestigkeit des Boden-Schaum-Gemischs beeinflusst. Die FER hat nur geringe Auswirkungen auf die Stabilität.

Durch die Tensidkonzentration  $c_f$  kann das Setzmaß, die Wasserdurchlässigkeit und die Flügelscherfestigkeit des konditionierten Materials wesentlich verändert werden. Auf die anderen Parameter hat die Anpassung der  $c_f$  hingegen größtenteils nur einen mittleren Einfluss.

Der Boden V konnte so konditioniert werden, dass die Anforderungen an das Stützmedium hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, der Kompressibilität und der Wasserdurchlässigkeit erfüllt wurden (vgl. Abbildung 6-33). Aus diesem Grund kann der in Abbildung 6-24 dargestellte Einsatzbereich für Erddruckschilde unterhalb des Grundwasserspiegels erweitert werden. Da der neue Bereich auch für die Schaumkonditionierung von Erddruckschilden unterhalb des Grundwasserspiegels geeignet ist, wurde dieser Bereich in Anlehnung an Abbildung 6-24 mit A\* bezeichnet. Sofern ein Boden mindestens 5 M-% Feinanteil aufweist und die Kornverteilungslinie im Bereich des in Abbildung 6-34 grün dargestellten Bereichs liegt, kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz eines Erddruckschilds bei geeigneter Konditionierung möglich ist.

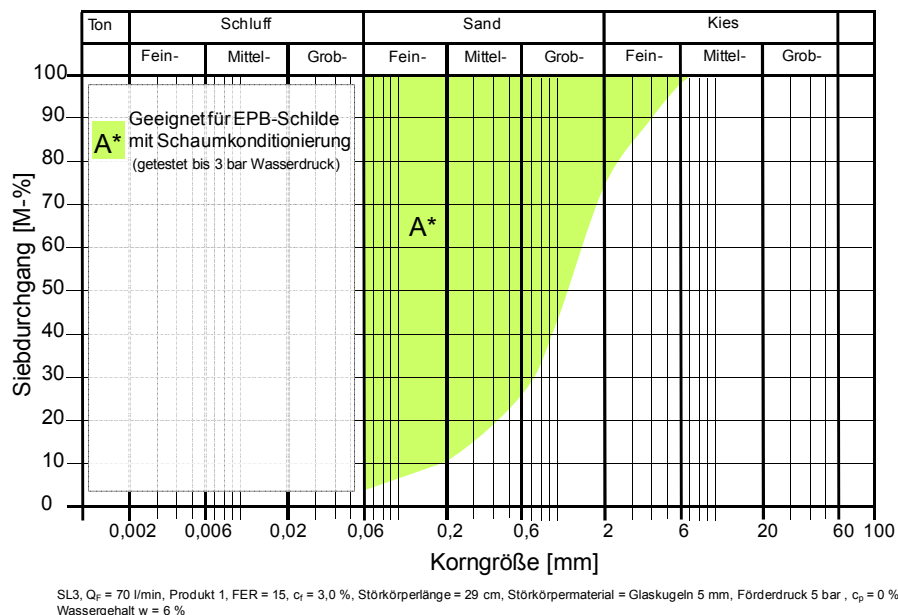


Abbildung 6-34: Einsatzbereiche unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzter Erddruckschilde, sofern der Boden mindestens 5 M-% Feinanteil aufweist

Die in Abbildung 6-24 (siehe Seite 172) bzw. Abbildung 6-34 definierten Einsatzgrenzen von Erddruckschilden dienen als Orientierungshilfe, da die Eigenschaften der Schäume z. T. großen Einfluss auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine haben können (vgl.

Tabelle 6-6). Eine Veränderung der Einsatzgrenzen aufgrund geänderter Eigenschaften der Schäume wäre möglich. Es ist während eines Vortriebs mit einer Erddruckschildmaschine zu überprüfen, ob nicht nur durch eine Veränderung der FIR, sondern auch durch eine Variationen der FER und  $c_f$  die erforderlichen Eigenschaften des Stützmediums erreicht werden können.

#### 6.4. Untersuchungsergebnisse von mit Polymerschäum konditionierten, grobkörnigen Böden

Für die Untersuchungen wurde das Polymer 1 verwendet, welches nach Herstellerangaben auf das für die Schaumherstellung genutzte Tensidprodukt 1 abgestimmt war. In den Untersuchungen zu Schäumen mit und ohne Polymerzusatz ergaben sich jedoch nur geringe Unterschiede zwischen den Eigenschaften der Schäume (vgl. Abschnitt 5.1). Da aber die Inhaltsstoffe des Polymers möglicherweise bei der Bodenkonditionierung eine Veränderung der Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen verursachen, wurden die Versuche zu mit Polymerschäumen konditionierten Böden durchgeführt.

Für diese Untersuchungen wurden zwei Böden mit Polymerschäumen konditioniert. Die Kornverteilung des ersten Bodens (Boden B) lag im für Erddruckschild mit Schaumkonditionierung geeigneten Bereich A (vgl. Abbildung 6-24). Die Kornverteilung des zweiten Bodens (Boden C) verlief durch den Bereich B (vgl. Abbildung 6-24), der nur für den Einsatz eines Erddruckschildes oberhalb des Grundwasserspiegels geeignet ist. Durch den Vergleich der jeweiligen Eigenschaften von mit Schäumen und unterschiedlichen Polymeranteilen konditionierten Böden kann so eine Aussage zur Wirkungsweise der genutzten Polymere als Additiv im Schaum getroffen werden.

In Tabelle 6-7 sind die ermittelten Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen mit unterschiedlichen Polymerkonzentrationen  $c_p$  zusammengefasst. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die mit Schäumen und einer  $c_p = 3,0 \%$  konditionierten Mittelsande ein z. T. deutlich geringeres Setzmaß und Setzfließmaß aufwiesen als jene ohne Polymerzusatz. Die Kompressibilität des Materials, das mit Schaum mit Polymerzusatz konditioniert wurde, lag jeweils unterhalb der des Boden-Schaum-Gemischs ohne Polymerzusätze. Bei Annahme der Randbedingung, dass bis zum Erreichen der jeweiligen Wasserdurchlässigkeit ca. 90 Minuten erforderlich sind, wiesen die Böden der mit und ohne Polymerzusatz produzierten Tensidschäume gleiche Einsatzbereiche hinsichtlich dieses Parameters auf. Die ermittelten Dichten lagen in ähnlichen Bereichen. Aufgrund der Zugabe der Polymere konnte eine Reduktion der Flügelscherfestigkeit bei den konditionierten Mittelsanden ermittelt werden, während bei der Bestimmung der Flügelscherfestigkeit des Grobsands annähernd gleiche Werte auftraten. Die bei den Versuchen zur Stabilität ermittelten Dichten lagen bei den Böden, die mit einem polymermodifizierten Schaum konditioniert wurden, üblicherweise höher als bei den Böden, die mit Schaum ohne Zusatz von Polymer aufbereitet wurden.

Tabelle 6-7: Eigenschaften verschiedener Boden-Schaum-Gemische mit unterschiedlichen Polymerkonzentrationen

Boden		FIR	c <sub>r</sub>	c <sub>p</sub>	Setzmaß	Setzfließmaß*	Kompressibilität			Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von				Dichte	Flügelstabilität	Stabilität: Dichte nach 24 h und	
							bei 0,5 bar	bei 1,0 bar	bei 2,0 bar	5*10 <sup>-6</sup> m/s	1*10 <sup>-5</sup> m/s	5*10 <sup>-5</sup> m/s	1*10 <sup>-4</sup> m/s			0 Hüben	90 Hüben
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[%]	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[min]	[min]	[min]	[min]	[kg/l]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kg/l]	[kg/l]
B	Mittelsand	9	3	0	12,0	24,5	2,7	2,7	2,7	27	280	412	431	1,38	1,0	1,36	1,38
		17	3	0	21,0	36,5	5,6	5,6	5,6	48	224	315	> 315	1,29	0,4	1,31	1,32
C	Grobsand	5	3	0	19,5	34,5	6,8	6,8	6,8	0	0	7	8	1,48	1,2	1,42	1,55
B	Mittelsand	9	3	3	5,0	21,0	1,8	1,8	1,8	0	113	244	245	1,40	0,0	1,40	1,47
		17	3	3	12,5	26,0	1,2	1,2	1,2	0	240	> 350	> 350	1,38	0,0	1,27	1,45
C	Grobsand	5	3	3	18,0	31,5	2,3	2,3	2,3	0	0	6	8	1,48	1,0	1,46	1,63

SL 3; Q<sub>F</sub> = 70 l/min, Produkt 1, FER 15, c<sub>r</sub> = 3,0 %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck = 5 bar, Polymer 1 Wassergehalt w = 10 %

Die Ergebnisse der Boden-Schaum-Gemische mit unterschiedlichen Polymerkonzentrationen lagen bei den jeweiligen Untersuchungen vielfach im gleichen Bereich. Allerdings konnte keine Verbesserung der Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische durch die Nutzung des auf das Tensid abgestimmten Polymers festgestellt werden. Vielmehr war durch die Verwendung von Schäumen mit Polymerzusatz in den Versuchen die Anforderung an die Kompressibilität der konditionierten Böden nicht mehr zu erreichen. Aus diesem Grund würde die Verwendung von Polymerschaum die Einsatzbereiche der Erddruckschilder reduzieren.

Der mit Polymerschaum konditionierte Grobsand (Boden C) wäre hingegen für den Einsatz einer Erddruckschildmaschine oberhalb des Grundwasserspiegels geeignet. Diesen Einsatzbereich wiesen jedoch auch die Boden-Schaum-Gemische auf, bei denen der Grobsand mit Schäumen ohne Polymerzusatz aufbereitet wurde.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse kann der Einsatzbereich von Erddruckschildmaschinen durch die Nutzung von Polymeren als Schaumadditive nicht auf Bereiche erweitert werden, in denen bislang der Vortrieb nicht oder nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich war. Bei den Untersuchungen wurde wegen des Versuchsumfanges nur eine Kombination von Schaum und Polymer verwendet. Möglicherweise beeinflussen Kombinationen aus anderen Tensid- oder Polymerprodukten die Eigenschaften der Boden-Schaum-Gemische. Auf diese Weise wäre eine Erweiterung der Einsatzgrenzen von konditionierten Lockergesteinen durch den Einsatz von Polymerschäumen möglich. Das Ziel weiterer Untersuchungen sollte daher sein, die Eigenschaften von unterschiedlichen Tensidschäumen mit verschiedenen Polymerzusätzen sowie die Eigenschaften von Böden, die mit diesen Schäumen konditioniert wurden, zu ermitteln. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist eine erneute Überprüfung möglich, ob die Einsatzgrenzen von Erddruckschildern bei Konditionierung mit Polymerschäumen erweitert werden können.

### 6.5. Untersuchungsergebnisse von mit Feinstoffsuspensionen konditionierten, grobkörnigen Böden

Der Einsatz von Feinstoffsuspensionen dient üblicherweise dazu, den Feinstoffanteil im Baugrund zu erhöhen, so dass sowohl eine bessere Verarbeitbarkeit des Bodens als auch eine geringere Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials erreicht werden. Auf diese Weise ist es möglich, Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Böden mit grobkörnigeren Anteilen zu erweitern. Für die Versuche mit Feinstoffsuspension als Konditionierungsmittel wurden Böden genutzt, die in den durchgeführten Untersuchungen nur mit Schaum nicht ausreichend konditioniert werden konnten. Die Kornverteilungslinien der bei diesen Untersuchungen genutzten Böden sind in Abbildung 6-35 dargestellt. Die Ergebnisse der Versuche zum Setz- und Setzfließmaß\* bei unterschiedlichen Feinstoffsuspensionsraten (SIR) sind in der Anlage D aufgeführt.

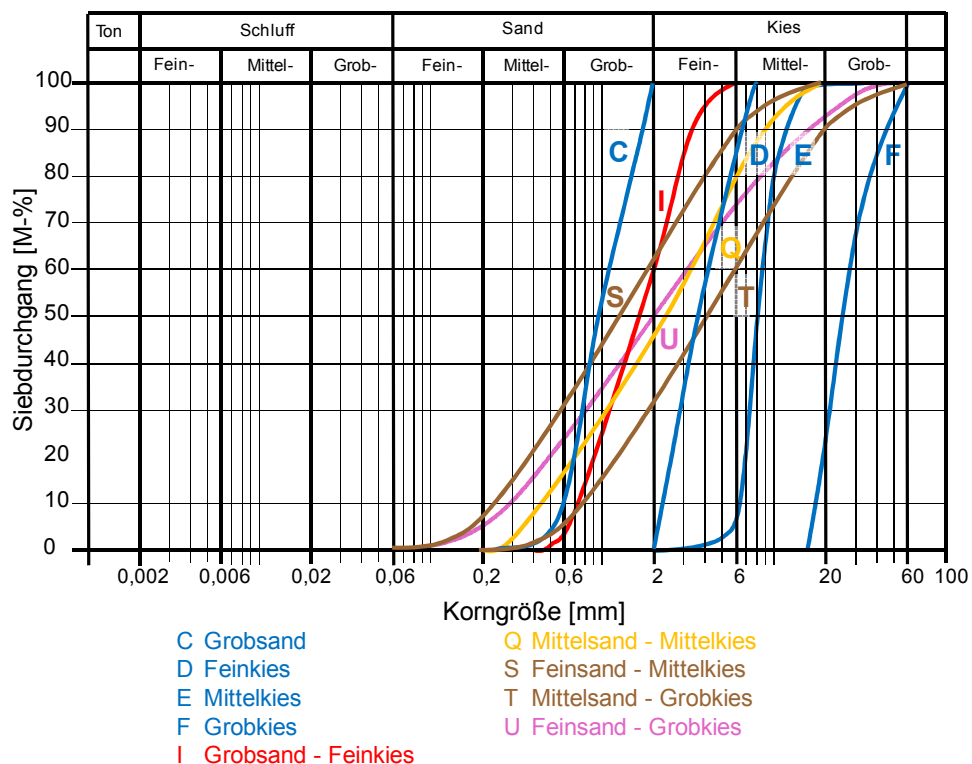


Abbildung 6-35: Kornverteilungslinien von Böden, die mit Feinstoffsuspensionen konditioniert wurden

Von den mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Lockergesteinsböden konnte bei drei Böden (Boden C, S und U) eine gute Konditionierung erzielt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu diesen konditionierten Lockergesteinen sind in Tabelle 6-8 zusammengefasst.

Tabelle 6-8: Eigenschaften verschiedener Boden-Feinstoffsuspensions-Gemische

Boden		SIR	C <sub>ausp</sub>	Setzmaß		Kompressibilität			Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von				Dichte	Flügelstabilität	Stabilität: Dichte nach 24 h und	
				Setzmaß	Setzfließmaß*	bei 0,5 bar	bei 1,0 bar	bei 2,0 bar	5*10 <sup>-6</sup> m/s	1*10 <sup>-5</sup> m/s	5*10 <sup>-5</sup> m/s	1*10 <sup>-4</sup> m/s			0 Hüben	90 Hüben
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[min]	[min]	[min]	[min]	[kg/l]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kg/l]	[kg/l]
C	Grobsand	33,0	55,0	19,0 15,0	27,0 29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,83	8,7	1,62	1,70
S	Feinsand - Mittelkies	11,0	55,0	10,5 8,0	42,5 27,5	1,7	1,7	1,7	0,0	> 300	> 300	> 300	2,09	7,0	2,15	2,19
		16,0	55,0	19,0 20,0	32,5 38,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	> 116	> 116	2,14	8,7	1,73	1,93
U	Feinsand - Grobkies	5,0	55,0	1,0	21,0	1,8	1,8	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,20	9,0	1,92	2,11
				11,0	25,0											

Material Kalksteinmehl; Wassergehalt w = 10 %

Bei den Untersuchungen zum Setzmaß zeigte sich, dass bei Wiederholungsversuchen mit gleicher SIR zum Teil stark unterschiedliche Werte ermittelt wurden bzw. große Streuungen der Versuchsergebnisse auftraten. Möglicherweise sind die Schwankungen der Messergebnisse der mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Böden bei diesem Versuch größer als die Schwankungen der in Abschnitt 4.4.4 betrachteten Boden-Schaum-Gemische.

Da kein kompressibles Medium in den Boden eingebracht wurde, sollte die Kompressibilität in den Versuchen 0 % betragen. In den Versuchen lagen die Werte bei 1,8 % und damit oberhalb der Messgenauigkeit von  $\pm 1,0$  % (vgl. Abschnitt 4.4.4). Daraus ist zu schließen, dass beim Einfüllen des Materials in den Behälter vermutlich auch Luft eingebracht wurde, welche für die Kompressibilität des Stützmediums ursächlich war. Mit Böden, die nur mit Feinstoffsuspensionen konditioniert wurden, ist es daher nicht möglich, die nach dem bereits erwähnten Beispiel berechneten mögliche Stützdruckschwankungen auszugleichen. Aus diesem Grund ist bei Vortrieben, bei denen Feinstoffsuspensionen als einziges Konditionierungsmittel genutzt werden, mit höheren Druckschwankungen zu rechnen.

Für die untersuchten Lockergesteine konnte über einen Zeitraum von größer als 90 Minuten nur für den Boden S eine Wasserdurchlässigkeit von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s bei einer SIR = 11 % bzw.  $k < 5 \cdot 10^{-5}$  m/s bei einer SIR = 16 % ermittelt werden. Bei Nutzung desselben Bodens wäre durch die höhere Feinstoffinjektion eigentlich eine niedrigere Wasserdurchlässigkeit zu erwarten gewesen. Es ist möglich, dass der Unterschied bei der Wasserdurchlässigkeit der unterschiedlich konditionierten Böden durch verschiedene Lagerungsdichten des Materials aufgrund der Suspensionsinjektion hervorgerufen wurde. Wie der Tabelle 6-8 zu entnehmen ist, wurde bei dem mit einer SIR = 16 % konditionierten Boden bei der Untersuchung der Stabilität eine deutlich geringere Dichte ermittelt als bei Konditionierung mit einer SIR = 11 %. Bei Ansatz einer höheren Lagerungsdichte bei einer SIR = 11 % wäre daher eine niedrigere Wasserdurchlässigkeit möglich. Für die Versuchsergebnisse bedeutet dies, dass die in den Versuchen ermittelte Wasserdurchlässigkeit bei einer SIR = 16 % noch unterschritten werden könnte.



Da Feinstoffsuspensionen kein zeitabhängiges Verhalten wie Schaum aufweisen, wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten annähernd die gleichen Werte der Wasserdurchlässigkeit bei konditionierten Lockergesteinen bestimmt. Für die Böden C und U waren die Wasserdurchlässigkeiten größer als  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s. Bei Boden C könnte die Größe des Porenraums aufgrund der geringen Unförmigkeitszahl des Bodens die Ursache für eine hohe Wasserdurchlässigkeit sein. Bei Boden U könnte hingegen die geringe Injektionsrate (SIR = 5 %) eine ausreichend niedrige Wasserdurchlässigkeit verhindert haben.

Die Dichten der konditionierten Lockergesteine lagen zwischen 1,8 und 2,2 kg/l und wiesen aufgrund der Injektion von Feinstoffsuspension deutlich höhere Werte als die mit Schaum konditionierten Lockergesteine auf. Die erhöhten Dichten sind in der Stützdruckberechnung zu berücksichtigen.

Die ermittelten Flügelscherfestigkeiten lagen bei diesen konditionierten Böden mit Werten zwischen 7 und 9 kN/m<sup>2</sup> im Bereich der Ergebnisse zur Flügelscherfestigkeit der unkonditionierten Böden. Sie waren damit wesentlich höher als die Flügelscherfestigkeiten der mit Schaum konditionierten Böden mit Werten zwischen 0 und 2 kN/m<sup>2</sup>. Aus diesem Grund wären bei Vortrieben, bei denen die Konditionierung nur mit Feinstoffsuspensionen erfolgt, höhere Antriebsdrehmomente des Schneidrads und des Schneckenförderers als bei Vortrieben unter Verwendung von Boden-Schaum-Gemischen als Stützmedium zu erwarten.

Die Untersuchungen zur Stabilität ergaben, dass die Dichte des Materials durch die Ausführung der Hübe um bis zu ca. 0,2 kg/l erhöht werden konnte. Bei konditionierten Böden mit hohen Dichteveränderungen lagen die bei den Stabilitätsuntersuchungen bestimmten Dichten ohne Durchführung von Hüben deutlich niedriger als die mit dem Rütteltisch bestimmten Dichten. Da vor allem Böden mit großem Korndurchmesser in die Standzylinder eingebracht wurden, besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der großen Durchmesser keine ausreichende Verdichtung während des Einfüllens stattgefunden hat. Erst durch Ausführung der 90 Hübe wurden Dichten bestimmt, die deutlich näher an den mit dem Rütteltisch bestimmten Werten lagen. Daher wäre bei Böden mit großen Korndurchmessern die Nutzung von Standzylindern mit größerem Volumen und einem ausreichenden D/H-Verhältnis sinnvoll gewesen.

Auf Grundlage der Ergebnisse zu den Untersuchungen von Boden-Feinstoffsuspensions-Gemischen können in Abhängigkeit der Kornverteilungslinie die Einsatzgrenzen der Erd-druckschilde bei Nutzung dieses Konditionierungsmittels abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 6-36). Für Kornverteilungen, die im hellbraunen Bereich C lagen, wird aufgrund der verbesserten Eigenschaften der Ausgangsböden die Eignung als gegeben angesehen. In diesem Bereich sind genaue Einstellungen bei der Konditionierung erforderlich, da bereits kleine Veränderungen zu unterschiedlichen Setzmaßen führen könnten. Die untersuchten Böden mit einer Kornverteilungslinie, die im dunkelvioletten hinterlegten Bereich D und ggf. Bereich C liegt, können mit Feinstoffsuspensionen konditioniert werden, sofern bezüglich der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums keine Anforderungen vorliegen. Für den Einsatz der Erd-druckschilde sind zusätzliche Komponenten, wie z. B. Zellradschleusen zu installieren, damit der Stützdruck bei möglichen Volumenschwankungen des Materials in der Abbaukammer aufgrund der geringen Kompressibilität gewährleistet wird.

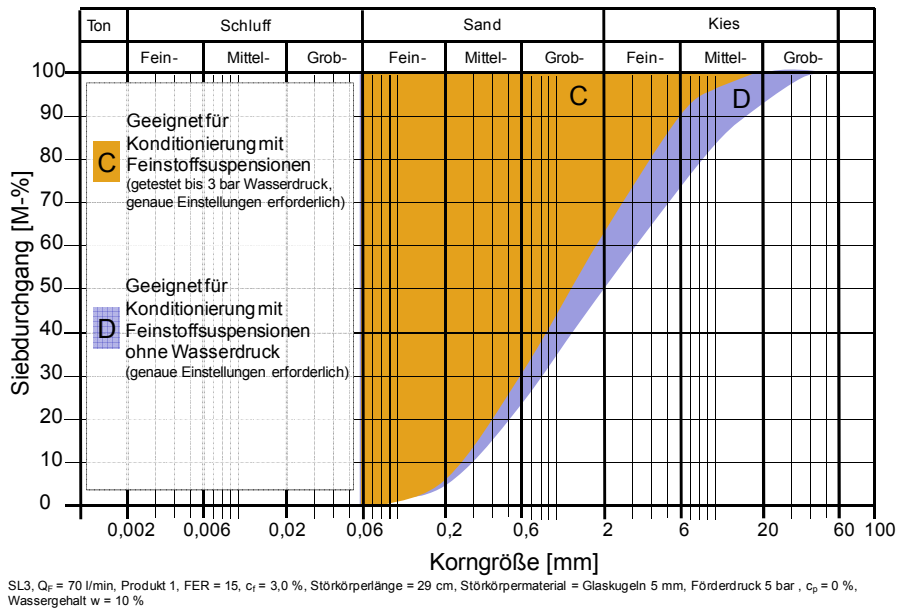


Abbildung 6-36: Einsatzbereiche von Erddruckschilden mit Feinstoffsuspensionen als Konditionierungsmittel

### 6.6. Untersuchungsergebnisse von mit mehreren Mitteln konditionierten, grobkörnigen Böden

Für die Untersuchungen mit mehreren Konditionierungsmitteln wurden Böden mit den in Abbildung 6-37 dargestellten Kornverteilungslinien genutzt, da bei diesen grobkörnigen Böden noch keine geeignete Konditionierung für Vortriebe unterhalb des Grundwasserspiegels möglich war. Durch den erfolgreichen Einsatz mehrerer Konditionierungsmittel (Schäume, Polymere und Feinstoffsuspensionen) könnten so die Einsatzgrenzen für Erddruckschilde auf Basis der Untersuchungen erweitert werden.

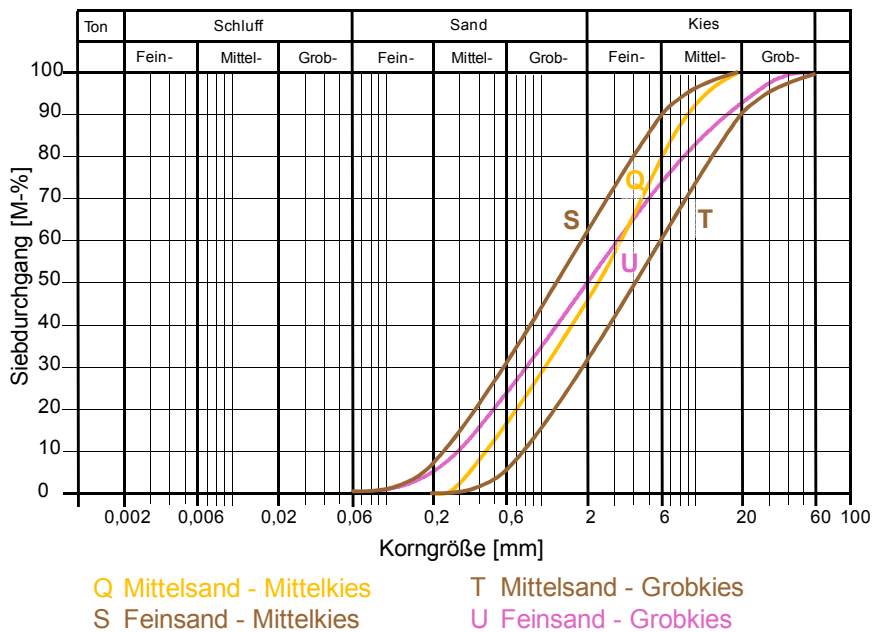


Abbildung 6-37: Kornverteilungslinien von Böden, die mit mehreren Konditionierungsmitteln aufbereitet wurden

Die Ergebnisse von Versuchen zum Setzmaß bei unterschiedlichen Konditionierungsmitteln und -mengen sind in der Anlage D dieser Arbeit aufgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche an konditionierten Böden mit Setzmaßen von annähernd 10 und 20 cm fasst Tabelle 6-9 zusammen. Der Boden T konnte nicht ausreichend konditioniert werden.

Tabelle 6-9: Eigenschaften von mit mehreren Mitteln konditionierten Böden

Boden		SIR	C <sub>ausp</sub>	PIR	C <sub>p</sub>	FIR	FER	C <sub>f</sub>	Setzmaß		Kompressibilität			Zeit bis zum Erreichen der Wasserdurchlässigkeit von				Dichte	Scherfestigkeit	Stabilität: Dichte nach 24 h und	
									Setzmaß	Setzmaß*	bei 0,5 bar	bei 1,0 bar	bei 2,0 bar	5*10 <sup>-6</sup> m/s	1*10 <sup>-5</sup> m/s	5*10 <sup>-5</sup> m/s	1*10 <sup>-4</sup> m/s			0 Hüben	90 Hüben
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[ ]	[%]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[min]	[min]	[min]	[min]	[kg/l]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kg/l]	[kg/l]
Q	Mittelsand - Mittelkies	0	55	0,3	100	16	15	3	20,0 9,0	32,0 30,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	>90	1,99	5,33	1,89	1,98
S	Feinsand - Mittelkies	5	55	0,0	100	5	15	3	10,0 17,5	21,5 28,0	3,5	3,5	3,5	0	> 50	> 50	> 50	1,75	2,33	1,72	1,86
U	Feinsand - Grobkies	5	55	0,0	100	6	15	3	20,0 18,5	32,5 28,5	3,0	6,1	6,1	0	>130	>130	>130	1,92	5,33	1,85	2,02
		11	55	0,3	100	0	15	3	13,0 9,0	24,5 32,0	1,5	1,5	1,5	0	> 45	> 45	> 45	2,11	10,00	1,99	2,07

Für den Boden Q schwankten die Ergebnisse zum Setzmaß bei denselben Konditionierungsmitteln und -mengen stark, was auf nicht untersuchte Einflüsse zurückzuführen sein könnte. Das Setzmaß lag zum einem im Bereich von 10 cm, zum anderen im Bereich von 20 cm. Trotz hoher Schaumzugabe (FIR = 16) konnte in den Versuchen keine Kompressibilität bestimmt werden. Während eines Vortriebs sind daher die Eigenschaften des Stützmediums kontinuierlich zu untersuchen. Zudem sind Vortriebe in diesem Boden aufgrund der hohen Wasserdurchlässigkeit nur oberhalb des Grundwasserspiegels möglich und hohe Stützdruckschwankungen zu erwarten.

Boden S wies in Bezug auf gleiche Injektionsparameter große Unterschiede beim Setzmaß auf, so dass bei diesem Boden ebenfalls eine genaue Dosierung der Konditionierungsmittel für eine ausreichende Verarbeitbarkeit nötig ist. Auch bei diesem Boden lagen die Setzmaße zwischen 10 und 20 cm. Die Kompressibilität dieses konditionierten Bodens lag im Vergleich zum gewählten Beispiel in einem ausreichenden Bereich größer als 1,9 %. Die Wasserdurchlässigkeit wies Werte  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s über einen Zeitraum von mindestens 50 Minuten auf. Aufgrund des Verlaufs kann der konditionierte Boden für Vortriebe unterhalb des Grundwasserspiegels als geeignet angesehen werden. Im Gegensatz zur reinen Feinstoffsuspension stellt die Zugabe des Schaums eine Verbesserung dar (vgl. Tabelle 6-8).

Für Boden U konnten Konditionierungsmittel eingesetzt werden, so dass in den eigentlichen Versuchen die erforderlichen Setzmaße erreicht wurden. Die Ergebnisse zur Kompressibilität des konditionierten Bodens lagen sowohl oberhalb als auch unterhalb der im Beispiel berechneten Werte. Die im Zeitraum der Untersuchungen ermittelten Wasserdurchlässigkeiten erreichten für beide konditionierten Böden Werte unterhalb von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Durch die Schaumzugabe konnte im Vergleich zur reinen Feinstoffsuspensionsinjektion (vgl. Tabelle 6-8) eine verbesserte Einsatzmöglichkeit erreicht werden.

Auf Basis der Ergebnisse sind in Abbildung 6-38 die Einsatzgrenzen von Erddruckschildmaschinen in Abhängigkeit der Kornverteilungskurven und hydrologischen Randbedingungen aufgeführt. Für Böden, deren Kornverteilungslinien im blauen Bereich E verlaufen, können bei Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel (vgl. Tabelle 6-9) die Eigenschaften der Böden so verändert werden, dass ein Vortrieb von Erddruckschilden unterhalb des Grundwasserspiegels aufgrund der Versuchsergebnisse möglich erscheint. Zu diesen Böden gehören z. B. die Böden S und U.

Liegt die Kornverteilungslinie von Böden im Bereich F sowie im Bereich E, ist ein Vortrieb hinsichtlich der Verarbeitung des Stützmediums möglich. Ein solcher Vortrieb erfordert jedoch bei der Dosierung der Konditionierungsmittel genaue Einstellungen, da geringe Unterschiede bei der Dosierung möglicherweise Einfluss auf die Verarbeitbarkeit haben. Für diese Lockergesteine gilt zudem, dass der Vortrieb oberhalb des Grundwasserspiegels liegen sollte, da die Eigenschaften für eine ausreichend geringe Wasserdurchlässigkeit nicht gegeben sind.

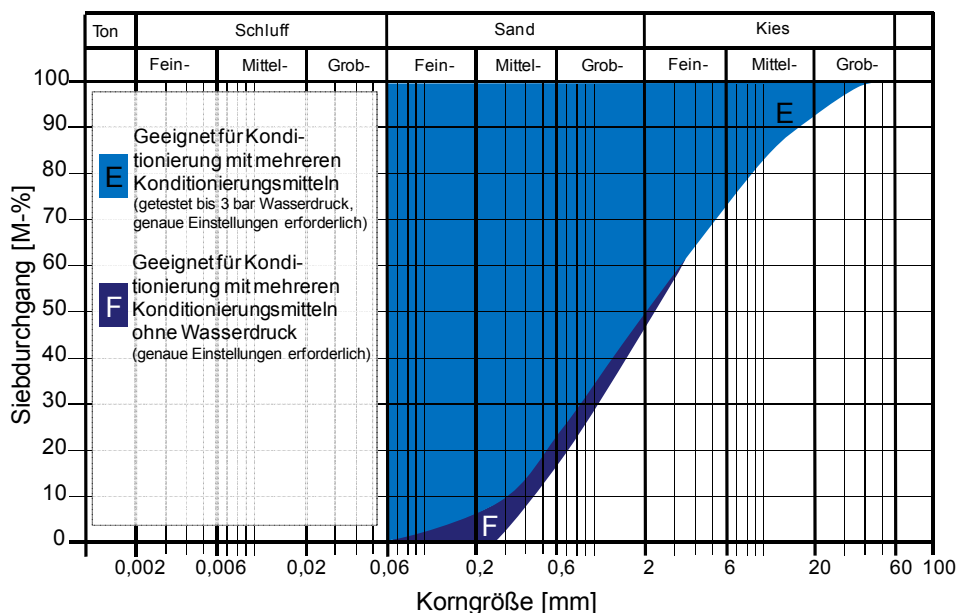


Abbildung 6-38: Einsatzbereiche von Erddruckschilden bei Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel

### 6.7. Anmerkungen zu den Untersuchungsergebnissen mit konditionierten, grobkörnigen Böden

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurden für Böden mit unterschiedlichen Kornverteilungslinien Einsatzbereiche für Erddruckschilder unter- bzw. oberhalb des Grundwasserspiegels bei Verwendung verschiedener Konditionierungsmittel erarbeitet. Die Durchführung der Versuche erfolgte unter bestimmten Annahmen, die nachfolgend zusammengefasst sind und diskutiert werden. Aus dieser Zusammenfassung leiten sich weitere Untersuchungen für kommende Forschungsvorhaben ab.

### *Sättigung des Bodens und Wahl des Wassergehalts*

Bei den Untersuchungen mit unterschiedlichen Böden und gleichbleibenden Schaumeigenschaften wurde aufgrund der Retention-Porosität von Sanden ein Wassergehalt von  $w = 10\%$  abgeschätzt. Anschließend erfolgte die Zugabe von Schäumen, so dass bei gut konditioniertem Material die beschriebenen Setzmaße erreicht wurden.

Bei Vortrieben mit Erddruckschilden in kohäsionslosen Böden ist eine Bestimmung des natürlichen Wassergehalts des Bodens sinnvoll. Dieser kann in anschließenden Untersuchungen bei der Konditionierung angesetzt werden. In den Versuchen mit verändertem Wassergehalt und unterschiedlicher Injektionsrate hat sich gezeigt, dass mit Erhöhung der FIR und  $w$  das Setzmaß steigt. Die durchgeführten Untersuchungen mit einem Wassergehalt von  $w = 10\%$  können daher als Orientierung für die Wahl einer erforderlichen FIR herangezogen werden. Sollte der natürliche Wassergehalt eines Bodens unterhalb des Wassergehaltes des untersuchten Bodens mit annähernd gleicher Kornverteilungslinie liegen, so ist aufgrund der Beeinflussung des Setzmaßes durch die FIR und durch  $w$  eine höhere FIR als in den Versuchen zu wählen. Bei einem natürlichen Wassergehalt des Bodens, der über dem Wassergehalt des untersuchten Lockergesteins liegt, wäre in Untersuchungen eine entsprechend niedrigere FIR zu wählen.

Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels ist von einer Sättigung des Porenraums des anstehenden Baugrunds mit Wasser auszugehen. Durch die Schauminjektion während des Vortriebs kann Wasser aus dem Porenraum verdrängt und Schaum eingebracht werden, so dass mit zunehmender FIR der Wassergehalt im Boden-Schaum-Gemisch sinkt. Maximal kann eine Verdrängung des Wassers stattfinden, bis der Wassergehalt der Retention-Porosität des Bodens entspricht. Sofern die Größe des Porenraums gleich bleibt, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Wassergehalt und FIR. In den eigenen Untersuchungen erfolgte keine Berücksichtigung dieses Aspekts, da für die Beschreibung einer geeigneten Konditionierung die Verarbeitbarkeit des konditionierten Lockergesteins mittels des Versuchs zur Bestimmung der Setzmaße genutzt wurde. In zukünftigen Versuchen wäre daher zu überprüfen, welche Auswirkungen die Variation der FIR in Abhängigkeit des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des jeweiligen Boden-Schaum-Gemischs hat.

Bei Vortrieben mit Erddruckschilden kann aufgrund der Rotation des Schneidrads, des Materialflusses des Boden-Schaum-Gemischs und der Schauminjektionsrate der Porenraum in der Abbaukammer verändert werden. Durch eine Änderung der Größe des Porenraums verändern sich üblicherweise auch die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine. In den eigenen Untersuchungen wurde die Schauminjektionsrate angepasst. Der Einfluss durch die Rotation des Schneidrads und des Materialflusses blieben unberücksichtigt, da die Bestimmung dieses Einflusses einen erheblichen Aufwand in der Versuchstechnik bedeuten würde. Dieser Einfluss könnte im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten abgeschätzt werden.

Durch die Schauminjektion in den Boden ist eine Verdrängung des Wassers aus dem Porenraum vor der Ortsbrust möglich. Bei den eigenen Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass das freie Porenwasser aus dem Porenraum verdrängt wird und dass nur ein Gemisch aus Boden, Wasser infolge der Retention-Porosität und Schaum in der Abbaukammer verbleibt.

### *Stützdruck*

Die Ergebnisse der eigenen Versuche sind als Grundlage anzusehen, da die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine bei Durchmischung unter atmosphärischen Randbedingungen durch Lufteintrag beeinflusst wurden. Für die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse zur Herstellung und zur Bestimmung der Eigenschaften von Boden-Schaum-Gemischen unter Stützdruckbedingungen sind daher weitere Versuche erforderlich. Dafür können für einzelne, in den bisherigen Untersuchungen genutzte Böden die Eigenschaften unter Stützdruckbedingungen ermittelt werden. Durch einen Vergleich der Eigenschaften der jeweiligen Boden-Schaum-Gemische unter atmosphärischen Bedingungen und unter Stützdruckbedingungen können später die Einsatzgebiete von Erddruckschilden auf der Grundlage von Versuchen bei Stützdrücken genauer dargestellt werden.

### *Versuchsmethodik*

Bei den eigenen Untersuchungen erfolgte zunächst in Versuchen eine Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 4.4.4). Bei Variation der konditionierten Böden und der Konditionierungsmittel wurden einzelne Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine, wie z. B. die Wasserdurchlässigkeit, nur in einem Versuch ermittelt, damit der Aufwand des Untersuchungsprogramms begrenzt wird. Für eine Steigerung der Genauigkeit der Untersuchungsergebnisse sollte die Anzahl der Versuche erhöht werden.

### *Mögliche weitere Versuche*

Bei weiteren Forschungsarbeiten im Bereich der Konditionierung von Lockergesteinsböden bei Erddruckschilden sind aufgrund der oben aufgeführten Überlegungen verschiedene Untersuchungen durchzuführen. Dazu gehören:

- Ein Versuch zur Bestimmung der Wasserverdrängung aus dem Porenraum bzw. zur Bestimmung der Retention-Porosität, um einen Zusammenhang zwischen der Schauminjektionsrate und dem Wassergehalt  $w$  bei verschiedenen Böden zu ermitteln.
- Ein Penetrationsversuch zur Überprüfung der Eindringtiefe des genutzten Konditionierungsmittels in den anstehenden Boden, so dass bestimmt werden kann, ob das Konditionierungsmittel in den Baugrund penetriert und Wasser verdrängt wird. Auf diese Weise kann auch abgeschätzt werden, aus welchen Anteilen das konditionierte Lockergestein in der Abbaukammer besteht.
- Untersuchungen zur Durchmischung und Bestimmung der Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen unter Stützdruckbedingungen, so dass der Einfluss der Durchmischung unter atmosphärischen Randbedingungen infolge des Lufteintrags in den Boden ermittelt wird.
- Versuche zur Bestimmung des Einflusses auf die Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine aufgrund einer Durchmischung, da durch den Mischvorgang die Lagerungsdichte des Bodens verändert werden kann. Auf diese Weise kann zum Beispiel der Einfluss bei der Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit eines Boden-Schaum-Gemischs in der Abbaukammer ermittelt werden.

## 7. Einfluss der Konditionierung auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks

Mithilfe der Konditionierung ist eine Veränderung der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums in der Abbaukammer und in der Förderschnecke möglich. In Anlehnung an Abschnitt 2.4.1 können unterschiedliche Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke die Größe des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks bei einem Erddruckschild beeinflussen (vgl. [3]).

Zur Ermittlung des Einflusses der Konditionierung auf die Größe des effektiven Stützdrucks wird als Bruchkörpermodell ein Gleitkeil mit darüber liegendem Prisma nach *Horn* in Anlehnung an das Verfahren von *Anagnostou & Kovári* gewählt (vgl. Abschnitt 2.4.1). Um die Auswirkungen der Konditionierung auf den effektiven Stützdruck zu ermitteln, erfolgt in diesem Kapitel zunächst die Beschreibung der Vorgehensweise zur Berechnung des effektiven Stützdrucks sowie die Vorstellung einer Parameterstudie, die die Variation der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke vorsieht. Es wird das numerische Modell erläutert, mit dem bei Ansatz verschiedener Wasserdurchlässigkeiten piezometrische Höhen im Baugrund ermittelt werden können, die Eingang in die Stützdruckberechnung finden. Anschließend erfolgen Berechnungen der effektiven Stützdrücke und die Vorstellung der Ergebnisse der Parameterstudie. Durch einen Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der durch die Konditionierung veränderten Wasserdurchlässigkeit wird eine Abschätzung des Einflusses der Konditionierung auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks ermöglicht.

### 7.1. Vorgehensweise zur Berechnung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks sowie Parameterstudie zur Bestimmung des Einflusses der Konditionierung auf den effektiven Stützdruck

Die Bestimmung des Einflusses der Konditionierung auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks ist bei den Untersuchungen in zwei Schritte unterteilt worden. Im ersten Schritt wird zunächst mit dem Programm *midas GTS* ein numerisches Modell erstellt, mit dem piezometrische Höhen im Baugrund ermittelt werden können. Auf Grundlage der piezometrischen Höhen einzelner Knoten erfolgt in einem zweiten Schritt die Bestimmung des durch Sickerströmungen beeinflussten Strömungsdrucks und des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks  $s'$  bei Variation des Gleitflächenwinkels  $\theta$  mit der Software *Excel*.

Das im **ersten Schritt** zu nutzende Modell wird in Abschnitt 7.2 näher beschrieben und ermöglicht eine Veränderung der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke. Durch die Anpassung können sich unterschiedliche piezometrische Höhen ergeben, mit deren Hilfe die auf den Gleitkeil wirkenden Strömungsdrücke errechnet werden (vgl. Abschnitt 2.4.1). Da für die Bestimmung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks eine Variation des Gleitflächenwinkels erforderlich ist, sind auch die piezometrischen Höhen für verschiedene Geometrien des Bruchkörpermodells zu ermitteln. Aus diesem Grund werden im numerischen Modell Gleitkeile mit einem Gleitflächenwinkel

von  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $70^\circ$  zur Horizontalen abgebildet. Die auf den Flächen der Gleitkeile wirkenden, durchschnittlichen piezometrischen Höhen können mithilfe der numerischen Berechnung ermittelt werden.

Die auf den Gleitkeil wirkende vertikale Kraft  $V'$  (vgl. Abbildung 7-1) wird durch die piezometrischen Höhen im Prisma beeinflusst. Der Anteil der vertikalen Spannung aus Sickerströmungen kann in Abhängigkeit der Höhe des Grundwasserspiegels z. B. nach Gleichung 2.34 bestimmt werden. Für eine näherungsweise Ermittlung dieses Anteils wird das Bodenprisma in zehn Bodenelemente gleicher Höhe unterteilt. Die piezometrischen Höhen werden in den jeweiligen horizontalen Flächen der Elemente mittels der numerischen Berechnung bestimmt. Anschließend erfolgt die Ermittlung des Strömungsdrucks unter Berücksichtigung der Gewölbewirkung im Prisma auf den unterschiedlichen Höhen. Die Summe des Strömungsdrucks aus den zehn übereinanderliegenden Bodenelementen geht in die durch die Sickerströmungen beeinflusste Erhöhung der vertikalen Kraft  $V'$  ein.

Da bei den durchgeführten Untersuchungen nur kohäsionslose Böden ausgewählt wurden, erfolgte keine Berücksichtigung von Kohäsionskräften in der Gleitfläche und in den Flanken des Gleitkeils.

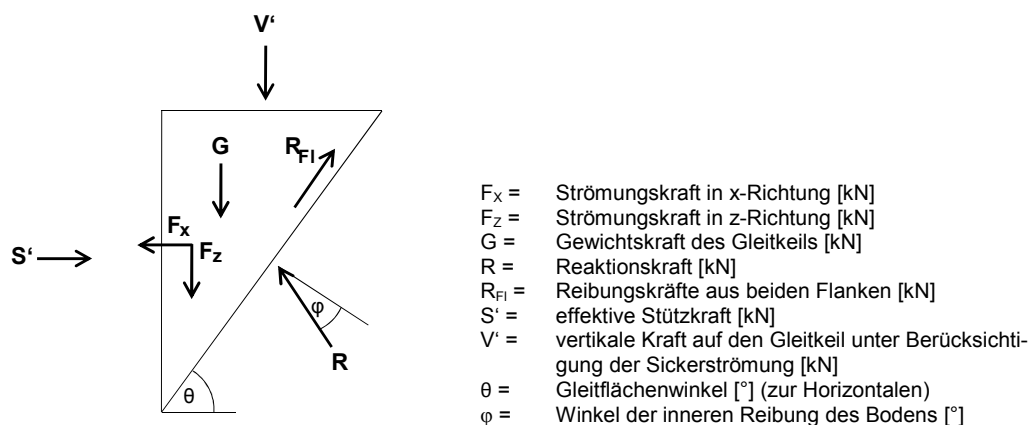


Abbildung 7-1: Kräfte am Gleitkeil zur Ermittlung des minimal erforderlichen effektiven Stützdrucks bei Vortrieben in kohäsionslosen Lockergesteinen in Anlehnung an [4]

Im **zweiten Schritt** werden die auf den Gleitkeil wirkenden Kräfte gemäß Abschnitt 2.4.1 unter Verwendung der Ergebnisse aus der numerischen Berechnung mit Excel ermittelt. Die Bestimmung der Kräfte  $F_x$  und  $F_z$  erfolgt durch die Ermittlung der Strömungskräfte auf den Gleitkeil in vertikaler bzw. horizontaler Richtung. Dabei werden die Strömungskräfte für unterschiedliche Gleitflächenwinkel bestimmt.

Bei der Ermittlung der vertikalen Kraft  $V'$  wurde der Strömungsdruck in den unterschiedlichen Höhen des Prismas berücksichtigt. Da der Gleitflächenwinkel die durchschnittlichen piezometrischen Höhen auf den jeweiligen Ebenen des Prismas beeinflussen kann, werden die vertikalen Spannungen für die oben beschriebenen Gleitflächenwinkel berechnet. Für Gleitflächenwinkel, die zwischen den vorgegebenen Winkeln liegen, sind die Werte der vertikalen Kraft  $V'$  durch Interpolation zu bestimmen. Zudem beeinflusst der Winkel der inneren Rei-



bung  $\varphi$  die Größe der vertikalen Spannung, so dass in den Berechnungen der vertikalen Spannung die Variation von  $\varphi$  berücksichtigt wird.

Es werden die Gewichtskraft  $G$ , die Reibungskräfte in den Flanken  $R_{FL}$ , die Reaktionskraft  $R$  sowie die effektive Stützkraft  $S'$  und der effektive Stützdruck  $s'$  ermittelt. Da diese Werte z. T. von dem Winkel der inneren Reibung abhängig sind, ergeben sich von  $\varphi$  abhängige effektive Stützdrücke. Die Formeln zur Berechnung der jeweiligen Kräfte sind in Abschnitt 2.4.1 zusammengefasst.

Abbildung 7-2 zeigt das Konzept einer Parameterstudie zur Ermittlung des Einflusses bei Variation der Wasserdurchlässigkeit der unterschiedlichen Bereiche (Baugrund, Abbaukammer und Förderschnecke). Die Parameterstudie ist in die drei Abschnitte A, B und C unterteilt. In Abschnitt A (vgl. Abbildung 7-2 links) wird eine Referenzberechnung mit einer Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s in den Bereichen Baugrund, Abbaukammer und Förderschnecke vorgenommen, die in der Abbildung durch rote Verbindungslinien gekennzeichnet ist. Durch Veränderung der Wasserdurchlässigkeit in einem Bereich lassen sich die Auswirkungen auf die Sickerströmung aufgrund dieser Variation ermitteln (vertikale Linien). Die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds wird zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $k = 1 \cdot 10^{-2}$  m/s variiert, da diese Werte nach Abbildung 3-1 den Wasserdurchlässigkeiten entsprechen, die in kohäsionslosen Böden auftreten können. Die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke wird zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $k = 1$  m/s verändert. Der Wert  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s entspricht bei einer ursprünglichen Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s einer geeigneten Konditionierung mit Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit (vgl. Kapitel 6). Der Wert  $k = 1$  m/s stellt hingegen den Fall dar, dass Wasser fast ungehindert die Abbaukammer oder die Förderschnecke durchströmt.

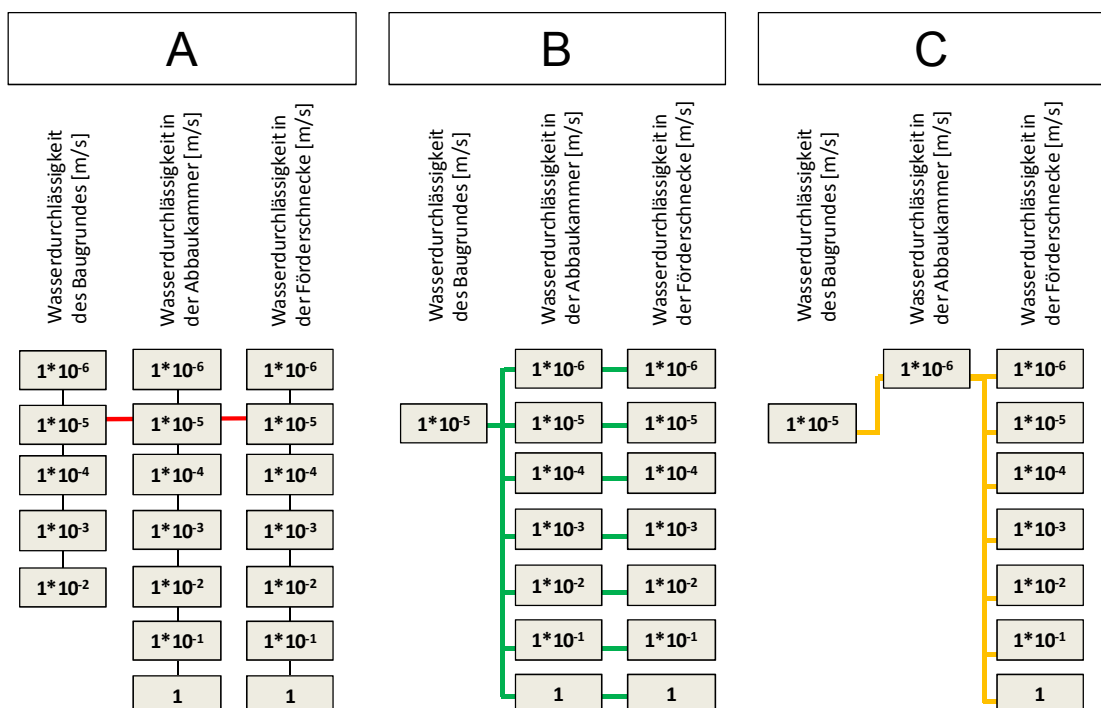


Abbildung 7-2: Konzept der Parameterstudie zur Berechnung der Strömungsdrücke mit Variation der Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke

In Abschnitt B der Parameterstudie (vgl. Abbildung 7-2 Mitte) werden die Sickerströmungen ermittelt, bei denen die Wasserdurchlässigkeit sowohl in der Abbaukammer als auch in der Förderschnecke die gleichen Werte annimmt (grüne Verbindungen). Die Wasserdurchlässigkeit des Baugrundes wird mit  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s konstant gehalten und die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $k = 1$  m/s verändert. Auf diese Weise ist der Einfluss einer gleichmäßigen Konditionierung in Abbaukammer und Förderschnecke bzw. einer einheitlichen Durchströmung dieser Bereiche zu bestimmen.

Zudem erfolgt in Abschnitt C (vgl. Abbildung 7-2 rechts) die Bestimmung der Sickerströmungen für die Variationen, bei denen die Wasserdurchlässigkeit durch eine Konditionierung in der Abbaukammer sinkt und die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke aufgrund möglicher Auflockerungsfaktoren oder einer unzureichenden Konditionierung höhere Werte als im Baugrund annimmt (gelbe Verbindungen). Bei diesen Untersuchungen bleibt die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds mit  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s wie die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer mit  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s unverändert. Die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke wird zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s und  $k = 1$  m/s variiert.

## 7.2. Numerisches Modell zur Ermittlung der Sickerströmung sowie Vorgehen zur Berechnung des Stützdrucks

Das in Abbildung 7-3 aufgeführte Beispiel von [4] stellt die Basis der eigenen numerischen Untersuchungen dar. Das Beispiel sieht einen Tunnel mit einem Durchmesser und einer Höhe des Gleitkeils von 10 m sowie einer Höhe der Überdeckung von 20 m vor. Der Grundwasserspiegel befindet sich an der Geländeoberkante (GOK).

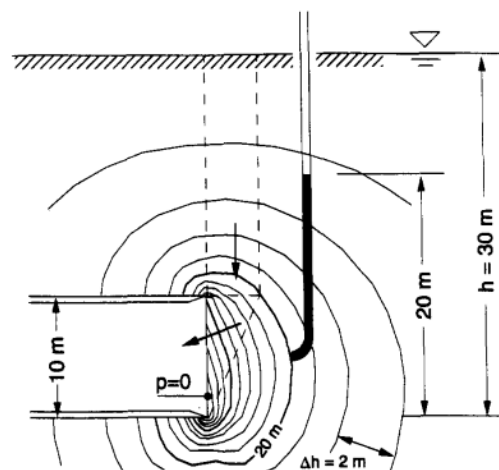


Abbildung 7-3: Abmessungen des Beispiels und Darstellung der ermittelten piezometrischen Höhen

[4]

Zur Bestimmung von piezometrischen Höhen im Baugrund wird das Programm midas GTS genutzt, welches bereits vielfach zur Bewältigung numerischer Aufgabenstellungen in der Geotechnik und im Tunnelbau zum Einsatz gekommen ist (vgl. u. a. [62, 78, 99, 157]).

### Geometrische Abmessungen des eigenen Modells

Bei dem eigenen Modell soll eine Symmetrie zu einer Vertikalachse bezüglich der Einwirkungen bzw. des Aufbaus bestehen. Nach [107] ist in einem solchen Fall die Abbildung von nur einer Hälfte des numerischen Modells möglich.

In der Literatur [107, 137] sind Abstände von den Rändern des numerischen Modells zum Tunnel angegeben, die mindestens eingehalten werden sollten, um Einflüsse von zu definierenden Randbedingungen zu vermeiden. Die Mindestabstände entsprechen maximal einer Länge des vier- bis fünffachen Tunneldurchmessers. Mit den gewählten und in Tabelle 7-1 angegebenen Werten wurden diese Abstände im eigenen Modell eingehalten, so dass von keinem Randeinfluss auszugehen ist. Das numerische Modell bildet einen Tunnel mit einem Durchmesser von 10,0 m ab.

Tabelle 7-1: Abstände vom Tunnel zu den Rändern des numerischen Modells

Abstand der Tunnelsohle vom unteren Rand	$5,0 * d' = 50 \text{ m}$
Abstand der Ortsbrust vom hinteren Rand	$5,0 * d' = 50 \text{ m}$
Abstand der Ortsbrust vom vorderen Rand	$6,0 * d' = 60 \text{ m}$
Abstand der Ortsbrust vom seitlichen Rand	$4,5 * d' = 45 \text{ m}$
Überdeckungshöhe	$2,0 * d' = 20 \text{ m}$

mit  $d' = \text{Durchmesser des Tunnels} = 10,0 \text{ m}$

Abbildung 7-4 zeigt das geometrische Modell des Baugrunds für die Ermittlung der räumlichen Sickerströmungen aufgrund der oben beschriebenen Randbedingungen. Die Abmessungen des Modells betragen 50 m in der Breite (orthogonal zur Vortriebsrichtung), 110 m in der Länge (in Vortriebsrichtung) und 80 m in der Höhe.

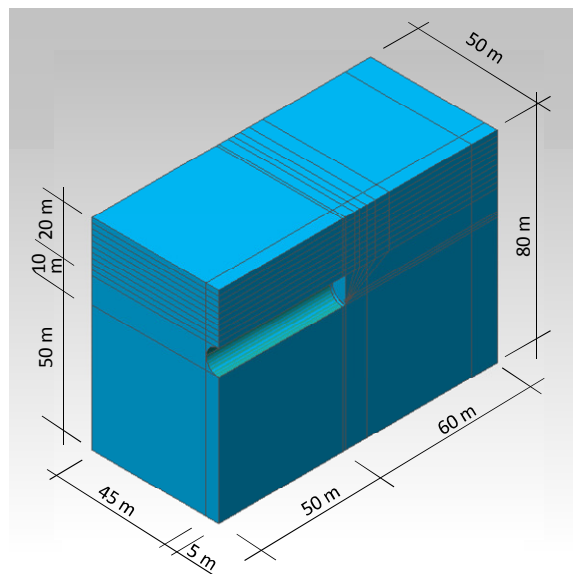


Abbildung 7-4: Geometrisches Modell des Baugrunds zur Ermittlung der piezometrischen Höhen

Der Aufbau des Gleitkeils mit den jeweiligen Gleitflächenwinkeln sowie des darüber liegenden Prismas, welches in zehn Abschnitte gleicher Höhe unterteilt wurde, ist in Abbildung 7-5 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Gleitflächenwinkel variieren auch die Abmessungen des Prismas. Dies hatte zur Folge, dass die ermittelten hydraulischen Höhen in den je-

weiligen horizontalen Flächen des Bodenprismas in Abhängigkeit des Gleitflächenwinkels  $\theta$  unterschiedliche Werte annehmen können.

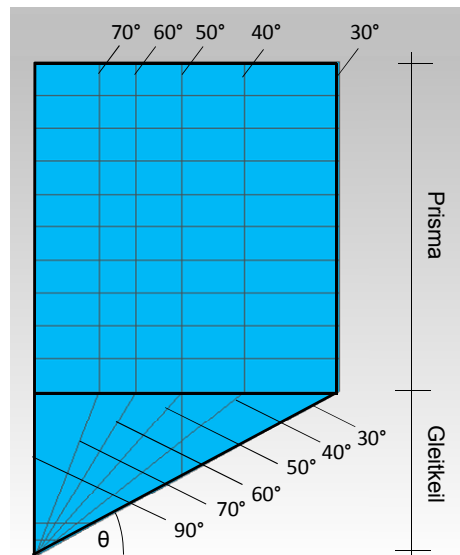


Abbildung 7-5: Seitliche Ansicht des Gleitkeils mit unterschiedlichen Gleitflächenwinkeln sowie Aufbau des Prismas in Abhängigkeit des Gleitflächenwinkels

Bei den Untersuchungen von [3] erfolgte keine Berücksichtigung der Abbaukammer und der Förderschnecke, sondern der Ansatz des Porenwasserdrucks an der Ortsbrust. In den eigenen Untersuchungen wurde hingegen die Schildmaschine mit der Abbaukammer und dem Rohr der Förderschnecke sowie mit Bodenmaterial in diesen beiden Bereichen abgebildet. Die Abbaukammer wies eine Länge von 1,0 m auf. Das Rohr der Förderschnecke wurde mit einer Länge von 15,0 m, einem Durchmesser von 1,0 m und einer Neigung von ca. 20° abgebildet. Der Abstand von der Tunnelsohle zur Unterseite des Rohrs betrug in der Symmetrieachse auf Höhe der Druckwand 1,0 m. Das Schneidrad, mögliche in die Abbaukammer ragende Einbauteile und die mit angebrachten Wendeln sowie üblicherweise einer Seele ausgestattete Förderschnecke wurden aufgrund ihrer geometrischen Komplexität nicht realisiert.

#### *Randbedingungen des numerischen Modells*

Da die Sickerströmungen im Bereich des vom Gleitflächenwinkel  $\theta$  abhängigen Gleitkeils und Prismas wesentlichen Einfluss auf die Größe des zu ermittelnden effektiven Stützdrucks  $s'$  haben können, sollte das numerische Modell in diesem Bereich eine erhöhte Anzahl an Knoten zur Bestimmung der piezometrischen Höhen haben. Aus diesem Grund wurde nach Absprache mit [125] zwischen der Symmetrieachse des Tunnels und der Außenseite des Tunnels bzw. der Außenseite des Gleitkeils (in Vortriebsrichtung) auf einer Breite von 5,0 m über die Höhe und Länge des numerischen Modells der Abstand zwischen zwei Knoten mit 1,0 m festgelegt. In den anderen Bereichen lag der Abstand zwischen zwei Knoten bei 2,0 m (vgl. Abbildung 7-6).

Da bei der Ermittlung des erforderlichen Stützdrucks eine Variation des Gleitflächenwinkels erfolgt (vgl. Abschnitt 7.1), wurde im numerischen Modell ein Gleitkeil mit einem Gleitflächenwinkel von  $30^\circ$  durch weitere Ebenen geschnitten, so dass die piezometrischen Höhen auf den Flächen der Gleitflächenwinkel bestimmbar sind. Das gleiche Prinzip findet bei den über dem Gleitkeil liegenden Prismen Anwendung. Die Breite des Gleitkeils und des Prismas (orthogonal zur Vortriebsrichtung) entspricht dabei dem Radius des Tunnelquerschnitts von 5,0 m. Die Gleitkeile und Prismen sowie das Material in der Abbaukammer und in der Förderschnecke sind in Abbildung 7-6 farblich hervorgehoben.

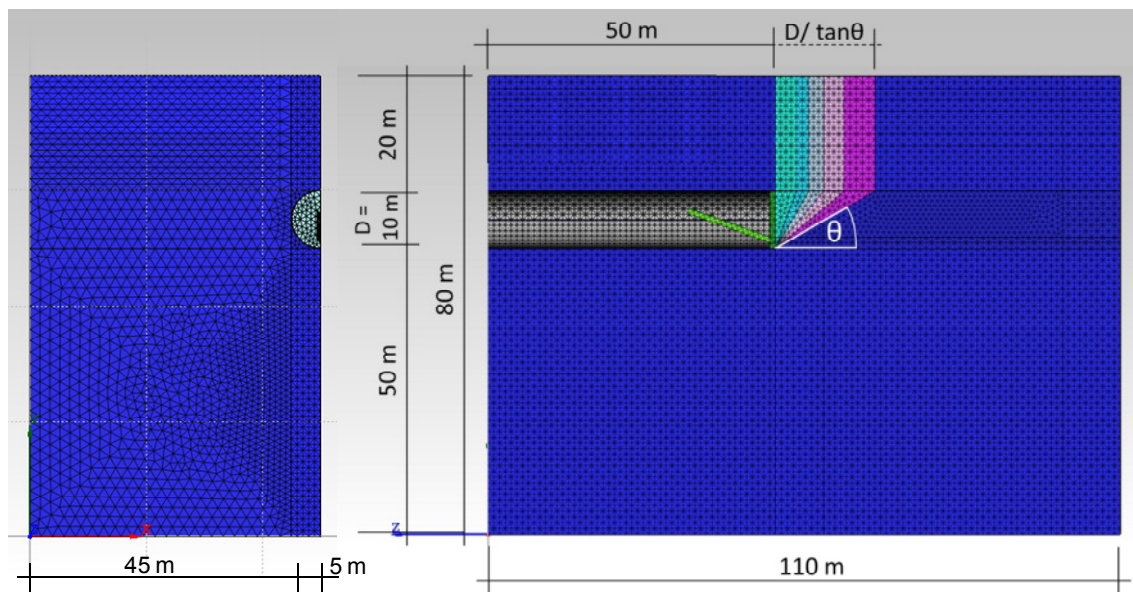


Abbildung 7-6: Numerisches Modell zur Ermittlung der Strömungsdrücke; orthogonal zur Vortriebsrichtung (links) bzw. parallel zur Vortriebsrichtung (rechts)

Das Rohr der Förderschnecke, die Druckwand, der Schildmantel und der Bereich der Tübbinge wurden wasserundurchlässig simuliert. Für den Fall eines offenen Schnecken-schiebers erfolgte die Definition der Randbedingung „offene Schnecke“, die durch einen Porenwasserdruck von  $p = 0$  bar am Ende der Schnecke gekennzeichnet ist und Sickerströmungen in Richtung des Ausgangs der Förderschnecke ermöglicht.

Für den Baugrund, das Material in der Abbaukammer und das Material im Schneckenförderer konnte die Wasserdurchlässigkeit gemäß dem in Abschnitt 7.1 vorgestellten Konzept separat verändert werden. Als weitere Materialdaten wurden dem Baugrund eine Wichte von  $20 \text{ kN/m}^3$  bzw. eine Wichte unter Auftrieb von  $12 \text{ kN/m}^3$  zugewiesen. Als Materialmodell ist das Verfahren nach Mohr-Coulomb gewählt worden. Dieses hat jedoch keinen Einfluss auf die Bestimmung der piezometrischen Höhen.

Im Beispiel von [4] stand das Grundwasser unmittelbar an der GOK an. Entsprechend dieser Randbedingung wurde den Knoten am Rand des eigenen Modells - bis auf die Knoten in der Symmetrieachse - eine piezometrische Höhe von 80 m zugewiesen. Dadurch lässt sich der Fall ableiten, dass dem Boden weniger Wasser durch den Vortrieb entzogen wird als Flüssigkeit nachströmen kann (vgl. [4]).

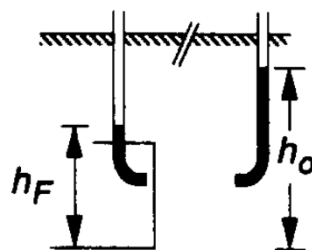
### Validierung des Modells

Das eigene numerische Modell soll mithilfe des oben beschriebenen Beispiels von [4] validiert werden. Dazu erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen (Berechnungen A und B) mit den Ergebnissen der Untersuchungen nach dem Verfahren von *Anagnostou & Kovári* (vgl. Gleichung 2.50). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind tabellarisch in Tabelle 7-2 zusammengefasst und werden nachfolgend beschrieben.

Tabelle 7-2: Ergebnisse der Berechnungen A und B

Berechnung			A			B	
Berechnungsbezeichnung			A1 *	A2 **	A3 **	B1	B2 **
Variation			Validierung				
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	-	-	-	1	-
	in der Förderschnecke	[m/s]	-	-	-	1	-
durchschnittliche $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	23,31	23,31	25,00	22,30	22,30
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 15^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	285,57	295,39	309,00	277,96	287,29
	$\varphi = 20^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	232,92	237,41	249,60	225,05	230,16
	$\varphi = 25^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	194,12	198,23	209,40	186,38	191,58
	$\varphi = 30^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	164,87	163,05	172,80	157,50	157,25
	$\varphi = 35^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	142,30	146,26	155,40	135,53	140,82
* $p = 0$ bar an der Ortsbrust							
** Verfahren von Anagnostou							

Durch die Berechnung A wird zunächst das entwickelte Verfahren zur Ermittlung der Größe des effektiven Stützdrucks unter Berücksichtigung von Sickerströmungen überprüft. Beim Verfahren von *Anagnostou & Kovári* findet der Wert  $\Delta h$  Eingang, der die Differenzhöhe vom Grundwasserstand  $h_0$  und der piezometrischen Höhe in der Abbaukammer  $h_F$  darstellt (vgl. Abbildung 7-7). Auf Höhe der Achse des Tunnels ergibt sich aufgrund des Durchmessers des Tunnels von 10,00 m eine durchschnittliche piezometrische Höhe von  $h_F = 5,00$  m. Bei Berücksichtigung eines Grundwasserstands von  $h_0 = 30,00$  m kann daher der maximale Wert an der Ortsbrust von  $\Delta h$  zu 25,00 m bestimmt werden.



$$\text{mit } \Delta h = h_0 - h_F$$

Abbildung 7-7: Darstellung des Grundwasserstands  $h_0$  und der piezometrischen Höhe in der Abbaukammer  $h_F$  [4]

Bei Berechnung A wurde die Randbedingung, dass ein Porenwasserdruck ( $p = 0$  bar) an der Ortsbrust herrscht, angesetzt. Eine Abbildung des Bodens in der Abbaukammer und in der Förderschnecke war nicht erforderlich. Dieses Beispiel entspricht der Randbedingung nach

dem Prinzip der Berechnung nach [3]. Aus der eigenen numerischen Berechnung (Berechnung A1) ergab sich auf der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils auf Höhe der Tunnelachse ein durchschnittlicher Wert für  $\Delta h = 23,31$  m, der vom theoretischen Wert von  $\Delta h = 25,00$  m abwich. Der Grund für den Unterschied von  $\Delta h$  ist in den unterschiedlichen Flächen der Ortsbrust bzw. des Gleitkeils und der jeweiligen Randbedingung zu sehen. Bei den eigenen Berechnungen erfolgte ein Ansatz der Randbedingung im Bereich des Halbkreises der Ortsbrust (in Abbildung 7-8 grün gekennzeichnet) mit einem Porenwasserdruck von  $p = 0$  bar, während im Bereich des Gleitkeils, der nicht von der Ortsbrust tangiert wurde (gelb dargestellt), keine Randbedingung hinsichtlich des Drucks bestand. Aufgrund der Sickerströmungen im Bereich der Zwickel lag die durchschnittliche piezometrische Höhe an der Fläche des Gleitkeils daher oberhalb der durchschnittlichen piezometrischen Höhe an der Fläche der Ortsbrust mit 5,00 m. Dies hat eine Reduzierung von  $\Delta h$  von 25,00 m auf 23,31 m zur Folge.

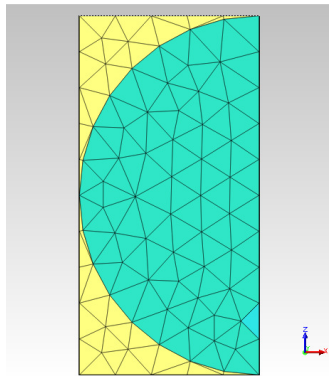


Abbildung 7-8: Ansicht der Ortsbrust (grün dargestellt) und des dahinter liegenden Gleitkeils in Vortriebsrichtung (gelb dargestellt) im numerischen Modell

In der anschließenden Bestimmung des effektiven Stützdrucks erfolgte eine Veränderung des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$  zwischen  $15^\circ$  und  $35^\circ$  verändert. Der effektive Stützdruck  $s'$  nahm Werte zwischen  $142,30$  und  $285,57$  kN/m<sup>2</sup> an. Für die Vergleichsberechnung nach *Anagnostou & Kovári* wurden sowohl der Wert  $\Delta h = 23,31$  m (Berechnung A2) als auch der Wert  $\Delta h = 25,00$  m (Berechnung A3) genutzt.

Da in den späteren Berechnungen nur kohäsionslose Lockergesteine betrachtet werden, blieb bei den Vergleichsuntersuchungen eine mögliche Kohäsion des Bodens unberücksichtigt. Zudem wird bei den späteren Berechnungen der Parameterstudie der Winkel der inneren Reibung  $\varphi$  den kohäsionslosen Lockergesteinen angepasst.

Die Ergebnisse zur Berechnung des effektiven Stützdrucks sind in Abbildung 7-9 in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung dargestellt. Die Ergebnisse lagen bei gleichem Wert von  $\Delta h$  maximal ca.  $10$  kN/m<sup>2</sup> und durchschnittlich ca.  $4$  kN/m<sup>2</sup> auseinander. Beim Vergleich der Ergebnisse der eigenen Berechnung (Berechnung A1) und der Berechnung nach dem Verfahren nach *Anagnostou & Kovári* mit einem  $\Delta h = 25,00$  m (Berechnung A3) lagen die ermittelten Werte in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung maximal  $23$  kN/m<sup>2</sup> bzw. durchschnittlich ca.  $15$  kN/m<sup>2</sup> auseinander. Vor allem bei Winkeln von  $\varphi \geq 30^\circ$  befanden sich die ermittelten Abweichungen unterhalb des durchschnittlichen Werts. Die durchschnittliche

prozentuale Abweichung lag bei unter 7 %. Die Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Randbedingungen an der Ortsbrust bzw. der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils oder möglichen Ableseungenauigkeiten der Werte des zu nutzenden Nomogramms nach [4] (vgl. Abbildung 2-14).

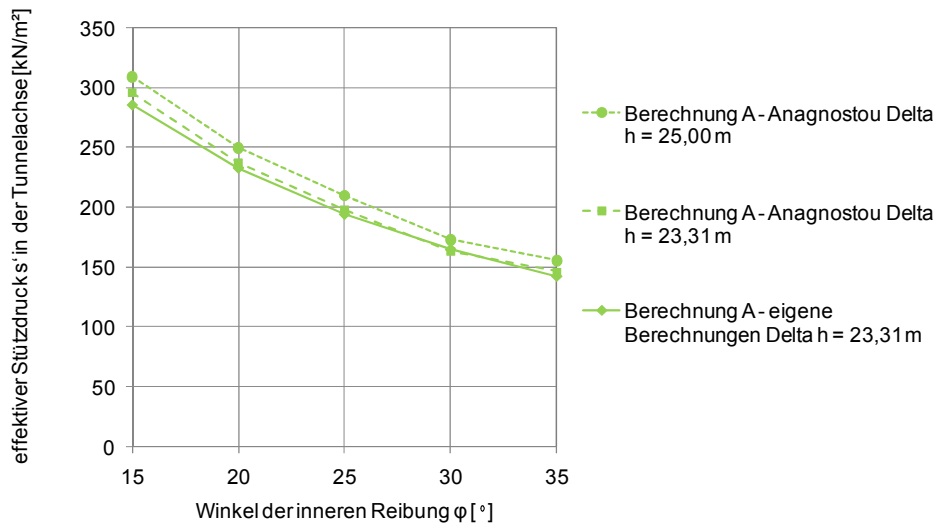


Abbildung 7-9: Effektiver Stützdruck  $s'$  in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$  und des Berechnungsverfahrens bei Berechnung A

In den eigenen Untersuchungen soll der qualitative Einfluss unterschiedlicher Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke auf den effektiven Stützdruck abgeschätzt werden. Aufgrund der geringen Unterschiede der Verfahren ist davon auszugehen, dass das eigene Verfahren im Rahmen der ermittelten Abweichung eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

Die Berechnung B ermittelt den Einfluss einer mit Material gefüllten Abbaukammer und Förderschnecke. Die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke lag bei  $k = 1 \text{ m/s}$ , während die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund einen Wert von  $k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  aufwies (Berechnung B1). Als Randbedingung wurde hier die „offene Schnecke“ (siehe oben) mit einem Porenwasserdruck von  $p = 0 \text{ bar}$  am Schneckenausgang gewählt. Durch einen Vergleich der Ergebnisse dieser Berechnung mit den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Untersuchungen (Berechnung A) kann der Einfluss des Materials in der Abbaukammer und der Förderschnecke bei der Ermittlung des effektiven Stützdrucks bestimmt werden.

Bei dieser Berechnung konnte ein Wert für  $\Delta h = 22,30 \text{ m}$  ermittelt werden, der im Vergleich zur eigenen Berechnung A um ca. 1,0 m geringer war. Dies führte zu einer geringen Verminderung der Werte des Stützdrucks bei Berechnung B1 im Vergleich zur Berechnung A1 zwischen 5 und 8 kN/m² (vgl. Abbildung 7-10). Zudem wurde in der Berechnung B2 nach dem Verfahren von *Anagnostou & Kovári* eine  $\Delta h = 22,30 \text{ m}$  angesetzt, so dass sich im Vergleich zur Berechnung B1 nur geringe Abweichungen von maximal 10 kN/m² ergaben. Die Verläufe



der bei Berechnung B ermittelten Stützdrücke sind nahezu parallel zu den zuvor bestimmten Verläufen der effektiven Stützdrücke.

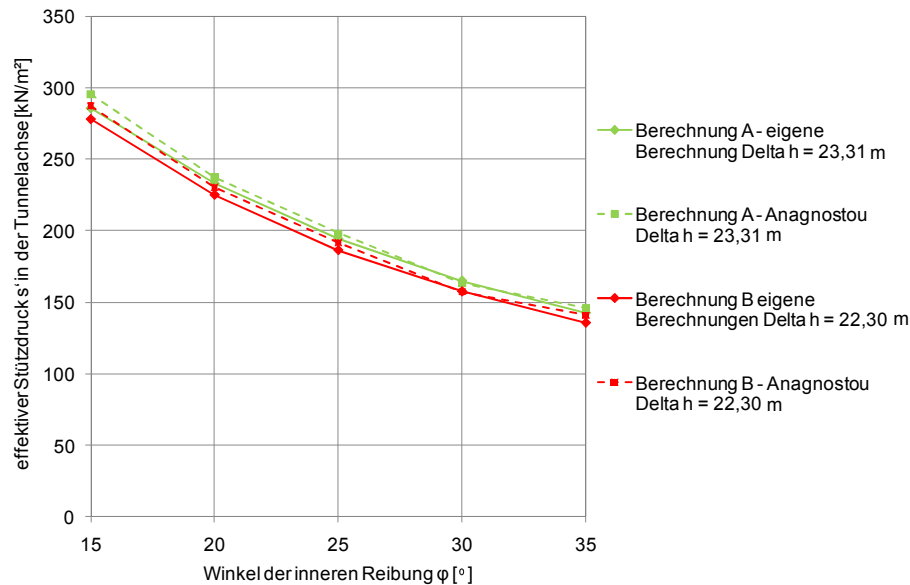


Abbildung 7-10: Effektiver Stützdruck  $s'$  in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$  und des Berechnungsverfahrens bei den Berechnungen A und B

Die Ergebnisse der Berechnung A bei Ansatz der Randbedingung eines Porenwasserdrucks von  $p = 0$  bar an der Ortsbrust wurden durch die Ergebnisse der Berechnung B durch Abbildung des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke bei Wahl einer Wasserdurchlässigkeit von  $k = 1$  m/s annähernd bestätigt. In den weiteren Untersuchungen erfolgt daher eine Berücksichtigung der mit Material gefüllten Abbaukammer und Förderschnecke. Durch die Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke aufgrund einer möglichen Konditionierung lässt sich der qualitative Einfluss auf die Stützdruckberechnung bestimmen.

### 7.3. Ergebnisse der Stützdruckberechnung unter Berücksichtigung von Sickerströmungen

Entsprechend dem Konzept aus Abschnitt 7.1 werden nachfolgend abschnittsweise die Ergebnisse der durchgeführten Stützdruckberechnungen beschrieben. Alle Ergebnisse der Berechnungen sind in der Anlage E zusammengefasst.

Nach [127] kann der Winkel der inneren Reibung von Sanden und Kiesen zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$  liegen. Da in den eigenen Untersuchungen kohäsionslose Lockergesteine als Baugrund betrachtet werden, erfolgt für die Ermittlung des effektiven Stützdrucks  $s'$  eine Variation des Winkels  $\varphi$  zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$  in  $2,5^\circ$ -Schritten. Eine Kohäsion wird bei diesen Böden nicht angesetzt.

In Abschnitt A der Parameterstudie wird jeweils ein Parameter der Wasserdurchlässigkeit des Baugrundes, des Materials in der Abbaukammer oder des Materials in der Förderschnecke verändert (vgl. Abbildung 7-2). Bei den Untersuchungen zum effektiven Stützdruck bei

Variation der **Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds** wurden Werte zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  und  $k = 1 \cdot 10^{-2}$  m/s im Baugrund abgebildet. Aufgrund einer höheren Wasserdurchlässigkeit des Bodens vor der Ortsbrust als in der Abbaukammer sowie in der Förderschnecke fand ein Potentialabbau vor allem in der Abbaukammer bzw. Förderschnecke und nicht im Bereich des Gleitkeils bzw. des Prismas statt. Es wurden daher nur geringe Einflüsse der Sickerströmungen im Bereich des der Ortsbrust vorgelagerten Bodens ermittelt, so dass bei der Stützdruckberechnung nur geringe Unterschiede durch die Variation der Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds bestimmt werden konnten (vgl. Abbildung 7-11). Die Verläufe des ermittelten, minimal erforderlichen Stützdrucks  $s'$  waren in Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$  annähernd deckungsgleich. Daraus lässt sich schließen, dass die Sickerströmung bei dem gewählten Beispiel unberücksichtigt bleiben kann, wenn die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds gleich groß oder größer ist als die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke.

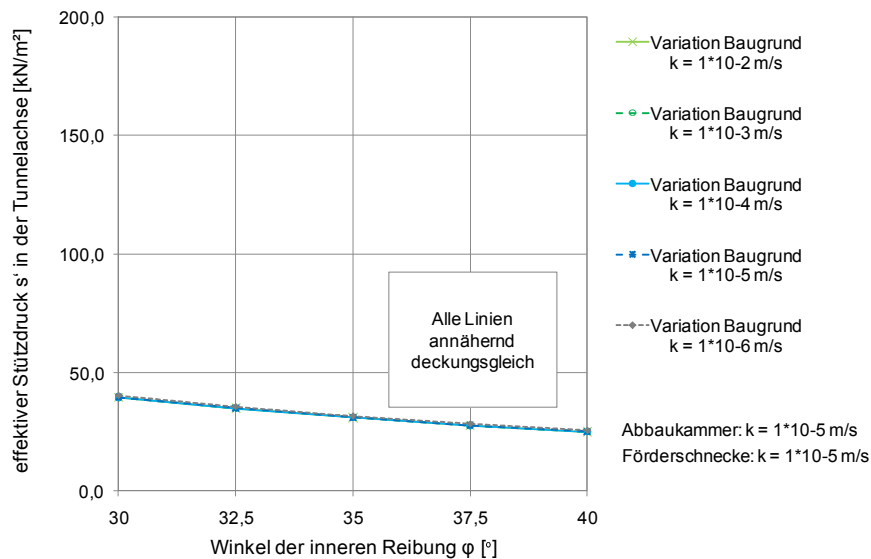


Abbildung 7-11: Effektiver Stützdruck  $s'$  bei Variation der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund und des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$

Ergebnisse von numerischen Berechnungen hinsichtlich der piezometrischen Höhe bei Variation der **Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer** sind in Abbildung 7-12 dargestellt. Die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds und des Materials im Schneckenförderer lag bei diesen Untersuchungen bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Sowohl bei einer Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer von  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s (vgl. Abbildung 7-12 oben) als auch bei  $k = 1$  m/s (vgl. Abbildung 7-12 unten) sind keine Veränderungen der piezometrischen Höhe im Baugrund vor der Ortsbrust zu erkennen.

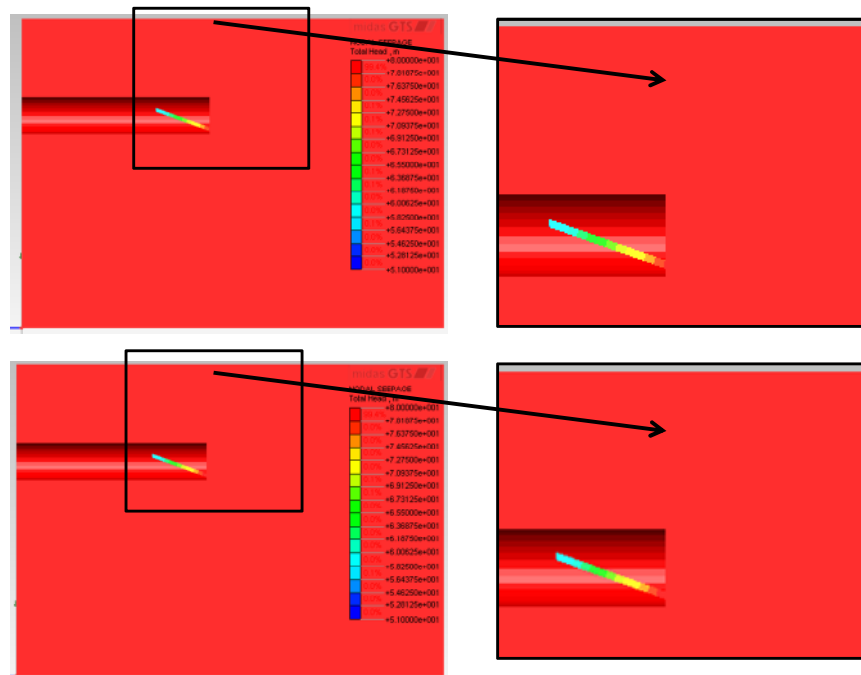


Abbildung 7-12: Piezometrische Höhen bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s im Baugrund und in der Förderschnecke sowie  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s (oben) und  $k = 1$  m/s (unten) in der Abbaukammer

Aufgrund der annähernd gleichen Werte der piezometrischen Höhen im Baugrund wurden bei denselben Reibungswinkeln fast dieselben effektiven Stützdrücke  $s'$  errechnet. Aus diesem Grund ist in der Abbildung 7-13 zum ermittelten, effektiven Stützdruck  $s'$  scheinbar nur ein Verlauf zu erkennen, da alle Variationen fast gleiche Werte haben und sich daher die Linien überlagern. Die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer hat für das gewählte Beispiel keinen Einfluss auf den effektiven Stützdruck  $s'$ , sofern der Baugrund und das Material im Schneckenförderer gleiche Werte aufweisen, die unterhalb der Wasserdurchlässigkeit der Abbaukammer liegen.

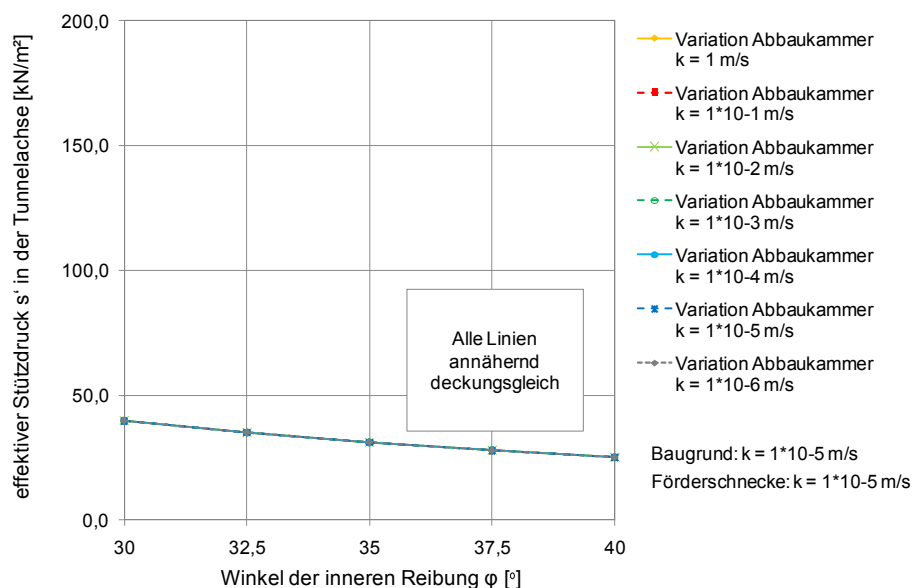


Abbildung 7-13: Effektiver Stützdruck  $s'$  bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und des Winkels der inneren Reibung  $\phi$

Bei Variation der **Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke** ergaben sich Unterschiede in der numerischen Berechnung. Bei gleichen Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund und in der Abbaukammer von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s wurde die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke von  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  bis  $k = 1$  m/s verändert. Beim Vergleich der jeweiligen piezometrischen Höhen fand bei hohen Wasserdurchlässigkeiten ein Abbau des Porenwasserdrucks auch am Übergang vom Schneckenförderer zur Abbaukammer statt (vgl. Abbildung 7-14 unten).

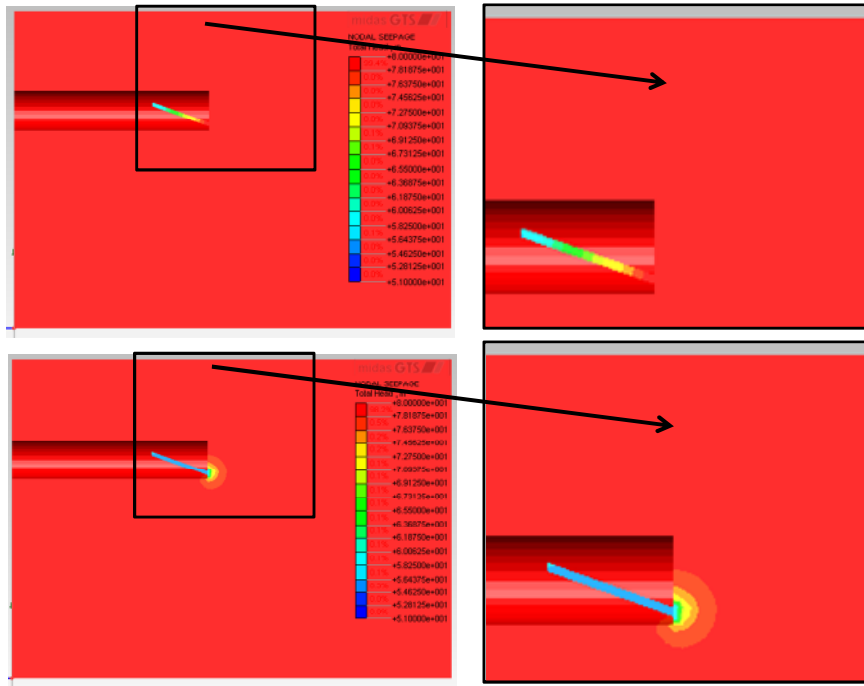


Abbildung 7-14: Piezometrische Höhen bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s im Baugrund und in der Abbaukammer sowie  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s (oben) und  $k = 1$  m/s (unten) in der Förderschnecke

Aufgrund des Einflusses der piezometrischen Höhe nahm der effektive Stützdruck  $s'$  an der Ortsbrust ab einer Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Förderschnecke von größer als  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s zu (vgl. Abbildung 7-15). Bei Werten des Materials zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  und  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s waren hingegen keine oder nur geringe Veränderungen festzustellen. Eine Erhöhung des effektiven Stützdrucks erscheint daher erforderlich, wenn die Wasserdurchlässigkeit im Schneckenförderer mindestens um zwei Zehnerpotenzen höher als die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund und in der Abbaukammer ist. Die Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke wirkte sich bei allen betrachteten Reibungswinkeln annähernd gleich auf den effektiven Stützdruck aus, was anhand der nahezu parallelen Verläufe der jeweiligen Variationen von  $\varphi$  zu erkennen ist. Die Erhöhung des effektiven Stützdrucks  $s'$  war aufgrund der hohen Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke feststellbar und betrug Werte bis zu ca. 20 kN/m<sup>2</sup>.

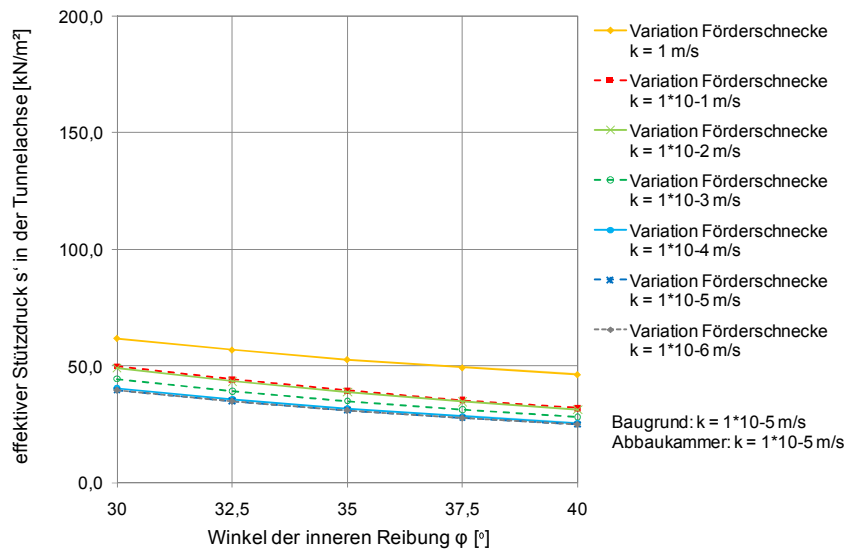


Abbildung 7-15: Effektiver Stützdruck  $s'$  bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und des Winkels der inneren Reibung  $\phi$

Im Abschnitt B der Parameterstudie wurde die **Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und in der Abbaukammer** verändert und die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds mit  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s konstant gehalten. Durch Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und in der Abbaukammer zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  und  $k = 1$  m/s konnte ein wesentlicher Einfluss bei der piezometrischen Höhe im Baugrund im Bereich der Ortsbrust sowie in einem möglichen Gleitkeil und im Prisma ermittelt werden (vgl. Abbildung 7-16).

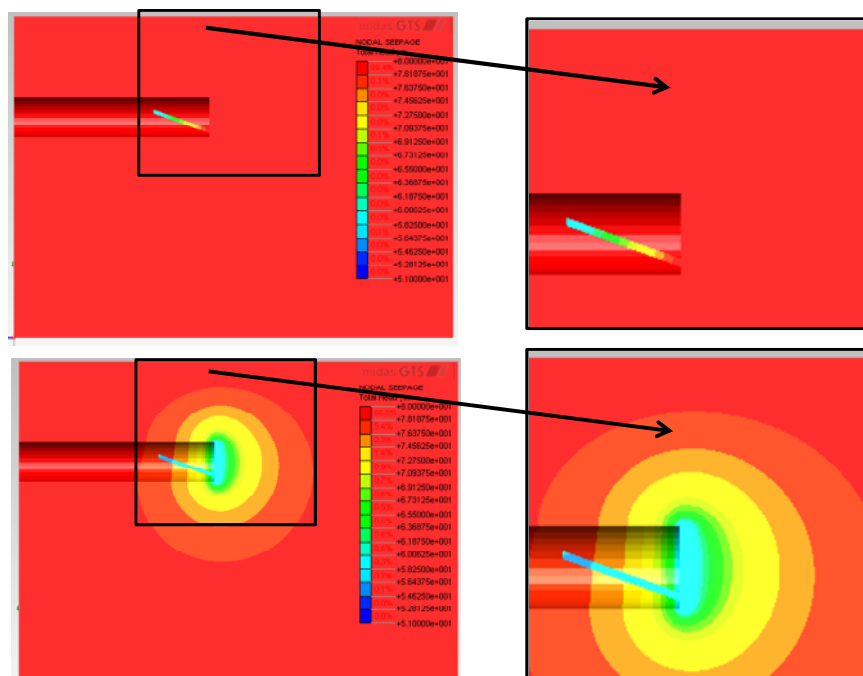


Abbildung 7-16: Piezometrische Höhen bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s im Baugrund sowie  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s (oben) und  $k = 1$  m/s (unten) in der Abbaukammer und in der Förderschnecke

Aufgrund der verschiedenen piezometrischen Höhen in Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeiten wiesen auch die Ergebnisse der Berechnung des effektiven Stützdrucks  $s'$  Unterschiede auf. Die Ergebnisse dieser Berechnungen in Abbildung 7-17 zeigen, dass ab einer Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und in der Abbaukammer größer  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s Einflüsse auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks bestanden. So lagen die effektiven Stützdrücke bei hohen Wasserdurchlässigkeiten des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke um bis zu ca. 120 kN/m<sup>2</sup> höher als die Stützdrücke bei geringen Wasserdurchlässigkeiten. Eine Berücksichtigung der Sickerströmung erscheint daher erforderlich, wenn die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke mehr als zwei Zehnerpotenzen höher als die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds ist. Mit zunehmendem Reibungswinkel  $\varphi$  nahmen die absoluten Unterschiede beim effektiven Stützdruck zwischen den jeweiligen Verläufen ab.

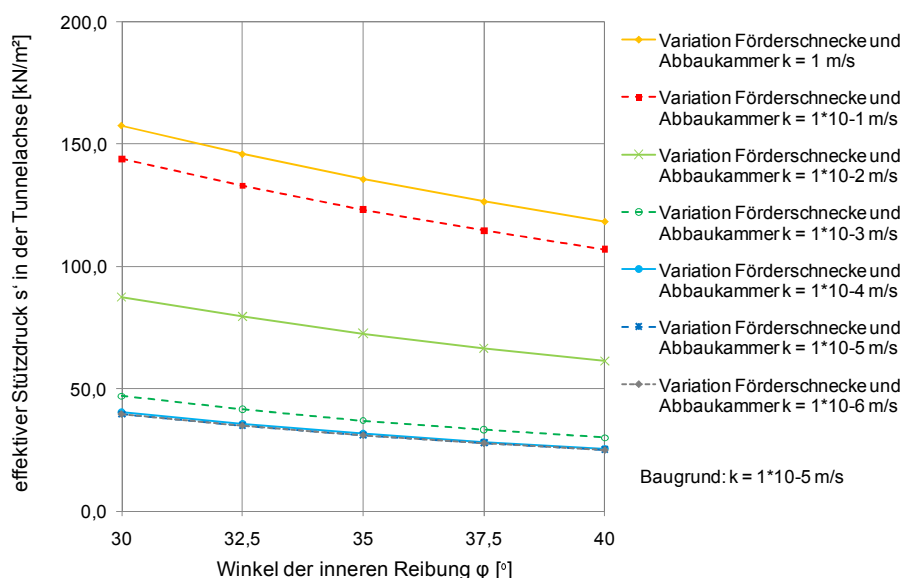


Abbildung 7-17: Effektiver Stützdruck  $s'$  bei Variation der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke sowie des Winkels der inneren Reibung  $\varphi$

In Abschnitt C der Parameterstudie lag die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund konstant bei  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer wies aufgrund durchgeführter Konditionierung einen Wert von  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s auf und die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke wurde variiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ergaben keine wesentlichen Veränderungen des effektiven Stützdrucks  $s'$ . Sofern die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer aufgrund einer Konditionierung auf 1/10 des Werts der Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds reduziert werden kann, ist unabhängig von der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke kein Einfluss aus Sickerströmungen zu berücksichtigen bzw. eine Anpassung bei der Ermittlung des effektiven Stützdrucks  $s'$  nicht erforderlich.

Für das betrachtete Beispiel werden die Erkenntnisse nachfolgend zusammengefasst und anschließend diskutiert:

- Liegt die Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds über der Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke, ist eine Erhöhung des effektiven Stützdrucks  $s'$  nicht zu erwarten.

- Bei gleicher Wasserdurchlässigkeit im Baugrund, in der Förderschnecke und der Abbaukammer besteht keine Notwendigkeit zur Berücksichtigung einer Sickerströmung bei der Ermittlung des effektiven Stützdrucks  $s'$ .
- Eine nur in der Abbaukammer erhöhte Wasserdurchlässigkeit hat fast keinen Einfluss auf den effektiven Stützdruck  $s'$ , sofern die Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund und in der Förderschnecke gleiche Werte haben.
- Eine nur in der Förderschnecke erhöhte Wasserdurchlässigkeit hat Einfluss auf den effektiven Stützdruck, sofern die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund und in der Abbaukammer gleiche Werte haben und die Wasserdurchlässigkeit der Förderschnecke größer als zwei Zehnerpotenzen der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund ist.
- Weist das Material in der Abbaukammer und gleichzeitig in der Förderschnecke eine 100-fach höhere Wasserdurchlässigkeit als der Baugrund auf, sind Sickerströmungen bei der Ermittlung des effektiven Stützdrucks  $s'$  zu berücksichtigen. Hohe Werte der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und gleichzeitig in der Förderschnecke im Vergleich zur Wasserdurchlässigkeit im Baugrund können großen Einfluss auf die Stützdruckberechnung haben.
- Wird die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer auf 1/10 der Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds reduziert, haben Sickerströmungen auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks unabhängig von der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke nur sehr geringen Einfluss.

Nach [81] sind die Strömungsdrücke infolge eines Potentialunterschieds von der durchströmten Länge der Böden und ihrer Wasserdurchlässigkeiten abhängig. Bei einem Vortrieb mit einem Erddruckschild beeinflussen die Geometrie der unterschiedlichen Böden im Baugrund, in der Abbaukammer und in der Förderschnecke die Länge der durchströmten Lockergesteine. Der Einfluss der Sickerströmungen auf die Größe des effektiven Stützdrucks ist daher von den geometrischen Abmessungen der Schildmaschine und dem gewählten Modell mit Höhe des Grundwasserstands und der Überdeckung sowie den Verhältnissen der Wasserdurchlässigkeit von Baugrund, Material in der Abbaukammer und Material in der Förderschnecke abhängig.

Bei gleichen geometrischen Abmessungen der Schildmaschine und einem gewähltem Modell mit gleichem Grundwasserstand und gleicher Überdeckung ist aufgrund der Untersuchungsergebnisse nur das Verhältnis der Wasserdurchlässigkeiten der gewählten Bereiche für die Höhe der Strömungsdrücke relevant. Die Ergebnisse der Berechnungen 1 und 19 (Nummerierung gemäß der Zusammenstellung der Ergebnisse in der Anlage E) und die Ergebnisse der Berechnungen 3 und 20 sind in Tabelle 7-3 zusammengefasst und bestätigen diese Annahme. Bei den Berechnungen 1 und 19 ist die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund 1/10 kleiner als die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke. Die Wasserdurchlässigkeiten unterscheiden sich aber in der absoluten Größe. Die Ergebnisse des effektiven Stützdrucks  $s'$  sind in Abhängigkeit des Winkels  $\varphi$  hingegen gleich. Bei den Berechnungen 3 und 20 ist die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund um das 10-fache höher als die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke bei unterschiedlichen absoluten Werten der Wasserdurchlässigkeit. Da auch hier gleiche Verhältnisse

bei den Wasserdurchlässigkeiten in den unterschiedlichen Bereichen bestehen, werden auch gleiche Stützdrücke ermittelt.

Tabelle 7-3: Vergleich der Berechnungen 1 und 19 sowie 3 und 20

Berechnungsbezeichnung			1	19	3	20
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,48	1,48	1,33	1,33
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	40,34	40,34	39,56	39,56
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	35,61	35,61	34,94	34,94
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,66	31,66	31,04	31,04
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	28,34	28,34	27,79	27,79
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,53	25,53	25,03	25,03

Kohäsionslose Lockergesteine weisen keine für einen Vortrieb ausreichenden Eigenschaften, wie z. B. eine Verarbeitbarkeit oder Kompressibilität, auf. Aus diesem Grund werden während des Vortriebs üblicherweise die Konditionierungsmittel zur Aufbereitung des Lockergesteins in der Abbaukammer hinzugegeben. Eine Beeinflussung der Wasserdurchlässigkeit des Materials kann daher sowohl in der Abbaukammer als auch in der Förderschnecke gegeben sein.

Hat aufgrund einer geeigneten Konditionierung die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und im Schneckenförderer denselben oder einen niedrigeren Wert als die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund, ist eine Berücksichtigung der Sickerströmungen nach den Erkenntnissen der Untersuchungen nicht erforderlich. Üblicherweise liegt die Wasserdurchlässigkeit von grobkörnigen Böden bei  $k > 1 \cdot 10^{-5}$  m/s (vgl. Abbildung 3-1). Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels gilt aber die Anforderung einer Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials von maximal  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei einem Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels mit einem Erddruckschild in grobkörnigen Lockergesteinen die erforderliche Wasserdurchlässigkeit kleiner als die tatsächliche Wasserdurchlässigkeit des unkonditionierten Baugrunds ist, so dass eine Konditionierung notwendig ist. Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 6 ist somit keine Erhöhung des effektiven Stützdrucks infolge von Sickerströmungen erforderlich. Sollte jedoch keine ausreichende Konditionierung erfolgen oder möglich sein, besteht ggf. die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der Sickerströmungen.

Eine Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Abbaukammer hat einen geringeren Einfluss auf den effektiven Stützdruck als eine Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Förderschnecke bei sonst gleichen Randbedingungen (vgl. Berechnungen 6 – 11 und 12 – 17, Anlage E). Dies bedeutet, dass für eine Vermeidung der Erhöhung des effektiven Stützdrucks  $s'$  auf eine niedrige Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke zu achten ist. Möglicherweise könnte durch zusätzliche Injektion von Feinstoffsuspension am Übergang von der Abbaukammer in die Förderschnecke die Wasserdurchlässigkeit des Materials in der Schnecke reduziert werden.



Sollte die Wasserdurchlässigkeit sowohl in der Abbaukammer als auch in der Förderschnecke im Vergleich zur Wasserdurchlässigkeit im Baugrund erhöht sein, kann ein größerer Einfluss auf die Ermittlung des effektiven Stützdrucks ausgemacht werden, als würde nur die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke erhöht sein (vgl. Berechnungen 12 – 17 und 18 – 23, Anlage E). Daraus ergibt sich, dass zur Verringerung des Einflusses aus Sickerströmungen auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks zunächst auf eine mögliche Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke geachtet werden sollte. Ist eine Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke jedoch nicht möglich, sollte versucht werden, die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer durch Konditionierung zu vermindern und so den Einfluss der Sickerströmungen auf die Stützdruckberechnungen zu verringern. Sollte die Wasserdurchlässigkeit sowohl in der Abbaukammer als auch in der Förderschnecke größer als im Baugrund sein, so kann ein größerer Einfluss auf die Ermittlung des effektiven Stützdrucks ausgemacht werden, als würde die Wasserdurchlässigkeit nur in der Förderschnecke erhöht sein (vgl. Berechnungen 12 – 17 und 18 – 23, Anlage E). Daraus ergibt sich, dass zur Verringerung des Einflusses aus Sickerströmungen auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks zunächst auf eine mögliche Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke geachtet werden sollte. Ist eine Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke jedoch nicht möglich, sollte versucht werden, die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer durch Konditionierung zu vermindern und so den Einfluss der Sickerströmungen auf die Stützdruckberechnungen zu verringern. Sollte der Wert der Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer durch eine geeignete Konditionierung eine Zehnerpotenz kleiner sein als der Wert der Wasserdurchlässigkeit im Baugrund, hat eine möglicherweise erhöhte Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke einen nur sehr geringen Einfluss auf den erforderlichen effektiven Stützdruck (vgl. Berechnungen 6, 18, 24 – 28, Anlage E).

Durch die Erhöhung des effektiven Stützdrucks  $s'$  nach dem Verfahren von *Anagnostou & Kovári* vermindert sich gleichzeitig der totale Stützdruck  $s$ , da die Reduzierung des hydrostatischen Drucks in der Abbaukammer infolge der Drainagewirkung größer ist als die daraus resultierende Erhöhung des effektiven Stützdrucks  $s'$  infolge der Sickerströmungen (vgl. auch [3]). Bei einer Vortriebssituation in grobkörnigen Böden mit ungenügender Konditionierung (und daraus resultierender Drainagewirkung) ist somit der totale Stützdruck  $s$  niedriger, jedoch der effektive Stützdruck  $s'$  höher als bei einer Vortriebssituation mit geeigneter Konditionierung und dementsprechend geringerer Drainagewirkung. Allerdings ist ein Vortrieb mit nicht ausreichender Konditionierung in betrieblicher Sicht sehr viel ungünstiger als bei geeigneter Konditionierung, da bei nicht ausreichender Konditionierung der totale Stützdruck vorwiegend in Form effektiver Spannungen übertragen werden muss. Hierbei treten deutlich höhere Reibungsspannungen auf, so dass Probleme hinsichtlich eines erhöhten Drehmoments, einer Verrollung der Maschine, einer steigenden Temperatur oder eines übermäßigen Verschleißes entstehen können.

Bei Erddruckschilden wird an der Druckwand üblicherweise die Größe des totalen Stützdrucks  $s$  mit Hilfe von Erddruckmeßgebern gemessen. Dabei kann nicht zwischen den Anteilen des effektiven Stützdrucks  $s'$  und des Porenwasserdrucks unterschieden werden. Daher

kann bei herkömmlichen EPB-Vortrieben keine Aussage getroffen werden, welchen Anteil der effektive Stützdruck  $s'$  am totalen Stützdruck  $s$  hat. Um diesen Anteil zukünftig zu bestimmen, könnten piezometrische Messungen im Baugrund vor der Ortsbrust durchgeführt werden. Sofern anhand dieser Messungen ermittelt wird, dass der Grundwasserspiegel unverändert bleibt, kann angenommen werden, dass der Porenwasserdruck  $p$  in der Abbaukammer dem natürlichen Druck entspricht. In diesem Fall kann der effektive Stützdruck  $s'$  als Differenz des totalen Stützdrucks  $s$  und des Porenwasserdrucks  $p$  bestimmt werden. Alternativ könnten piezometrische Messungen in der Abbaukammer durchgeführt werden, mit denen der Porenwasserdruck  $p$  ermittelt wird. Bei gleichzeitiger Installation von Druckmessdosen wäre so eine Bestimmung der totalen Spannungen und des Porenwasserdrucks möglich, so dass die effektiven Spannungen berechnet werden können. Allerdings wären bei dieser Vorgehensweise erhebliche Ungenauigkeiten aufgrund von wahrscheinlich auftretenden Meßwertschwankungen zu erwarten.

## 8. Erkenntnisse aus den Untersuchungen und Empfehlungen für die Praxis

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der Untersuchungen aus den vorangegangenen Kapiteln zusammengefasst. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgen sowohl Empfehlungen für die Praxis zu Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen als auch zur Stützdruckberechnung bei Erddruckschilden.

### 8.1. Erkenntnisse aus den Versuchen mit Konditionierungsmitteln und Empfehlungen für die Praxis

Nachfolgend werden zunächst Anforderungen an für eine Konditionierung geeignet erscheinende Schäume beschrieben. Anschließend folgen Empfehlungen für die vortriebsbegleitenden Untersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen. Abschließend wird eine verbesserte Verfahrenstechnik für Vortriebssituationen mit geringen Schaumvolumenströmen vorgeschlagen sowie weitere Hinweise zur Verfahrenstechnik bei der Konditionierung gegeben.

#### *Anforderungen an Schäume*

Aus den Ergebnissen zu den durchgeführten Untersuchungen zu Lockergesteinen und Schäumen mit unterschiedlichen Eigenschaften können die Anforderungen an Schäume wie folgt abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 6.3):

- Die ermittelte Dichte der Schäume sollte möglichst der von den Einstellungen der Volumenströme von Luft und Tensidlösung abhängigen theoretischen Dichte entsprechen.
- Die Drainagezeit der Schäume für 40 g Tensidlösung sollte zwischen 600 und 700 Sekunden liegen.
- Die maximale Größe der Schaumbläschen sollte unmittelbar nach Herstellung des Schaums zwischen 0,3 und 0,8 mm aufweisen.

#### *Vortriebsbegleitende Bestimmung der Eigenschaften von Schäumen*

Für die Bestimmung der oben aufgeführten Eigenschaften von auf Schildmaschinen hergestellten Schäumen sind vortriebsbegleitende Untersuchungen erforderlich. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen können zu möglichen Veränderungen bei den Einstellungen der Schaumproduktion, wie z. B. einer Anpassung der FER oder  $c_r$ , führen. Auf diese Weise wäre aus technischer und ökonomischer Hinsicht ggf. eine Verbesserung der Einstellung der Konditionierungsmittelparameter möglich.

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.1 haben gezeigt, dass die Kompressibilität des Schaums von keinem der untersuchten Parameter beeinflusst wurde, so dass diesbezüglich keine vortriebsbegleitenden Untersuchungen erforderlich sind. Zudem wurden die Drainagezeit und die maximale Bläschengröße von annähernd den gleichen Parametern in ähnlichen Maßen beeinflusst. Da die Bestimmung der Bläschengröße mithilfe eines Risslineals oder eines Mik-

roskops während des Vortriebs schwer durchzuführen ist, kann auf diesen Versuch verzichtet werden. Bei vortriebsbegleitenden Untersuchungen bietet sich vielmehr eine Bestimmung der Dichte und der Drainagezeit des Schaums an.

Bei der Bodenconditionierung mit Schaum muss der Injektionsdruck größer als der in der Abbaukammer herrschende Druck sein, damit dem Lockergestein das Conditionierungsmittel zugegeben werden kann. Im Falle eines Vortriebs im geschlossenen Modus bedeutet dies, dass der Druck des Schaums während der Förderung im Leitungssystem größer als der atmosphärische Druck ist. An der Förderleitung zwischen Schaumlanze und Austrittsöffnung sind üblicherweise Anschlussmöglichkeiten mit Kugelhähnen installiert, die genutzt werden können, um die Leitungen zu reinigen oder Schaum zu entnehmen. Beim Öffnen eines solchen Kugelhahns und Entnahme des Schaums bei atmosphärischen Bedingungen würden sich jedoch die Eigenschaften des bei höheren Drücken hergestellten Schaums verändern.

Zur Ermittlung der Eigenschaften von Schaum während des Vortriebs eines Erddruckschildes im geschlossenen Modus kann mittels der Anschlussmöglichkeit ein Druckzylinder aus Plexiglas mit installiertem Überdruckventil verbunden und dieser mit einem mit dem Förderdruck äquivalenten Druck beaufschlagt werden (vgl. Schema in Abbildung 8-1 a)). Durch Öffnen des Kugelhahns erfolgt bei gleichen Druckbedingungen wie in der Leitung das Füllen des Druckzylinders mit Schaum (vgl. Abbildung 8-1 b)). Anschließend wird dieser mittels Kugelhahn verschlossen. Das eingebrachte Schaumvolumen entspricht dabei dem Volumen des Druckzylinders. Aufgrund des zeitabhängigen Verhaltens des Schaums drainiert der Schaum bei konstanten Druckbedingungen. Das Volumen des drainierten Liquids im Zylinder kann durch Ermittlung der Höhe des Liquids mittels auf dem Druckzylinder angebrachten Messstreifen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt werden. Nach vollständiger Drainage des Liquids aus dem Schaum ist es möglich, die in der Schaumprobe enthaltene Liquidmenge zu ermitteln (vgl. Abbildung 8-1 c)).

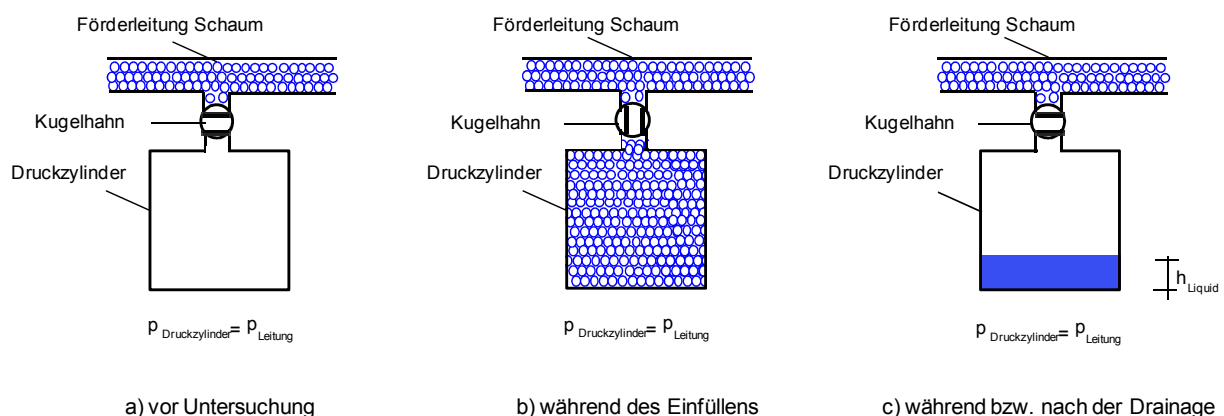


Abbildung 8-1: Mögliche Verfahrenstechnik zur Untersuchung von Schaumeigenschaften während des Vortriebs

Aufgrund der Ermittlung des Schaumvolumens zu Beginn der Untersuchung und des Volumens des Liquids nach der Drainage ist eine Bestimmung der Dichte des Schaums und der ermittelten FER nach Gleichung 8.1 möglich.

$$FER = \frac{h_{Schaum}}{h_{Liquid}} \quad (\text{Gl. 8.1})$$

mit  $h_{Liquid}$  = Höhe des Liquids im Zylinder nach vollständiger Drainage [cm]

$h_{Schaum}$  = Höhe des Schaums im Zylinder unmittelbar nach Einfüllen [cm]

$FER$  = Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]

Zudem kann mittels einer Bestimmung des Volumens des drainierten Liquids zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Drainage der Drainageverlauf ermittelt werden. Mithilfe des Druckzylinders lassen sich während des Vortriebs die Dichte und das Drainageverhalten von Schäumen bei entsprechenden Druckbedingungen bestimmen.

#### *Verbesserte Verfahrenstechnik für Vortriebssituationen mit geringen Schaumvolumenströmen*

Für die Schaumherstellung wurden untere Grenzen von Schaumvolumenströmen  $Q_F$  in Abhängigkeit der Schaumlanze ermittelt. Diese Grenzen lagen für die auf Erddruckschilden installierte Schaumlanze 1 bei  $Q_F = 100$  l/min und für Schaumlanze 2 bei  $Q_F = 75$  l/min (vgl. Abschnitt 5.1.1). Kommt es aufgrund einer geringen FIR oder Vortriebsgeschwindigkeit zu einer Unterschreitung der Werte, können eine kontinuierliche Schaumproduktion und die erforderlichen Eigenschaften des Schaums nicht gewährleistet werden.

Aus diesem Grund wäre bei Unterschreitung der unteren Grenze des Schaumvolumenstroms während des Vortriebs eine Reduzierung der Anzahl der für die Schaumherstellung genutzten Lanzen auf der Schildmaschine und eine damit einhergehende Erhöhung des Schaumvolumenstroms pro verwendeter Lanze sinnvoll. Zur Verteilung des Schaums auf unterschiedliche Austrittsöffnungen ist die Installation zusätzlicher Verbindungen und Reglern zwischen den verschiedenen Leitungen erforderlich.

Anhand eines aus zwei Vortriebssituationen bestehenden Beispiels soll die erforderliche Reduzierung der Anzahl der verwendeten Schaumlanzen erläutert werden. Die Randbedingungen sind in Tabelle 8-1 aufgeführt.

Gegeben sei eine Schildmaschine mit einem Durchmesser von 10,0 m und insgesamt 8 installierten Schaumlanzen des Typs Schaumlanze 1. Bei einer FIR = 40 % wird für die Vortriebssituation 1 eine Vortriebsgeschwindigkeit von 60 mm/min angesetzt. Daraus ergibt sich der für den Vortrieb erforderliche Gesamtvolumenstrom des Schaums  $Q_{F,ges}$  von 1,89 m<sup>3</sup>/min bzw. bei 8 genutzten Lanzen ein erforderlicher Volumenstrom des Schaums von 230 l/min. Diese liegt höher als die Untergrenze von 100 l/min der bei dieser Schildmaschine genutzten Schaumlanze 1, so dass keine Reduzierung der Anzahl an verwendeten Schaumlanzen erforderlich ist.

Tabelle 8-1: Beispiel zur Reduzierung der Anzahl an verwendeten Schaumlanzen

	Situation 1	Situation 2
$d_{Schild}$	10,0 m	
$v_{Vortrieb}$	60 mm/min	20 mm/min
$FIR$	40 %	40 %
$Q_{F,ges} = \frac{FIR}{100} * \pi * \frac{d_{Schild}^2}{4} * \frac{v_{vortrieb}}{1000}$	1,89 m <sup>3</sup> /min	0,63 m <sup>3</sup> /min
$n_{Lanze}$	8 Stück	
$Q_{Lanze} = \frac{Q_{F,ges}}{n_{Lanze}} * 1000$	230 l/min	78 l/min
$Q_{Lanze1}$	100 l/min	
$n_{Lanze,neu}$	-	4 Stück
$Q_{Lanze1, neu} = \frac{Q_{F,ges}}{n_{Lanze,neu}}$	-	156 l/min

- mit  $d_{Schild}$  = Durchmesser des Schilds [m]  
 $FIR$  = Foam Injection Ratio [%]  
 $n_{Lanze}$  = Anzahl der verwendeten Schaumlanzen [Stk]  
 $n_{Lanze,neu}$  = reduzierte Anzahl der verwendeten Schaumlanzen [Stk]  
 $Q_{F,ges}$  = Gesamtvolumenstrom des Schaums [m<sup>3</sup>/min]  
 $Q_{Lanze}$  = Volumenstrom des Schaums pro Lanze [l/min]  
 $Q_{Lanze1}$  = Untergrenze des Volumenstroms des Schaums bei Lanze 1 [l/min]  
 $Q_{Lanze1,neu}$  = Schaumvolumenstrom pro Lanze bei reduzierter Anzahl der verwendeten Schaumlanzen [l/min]  
 $v_{vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

Bei Vortriebssituation 2 beträgt die Vortriebsgeschwindigkeit der Schildmaschine bei gleicher FIR hingegen nur 20 mm/min, so dass sich auch die für den Vortrieb erforderliche Gesamtschaummenge  $Q_{F,ges}$  auf ca. 630 l/min reduziert. Bei 8 Schaumlanzen würde sich ein Schaumvolumenstrom von 78 l/min ergeben, der unterhalb der Untergrenze von Schaumlanze 1 liegt. Aus diesem Grund ist die Anzahl der genutzten Schaumlanzen zu verringern, so dass die zu erzielenden Volumenströme pro Lanze oberhalb des Grenzwertes von 100 l/min liegen. Mit je einer der vier verwendeten Schaumlanzen kann so Schaum mit  $Q_F > 100$  l/min produziert und anschließend durch jeweils zwei Leitungen zu den Austrittsöffnungen gefördert werden. Mithilfe dieser verbesserten Verfahrenstechnik wäre eine Gewährleistung der Schaumeigenschaften bei geringen Volumenströmen möglich.

#### Weitere Hinweise zur Verfahrenstechnik

Die Förderungen von Polymeren oder Polymersuspensionen sollten über ein Leitungssystem mit Drehdurchführungen bis an die Ortsbrust möglich sein, um eine Veränderung der Eigenschaften des konditionierten Materials bereits an der Ortsbrust zu gewährleisten. Um zeitgleich eine Schaumzugabe und die Zuführung von Polymeren oder Polymersuspensionen zu ermöglichen, sollten einzelne Leitungen und Drehdurchführungen nur für die Förderung des Schaums bzw. des Polymers genutzt werden.

Bei der Verwendung von Feinstoffsuspensionen besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der Größe der Inhaltsstoffe bzw. der Konzentration  $c_{\text{susp}}$  während des Transports Stopfer entstehen. Die Förderung des Materials durch Drehdurchführung beim Übergang der Förderung ins Schneidrad würde vermutlich die Stopferbildung unterstützen, so dass die Eignung der Drehdurchführungen für das entsprechende Material nachzuweisen ist. Sollte ein Transport des Materials an die Ortsbrust aufgrund möglicher Stopfer im Bereich der Drehdurchführungen nicht möglich sein, können die Feinstoffsuspensionen auch durch Öffnungen in der Druckwand in die Abbaukammer eingebracht werden. Für eine möglichst nah zur Ortsbrust gelegene Injektion des Materials wäre eine Injektion durch in die Abbaukammer hineinragende Statoren ähnlich wie bei Schäumen möglich (vgl. Abbildung 2-1).

## 8.2. Erkenntnisse aus den Versuchen mit konditionierten, grobkörnigen Lockergesteinen und Empfehlungen für die Praxis

Auf Basis der in Kapitel 6 aufgeführten Ergebnisse zu unterschiedlichen konditionierten Lockergesteinen werden in Abbildung 8-2 die Einsatzbereiche von Erddruckschildmaschinen in Abhängigkeit verschiedener Konditionierungsmittel und Randbedingungen überlagert dargestellt und nachfolgend erläutert.

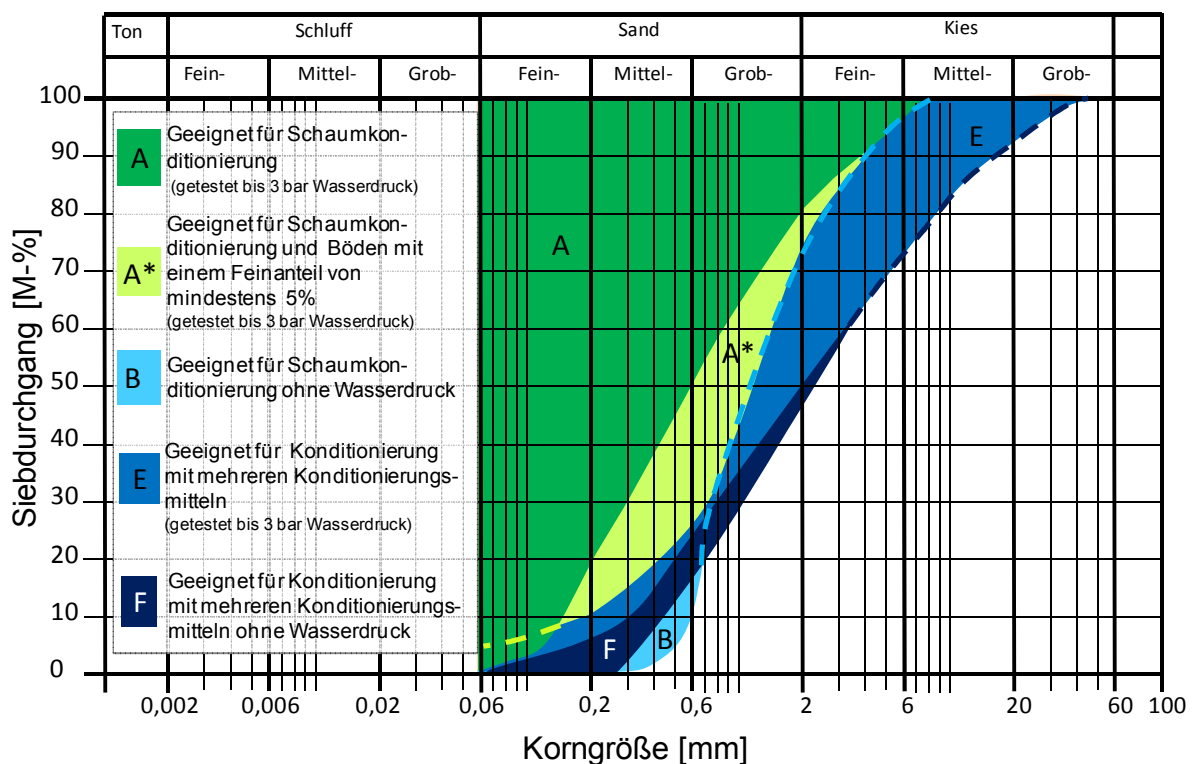


Abbildung 8-2: Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Für Vortriebe in grobkörnigen Böden, die eine Kornverteilungslinie innerhalb des **Bereichs A** haben, ist eine Konditionierung mit Schaum aufgrund der ermittelten Setzmaße der Bodenschäum-Gemische von annähernd 10 bzw. 20 cm möglich. Zudem besteht üblicherweise

eine hinreichend niedrige Wasserdurchlässigkeit von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s (getestet bei einem Wasserdruck von 3,0 bar und einem hydraulischen Gefälle  $i = 5,6$ ) sowie eine ausreichende Kompressibilität des konditionierten Materials.

Liegen die Kornverteilungslinien der Böden im **Bereich A\*** (und ggf. im Bereich A), ist eine Konditionierung mit Schaum ausreichend, wenn der Feinkornanteil mindestens 5 % beträgt. Die mit diesen Kornverteilungslinien konditionierten Böden erlauben üblicherweise eine ausreichende Kompressibilität und weisen eine geringe Wasserdurchlässigkeit auf.

Böden, deren Kornverteilungslinien im durch die gestrichelte Linie begrenzten **Bereich B** liegen und die keinen Feinkornanteil aufweisen, können auf Basis der Versuche mit Hilfe von Schaum konditioniert werden, aber nur, wenn die Vortriebe oberhalb des Grundwasserspiegels liegen, da keine ausreichende Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums besteht.

Die Bereiche C und D (vgl. Abbildung 6-36) wurden nicht abgebildet, da die mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Böden die Anforderungen an die Kompressibilität nicht erfüllten. Durch die Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel (Schäume, Polymere und Feinstoffsuspensionen) können Erddruckschilde in den jeweiligen Bereichen eingesetzt werden (Bereiche E und F).

Für einen Boden, dessen Kornverteilungslinie den **Bereich E** (sowie möglicherweise Bereich A\* und A) schneidet, ermöglicht die Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel eine ausreichende Verarbeitbarkeit der Böden. Zudem kann bei diesen Böden die Wasserdurchlässigkeit ausreichend gering und die Kompressibilität so hoch sein, dass ein Erddruckschild auch unterhalb des Grundwasserspiegels bei entsprechend hoher Dämpfung der Stützdrücke bei Volumenschwankung erfolgreich eingesetzt wird.

Bei Böden mit Kornverteilungslinien im **Bereich F**, die einen Anteil an Kornfraktionen mit einem Durchmesser  $< 0,25$  mm (entsprechend den Randbedingungen des Mittelsands) aufweisen, ist ein Vortrieb bei Nutzung mehrerer Konditionierungsmittel oberhalb des Grundwasserspiegels möglich.

Für die durchgeführten Untersuchungen erfolgte eine Nutzung kohäsionsloser Lockergesteine, die nach [45] den grobkörnigen Böden zuzuordnen sind. Im Gegensatz zu diesen Böden wurden die Einsatzgrenzen von Erddruckschilden bislang größtenteils nur für gemischtkörnige Böden definiert (vgl. Abschnitt 3.2), so dass die in Abbildung 8-2 dargestellten Bereiche eine Erweiterung der bisherigen Einsatzbereiche darstellen.

Um die Einteilung nach Abbildung 8-2 für praktische Zwecke zu vereinfachen, erfolgt die Zusammenfassung der fünf Abschnitte in Abhängigkeit der Kornverteilungslinie und hydrogeologischen Randbedingungen des Bodens in drei wesentliche Bereiche. Die Bereiche sind dabei als Orientierung der Einsatzbereiche anzusehen.



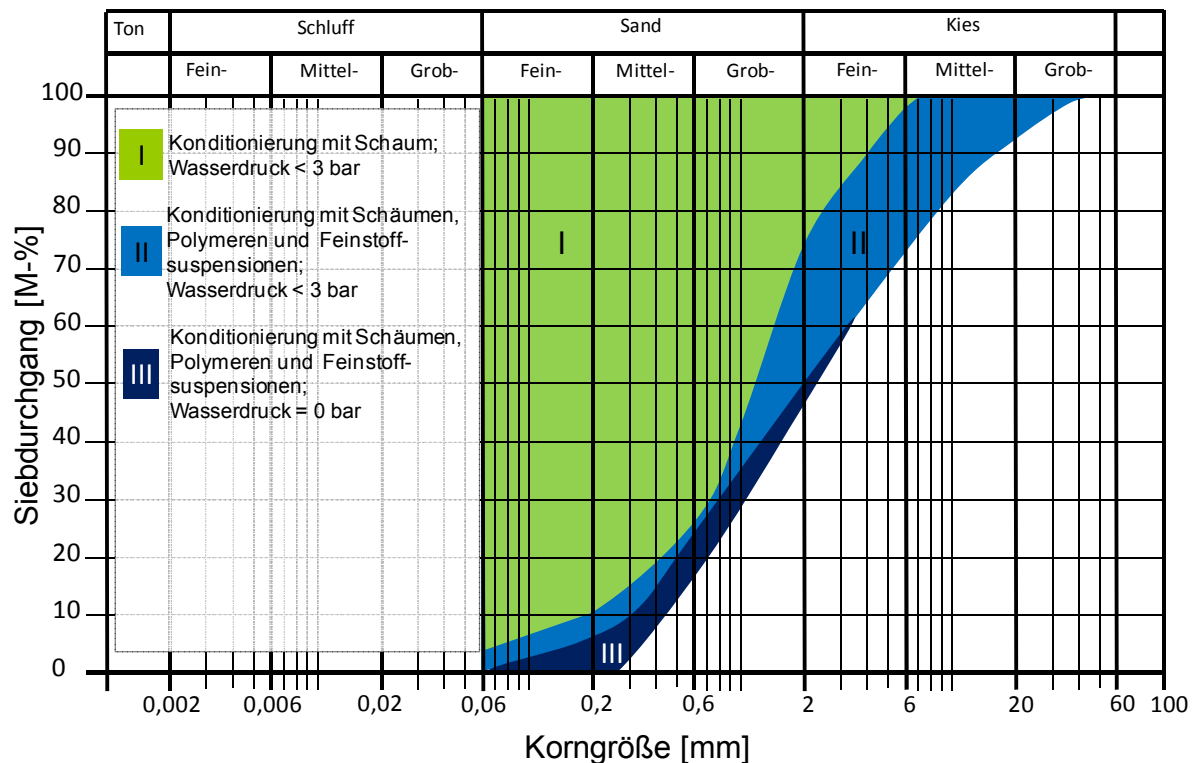


Abbildung 8-3: Einsatzbereiche von Erddruckschilden für grobkörnige Böden auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen

Zum Einsatz eines Erddruckschildes mit Konditionierung von Schaum zählt zunächst der Bereich I (in Abbildung 8-3 grün dargestellt), um einen Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels zu realisieren. Der Feinkornanteil des Bodens sollte dabei bei mindestens 5 M-% liegen.

Der Bereich II (in Abbildung 8-3 hellblau dargestellt) stellt den Vortrieb mit EPB-Schilden unterhalb des Grundwasserspiegels dar, der durch die Nutzung mehrerer Konditionierungsmittel gewährleistet wird. Dabei verändern die Konditionierungsmittel die Eigenschaften des Stützmediums, so dass dieses eine ausreichende Verarbeitbarkeit und Kompressibilität sowie eine hinreichend niedrige Wasserdurchlässigkeit aufweist. Diese Eigenschaften können als erfüllt angesehen werden, wenn die Kornverteilungslinie des Bodens innerhalb des Bereichs II und ggf. des Bereichs I liegt.

Im Bereich III (in Abbildung 8-3 dunkelblau dargestellt) führen die eingesetzten Konditionierungsmittel zwar zu einer ausreichenden Kompressibilität und Verarbeitbarkeit, jedoch war in den Versuchen keine Wasserdurchlässigkeit des Boden-Schaum-Gemischs von  $k < 1 \cdot 10^{-5}$  m/s über einen ausreichend langen Zeitraum zu erreichen. Verläuft die Kornverteilungslinie des Bodens durch die Bereiche III, II und ggf. I, kann bei einer geeigneten Konditionierung davon ausgegangen werden, dass ein Erddruckschild oberhalb des Grundwasserspiegels zum Einsatz kommen kann.

Liegt die Kornverteilung eines Bodens teilweise oder vollständig außerhalb der beschriebenen Bereiche, wird der Einsatz eines Erddruckschildes sowohl oberhalb als auch unterhalb des Grundwasserspiegels als nicht möglich erachtet. Für die Verwendung von Erddruck-

schilden in grobkörnigen Böden und Aufbereitung der Lockergesteine mit mehreren Konditionierungsmitteln sollten die erforderlichen Injektionssysteme in Abhängigkeit der zu erwartenden Böden auf der Schildmaschine vorgehalten werden. Es kann erforderlich sein, bis zu drei unterschiedliche Injektionssysteme (zur Schaumkonditionierung bzw. für Schäume mit Polymerzusatz, für Polymerinjektionen sowie für die Injektion von Feinstoffsuspensionen) auf einer Schildmaschine zu installieren, wenn zum Beispiel ein Boden mit einer Kornverteilungslinie aus den Bereichen II oder III aufgeföhren werden soll.

Die drei Bereiche für konditionierte grobkörnige Böden sind in Abbildung 8-4 dargestellt. Diese Abbildung enthält zudem Informationen zu möglichen Konditionierungsmitteln. Zum Vergleich der in dieser Arbeit neu entwickelten Einsatzbereiche sind auch die nach [150] beschriebenen Kornverteilungslinien für Einsatzgrenzen von Erddruckschilden in Abhängigkeit der Konditionierungsart aufgeföhrt.

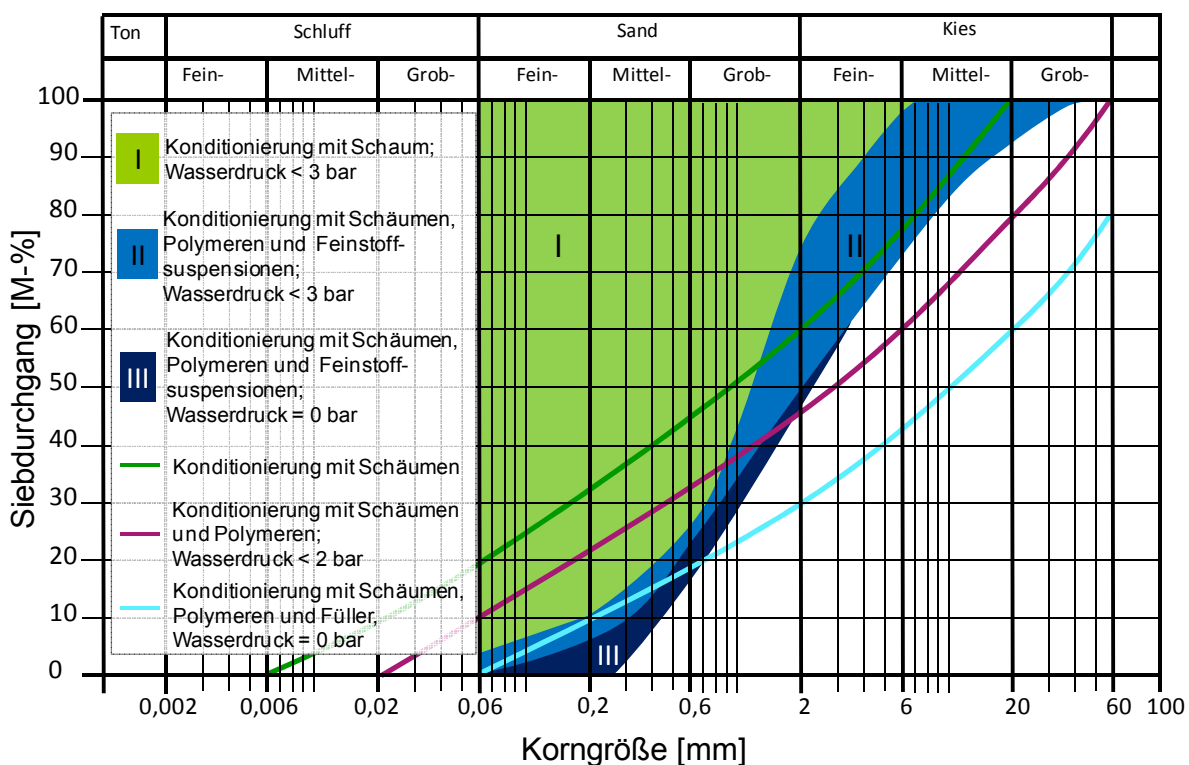


Abbildung 8-4: Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Grundlage der durchgeföhrtten Untersuchungen sowie auf Grundlage der Empfehlungen nach [150]

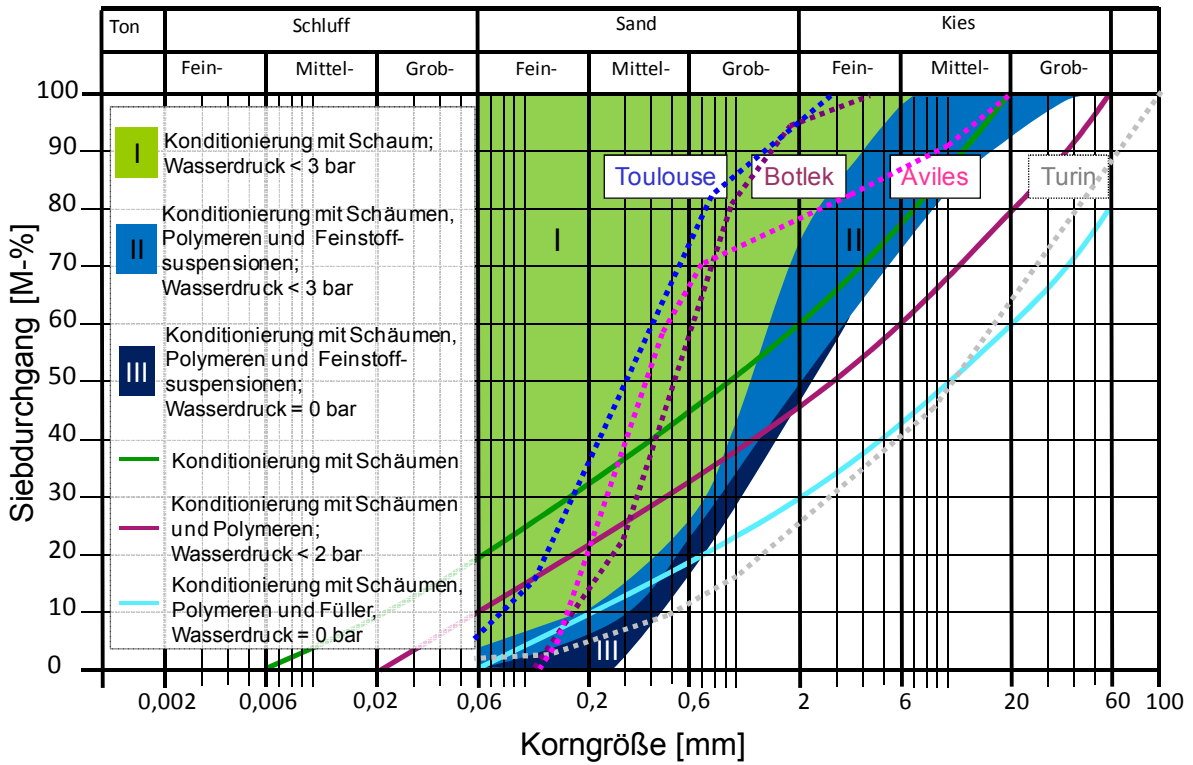
Die grün dargestellte Linie stellt die nach [150] definierte Grenze der Einsatzbereiche für Erddruckschilder mit Schaumkonditionierung dar. Diese Böden sollten mindestens einen Anteil von 20 M-% Feinanteil aufweisen. In den eigenen Versuchen konnten die Einsatzgrenzen für Erddruckschilder durch Reduzierung des Feinanteils auch auf grobkörnige Böden erweitert werden, sofern die Kornverteilungslinien im Bereich des grün dargestellten Einsatzbereichs liegen. Auf diese Weise lassen sich Vortriebe in kohäsionslosen Böden realisieren, die eine geringe Ungleichförmigkeitszahl haben.

Die in Abbildung 8-4 violett dargestellte Linie zeigt die maximale Kornverteilungslinie für den Einsatz eines EPB-Schildes bei Verwendung von Schäumen und Polymeren, sofern der Wasserdruck geringer als 2,0 bar ist (vgl. [150]). In den durchgeführten Untersuchungen lag der Einsatzbereich der mit Schäumen mit Polymerzusatz konditionierten Böden im Bereich der mit Schaum konditionierten Böden, da die Zugabe des Polymers keine Erweiterung der Einsatzbereiche ermöglichte (vgl. Kapitel 6). Aus diesem Grund kann die violett dargestellte Linie für gemischtkörnige Böden mit der grün dargestellten Fläche für grobkörnige Böden verglichen werden. Daraus ergibt sich eine Erweiterung der Einsatzbereiche auf Böden, deren Kornverteilungslinie einen geringeren Fein- bzw. Mittelsandanteil als Böden gemäß der violetten Linie hat.

Bei Vortrieben vorzugsweise ohne Grundwasserdruck können nach [150] mithilfe der Verwendung von Schaum, Polymeren und Feinstoffsuspensionen Böden mit maximal der hellblau abgebildeten Kornverteilungslinie aufgefahren werden. Bei den eigenen Untersuchungen wurde bei Nutzung dieser Konditionierungsmittel zwischen Vortrieben unterhalb (blau dargestellter Bereich II) und oberhalb (dunkelblau dargestellter Bereich III) des Grundwasserspiegels unterschieden.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen können bei Ansatz des Wasserdrucks von  $p = 3$  bar Vortriebe in Böden erfolgen, die einen geringeren Anteil an Feinsand als 20 M-% haben (vgl. blau dargestellter Bereich II und violette Linie). Zudem ermöglicht die Verwendung der genannten Konditionierungsmittel eine Erweiterung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf Böden, die keinen Anteil an Feinsand aufweisen (vgl. dunkelblau dargestellter Bereich III und hellblaue Linie). In diesen Böden sollte aber kein Wasserdruck auftreten, da die Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials für einen Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels nicht ausreicht.

Durch die Untersuchungen mit grobkörnigen Böden konnten die Einsatzbereiche von Erddruckschilden wesentlich ausgeweitet werden. Den erarbeiteten Einsatzbereichen von Erddruckschilden nach Abbildung 8-4 wurden ausgewählte Kornverteilungslinien von erfolgreich aufgefahrenen Vortrieben und deren Konditionierungsparametern aus Abbildung 3-3 gegenübergestellt. Diese Kornverteilungslinien sind in Abbildung 8-5 punktiert dargestellt. Bei den durchgeführten Vortrieben und den Einsatzgrenzen der Erddruckschilde sind hinsichtlich der eingesetzten Konditionierungsmittelparameter und der jeweiligen Kornverteilungslinie große Übereinstimmungen zu erkennen. Die entwickelte Abbildung 8-4 erscheint daher zur Beschreibung der Einsatzgrenzen von Erddruckschilden geeignet zu sein.



**Toulouse** hauptsächlich unterhalb GWS, Schaum + Anti-Ton-Additive  
**Aviles** 2.5 bar Meerwasser Schaum + Polymere  
**Botlek** 3.6 bar Wasserdruck Schaum + Polymere  
**Turin** hauptsächlich oberhalb GWS, Schaum + Polymere

Abbildung 8-5: Einsatzbereiche von Erddruckschilden sowie Kornverteilungslinien und Konditionierungsparameter ausgewählter Vortriebe

Auf Grundlage der Versuchserkenntnisse sind in Tabelle 8-2 die wesentlichen Eigenschaften von konditionierten, grobkörnigen Lockergesteinen aufgeführt. Die Randbedingungen für die Verarbeitbarkeit hinsichtlich der Setzmaße von ca. 10 oder 20 cm basieren auf den Auswertungen bisheriger Praxiserfahrungen. Die Kompressibilität des konditionierten, grobkörnigen Lockergesteins ist abhängig von geometrischen und verfahrensbedingten Parametern der Schildmaschine und lag beim betrachteten Beispiel bei 1,9 % (vgl. Abschnitt 3.1). Die Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums sollte bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels den Wert von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s nicht überschreiten. Diese drei Randbedingungen sind für die Bestimmung der Einsatzgrenzen eines Erddruckschilds wesentlich.

Tabelle 8-2: Randbedingungen der wesentlichen Eigenschaften des Stützmediums

Randbedingung	Eigenschaften des konditionierten Materials	Anmerkungen
Verarbeitbarkeit	$s^\# = 10 \text{ cm} \cup s^\# = 20 \text{ cm}$	Aufgrund bisheriger Auswertungen sollte das Setzmaß $s^\#$ bei ca. 10 oder 20 cm liegen
Kompressibilität	z. B. $\epsilon_K = 1,9 \%$	In Abhängigkeit der geometrischen Abmessungen der Schildmaschine
Wasserdurchlässigkeit	$k < 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	Für Vortriebe unterhalb des GW-Spiegels

mit  $k =$  Wasserdurchlässigkeit  
 $s^\# =$  Setzmaß  
 $\epsilon_K =$  Kompressibilität des Materials

Die Parameter der Dichte, der Flügelscherfestigkeit und der Stabilität sind hingegen weniger bedeutend, um einen erfolgreichen Vortrieb mit einem Erddruckschild zu gewährleisten. Tabelle 8-3 zeigt die Randbedingungen dieser Eigenschaften. Allerdings ist bei den Untersuchungen zur Flügelscherfestigkeit zu beachten, dass erhöhte Werte zu einem höheren erforderlichen Drehmoment des Schneidrads und der Förderschnecke bzw. möglicherweise einem höheren Verschleiß an Abbauwerkzeugen und weiteren Komponenten führen können.

Tabelle 8-3: Randbedingungen der weniger bedeutenden Eigenschaften des Stützmediums

Randbedingung	Eigenschaften des Lockergesteins	Anmerkungen
Dichte	$1,00 \text{ kg/l} < \rho_{cond \text{ Soil}} < 2,00 \text{ kg/l}$	In Abhängigkeit des Bodens und der Injektionsraten der jeweiligen Konditionierungsmittel
Flügelscherfestigkeit	$\tau_{cond} \ll \tau_{uncond}$	
Stabilität	bis zu 20 % Volumenreduzierung	

mit  $\rho_{cond \text{ Soil}} =$  Dichte des konditionierten Materials  
 $\tau_{cond} =$  Flügelscherfestigkeit des konditionierten Materials  
 $\tau_{uncond} =$  Flügelscherfestigkeit des unkonditionierten Materials

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die Verwendung von Konditionierungsmitteln macht eine Erweiterung der Einsatzbereiche von Erddruckschilden auf grobkörnige Böden möglich.
- Durch die Verwendung mehrerer Konditionierungsmittel wie z. B. Polymere und Feinstoff Suspensionen sind Erddruckschilder auch in kohäsionslosen Böden unterhalb des Grundwasserspiegels einsetzbar, in denen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums eine reine Schaumkonditionierung nicht mehr ausreichend wäre.
- Es wurde erstmalig eine auf Laboruntersuchungen basierende Empfehlung zu den Einsatzbereichen von Erddruckschilden in grobkörnigen Lockergesteinen unter Verwendung von Konditionierungsmitteln entwickelt.
- Für die konditionierten Lockergesteine wurden auf Grundlage der Untersuchungen wesentliche Anforderungen zur Verarbeitbarkeit, Kompressibilität und Wasserdurchlässigkeit ermittelt.

### 8.3. Erkenntnisse aus den Ergebnissen zur Stützdruckberechnung und Empfehlungen für die Praxis

Mithilfe numerischer Berechnungen wurde der Einfluss der unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeiten im Baugrund, in der Abbaukammer und im Schneckenförderer auf den effektiven Stützdruck für die beispielhafte Vortriebssituation in Abschnitt 7.3 aufgezeigt.

Für Vortriebssituationen mit Erddruckschilden, die andere Randbedingungen hinsichtlich der Höhe der Überdeckung, Höhe des Grundwasserstands über der Tunnelfirste oder Abmessungen der Schildmaschine, der Abbaukammer sowie des Schneckenförderers haben, sind weitere Betrachtungen erforderlich, da diese Randbedingungen die Sickerströmungen im der Ortsbrust vorgelagerten Gleitkeil und dem darüber liegenden Prisma beeinflussen können (vgl. Abschnitt 7.3).

Aufgrund veränderter Randbedingungen, wie z. B. Schilddurchmesser, Höhe der Überdeckung, Durchmesser des Schneckenförderers, Länge der Abbaukammer und des Schneckenförderers sowie einer Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten dieser, erscheint eine Berücksichtigung der Randbedingungen in einem Anwendungsdiagramm zur Ermittlung des Stützdrucks in Anlehnung an *Anagnostou & Kovári* (vgl. [4]) nicht möglich. Aus diesem Grund wird empfohlen, im Vorfeld eines Projekts ein numerisches Modell des Baugrunds und der Schildmaschine zu erstellen. Mithilfe von numerischen Berechnungen und dem Abbilden der projektspezifischen Randbedingungen bzw. Veränderungen der Materialeigenschaften aufgrund der Konditionierung besteht die Möglichkeit, die Strömungsdrücke auf den der Ortsbrust vorgelagerten Gleitkeil und im Prisma zu bestimmen. Der Einfluss der Sickerströmungen auf den effektiven Stützdruck  $s'$  kann so projektspezifisch ermittelt werden.

Ein Eingangsparameter beim Verfahren von *Anagnostou & Kovári* [4] ist die durchschnittliche piezometrische Höhe an der Ortsbrust. Da diese jedoch nur sehr selten bestimmt wird, besteht für die Gewährleistung eines Ansatzes auf der „sicheren Seite“ für die Ermittlung eines effektiven Stützdrucks generell die Möglichkeit, an der Ortsbrust einen Porenwasserdruck von  $p = 0 \text{ kN/m}^2$  anzusetzen. Bei diesem Ansatz bleiben die Wasserdurchlässigkeiten in der Abbaukammer und in der Förderschnecke in Abhängigkeit der Konditionierung jedoch unberücksichtigt. Aus diesem Grund wird empfohlen, bei künftigen Vortrieben Messaufnehmer im Bereich der Abbaukammer zu installieren, die den Porenwasserdruck aufnehmen können, oder während des Vortriebs die Wasserdurchlässigkeiten des Materials in der Abbaukammer und in der Förderschnecke zu bestimmen bzw. abzuschätzen. Diese Werte könnten dann als Eingangsparameter für das Verfahren nach [4] dienen oder in das zu erstellende numerische Modell übernommen werden, so dass eine Bestimmung des daraus resultierenden Stützdrucks unter Berücksichtigung möglicher Sickerströmung erfolgen kann.

Um Proben des unter Druck stehenden Materials aus der Abbaukammer gewinnen zu können, besteht nach [138] die Möglichkeit, Druckzylinder an der Druckwand zu installieren. Diese Vorgehensweise kann genutzt werden, um an verschiedenen Bodenproben die Eigenschaften der konditionierten Materialien unter Druck zu bestimmen. Auf diese Weise wäre z. B. auch eine Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials in der Abbaukammer möglich, die Eingang im numerischen Modell finden könnte. So ließe sich eine realitätsnahe Betrachtung der Vortriebssituation hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums durchführen.

Durch die Installation zusätzlicher Aufnehmer von Porenwasserdrücken bzw. von Erddrücken in der Förderschnecke ist zudem die Abschätzung des Erddruck- bzw. Porenwasserdruckabbaus innerhalb der Förderschnecke möglich. Mithilfe der installierten Messaufnehmer kann auch der Einfluss der Konditionierung auf den jeweiligen Druck in diesem Bereich ermittelt werden.

Für eine weitergehende Untersuchung der Auswirkungen der Konditionierung auf den effektiven Stützdruck können verschiedene Ansätze, wie z. B. die Unterteilung des Prismas in mehr als zehn Abschnitte oder eine Flächengleichheit zwischen Ortsbrust und der der Ortsbrust zugewandten Fläche des Gleitkeils, verändert werden. Auf diese Weise wären z. B. die vertikale Kraft  $V'$  sowie die Kräfte infolge der Sickerströmung genauer bestimmbar.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit erläutert zunächst die Grundlagen zur Konditionierung von Lockergesteinen und zwei Verfahren zur Ermittlung des Stützdrucks bei Erddruckschilden. Anschließend erfolgt die Beschreibung des bisherigen Stands der Technik, wobei auf Erfahrungen bei Vortrieben mit Erddruckschilden und die Einsatzbereiche von EPB-Schilden ohne Verwendung von Konditionierungsmitteln eingegangen wird. Zudem werden verschiedene Übersichten zu den Einsatzbereichen von EPB-Schilden auf Grundlage empirischer Erfahrungen bei Vortrieben vorgestellt. Eine Beschreibung der wesentlichen Ergebnisse verschiedener Forschungseinrichtungen zur Konditionierung von Lockergesteinen schließt sich an.

Die Auswertung des Stands der Technik hat ergeben, dass bislang keine standardisierten Untersuchungsmethoden zu Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen unter atmosphärischen Bedingungen sowie zur Abschätzung der Eignung eines Bodens als Stützmedium existieren. Aus diesem Grund werden Versuchskonzepte erarbeitet und geeignete Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften der Konditionierungsmittel und konditionierten Böden aus anderen Bereichen ausgewählt.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass unterschiedliche Einflüsse auf die Konditionierungsmittel und die konditionierten Lockergesteine bestehen. Vor allem das verwendete Tensidprodukt sowie der Aufbau und der Typ der Schaumlanze haben einen großen Einfluss auf die Drainagezeit und die Bläschengröße der Schäume. Dabei kann sich z. B. die Drainagezeit von 40 g Schaum bei Wahl von verschiedenen Schaumlanzen und Konditionierungsmitteln um das 10-fache unterscheiden. Bei den Untersuchungen zu Boden-Schaum-Gemischen eigneten sich vor allem Schäume, deren Drainagezeiten für 40 g Schaum zwischen 600 und 700 Sekunden lagen und deren maximale Größe der Schaumbläschen unmittelbar nach Herstellung Werte zwischen 0,3 und 0,8 mm aufwies. Für weitere Konditionierungsmittel (Polymere und Polymersuspensionen sowie Feinstoffsuspensionen) werden die wesentlichen Einflussfaktoren, wie z. B. die Konzentration oder das Produkt des Polymers oder Feinstoffs, bestimmt. Für eine Gewährleistung der Pumpfähigkeit sollten die Feinstoffsuspensionen ein Ausbreitmaß größer 15 cm aufweisen. Auf Grundlage der Versuche zu den jeweiligen Eigenschaften erfolgt die Auswahl der Polymere und der Feinstoffsuspensionen, die für die anschließende Konditionierung von Böden genutzt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen mit konditionierten Lockergesteinen erfolgen Versuche mit Variation der Eigenschaften der Konditionierungsmittel als auch mit Variation der Eigenschaften der Lockergesteine. Es zeigt sich dabei, dass die Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, Kompressibilität und Wasserdurchlässigkeit des Stützmediums für die Bestimmung der Einsatzmöglichkeit einer Erddruckschildmaschine in grobkörnigen Böden wichtig sind. Es werden die Eigenschaften von konditionierten, grobkörnigen Böden mit Variationen der Konditionierungsmittel und der Kornverteilung ermittelt. Auf Basis der Versuchserkenntnisse können die Einsatzgrenzen für Erddruckschildmaschinen mit Schaumkonditionierung in grobkörnigen Böden abgeleitet werden. Unter Verwendung weiterer Konditionierungsmittel, wie Polymere und Feinstoffsuspensionen, erfolgen zahlreiche Untersuchungen zu den Eigenschaften der konditionierten Lockergesteine. Die Ergebnisse ermöglichen eine wesentli-

che Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde in Abhängigkeit verschiedener Konditionierungsmittel. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird erstmals eine auf Laboruntersuchungen basierende Empfehlung zu Einsatzbereichen von Erddruckschilden in grobkörnigen Böden entwickelt.

Die Wasserdurchlässigkeit der konditionierten Lockergesteine kann oftmals durch eine Verwendung geeigneter Konditionierungsmittel und -mengen im Vergleich zu unkonditionierten Böden reduziert werden. Bei einem Vortrieb kann daher bei ausreichender Konditionierung die Wasserdurchlässigkeit in der Abbaukammer und in der Förderschnecke geringer als die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund sein. Bei Ansatz dieser Annahme zeigen die Ergebnisse der numerischen Berechnungen, dass keine Erhöhung des effektiven Stützdrucks erforderlich ist. Eine Erhöhung des effektiven Stützdrucks kann hingegen dann erforderlich sein, wenn die Wasserdurchlässigkeit in der Förderschnecke und in der Abbaukammer deutlich höhere Werte als die Wasserdurchlässigkeit im Baugrund aufweist. Wenn hohe Wasserdurchlässigkeiten in der Abbaukammer und in der Förderschnecke zu erwarten sind, wird daher empfohlen, numerische Untersuchungen im Vorfeld eines Projekts durchzuführen. So können die projektspezifischen Einflüsse des Strömungsdrucks auf die Ermittlung der Größe des effektiven Stützdrucks abgeschätzt werden.

Für weitere Erkenntnisse im Bereich der Konditionierung von grobkörnigen Böden mit Erddruckschilden ist es sinnvoll, sowohl vortriebsbegleitende Untersuchungen als auch weitere Laborversuche mit konditionierten Lockergesteinen durchzuführen. Bei vortriebsbegleitenden Untersuchungen sollten Proben des konditionierten Materials aus der Abbaukammer gewonnen und diese hinsichtlich der Eigenschaften zur Verarbeitbarkeit, zur Kompressibilität und zur Wasserdurchlässigkeit unter Stützdruckbedingungen untersucht werden. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen ist es möglich, eine Einschätzung zur Verbesserung des Vortriebs hinsichtlich der Konditionierungsmittel und deren Mengen zu erarbeiten. Zur Ermittlung des Einflusses von Sickerströmungen im Baugrund auf die Berechnung des effektiven Stützdrucks nach *Anagnostou & Kovári* [4] ist es wichtig, dass der Porenwasserdruck an der Ortsbrust bzw. in der Abbaukammer bestimmt wird. Daher sollten bei künftigen Vortrieben in der Druckwand eingelassene Messaufnehmer zur Ermittlung des Porenwasserdrucks installiert werden. Zudem können Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Lockergesteins Erkenntnisse über den Einfluss der Konditionierung auf den erforderlichen Stützdruck liefern.

In weiteren Laborversuchen sollten einzelne, ausgewählte Böden in einem Versuchsbehälter unter Stützdruckbedingungen konditioniert und durchmischt werden. Die wesentlichen Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit, Kompressibilität und Wasserdurchlässigkeit des konditionierten Materials sind dabei zu untersuchen. Durch den Vergleich der Ergebnisse der unter atmosphärischen Bedingungen und der bei Druckbeaufschlagung konditionierten Böden ist eine Ermittlung dieses Einflusses möglich. Mithilfe weiterer experimenteller Untersuchungen kann zudem eine rheologische Charakterisierung der konditionierten Lockergesteine erfolgen, so dass eine Entwicklung eines Mehrphasenmodells möglich ist, welches die Basis für eine realitätsnahe Berechnungsmethode bildet. Diese Berechnungsmethode kann anschließend zur Analyse der Stabilität der Ortsbrust bei Vortrieben mit EPB-Schilden dienen.



## 10. Literaturverzeichnis

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM): Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete: ASTM C143/C 143M-00, 2003
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM): Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM D2434-68, 2000
- [3] Anagnostou, G., Kovári, K.: Die Stabilität der Ortsbrust bei Erddruckschilden, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, 29, 1994, S. 27 - 34
- [4] Anagnostou, G., Kovári, K.: Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, 1996, S. 165 - 173
- [5] Anagnostou, G., Kovári, K.: The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, 1994, S. 165 - 174
- [6] ArGe Neuer Schlüchterner Tunnel: Ausbaustrecke Frankfurt a. M. – Göttingen, Neubau und Erweiterung Schlüchterner Tunnel, Statik Ortsbruststabilität, geschlossener Modus, SSTBAT037\_BB70PI10d\_, 2006, unveröffentlicht
- [7] Babendererde, L.: Developments in polymer application for soil conditioning in EPB-TBMs, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Sao Paulo, 1998, S. 691 - 694
- [8] Babendererde, L.: TBM mit Slurry- bzw. Erddruckstützung – Einsatzbereiche und Zuverlässigkeitsanalyse, Felsbau, Nr. 5, 2003, S. 155 - 160
- [9] Babendererde, T., Hahn, C.: Ausbläuersicherheit, Stützdruck und Wirtschaftlichkeit bei Druckluftestiegen in durchlässigen Böden bei geringer Überdeckung, Forschung und Praxis 43, STUVA-Tagung Hamburg, 2009, S. 104 - 108
- [10] Bär, F.: Abfallrechtliche Herausforderungen bei der Verwertung von mineralischen Massen, Felsbaumagazin, Heft 4, 2010, S. 253 - 268
- [11] Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung, Wasserwirtschaft - Wassertechnik (WWT), 1964, S. 165 - 169
- [12] Bezuijen A., Joustra, J. F. W., Talmon, A. M, Grote, B.: Pressure gradients and muck properties at face of an EPB, 5<sup>th</sup> int. Symp. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 15-17 June, ISSMGE-TC28, Amsterdam, The Netherlands, 2005
- [13] Bezuijen, A., Joustra, J .F. W., Talmon, A. M., Grote, B.: Pressure gradients at the tunnel face of an Earth Pressure Balance shield, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Istanbul, 2005, S. 809 - 814
- [14] Bezuijen, A., Puiksma, J. P., Meerten, H. H.: Pore Pressures in front of tunnel, measurements, calculations and consequences for stability of tunnel face, Proc. Int. Symp. on Modern Tunnelling Science and Techn. Kyoto, 2001, S. 799 - 804

- [15] Bezuijen, A., Schaminée, P. E. L., Kleinjan J. A.: Additive testing for earth pressure balance shields, Proc. 12<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Juni 1999, Rotterdam, Balkema, volume 3, 1999, S. 1991 - 1996
- [16] Bezuijen, A., Schaminée, P. E. L.: Model experiments using foam - simulating the drilling with an EPB shield, Geodelft report, BF 51010, 2000, unveröffentlicht
- [17] Bezuijen, A., Schaminée, P. E. L.: Simulation of the EPB-shield TBM in model test with foam as additive, Proc. IS-Kyoto 2001 conference on Modern Tunneling Science and Technology, 2001, S. 935 - 940
- [18] Bezuijen, A., Talmon, A. M., Joustra, J. F. W., Grote, B.: Pressure gradients at the EPBM face, J. of. Tunnels and Tunnelling International, Dec, 2005, S. 14 - 17
- [19] Bezuijen, A.: Foam used during EPB Tunnelling in saturated sand, description of mechanisms, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Helsinki, 2011
- [20] Bezuijen, A.: The influence of permeability on the properties of a foam mixture in a TBM, 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground – IS Toulouse 2002, 2002, S. 23 - 28
- [21] BMG Engineering AG: Environmental Risk Assessment – Use of MEYCO Fix SLF in tunnel constructions, 2007
- [22] Borghi, X.: Lubrication and soil conditioning in pipejacking and tunneling, PhD Thesis, Cambridge University, 2006
- [23] Borio, L., Peila, D., Oggeri, C., Pelizza, S.: Effects of foam on soil conditioned behaviour, In: Safe Tunneling For The city and for The Environment, 35<sup>th</sup> World Tunnel Congress 2009 - Safe tunneling for the city and for the Environment, Budapest 24. - 28. May, 2009
- [24] Borio, L., Peila, D.: Study of the Permeability of Foam Conditioned Soils with Laboratory Tests, American Journal of Environmental Sciences 6 (4), 2010, S. 365 - 370
- [25] Borio, L., Picchio, A., Peila, D., Pelizza, S.: Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Helsinki, 2011
- [26] Budach, C.: Neue Untersuchungen zur Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden, in: 50 Jahre STUVA 1960 – 2010: Vergangenheit trifft Zukunft, 2010, S. 252 - 261
- [27] Bundesministerium der Justiz: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe, 2005
- [28] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), 2009
- [29] Burger, W.: Schneidräder für Lockergestein: Prinzipien und Auslegungsaspekte, Tunnel, Nr. 2, 2006, S. 8 - 19
- [30] Castany, G.: Traite pratique des eaux souterraines. 2 ed., Dunod, Paris, 1967

- [31] Condat S. A.: „Biochemical degradation-kinetics“ für das Produkt CLB F4, 2011, unveröffentlicht
- [32] Darcy, H.: Les fontains publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris, 1856
- [33] DB ProjektBau GmbH (RB Mitte): Bau des Neuen Kaiser-Wilhelm-Tunnels, Strecke 3010 / Koblenz - Perl, Teil D: Technische Vorbemerkungen zur Leistungsbeschreibung, 2008
- [34] DB ProjektBau GmbH (RB Mitte): Ersatzmaßnahme Schlüchterner Tunnel, Strecke 3600 / Frankfurt/M – Göttingen, Teil D: Technische Vorbemerkungen, 2005
- [35] DB ProjektBau GmbH (RB Südwest): Ausschreibungsunterlagen zum Großprojekt ABS/NBS Karlsruhe – Basel, PfA 9.1 Katzenbergtunnel, Vorbemerkungen zur Leistungsbeschreibung, Tunnelbau Maschinelle Bauweise, 2002
- [36] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Selbstverdichtender Beton, Ausgabe November 2003
- [37] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) - AK Schildstatik: Empfehlungen für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen, Tunnel, Nr. 7, 2005, S. 44 - 59
- [38] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB), Arbeitsgruppe „Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen“: Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen, Taschenbuch für den Tunnelbau 2011, 2010, S. 231 – 299
- [39] DIN 18121, T1: Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, April 1998
- [40] DIN 18122, T1: Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen, Juli 1997
- [41] DIN 18122, T2: Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze, September 2000
- [42] DIN 18124: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Korndichte, November 2007
- [43] DIN 18125, T1: Bestimmung der Dichte des Bodens, Teil 1: Laborversuche, August 1997
- [44] DIN 18130, T1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Teil 1: Laborversuche, Mai 1998
- [45] DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Juni 2006
- [46] DIN 4085: Baugrund - Berechnung des Erddrucks, Februar 1987
- [47] DIN 4085: Baugrund - Berechnung des Erddrucks, Mai 2011
- [48] DIN 4094, T4: Felduntersuchungen, Teil 4: Flügelscherversuche, Januar 2002
- [49] DIN 4126: Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden, August 1986

- [50] DIN EN 1015, T3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch), Mai 2007
- [51] DIN EN 1015, T6: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel, Mai 2007
- [52] DIN EN 12350, T2: Prüfung von Frischbeton, Teil 2: Setzmaß; Deutsche Fassung, August 2009
- [53] DIN EN 12350, T6: Prüfung von Frischbeton, Teil 6: Frischbetonrohddichte, März 2011
- [54] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton, Juli 2008
- [55] DIN EN 196, T1: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Mai 2005
- [56] DIN EN ISO 14688, T1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1, Januar 2003
- [57] DIN V 4126-100, T 100: Schlitzwände: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, April 1996
- [58] Dobrinski, P., Krakau, G., Vogel, A.: Physik für Ingenieure, B. G. Teubner, 1984
- [59] EFNARC (Hg.): Specification and Guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunnelling, 2001
- [60] EFNARC (Hg.): Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tunneling (TBM) in soft ground and hard rock, 2005
- [61] Egli, H., Langmaack, L.: Erddruckgestützter Vortrieb – Risiken und Chancen, Felsbau, Heft 4, 2008, S. 149 - 154
- [62] Elkadi, A., Partovi, M.: 3D Finite Element Analysis for Geotechnical & Tunnel Engineering, Unterlagen zu "midas GTS Training Course", Delft, 2010
- [63] Europäischer Rat: Richtlinie 67/548/EWG: Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe; Anhang VI: Allgemeine Anforderungen an die Einstufung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe und Zubereitungen, 27. Juni 1967
- [64] Galli, M.: Untersuchungen zur Nutzung von Tensidschäumen für die Konditionierung von kohäsionslosen Lockergesteinsböden bei EPB-Vortrieben unter realitätsnahen Randbedingungen, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit, 2009, unveröffentlicht
- [65] Graziani, A., Lembo-Fazi, A., Mocchino, M., Romualdi, P.: Face stability control for EPB tunnels in a non homogeneous till formation with highly permeable layers, Proceedings of The 7<sup>th</sup> International Symposium on "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground", Roma, 2011
- [66] Gudehus, G., Melix, P.: Standsicherheitsnachweise für Bauzustände von Tunneln in schwach kohäsivem Gebirge, Forschung + Praxis 30, 1985, S. 145 - 152

- [67] Hazen, A.: Some Physical Properties of Sands and Gravels with Special Reference to their Use in Filtration, 24<sup>th</sup> Annual Report, Massachusetts State Bureau of Health, Publ. Doc. 34, 1893, S. 539 - 556
- [68] Herrenknecht AG: Bahnbrechende Vortriebstechnik für unterirdische Verkehrssysteme, Schwanau, 2008
- [69] Herrenknecht, M., Maidl, U.: Einsatz von Schaum bei einem Erddruckschild in Valencia, Tunnel, Nr. 5, 1995, S. 10 - 19
- [70] Herrenknecht, M., Thewes, M., Budach, C.: Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart, Geomechanics and Tunnelling, No. 1, 2011, S. 11 - 35
- [71] Horn, M.: Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflächen von Tunneln, Landeskonferenz der ungarischen Tiefbauindustrie, Budapest (Deutsche Überarbeitung STUVA, Düsseldorf), 1961
- [72] Hutzler, S., Weaire, D.: The Physics of Foam, Clarendon press, Oxford, 1999
- [73] IBECO: Laborbericht Nr. 2004.57, Dispergierung von IBECO Bentonitprodukten unter Verwendung des HÄNY Mischaggregat HCM 300, 2004, unveröffentlicht
- [74] ISO 1920-2: Testing of concrete - Part 2: Properties of fresh concrete, 2005
- [75] ISO 4109: Fresh concrete - Determination of the consistency - Slump test, 1980
- [76] ISO 4793: Laboratory sintered (fritted) filters – Porosity grading, classification and designation, 1980
- [77] Janssen, H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band XXXIX, No. 35, 1895, S. 1045 - 1049
- [78] Kim, S. H., Tonon, F.: Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane – Drained case, Tunnelling and Underground Space Technology 25 (5), 2010, S. 526 - 542
- [79] Kirsch, A., Kolymbas, D.: Theoretische Untersuchungen zur Ortsbruststabilität, Bautechnik 82, Heft 7, 2005, S. 449 - 456
- [80] Kirsch, A.: On the face stability of shallow tunnels in sand, Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling, Band 16, 2009
- [81] Knaupe, W.: Baugrubensicherung und Wasserhaltung, Verlag für Bauwesen, VEB in Berlin, 1980
- [82] Kolymbas, D.: Geotechnik, Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2. Auflage, Springer, Berlin, 2007
- [83] Kosashvilli, G.: Untersuchungen zur Konditionierung von grobkörnigen Böden mit Tensidschäumen bei Vortrieben mit Erddruckschilden, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit, 2010, unveröffentlicht
- [84] Krapp, L., Pantartzis, P.: Besondere ingenieurgeologische und hydrologische Aufgaben beim Talsperrenbau in N-Griechenland, Mitt. Ing. u. Hydrogeol. Aachen, 32, 1989, S. 77 - 107

- [85] Krause, T.: Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erddruckgestützter Ortsbrust, Dissertation, Universität Braunschweig, Heft Nr. 24, 1987
- [86] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Band 1: Anorganische Chemie, Springer Verlag, 1980
- [87] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Auflage 17, 2007
- [88] Kusakabe, O., Nomoto, T., Imamura, S.: Geotechnical criteria for selecting mechanised tunnel system and DMM for tunnelling. Panel discussion, Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Vol. 4, 1997, S. 2439 - 2440
- [89] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA); Mitteilung M20; Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln - (Stand 6. November 2003), 2003
- [90] Lange, H.: Physikalisch-chemische Grundlagen der Wirkung von Tensiden und Buildern, aus Lindner Teil II, 1973, S. 2243 - 2297
- [91] Langmaack, L.: Advanced Technology of Soil Conditioning, North American Tunneling Congress, Boston 2000, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 2000, S. 525 - 540
- [92] Langmaack, L.: Ecological aspects of soil conditioning for EPB-TBM Projects, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Amsterdam, 2003, S. 733 - 736
- [93] Lautenschläger, K.-H., Schröter, W., Teschner, T., Bibrack, J.: Taschenbuch der Chemie, Harri - Verlag, 2001
- [94] Léca, E., Dormieux, L.: Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material, Géotechnique, 40 (4), 1990, S. 581 - 606
- [95] Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum: Skript Straßenbau-technik - Übung, Wintersemester 2010/2011
- [96] Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München: Studienunterlagen, Vorlesung: Statik von Tunnelbauwerken, Sommersemester, 2011, S. 3.1 - 3.34
- [97] Leinala, T., Grabinsky, M., Delmar, R., Collins, J. R.: Effects of foam soil conditioning on EPBM performance.: In I. A. Ozdemir (Editor), North American Tunneling 2000, Balkema Rotterdam, The Netherlands, 2000, S. 543 - 552
- [98] Leinala, T., Grabinsky, M., Klein, K.: A Review of Soil Conditioning Agents for Earth Pressure Balance Machine Tunneling, Canadian Tunneling Canadian, Tunneling, Association of Canada, 2002, S. 1563 - 1570
- [99] Leszczynski, M.: Barretted raft design for high-rise building applying 3D numerical tool, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2009), 2009, S. 1263 - 1266
- [100] Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L.: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb, Ernst und Sohn, Berlin, 1994

- [101] Maidl, U., Jonker, J.: Betuweroute: Erfahrungen mit dem Einsatz innovativer Schildvortriebstechnik, *Forschung + Praxis* 39, 2001, S. 52 - 57
- [102] Maidl, U., Wingmann, J.: Leistungsprognosen von Erddruckschilden im Lockergestein, *Geomechanics and Tunnelling*, Volume 2, 2009, S. 189 - 197
- [103] Maidl, U.: Aktive Stützdrucksteuerung bei Erddruckschilden, *Bautechnik* 74, Heft 6, 1997, S. 376 - 380
- [104] Maidl, U.: Einsatz von Schaum für Erddruckschilde - Theoretische Grundlagen der Verfahrenstechnik, *Bauingenieur* (70), 1995, S. 487 - 495
- [105] Maidl, U.: Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenkonditionierung mit Schaum, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1995
- [106] Mair, R., Merritt, A., Borghi, X., Yamazaki, H., Minami, T.: Soil conditioning for clay soils, *Tunnels and Tunnelling International*, April, 2003, S. 29 - 33
- [107] Meißner, H.: Tunnelbau unter Tage - Empfehlungen des Arbeitskreises 1.3 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 2, *geotechnik* 19, Nr. 2, 1991, S. 99 - 108
- [108] Merrit, A.: Conditioning of clay soils for tunneling machine screw conveyors, Ph.D. Thesis, Cambridge, 2004
- [109] Metroselskabet: Cityringen, CW-GT-1, Environment, General Technical Specification, MCW-2-PMT-PM\_Gen-REP-201, Ausschreibungsunterlagen zum Projekt Cityringen, Kopenhagen, Dänemark, 2009
- [110] Milligan, G.: Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipe jacking and micro-tunneling – a state of the art review, Pipe Jacking Research Group, 2000
- [111] Ministry of Defence (Hsg.): Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing), Defence Standard 42 - 40, Defence Procurement Agency, Glasgow, 2002
- [112] Mohkam, M., Wong, Y. W.: Three-dimensional stability analysis of the tunnel face under fluid pressure, Proc. 6<sup>th</sup>, Int. Conf. on Numerical methods in Geomechanics, Innsbruck, 1988, S. 2271 - 2278
- [113] New York State Department of Transportation: Test procedure for specific surface analysis, Geotechnical test procedure, April 2007
- [114] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guideline 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, 2006
- [115] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guideline 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, 2004
- [116] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guideline 203: Fish, Acute Toxicity Test, 1992
- [117] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guideline 301 B und 302 B: CO<sub>2</sub> Evolution Test, 1992
- [118] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guideline 302 B: Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/EMPA Test, 1992

- [119] Peila, D., Oggeri, C., Borio, L.: Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications, in: *Underground Facilities for Better Environment and Safety*, Agra, 22 - 24 September 2008, New Dehli: Aravali Printers & Publishers, vol. 2, 2008, S. 881 - 891
- [120] Peila, D., Oggeri, C., Borio, L.: Using the slump test to assess the behaviour of conditioned soils for EPB Tunneling, *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XV (3), August, 2009, S. 167 - 174
- [121] Peila, D., Oggeri, C., Vinai, C.: Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, S. 1622 - 1625
- [122] Pena, M.: *Foam as a Soil Conditioner in Tunnelling: Physical and Mechanical Properties of Conditioned Sands*, Ph.D. Thesis, Oxford, 2007
- [123] Pena, M.: Soil conditioning for sands, *Tunnels and Tunnelling International*, July, 2003, S. 40 - 42
- [124] Peron, J. Y., Marcheselli, P.: Construction of the 'Passante Ferroviario' link in Milan, Italy, lots 3P, 5P and 6P, excavation by large earth pressure balanced shield with chemical foam injection, *Tunnelling 94, Conf. Proc.*, London: Chapman and Hall, 1994, S. 679 - 707
- [125] Persönliche Korrespondenz mit midas GTS, insbesondere Dr. Ahmend Elkadi und Pranseh Chatterjee, Delft, 4. - 5. März, 2010
- [126] Piaskowski, A., Kowalewski, Z.: Application of tixotropic clay suspensions for stability of vertical sides of deep trenches without strutting, 6<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE Montreal, Vol. III, 1965, S. 526 - 529
- [127] Prinz, H., Strauß, R.: *Abriss der Ingenieurgeologie*, Elsevier, München, 2006
- [128] Psomas, S.: *Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications*, M.-Sc. Thesis, University of Oxford, 2001
- [129] Quebaud, S., Morel, E.: Verwendung von Schäumen im Mikrotunnelbau, No Dig-Tagung, Dresden, 1995, S. 375 - 398
- [130] Quebaud, S., Sinai, M., Henry, J. P.: Use of chemical foam for improvements in drilling by earth-pressure balance shields in granular soils, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 2, 1998, S. 173 - 180
- [131] Rivas, J. L., Jiménez, A., Videra, O., Gégout, P., Vallon, F., Pegon J.-L.: Reducing the environmental impact of tunnel boring, in: *Technology Innovation in Underground Construction*, Routledge Chapman & Hall, 2009
- [132] Ruse, N.: *Räumliche Betrachtung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb*, Dissertation, Universität Stuttgart, Heft 51, 2004
- [133] Schick, C.: *A Mathematical Analysis of Foam Films*, Dissertation, Fachbereich Mathematik, Universität Kaiserslautern, 2004
- [134] Schimohr, C.: *Untersuchungen zur Konditionierung von gezielt variierten kohäsionslosen Lockergesteinsböden bei EPB-Vortrieben mit Tensidschäumen*, Ruhr-Universität Bochum, Diplomarbeit, 2010, unveröffentlicht



- [135] Schramm, L.: Emulsions, Foams, and Suspension, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005
- [136] Schwarz, J., Schmidt, J., Maidl, R., Handke, D.: Stützdruckberechnung beim Hydroschildvortrieb - Stand der Technik, dargestellt am City-Tunnel-Leipzig Vortrag und Veröffentlichung zum Geotechnik-Tag, 2006
- [137] Ströhle, P., Vermeer, P. A.: Die Stabilität der Ortsbrust bei strömendem Grundwasser, Tagungsband des 7. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 26. - 27.01.2010, 2010, S. 117 - 123
- [138] Talmon, A. M., Bezuijen, A.: Muck discharge by the screw conveyor of an EPB Tunnel Boring Machine, 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, IS- Toulouse, 2002, S. 89 - 94
- [139] Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, Chapman and Hall, 1948
- [140] Thewes, M., Budach, C., Bezuijen, A.: Foam Conditioning in EPB Tunnelling, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium Geotechnical Aspects of underground construction in soft ground, 2011
- [141] Thewes, M., Budach, C., Galli, M.: Laboruntersuchungen von verschiedenen konditionierten Lockergesteinsböden für Tunnelvortriebe mit Erddruckschildmaschinen, Tunnel, Nr. 6, 2010, S. 21 - 30
- [142] Thewes, M., Budach, C.: Dimensionierung von Schneckenförderern bei EPB-Schilden - Endbericht, Bochum, 2009, unveröffentlicht
- [143] Thewes, M., Budach, C.: Grouting of the annular gap in shield tunnelling - an important factor for minimisation of settlements and production performance, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Budapest, 2009
- [144] Thewes, M., Budach, C.: Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden, Geomechanics and Tunnelling, No. 3, 2010, S. 256 - 267
- [145] Thewes, M., Budach, C.: Mörtel im Tunnelbau: Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspaltes bei Tunnelvortriebsmaschinen, Bauportal, Nr. 12, 2009, S. 706 - 711
- [146] Thewes, M., Budach, C.: Parameters for Soil Conditioning with Foam in Coarse-Grained Soils with EPB-Shields, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Vancouver, 2010
- [147] Thewes, M., Budach, C.: Schildvortrieb mit Erddruckschilden: Möglichkeit und Grenzen der Konditionierung des Stützmediums, Tagungsband des 7. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 26. - 27.01.2010, 2010, S. 171 - 183
- [148] Thewes, M., Burger, W.: Clogging of TBM drives in clay - identification and mitigation of risks, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Istanbul, 2005, S. 737 - 742
- [149] Thewes, M., Burger, W.: Verklebungen beim Schildvortrieb in Tonformationen – Erkennen und Begrenzen technischer und vertraglicher Risiken, Forschung + Praxis 40, STUVA Tagung 2003 in Dortmund, 2003, S. 182 - 187

- [150] Thewes, M.: TBM Tunnelling Challenges - Redefining the State-of-the-Art. Keynote lecture at the 2007 ITA-AITES World Tunnel Congress, Prague, Tunnel, Vol. 16, 2007, S. 13 - 21
- [151] Thewes, M., Budach, C.: Soil Conditioning for EPB Shields: New Results from Research on Foams and Soil-Foam-Mixtures, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Helsinki, 2011
- [152] Tuckermann, R.: Übungsumdruck „Grenzflächenchemie“, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Technischen Universität Carolina-Wilhelmina zu Braunschweig, 2006
- [153] Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D.: Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research, Tunnelling and Underground Space Technology, 23 (3), Pergamon Press, 2008, S. 308 - 318
- [154] Vinai, R., Peila, D., Oggeri, C., Pelizza, S.: Laboratory tests for EPB tunnelling soil conditioning, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Prague, 2007, S. 273 - 278
- [155] Vinai, R.: A contribution to the study of soil conditioning techniques for EPB TBM applications in cohesionless soils, Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2006
- [156] Wilms, J.: Zum Einfluss der Eigenschaften des Stützmediums auf das Verschleißverhalten eines Erddruckschildes, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, Essen, 1995
- [157] Yenigül, N. B., Elkadi, A. S.: 3D settlement analysis using GIS and FEM: A case study in Sliedrecht area, The Netherlands, Proceedings of the Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 2010, S. 529 - 534

## 11. Anlagen

- Anlage A: - Herleitung von Formeln zur Konditionierung mit unterschiedlichen Mitteln  
- Anwendungsnomogramm zur Bestimmung der für den Vortrieb erforderlichen Schaum-, Luft-, Wasser- und Tensidvolumenströme  
- Herleitung von Formeln zum Verfahren der Stützdruckberechnung nach *Anagnostou & Kovári* (zu Kapitel 2)
- Anlage B: Beschreibungen zur Ermittlung der Eigenschaften von Konditionierungsmitteln und konditionierten Lockergesteinen (zu Kapitel 4)
- Anlage C: Ergebnisse zu Versuchen mit Konditionierungsmitteln (zu Kapitel 5)
- Anlage D: Ergebnisse zu Versuchen mit konditionierten Lockergesteinen (zu Kapitel 6)
- Anlage E: Ergebnisse zu Untersuchungen zur Stützdruckberechnung (zu Kapitel 7)

zu Abschnitt 2.3.2:

## Herleitung der Formel zur Konditionierung mit Wasser

$$w = \frac{m_w}{m_d}$$

$$m_d = V_d * \rho_d$$

$$V_W = \frac{m_w}{\rho_w}$$

$$\Delta V_W = V_{W,soll} - V_W$$

$$\Delta V_W = \frac{m_{w,soll}}{\rho_w} - \frac{m_w}{\rho_w}$$

$$\Delta V_W = (m_{w,soll} - m_w) * \frac{1}{\rho_w}$$

$$\Delta V_W = (w_{soll} - w) * \frac{m_d}{\rho_w}$$

$$\Delta V_W = (w_{soll} - w) * \frac{V_d * \rho_d}{\rho_w}$$

$$Q_W = (w_{soll} - w) * \frac{Q_S * \rho_d}{\rho_w}$$

$$Q_S = A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_W = (w_{soll} - w) * \frac{\rho_d}{\rho_w} * A_S * v_{vortrieb}$$

mit	$A_S =$	Abbaufäche des Schildes [m <sup>2</sup> ]
	$m_d =$	Masse des trockenen Bodens [kg]
	$m_w =$	Masse des Wassers [kg]
	$m_{w,soll} =$	Masse des erforderlichen Wassers im Boden [kg]
	$Q_S =$	Volumenstrom des trockenen Bodens [m <sup>3</sup> /s]
	$Q_W =$	Volumenstrom des Wassers [m <sup>3</sup> /s]
	$V_d =$	Volumen des trockenen Bodens [m <sup>3</sup> ]
	$v_{vortrieb} =$	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]
	$V_W =$	Volumen des Wassers [m <sup>3</sup> ]
	$w =$	Wassergehalt [%]
	$w_{soll} =$	einzustellender Wassergehalt [%]
	$\Delta V_W =$	Volumen des zuzugebenden Wassers [m <sup>3</sup> ]
	$\rho_d =$	Trockendichte [kg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_w =$	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]

zu Abschnitt 2.3.3:

## Herleitung der Formel zur Konditionierung mit Feinstoffsuspensionen

$$c_{susp} = \frac{V_{fein,susp}}{V_{susp}} * 100 = \frac{V_{fein,susp}}{V_{fein,susp} + V_w} * 100 = \frac{Q_{fein,susp}}{Q_{susp}} * 100 = \frac{Q_{fein,susp}}{Q_{fein,susp} + Q_w} * 100$$

$$SIR = \frac{V_{susp}}{V_S} * 100 = \frac{Q_{susp}}{Q_S} * 100$$

$$Q_{susp} = \frac{SIR}{100} * Q_S$$

$$Q_S = A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_{susp} = \frac{SIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_{susp} = Q_{fein,susp} + Q_w$$

$$Q_{susp} - Q_{fein,susp} = Q_w$$

$$Q_{susp} = \frac{Q_{fein,susp}}{c_{susp}} * 100$$

$$Q_{fein,susp} = \frac{c_{susp}}{100} * Q_{susp}$$

$$Q_{fein,susp} = \frac{c_{susp}}{100} * \frac{SIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_{susp} - Q_{fein,susp} = Q_w$$

$$Q_w = Q_{susp} - Q_{fein,susp}$$

$$Q_w = \frac{SIR}{100} * A_S * v_{vortrieb} - \frac{c_{susp}}{100} * \frac{SIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_w = \frac{SIR}{100} * \left(1 - \frac{c_{susp}}{100}\right) * A_S * v_{vortrieb}$$

- mit
- $A_S$  = Abbaufäche des Schilds [m<sup>2</sup>]
  - $c_{susp}$  = Konzentration der Suspension [%]
  - $Q_{fein,susp}$  = Volumenstrom des Feinstoffanteils [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_S$  = Volumenstrom des Bodens [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_{susp}$  = Volumenstrom der Feinstoffsuspension [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_w$  = Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/s]
  - $SIR$  = Suspension Injection Ratio (engl.) = Suspensionsinjektionsrate [%]
  - $V_{fein,susp}$  = Volumen des Feinstoffanteils in der Suspension [m<sup>3</sup>]
  - $V_S$  = Volumen des Bodens [m<sup>3</sup>]
  - $V_{susp}$  = Volumen der Suspension [m<sup>3</sup>]
  - $V_w$  = Volumen des Wassers [m<sup>3</sup>]
  - $v_{vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

zu Abschnitt 2.3.4:

## Herleitung der Formel zur Konditionierung mit Polymersuspensionen

$$c_P = \frac{Q_{Pol}}{Q_{Pol} + Q_W} * 100 = \frac{Q_{Pol}}{Q_P} * 100$$

$$PIR = \frac{Q_P}{Q_S} * 100$$

$$Q_P = \frac{PIR}{100} * Q_S$$

$$Q_S = A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_P = \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_P = Q_{Pol} + Q_W$$

$$Q_P - Q_{Pol} = Q_W$$

$$Q_P = \frac{Q_{Pol}}{c_p} * 100$$

$$Q_{Pol} = \frac{c_p}{100} * Q_P$$

$$Q_{Pol} = \frac{c_p}{100} * \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_W = Q_P - Q_{Pol}$$

$$Q_W = \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb} - \frac{c_p}{100} * \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_W = \frac{PIR}{100} * \left(1 - \frac{c_p}{100}\right) * A_S * v_{vortrieb}$$

- mit
- $A_S$  = Abbaufäche des Schilds [m<sup>2</sup>]
  - $c_p$  = Konzentration der Polymersuspension [%]
  - $PIR$  = Polymer Injection Ratio (engl.) = Polymerinjektionsrate [%]
  - $Q_P$  = Volumenstrom der Polymersuspension [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_{Pol}$  = Volumenstrom des Polymers [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_S$  = Volumenstrom des Bodens [m<sup>3</sup>/s]
  - $Q_W$  = Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/s]
  - $v_{vortrieb}$  = Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

zu Abschnitt 2.3.5:

## Herleitung der Formel zur Konditionierung mit Schaum

$$c_f = \frac{m_f}{m_L} * 100 \approx \frac{V_f}{V_L} * 100 = \frac{Q_f}{Q_L} * 100$$

$$FER = \frac{Q_F}{Q_L}$$

$$FIR = \frac{Q_F}{Q_S} * 100$$

$$p * V_A = \text{konstant} \quad \text{bzw.} \quad p * Q_A = \text{konstant}$$

$$p_{atm} \approx 1 \text{ bar}$$

$$Q_L = Q_f + Q_W$$

$$Q_F = Q_A + Q_L$$

$$Q_f = \frac{c_f}{100} * Q_L$$

$$Q_L = \frac{Q_F}{FER}$$

$$Q_f = \frac{c_f}{100} * \frac{Q_F}{FER}$$

$$Q_F = \frac{FIR}{100} * Q_S$$

$$Q_S = A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_F = \frac{FIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_f = \frac{c_f}{100} * \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_L = Q_f * \frac{100}{c_f}$$

$$Q_L = \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_W = Q_L - Q_f$$

$$Q_W = \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb} - \frac{c_f}{100} * \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_W = \left(1 - \frac{c_f}{100}\right) * \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_A = Q_F - Q_L$$

$$Q_A = \frac{FIR}{100} * A_S * v_{vortrieb} - \frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_A = \frac{FIR}{100} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_{A,atm} = Q_A * (p_{atm} + p_{supp})$$

$$Q_{A,atm} = \frac{FIR}{100} \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (p_{atm} + p_{supp}) * A_S * v_{vortrieb}$$

$$Q_{A,atm} = \frac{FIR}{100} \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (1 + p_{supp}) * A_S * v_{vortrieb}$$

$$LIR = \frac{Q_L + Q_P}{Q_S} * 100 = \frac{\frac{FIR/100}{FER} * A_S * v_{vortrieb} + \frac{PIR}{100} * A_S * v_{vortrieb}}{A_S * v_{vortrieb}} * 100$$

$$LIR = \left(\frac{\frac{FIR}{100}}{FER} + \frac{PIR}{100}\right) * 100$$

$$LIR = \frac{FIR}{FER} + PIR$$

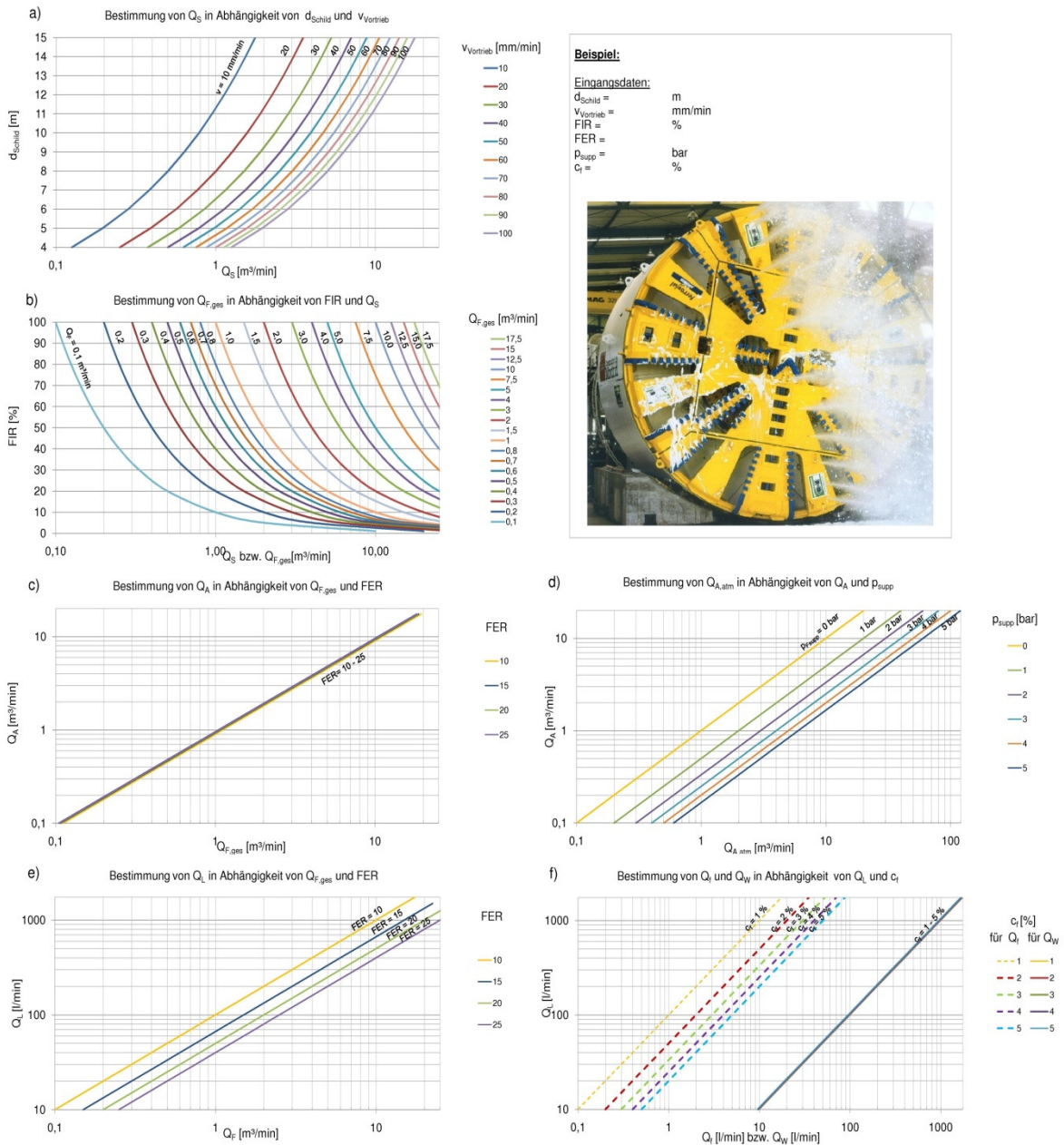
mit

$A_S$	=	Abbaufäche des Schilds [m <sup>2</sup> ]
$c_f$	=	Konzentration der Tensidlösung [%]
$FER$	=	Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]
$FIR$	=	Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate [%]
$LIR$	=	Liquid Injection Ratio (engl.) = Liquidinjektionsrate [%]
$m_f$	=	Masse des Tensids [kg]
$m_L$	=	Masse der Tensidlösung [kg]
$p$	=	Druck [bar]
$p_{atm}$	=	atmosphärischer Druck [bar]
$PIR$	=	Polymer Injection Ratio (engl.) = Polymerinjektionsrate [%]
$p_{supp}$	=	Differenzdruck zwischen Stützdruck und atmosphärischem Druck [bar]
$Q_A$	=	Volumenstrom der Luft [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{A,atm}$	=	Volumenstrom der Luft unter atmosphärischen Bedingungen [m <sup>3</sup> /s]
$Q_f$	=	Volumenstrom des Tensids [m <sup>3</sup> /s]
$Q_F$	=	Volumenstrom des Schaums unter Stützdruckbedingungen [m <sup>3</sup> /s]
$Q_L$	=	Volumenstrom der Tensidlösung [m <sup>3</sup> /s]
$Q_P$	=	Volumenstrom des Polymers [m <sup>3</sup> ]
$Q_S$	=	Volumenstrom des Bodens [m <sup>3</sup> /s]
$Q_W$	=	Volumenstrom des Wassers [m <sup>3</sup> /s]
$V_A$	=	Volumen der Luft [m <sup>3</sup> ]
$V_f$	=	Volumen des Tensids [m <sup>3</sup> ]
$V_L$	=	Volumen der Tensidlösung [m <sup>3</sup> ]
$v_{Vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]



zu Abschnitt 2.3.5:

# Anwendungsnomogramm zur Bestimmung der für den Vortrieb erforderlichen Schaum-, Luft-, Wasser- und Tensidvolumenströme



hier:

- mit  $c_f$  = Tensidkonzentration [%]
- $d_{Schild}$  = Durchmesser der Schildmaschine [m]
- FER = Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]
- FIR = Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate [%]
- $p_{supp}$  = Differenzdruck zwischen Stützdruck und atmosphärischem Druck [bar]
- $Q_A$  = Volumenstrom der Luft [ $m^3/min$ ]

---

$Q_{A,atm}$	=	Volumenstrom der Luft unter atmosphärischen Bedingungen [m <sup>3</sup> /min]
$Q_f$	=	Volumenstrom des Tensids [l/min]
$Q_F$	=	Volumenstrom des Schaums unter Stützdruckbedingungen [m <sup>3</sup> /min]
$Q_L$	=	Volumenstrom der Tensidlösung [l/min]
$Q_S$	=	Volumenstrom des Bodens [m <sup>3</sup> /min]
$Q_W$	=	Volumenstrom des Wassers [l/min]
$v$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [mm/min]

zu Abschnitt 2.4.1:

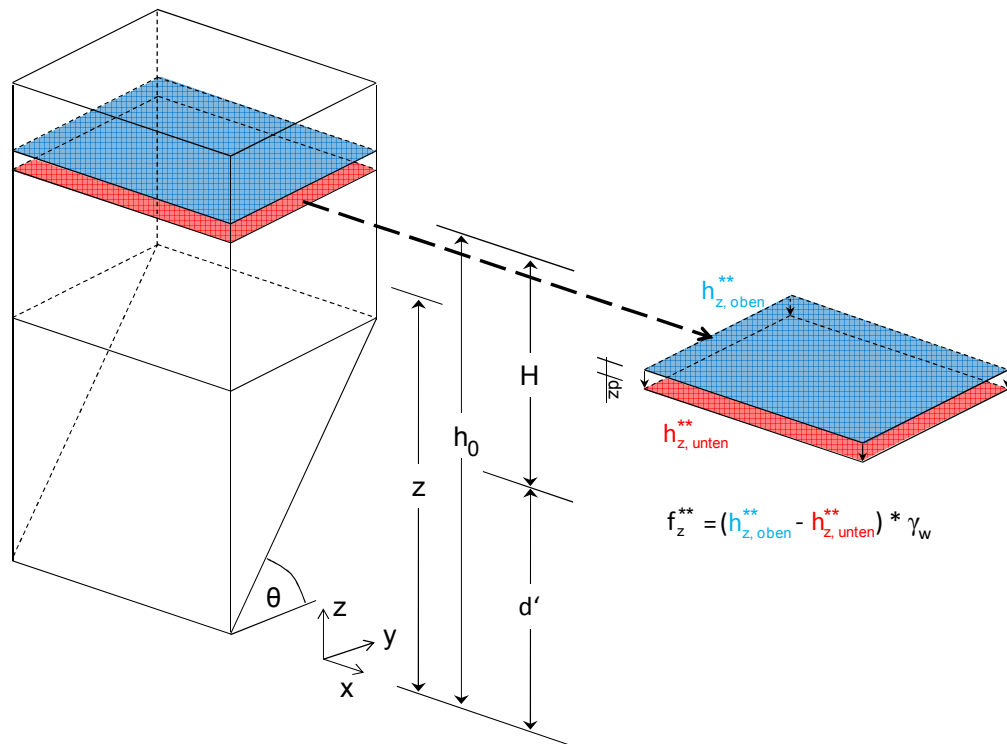
## Zur Ermittlung der vertikalen Kraft $V'$

Wasserspiegel über der Geländeoberkante (nach [4])

$$\sigma'_v = \underbrace{\frac{\gamma'_i - c_i * \frac{U}{A_B}}{k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi} * \left(1 - e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * H}\right)}_{\text{Anteil des effektiven Drucks des Bodens aufgrund der Silotheorie}} + \underbrace{\gamma_W * \alpha}_{\text{Anteil aus Strömungsdruck}}$$

$$\gamma_W * \alpha = \int_{d'}^{d'+H} \underbrace{f_z^{**}}_{\text{Sickerströmung}} * \underbrace{e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (z - d')}}_{\text{Abminderung des Strömungsdrucks aufgrund der Silotheorie}} dz$$

- mit
- $A_B =$  Fläche eines Bodenelements im Prisma [m<sup>2</sup>]
  - $c_i =$  Kohäsion der Bodenschicht [kN/m<sup>2</sup>]
  - $d' =$  Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
  - $f_z^{**} =$  vertikaler Strömungsdruck des Bodenelements in der Höhe z [kN/m<sup>2</sup>]
  - $H =$  Überdeckung [m]
  - $k_i =$  Silobeiwert der Bodenschicht [-]
  - $U =$  Umfang eines Bodenelements im Prisma [m]
  - $z =$  Höhe von Tunnelsohle bis zum betrachteten Element [m]
  - $\alpha =$  Beiwert nach [4] [m]
  - $\gamma'_i =$  Wichte der Bodenschicht unter Auftrieb [kN/m<sup>3</sup>]
  - $\gamma_W =$  Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]
  - $\sigma'_v =$  reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 > H$
  - $\varphi =$  Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]



Belastungen eines Elementes des Prismas mit der Höhe  $dz$  und den piezometrischen Höhen  $h_{z,unten}^{**}$  und  $h_{z,oben}^{**}$  und der resultierende Sickerströmung  $f_z^{**}$  in der Höhe  $z$

Zur Ermittlung des Einflusses aus den Sickerströmungen des Prismas müssen die gemittelten Sickerströmungen in entsprechender Tiefenlage über die Höhe des Prismas nach obiger Formel integriert werden (siehe auch [4]).

mit	$d'$	=	Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]
	$dz$	=	Höhe des betrachteten Elements [m]
	$f_z^{**}$	=	vertikale Sickerströmung des Bodenelements in der Höhe $z$ [kN/m <sup>2</sup> ]
	$H$	=	Überdeckung [m]
	$h_0$	=	Höhe des Grundwasserspiegels [m]
	$h_{z,oben}^{**}$	=	piezometrische Höhe auf der oberen Fläche des Elements [m]
	$h_{z,unten}^{**}$	=	piezometrische Höhe auf der unteren Fläche des Elements [m]
	$z$	=	Höhe von Tunnelsohle bis zum betrachteten Element [m]
	$\gamma_w$	=	Wichte des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ]
	$\theta$	=	Gleitflächenwinkel [°]

### Wasserspiegel unter der Geländeoberkante (nach [4])

Für Situationen, bei denen der Wasserspiegel unterhalb der Geländeoberkante liegt, können in Anlehnung an Abschnitt 2.4.1 nachfolgende Gleichungen angesetzt werden (vgl. [4]).

$$\sigma_v'^* = \sigma_z'^*(h_0) * e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (H + d' - h_0)} + \frac{\gamma_i' - c_i * \frac{U}{A_B}}{k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi} * \left(1 - e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (h_0 - d')}\right) + \gamma_W * a$$

$$\text{mit } \sigma_z'^*(h_0) = \frac{\gamma_i - c_i * \frac{U}{A_B}}{k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi} * \left(1 - e^{-k_i * \frac{U}{A_B} * \tan\varphi * (H + d' - h_0)}\right)$$

- mit  $A_B$  = Fläche eines Bodenelements im Prisma [m<sup>2</sup>]  
 $c_i$  = Kohäsion der Bodenschicht [kN/m<sup>2</sup>]  
 $d'$  = Breite bzw. Höhe des Gleitkeils = Durchmesser des Tunnels [m]  
 $H$  = Überdeckung [m]  
 $h_0$  = Höhe des Grundwasserspiegels [m]  
 $k_i$  = Silobeiwert der Bodenschicht [-]  
 $U$  = Umfang eines Bodenelements im Prisma [m]  
 $\alpha$  = Beiwert nach [4] [m]  
 $\gamma_i$  = Wichte der Bodenschicht ohne Auftrieb [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_i'$  = Wichte der Bodenschicht unter Auftrieb [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_W$  = Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_v'^*$  = reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 < H$   
 $\sigma_z'^*(h_0)$  = reduzierte vertikale Spannung zwischen Quader und Gleitkeil unter Berücksichtigung der Sickerströmung in der Höhe  $h_0$  [kN/m<sup>2</sup>], wenn  $h_0 < H$   
 $\varphi$  = Winkel der inneren Reibung des Bodens [°]

zu Abschnitt 4.1.4:

## Vorgehensweise zur Ermittlung der Eigenschaften von Schäumen

<b>Versuchsreihenfolge</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>
I.	Bestimmung der Dichte
II.	Ermittlung des Drainageverhaltens
III.	Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Risslineal
IV.	Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Mikroskop
V.	Untersuchung der Kompressibilität

zu Abschnitt 4.1.4:

## Bestimmung der Dichte

### Erforderliche Laborgeräte

- Probengefäße mit Deckel, Volumen ca. 2,5 l;  $0,8 < D/H < 1,2$
- Waage

### Versuchsvorbereitungen

-

### Versuchsbeschreibung

- Schaumproduktion
- Probenentnahme am entsprechenden Ende der Förderleitung
- Füllen des Behälters bis über die Höhe des Rands
- Deckel auf das Probengefäß zum luftdichten Verschluss aufschieben
- Probe von Restschaum säubern
- Wiegen der Probe
- Eintragen des Messwerts ins Datenblatt

Bestimmung der Dichte mit nachfolgender Formel:

$$\rho_F = \frac{m_F}{V_F}$$

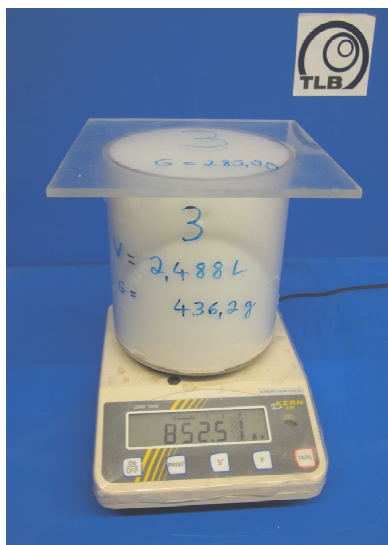
mit  $m_F$  = Masse des Schaums [kg]

$V_F$  = Volumen des Schaums [l]

$\rho_F$  = Dichte des Schaums [kg/l]

### Hinweise

Lufteinschlüsse sind zu vermeiden



Genutzter Behälter zur Bestimmung der Dichte von Schäumen

zu Abschnitt 4.1.4:

## **Ermittlung des Drainageverhaltens**

### Erforderliche Laborgeräte

- Filter 1 mit Halterung, max. Porenweite 100 – 160  $\mu\text{m}$  (vgl. Abschnitt 4.1.4)
- Taschenwaage
- Teigschaber
- Messbecher 50 ml
- Stoppuhr
- Eimer
- Waage

### Versuchsvorbereitungen

- Filter 1 in Halterung einklemmen und Taschenwaage unter Auslass positionieren
- Sättigung der Filterplatte vor der Schaumproduktion
  - i. 50 ml Wasser abwiegen und exakten Wert im Formblatt notieren
  - ii. Messbecher auf Taschenwaage aufstellen und tarieren
  - iii. Einfüllen des Wassers in die Filternutsche und Zeitmessung starten
  - iv. nach 1 Minute Durchfluss an Taschenwaage ablesen und im Formblatt festhalten

### Versuchsbeschreibung

- Schaumproduktion
- Probenentnahme am entsprechenden Ende der Förderleitung in den Eimer
- Waage unter dem Gewicht des gefüllten Eimers tarieren
- Messbecher auf Taschenwaage aufstellen und tarieren
- Einfüllen mithilfe des Teigschabers von  $80 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  Schaum in Filternutsche 1 und Zeitmessung starten
- Zeit für Drainage von 10 g, 20 g, 30 g und 40 g Liquid im Formblatt aufschreiben

### Hinweise

Das Einfüllen der Schaumprobe in den Trichter sollte innerhalb von 30 Sekunden nach Entnahme geschehen, um den Einfluss einer Drainage des Schaums vor dem Versuch zu verringern. Zwischen Sättigung der Filterplatte und Start des Versuchs sollte maximal eine Minute liegen.



Verwendeter Trichter zur Bestimmung der Drainagezeit bei Schäumen



zu Abschnitt 4.1.4:

## **Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit dem Risslineal**

### Erforderliche Laborgeräte

- Kristallisierschale
- Lichtplatte mit Holzaufsatz
- Stoppuhr
- Risslineal

### Versuchsvorbereitungen

- Lichtplatte an Stromanschluss anschließen und Holzaufsatz auflegen

### Versuchsbeschreibung

- Schaumproduktion
- Probenentnahme am entsprechenden Ende der Förderleitung
- Probe in die Kristallisierschale füllen
- Gefäß auf die Lichtplatte stellen und Zeitmessung starten
- maximale Durchmesser der Bläschen nach 0, 2 ½, 5, 10 und 30 Minuten an der Oberfläche der Probe mittels Risslineal bestimmen und im Versuchsformular festhalten
- Bläschengröße im Formblatt festhalten

### Hinweise

- Die Lichtquelle ist nach jeder Messung auszuschalten, um den Einfluss der Temperatur der Lichtquelle auf die Bläschengröße zu verringern.



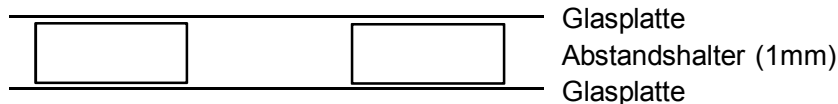
Versuchsaufbau zur Bestimmung der Bläschengröße von Schäumen mit dem Risslineal

zu Abschnitt 4.1.4:

## Bestimmung des maximalen Bläschendurchmessers mit Mikroskop

### Erforderliche Laborgeräte

- Probengefäße mit Deckel
- Teigschaber
- Waage
- Stoppuhr
- Mikroskop mit 40-facher Vergrößerung
- drei Objektträger mit nachfolgendem Aufbau



### Versuchsvorbereitungen

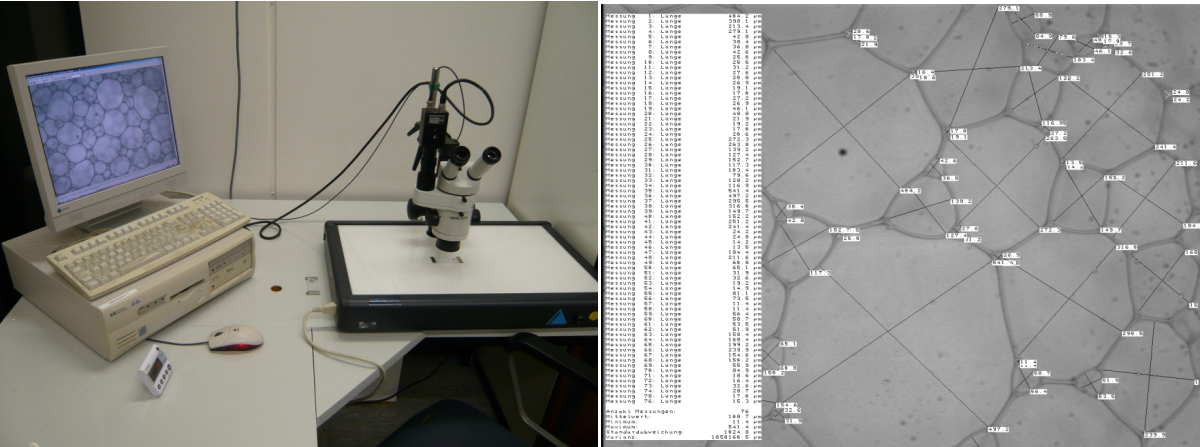
- Schaumproduktion
- Schaumproben
- Dichte bestimmen und Schaumproben zum Mikroskop nehmen

### Versuchsbeschreibung

- Entnahme einer kleinen Schaummenge und Aufbringen des Schaums auf einem Objektträger
- obere Glasplatte im Abstand von 1 mm auf die untere Platte legen (mit Abstandshalter)
- Mikroskop mit 40-facher Vergrößerung mit Programm Impac einstellen ( $x = 1,32 \mu\text{m je Pixel}$ ;  $y = 1,32 \mu\text{m je Pixel}$ )
- von oben in die Probe zoomen
- oberste Schicht fotografieren und Foto speichern
- Zeitpunkt  $\Delta t$  notieren (Zeitdifferenz zwischen Probenentnahme und Zeitpunkt  $t_0$ ); das erste Foto sollte nach 13 Minuten aufgenommen werden
- Lichtplatte unter Objektträger ausschalten; erst für die nächsten Fotos wieder anschalten, um Einfluss der Wärme der Lichtplatte auszuschalten
- Vorgang nach 5 min, 10 min und 30 min (jeweils nach  $\Delta t$ ) wiederholen
- Auswertung mit dem Programm Impac und Bestimmung der Durchmesser, der auf dem Bild vorhandenen Schaumbläschen
- Bestimmung des maximalen Durchmessers und der durchschnittlichen Durchmesser

### Hinweise

- immer gleiches  $\Delta t$  verwenden, um die Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Bläschengröße von Schäumen mit dem Mikroskop sowie Grafik zur Auswertung

zu Abschnitt 4.1.4:

## Untersuchung der Kompressibilität

### Erforderliche Laborgeräte

- Druckzylinder

### Versuchsvorbereitungen

- Öffnen der Einfüllöffnung durch Umlegen des Kugelhahns am Zylinderdeckel
- Öffnen des Überdruckventils am Druckzylinder

### Versuchsbeschreibung

- Schaumproduktion: Umschalten des Schaumstroms auf den Druckzylinder
- bei Füllhöhe von ca. 40 cm Abschalten des Schaumflusses
- alle Ventile und Kugelhähne am Druckzylinder schließen und Zeitmessung starten
- Höhe des Liquids und des Schaums an den Messstreifen ablesen und notieren
- nach 1 Minute Messung wiederholen
- Druckluftzuleitung öffnen und über Manometer langsam und ohne die Schaumprobe zu zerstören einen Überdruck von 0,5 bar erzeugen
- Höhe des Liquids und des Schaums an den Messstreifen ablesen und notieren
- Druck 1 Minute halten
- Höhe des Liquids und des Schaums an den Messstreifen ablesen und notieren
- Druck auf die Druckstufen 1,0, 1,5 und 2,0 bar erhöhen und 1 Minute lang halten

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kompressibilität von Schäumen

zu Abschnitt 4.2.4:

## Vorgehensweise zur Ermittlung der Eigenschaften von Polymeren und Polymersuspensionen

Versuchsreihenfolge	Versuchsbeschreibung
I.	Bestimmung der Marsh-Zeit
II.	Versuch mit der Kugelharfe nach <i>von Soos</i>

zu Abschnitt 4.2.4:

## **Bestimmung der Marsh-Zeit von Polymeren und Polymersuspensionen**

(nach Arbeitsanweisung AA 8.2.4/014 – 1/1 S&B Industrial Minerals GmbH)

### Erforderliche Laborgeräte

- Marsh-Trichter nach DIN 4126-100
- Messbecher mit Messmarke bei 1.000 ml
- Stoppuhren

### Versuchsvorbereitungen

- Polymere und Polymersuspension vor Einfüllen in den Marsh-Trichter dreimal hin- und hergießen

### Versuchsbeschreibung

- Auslaufdüse verschließen
- Suspension einfüllen
- Auslaufdüse freigeben und gleichzeitig Stoppuhr starten
- Zeit für den Durchfluss von 1.000 ml aufnehmen

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Marsh-Zeit von Polymeren und Polymersuspensionen

zu Abschnitt 4.2.4:

## **Versuch mit der Kugelharfe nach von Soos für Polymere und Polymersuspensionen**

(nach Arbeitsanweisung AA 8.2.4/116 – 1/2 und 2/2 S&B Industrial Minerals GmbH)

### Erforderliche Laborgeräte

- Kugelharfengerät nach DIN 4126
- Messbecher
- Stoppuhr

### Versuchsvorbereitungen

- Polymere und Polymersuspension vor Einfüllen in das Messglas dreimal hin- und hergießen

### Versuchsbeschreibung

- Suspension in den Messbecher einfüllen
- Kugelharfe langsam lotrecht absenken und Kugeln nach exakt einer Minute in die Suspension eintauchen
- Bestimmung der Kugel, die als Kugel mit der niedrigsten Nummer am gespannten Faden hängt

### Hinweise

- Zur Reinigung werden die Kugeln in Wasser eingetaucht und durch hin- und herschwenken bzw. durch Abtupfen getrocknet.



Versuch mit der Kugelharfe nach von Soos für Polymere und Polymersuspensionen

zu Abschnitt 4.3.4:

### **Vorgehensweise zur Ermittlung der Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen**

<b>Versuchsreihenfolge</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>
I.	Setz- und Ausbreitmaß
II.	Dichte



zu Abschnitt 4.3.4:

## **Bestimmung des Ausbreitmaßes von Feinstoffsuspensionen**

(in Anlehnung an DIN EN 1015-3)

### Erforderliche Laborgeräte

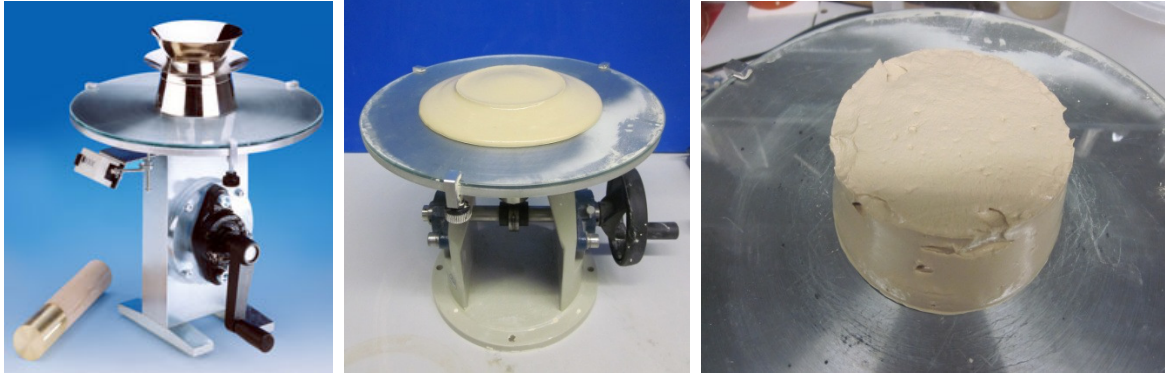
- Ausbreittisch nach DIN EN 1015-3
- Kegelstumpfform
- Stampfer
- Stahllineal
- Zollstock

### Versuchsvorbereitungen

- Feinstoffsuspension herstellen
- Vor jeder Prüfung sind die Scheibe des Ausbreittischs und die Innenfläche und die Kanten des Setztrichters mit einem feuchten Tuch zu säubern und trocken zu lassen. Falls der Tisch in den vorangegangenen 24 h nicht benutzt wurde, sind vor Inbetriebnahme zehn Umdrehungen durchzuführen.

### Versuchsbeschreibung

- Der Setztrichter ist mittig auf die Scheibe des Ausbreittischs zu stellen und die Feinstoffsuspension in zwei Schichten einzufüllen. Dabei wird jede Schicht durch mindestens zehn kurze Stöße mit dem Stampfer verdichtet, um ein gleichmäßiges Füllen des Setztrichters sicherzustellen. Während des Füllens ist der Setztrichter mit einer Hand auf die Scheibe zu drücken.
- Überstehende Feinstoffsuspension ist mit dem Abstreichlineal abzustreichen, und die freie Fläche der Scheibe ist zu säubern und trocken zu wischen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass am unteren Rand des Setztrichters alles stehende Wasser entfernt wird.
- Nach etwa 15 s ist der Setztrichter langsam vertikal anzuheben.
- Der Durchmesser der Feinstoffsuspension ist mit dem Messschieber in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen zu messen. Die Messwerte sind in Millimetern auf 1 mm gerundet anzugeben.
- Die Feinstoffsuspension wird auf der Scheibe ausgebreitet, indem der Ausbreittisch 15 Mal mit einer konstanten Frequenz von etwa einem Hub je Sekunde angehoben und fallengelassen wird.
- Der Durchmesser der ausgebreiteten Feinstoffsuspension ist mit dem Messschieber in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen zu messen (Ausbreitmaß). Die Messwerte sind in Millimetern auf 1 mm gerundet anzugeben.

Hinweise

Versuchsaufbau zur Bestimmung des Ausbreitmaßes von Feinstoffssuspensionen

zu Abschnitt 4.3.4:

## Bestimmung der Dichte von Feinstoffsuspensionen

### Erforderliche Laborgeräte

- 2 Dichtebehälter (D = ca. 12,0 cm, Höhe = ca. 15,0 cm, V = ca. 1,5 l) mit Deckel
- Waage

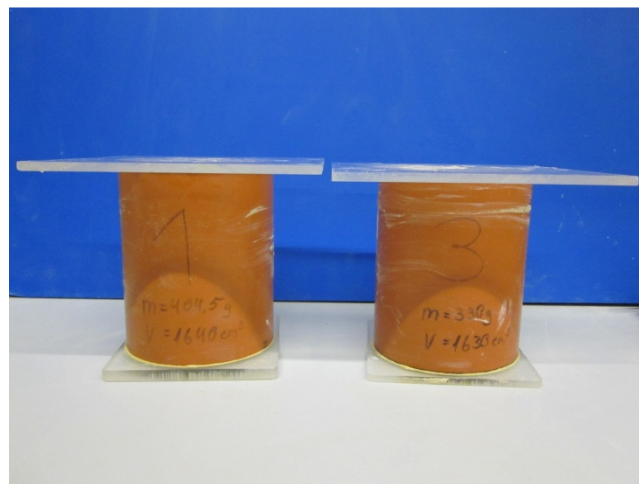
### Versuchsvorbereitungen

- Feinstoffsuspension mit einem Mischer in erforderlicher Konzentration und Menge durchmischen

### Versuchsbeschreibung

- Suspension in den Messbecher über den Rand einfüllen
- Deckel luftdicht aufsetzen und überschüssige Suspension mit einem Tuch auffangen bzw. befüllte Dichtebecher wiegen
- Dichtermittlung durch Bestimmung des Gewichts des befüllten Zylinders bei bekanntem Leergewicht und Volumen des Zylinders

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte von Feinstoffsuspensionen

zu Abschnitt 4.4.4:

### **Vorgehensweise zur Ermittlung der Eigenschaften von konditionierten Lockergesteinen**

<b>Versuchsreihenfolge</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>
0.	Vorversuche: Bestimmung der Injektionsmengen und Konditionierungsmittel zur Gewährleistung eines Setzmaßes von 10 bzw. 20 cm
I.	Bestimmung des Setzmaßes
II.	Ermittlung der Kompressibilität
III.	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit
IV.	Ermittlung der Dichte in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes
V.	Bestimmung der Flügelscherfestigkeit
VI.	Ermittlung der Stabilität

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Freifall-Mischer**

### Erforderliche Laborgeräte

- Freifall-Mischer
- Waage
- Schaufel

### Versuchsvorbereitungen

- Herstellung des Boden-Schaum-Gemischs
- Vorbereitung für Schaumproduktion treffen

### Versuchsbeschreibung

- zu nutzende Bodenprobe mit entsprechendem Wassergehalt in den Mischer geben und 1 Minute durchmischen
- Stoppen des Mixers, Einstellung des Mixers auf ca. 70° gegenüber der Horizontalen
- Herstellen des Schaums mit jeweiligen Parametern
- Bestimmung des Gewichts des Behälters inkl. Schaum
- Zugabe der gewünschten Menge Schaum über das Differenzgewicht
- Mischen mit Freifall-Mischer für 15 Sekunden, Untermischen des Schaums innerhalb von 30 Sekunden per Hand, weiteres Mischen von 15 Sekunden mit Freifall-Mischer
- Entnahme einer Boden-Schaum-Probe

### Hinweise



Verwendeter Freifall-Mischer

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung des Setzmaßes von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn bis zu 32 mm nach DIN EN 12350-2 sowie des Setzfließmaßes\***

### Erforderliche Laborgeräte

- Slump-Test ( $H = 300 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{oben}} = 100 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{unten}} = 100 \text{ mm}$ ) nach DIN EN 12350-2
- Waage
- Schaufel
- Stab aus Stahl
- Bodenplatte
- Stahllineal

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen

### Versuchsbeschreibung

- Die Form und die Bodenplatte sind anzufeuchten. Die Form ist auf die horizontale Bodenplatte zu stellen. Während des Füllvorgangs muss die Form an der Bodenplatte festgehalten werden (z. B. durch Betonsteine beschwert) bzw. der Prüfer muss auf beiden Trittlechen stehen.
- Die Boden-Schaum-Probe ist in drei Schichten in die Form zu geben, wobei jede Schicht nach dem Verdichten ungefähr ein Drittel der Höhe der Form einnimmt. Jede Schicht ist mit 25 Stößen des Stampfers zu verdichten. Die Stöße sind über die gesamte Fläche jeder Schicht gleichmäßig zu verteilen. Bei der untersten Schicht sind die Stöße mit leicht geneigtem Stampfer durchzuführen, wobei etwa die Hälfte der Stöße spiralförmig zum Mittelpunkt gerichtet wird. Bei der mittleren und oberen Schicht sind die Stöße durch die gesamte Dicke der jeweiligen Schicht auszuführen, wobei der Stampfer gerade bis in die tiefer liegende Schicht eindringt. Vor dem Füllen und Verdichten der obersten Schicht ist das Boden-Schaum-Gemisch über die Form hinaus zu füllen.
- Das Gewicht des eingebauten Boden-Schaum-Gemischs ist zu bestimmen, so dass über das Volumen die Dichte des eingebauten Materials abschätzbar ist.
- Wenn die Schicht durch den Verdichtungsprozess unter den oberen Rand der Form absinkt, ist Boden-Schaum-Gemisch hinzuzufügen, um stets ein Überstehen des Gemischs zu erreichen. Nach dem Verdichten der obersten Schicht ist die Oberfläche mit dem oberen Rand der Form durch Säge- und Walzbewegungen des Stahllineals bündig abzuziehen.
- Die Bodenplatte/-fläche ist von verschüttetem Boden-Schaum-Gemisch zu reinigen. Die Form ist langsam lotrecht hochzuziehen.
- Dieser Vorgang muss innerhalb von 2 bis 5 s durch gleichmäßiges Hochziehen der Form erfolgen, wobei diese weder seitlich verschoben noch gedreht werden darf.
- Der gesamte Vorgang vom Beginn des Einfüllens bis zum Hochziehen der Form ist ohne Unterbrechung innerhalb von 150 s durchzuführen.

- Unmittelbar nach dem Entfernen der Form ist das Setzmaß (h) zu bestimmen, indem die Differenz zwischen der Höhe der Form und dem höchsten Punkt des abgesetzten Prüfkörpers bestimmt wird. Die Ergebnisse sind auf 10 mm anzugeben.
- Mit dem Zollstock ist das Setzfließmaß\* 1 und das Setzfließmaß\* 2 in zwei Richtungen, parallel zu den Kanten der Bodenplatte, zu bestimmen. Die Ergebnisse sind auf 10 mm anzugeben und zu mitteln.

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung des Setzmaßes und Setzfließmaßes\* von konditionierten Böden

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung des Kompressionsverhaltens von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn von 32 mm**

### Erforderliche Laborgeräte

- Plexiglaszylinder (H = ca. 450 mm,  $d_{\text{innen}} = 165 \text{ mm}$ ) mit Druckluftanschluss im Deckel
- Waage

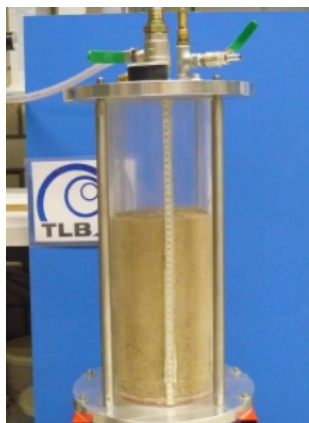
### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen

### Versuchsbeschreibung

- Wägung des Behälters inkl. des Boden-Schaum-Gemischs
- Plexiglaszylinder schräg halten und Material einfüllen
- Während des Befüllvorgangs Einschütten aus großer Höhe vermeiden
- Material in den Plexiglaszylinder bis auf ca. 2/3 der Höhe füllen und Probenoberfläche glätten
- Plexiglaszylinder in Halterungsstellen einbauen und Bestimmung der Füllhöhe durch Ablesen an drei angeklebten Messbändern
- Wägung des zurückbleibenden Materials im Behälter
- Bestimmung der Dichte des Materials im Plexiglaszylinder über Füllvolumen und Gewichts Differenz
- Einlegen eines Dichtungsringes und Verschließen des Deckels mit Schrauben
- Zufuhr von Druckluft mit bis zu 5 bar gewährleisten (Probe noch nicht belasten)
- Verschließen der abgehenden Absperrhähne
- Öffnen des Überdruckventils, dass es auf 4 bar eingestellt ist
- Zufuhr der Druckluft über entsprechenden Kugelhahn mit 0,5 bar
- Ablesen der Füllhöhe an den drei Messbändern
- Weitere Belastung mit den Druckstufen 1, 2, 3 und 4 bar und entsprechende Bestimmung der Füllhöhe

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kompressibilität von konditionierten Böden



zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn bis zu 32 mm nach DIN 18130-1**

### Erforderliche Laborgeräte

- Plexiglaszylinder (H = ca. 450 mm,  $d_{\text{innen}} = 165$  mm) mit Anschlüssen im Deckel und im Boden (Minstdurchmesser  $5 * d_{\text{max}}$ )
- Standzylinder
- Waage
- Stoppuhr
- entlüftetes bzw. abgestandenes Wasser
- Wasserbehälter mit Pumpe

### Versuchsvorbereitungen

- Wasserbehälter mit ausreichend abgestandenem Wasser und Pumpe vorbereiten
- Öffnen des Deckels
- Schlauch zwischen Überlauf und Zuführung am Boden entlüften, in dem Wasser in das Schlauchsystem eingebracht wird
- Luft in diesem Schlauch am unteren Ende des Zylinders durch Öffnen von Ventilen entweichen lassen, so dass Wasser am Boden des Zylinders steht
- Abstandshalter aus Gummi und Lochplatte auf den Boden des Zylinders legen, um ein Eindringen des Filters in das Leitungssystem zu verhindern
- Einbringen von grobem Filtermaterial (z. B. gewaschener und nasser Kies 8 – 16 mm) und anschließend Verdichten des Materials, Oberfläche glätten
- Einfüllen von entlüftetem Wasser bis kurz unterhalb der Filteroberfläche durch Öffnen des am Boden angebrachten Zulaufventils
- Einbau einer Lochplatte (zum groben Material hin) und Einlegen eines Siebs (zum feinen Material hin)
- Einbau eines feinen Filters (z. B. gewaschener Sand 1 – 2 mm) auf das Sieb und anschließendes Verdichten
- Wasserspiegel bis zur Oberkante des feinen Filters steigen lassen

### Versuchsbeschreibung

- Versuchsbeginn zeitlich festhalten
- Boden-Schaum-Material im Behälter wiegen und Material in 2 cm Lagen auf den feinen Filter einbauen und mit Stampfer verdichten
- Dichte des Boden-Schaum-Gemischs muss mittels Bestimmung des Volumens und Gewichts des eingebauten Materials entsprechend der Vorgabe eingehalten werden
- lagenweiser Einbau des Materials mit anschließender Verdichtung auf die erforderliche Dichte
- Einbau von Material bis zu einer Probenhöhe von ca. 10 cm
- Bestimmung der Dichte des Boden-Schaum-Gemischs
- Einbau und Verdichten des feinen Filtermaterials
- anschließend Einbau eines Siebs und Einsetzen einer Lochplatte

- groben Filter bis fast zur Zylinderoberkante einbauen und verdichten
- Lochplatte auflegen und Abstandshalter einbauen
- Verschließen des Zylinders und langsames Ansteigen des Wasserspiegels im Behälter bis zur Probenoberkante
- Einfüllen von entlüftetem Wasser oberhalb der Probe durch Einbringen von Wasser in diesem Bereich von oben – gleichzeitiges Entlüften dieses Filterabschnitts ermöglichen
- nach Füllen des oberen Filters mit Wasser, Ventile schließen
- Einstellen des gewünschten Gradienten  $i$  durch Variation der Höhe des Überlaufs
- Standzylinder auf ausgerichteter Waage unter Auslauf stellen, so dass durchströmtes Wasser gewogen werden kann
- Hebel des Wasserzulaufs am Boden des Zylinders langsam öffnen, so dass Bodenprobe durch Wasserdruck nicht zerstört wird
- Aufnahme des Zeitpunkts
- Wasserauslass öffnen
- Durch Bestimmung des Gewichts des durchströmten Wassers zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann die Wasserdurchlässigkeit bzw. deren Veränderung aufgenommen werden.
- Zeitintervalle (z. B. anfangs alle 5 Minuten, anschließend alle 30 Minuten) festlegen und Wasserdurchlässigkeit bestimmen
- ggf. Webcam nutzen, um Gewicht des durchströmten Wassers zu bestimmten Zeitintervallen zu bestimmen
- Aufzeichnen des Verlaufs der Wasserdurchlässigkeit des Materials

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von konditionierten Böden

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung des Ausbreitmaßes von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn von 8 mm nach DIN EN 1015-3**

### Erforderliche Laborgeräte

- Ausbreittisch nach DIN EN 1015-3
- Kegelstumpfform
- Stampfer
- Lineal
- Zollstock

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen
- Vor jeder Prüfung sind die Scheibe des Ausbreittischs und die Innenfläche und Kanten des Setztrichters mit einem feuchten Tuch zu säubern und trocken zu lassen. Falls der Tisch in den vorangegangenen 24 h nicht benutzt wurde, sind vor Inbetriebnahme zehn Umdrehungen durchzuführen

### Versuchsbeschreibung

- Der Setzrichter ist mittig auf die Scheibe des Ausbreittischs zu stellen und der konditionierte Boden in zwei Schichten einzufüllen. Dabei wird jede Schicht durch mindestens zehn kurze Stöße mit dem Stampfer verdichtet, um ein gleichmäßiges Füllen des Setztrichters sicherzustellen. Während des Füllens ist der Setzrichter mit einer Hand auf die Scheibe zu drücken.
- Überstehender Boden ist mit dem Abstreichlineal abzustreichen, und die freie Fläche der Scheibe ist zu säubern und trocken zu wischen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass am unteren Rand des Setztrichters alles stehende Wasser entfernt wird.
- Nach etwa 15 s ist der Setzrichter langsam vertikal anzuheben.
- Der Durchmesser des konditionierten Bodens ist mit dem Messschieber in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen zu messen. Die Messwerte sind in Millimetern auf 1 mm gerundet anzugeben
- Der konditionierte Boden wird auf der Scheibe ausgebreitet, indem der Ausbreittisch 15 Mal mit einer konstanten Frequenz von etwa einem Hub je Sekunde angehoben und fallengelassen wird.
- Der Durchmesser des ausgebreiteten, konditionierten Bodens ist mit dem Messschieber in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen zu messen (Ausbreitmaß). Die Messwerte sind in Millimetern auf 1 mm gerundet anzugeben.

### Hinweise

- Es sind drei Proben zu untersuchen. Die Ergebnisse der Bestimmung des Setzmaßes gehen in die Verfahrenstechnik zur Bestimmung der Dichte von Boden-Schaum-Gemischen ein.



Versuchsaufbau zur Bestimmung des Ausbreitmaßes von konditionierten Böden

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung der Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn von 8 mm nach DIN EN 1015-6**

### Erforderliche Laborgeräte

- Messgefäß mit ca. 1 l Fassungsvermögen mit definiertem Volumen (V) und Gewicht  $m_1$
- Waage
- Schaufel
- Kelle
- Vibrationstisch, der in Vertikalrichtung mit einer Frequenz von  $(50 \pm 1)$  Hz und einer Amplitude von  $(0,375 \pm 0,050)$  mm ausgestattet ist

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen
- In Abhängigkeit der Konsistenz des Boden-Schaum-Gemischs ist das geeignete Verfahren zu wählen:

<b>Ausbreitmaß</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Dichte</b>
< 140 mm	Rüttelverfahren
140 mm bis 200 mm	Rüttelverfahren oder „Schock“-Verfahren
> 200 mm	Einfüllverfahren

### Versuchsbeschreibung

#### **Rüttelverfahren**

- Das Messgefäß ist mit der Schaufel soweit mit dem Boden-Schaum-Gemisch zu füllen, dass dieses über den Gefäßrand übersteht. Das Gefäß ist auf den Vibrationstisch zu stellen und 30 Sekunden zu rütteln, bis kein weiteres Setzen mehr beobachtet wird.
- Zugabe des Boden-Schaum-Gemischs während des Rüttelns bis dieser über dem Gefäßrand übersteht. Mit dem Abstreichlineal ist das überstehende Material abzustreichen, bis die Oberfläche eben und bündig mit dem Gefäßrand ist. Abwischen des Rands mit einem feuchten Tuch.

#### **„Schock“-Verfahren**

- Das Messgefäß ist mit der Schaufel etwa bis zur Hälfte zu füllen. Zur Verdichtung des konditionierten Materials ist das Gefäß abwechselnd an beiden Seiten um 30 mm anzuheben und insgesamt zehnmal auf eine feste, starre Unterlage mit einer Masse von mindestens 25 kg fallen zu lassen.
- Anschließend ist das Messgefäß bis zum oberen Rand mit weiterem Material zu füllen und das konditionierte Material in gleicher Weise zu verdichten. Dann ist weiterer Boden zuzugeben, bis er über den oberen Rand übersteht. Mit dem Abstreichlineal ist überstehendes konditioniertes Material abzustreichen, bis die Oberfläche eben und bündig mit dem Gefäßrand ist. Abwischen des Rands mit einem feuchten Tuch.

**Einfüllverfahren**

- Das konditionierte Material ist mit der Schaufel in das Messgefäß so einzufüllen, dass es von der Mitte des Gefäßes zu dessen Außenfläche fließt. Dann ist weiteres Material zuzugeben, bis es über den oberen Rand übersteht. Mit dem Abstreichlineal ist das überstehende Material abzustreichen, bis die Oberfläche eben und bündig mit dem Gefäßrand ist. Abwischen des Rands mit einem feuchten Tuch.
- Anschließend ist das Gewicht des gefüllten Behälters ( $m_2$ ) zu bestimmen.
- Es gilt:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

**Hinweise**

- Es sind zwei Proben zu untersuchen.
- Die Ergebnisse sind auf 0,01 kg/l zu runden.



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte von konditionierten Böden

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung der Dichte von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn zwischen 8 und 32 mm nach DIN EN 12350-6**

### Erforderliche Laborgeräte

- Messgefäß mit ca. 5 l Fassungsvermögen und einem Innendurchmesser von mindestens 150 mm mit definiertem Volumen ( $V$ ) und Gewicht  $m_1$
- Waage
- Schaufel
- Stab aus Stahl

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen

### Versuchsbeschreibung

- Das konditionierte Material ist mit der Schaufel in das Messgefäß so einzufüllen, dass es von der Mitte des Gefäßes zu dessen Außenfläche fließt. Das Material ist in drei Schichten einzubringen. Je Schicht ist der Boden mindestens 25 Stößen auszusetzen. Die Stöße mit dem Stab oder dem Stampfer sind gleichmäßig über den Querschnitt der Form zu verteilen. Es ist sicherzustellen, dass der Stab oder der Stampfer beim Verdichten der ersten Schicht nicht gewaltsam auf den Boden des Behälters auftrifft und des Weiteren nicht wesentlich in die vorangegangenen Schichten eindringt.
- Die Oberfläche wird dann mit dem Deckel abgezogen. Der Rand und die Außenseiten des Behälters werden sauber gewischt.
- Anschließend ist das Gewicht des gefüllten Behälters ( $m_2$ ) zu bestimmen. Es gilt:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

### Hinweise

- Es sind zwei Proben zu untersuchen.
- Die Ergebnisse sind auf  $10 \text{ kg/m}^3$  zu runden.



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte von konditionierten Böden mit einem Größtkorn größer 8 mm

zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn**

### Erforderliche Laborgeräte

- Probengefäße 1 bis 3 mit Deckel
- Flügelsonde mit Flügeldurchmesser von 33 mm

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen
- Einfüllen in Behälter des Boden-Schaum-Gemischs gemäß Dichtebestimmung

### Versuchsbeschreibung

- Flügelsonde in die Probe einbringen, so dass die Mitte des Flügels in der Mitte des Behälters (horizontal wie vertikal) positioniert ist
- Positionieren des Schleppdrahts auf Null
- Drehen der Flügelsonde
- Ablesen der maximalen Flügelscherfestigkeit am Schleppdraht

### Hinweise



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Flügelscherfestigkeit von konditionierten Böden



zu Abschnitt 4.4.4:

## **Bestimmung der Stabilität von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Größtkorn**

### Erforderliche Laborgeräte

- Probenzylinder, Durchmesser mindestens  $5 \cdot d_{\max}$
- Ausbreittisch

### Versuchsvorbereitungen

- Boden-Schaum-Gemisch herstellen

### Versuchsbeschreibung

- Beim Einfüllen des Boden-Schaum-Gemischs bis zur Oberkante des Behälters darauf achten, dass keine Lufteinschlüsse auftreten
- Mit dem Stab 15 Mal die Probe verdichten
- Volumenabnahme durch Zugabe von Material ohne Verdichtung ausgleichen
- überschüssiges Material mit einem Stahllineal abziehen
- Deckel auf den Behälter legen
- Wiegen der Probe
- 24 Stunden warten
- erneutes Wiegen der Probe
- Ablesen und Aufschreiben des Volumens
- Probe auf den Ausbreittisch stellen
- 15 Schläge innerhalb von 15 Sekunden ausführen
- Ablesen und Aufschreiben des Volumens
- Volumen für 30, 45, 60, 75 und 90 Schläge aufnehmen und Dichte bestimmen

### Hinweise

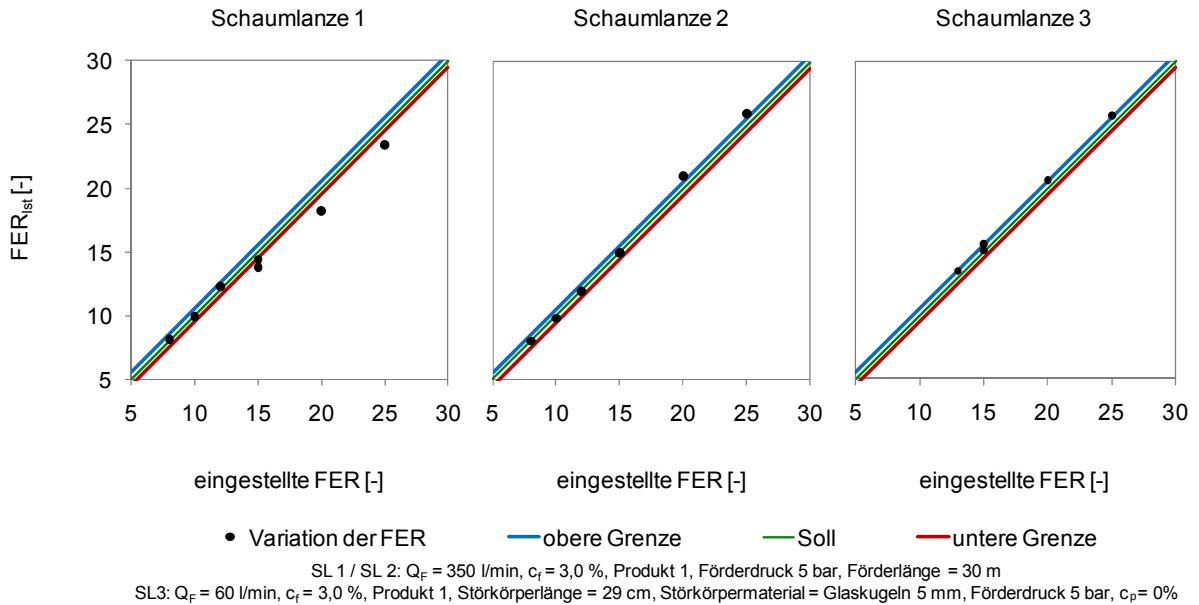


Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stabilität von konditionierten Böden

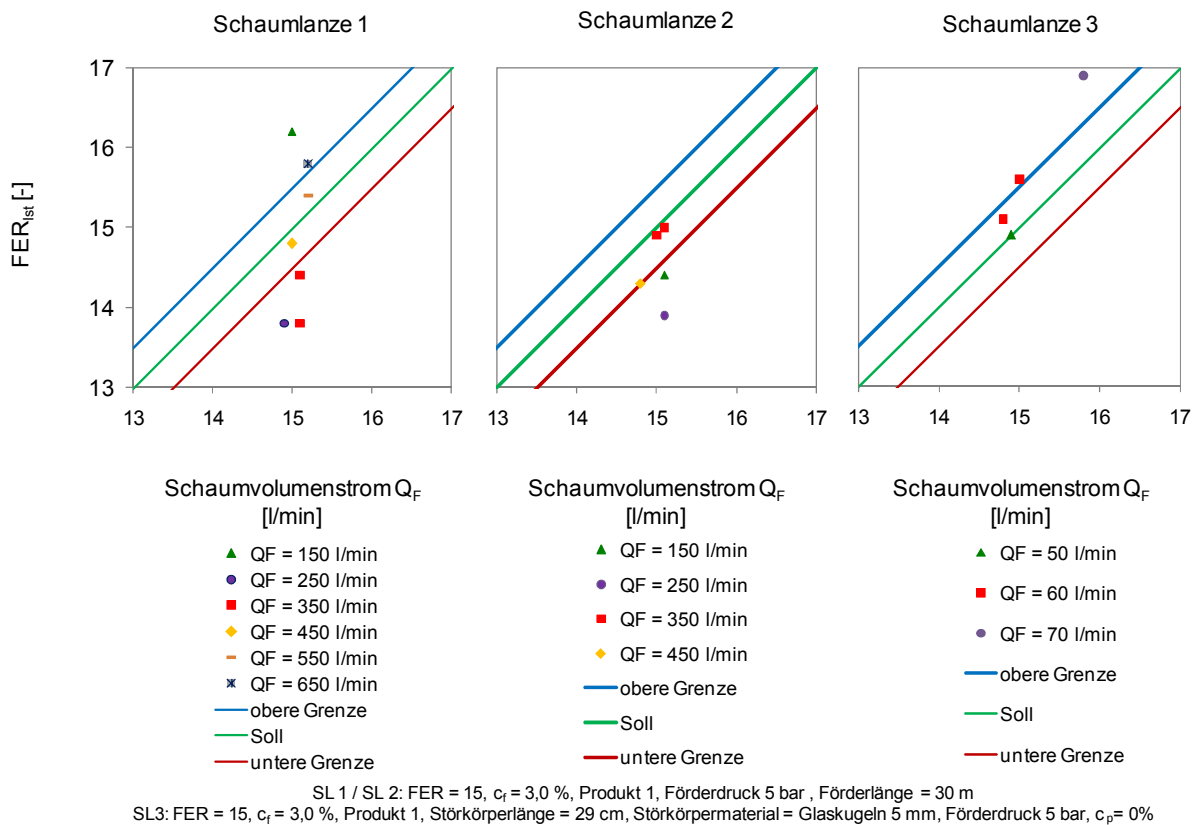
zu Abschnitt 5.1.1:

## Ergebnisse zur Dichtebestimmung von Schäumen

$FER_{ist}$  von Schäumen bei Variation der eingestellten FER bei unterschiedlichen Schaumlanzen



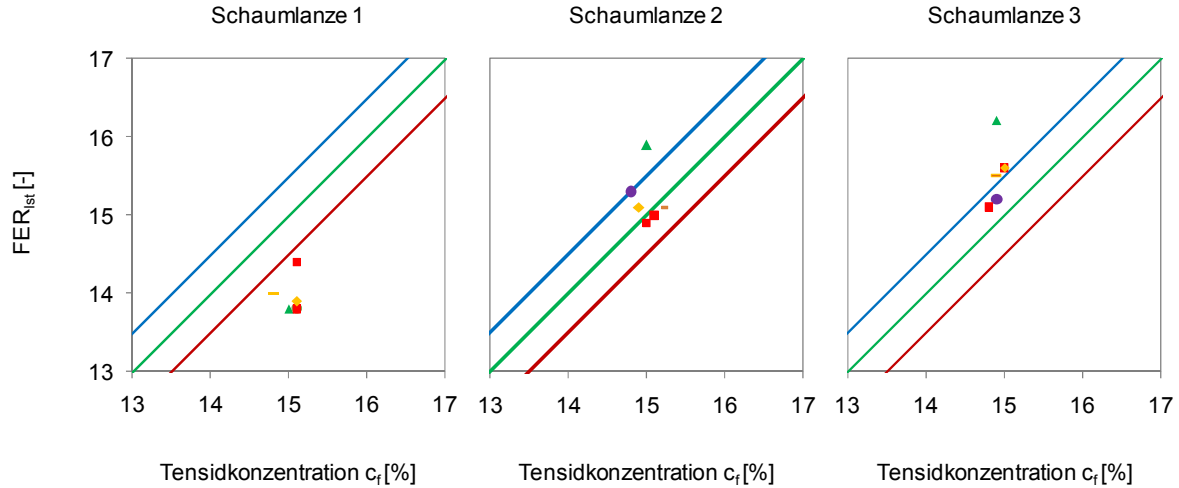
$FER_{ist}$  von Schäumen bei Variation des Volumenstroms des Schaums  $Q_F$



zu Abschnitt 5.1.1:

## Ergebnisse zur Dichtebestimmung von Schäumen

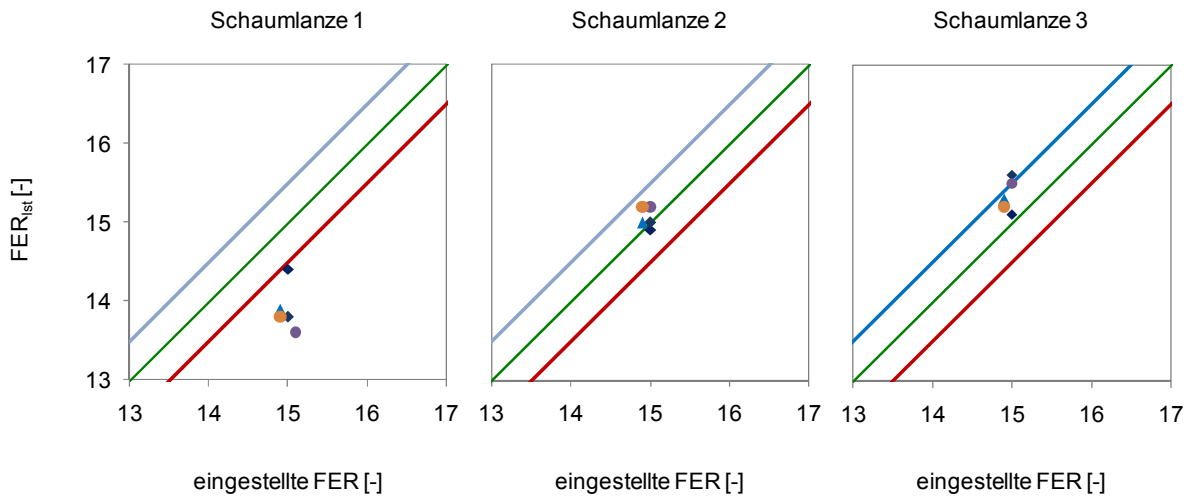
FER<sub>ist</sub> von Schäumen bei Variation der Tensidkonzentration  $c_f$



▲  $c_f = 1,5\%$  ●  $c_f = 2,0\%$  ■  $c_f = 3,0\%$  ◆  $c_f = 4,0\%$  ◇  $c_f = 5,0\%$  — obere Grenze — Soll — untere Grenze

SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15, Produkt 1, Förderdruck 5 bar, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15, Produkt 1, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0\%$

FER<sub>ist</sub> von Schäumen bei Variation des Produkts



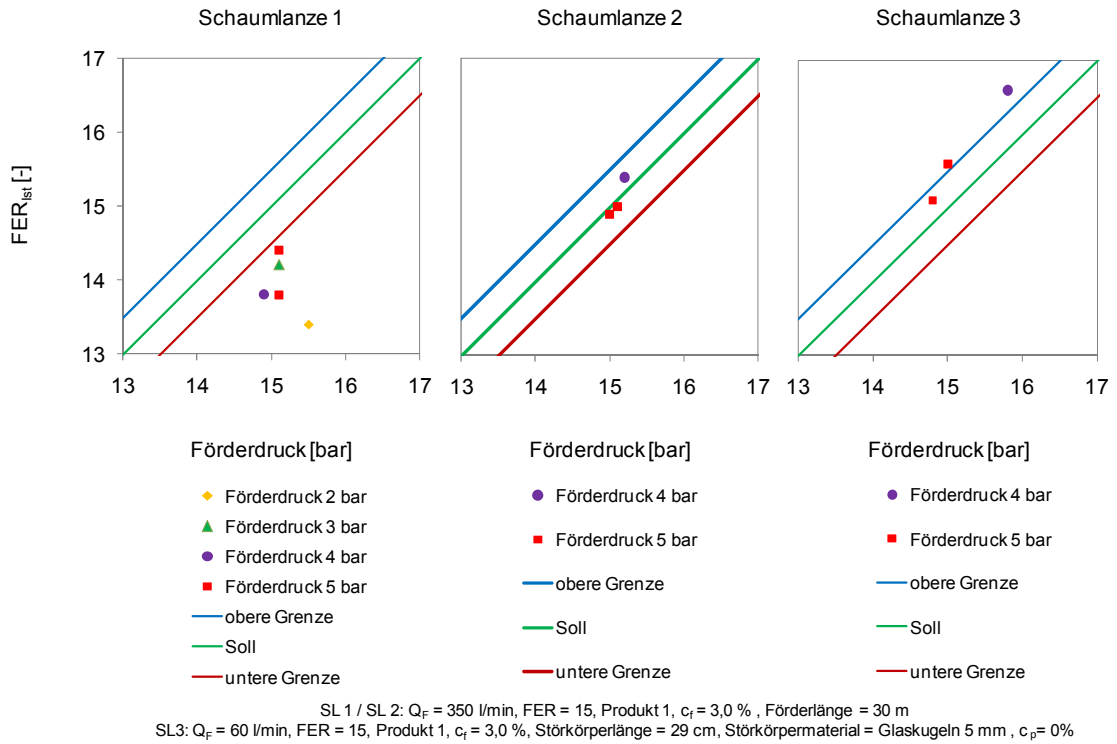
◆ Produkt 1 ● Produkt 2 ▲ Produkt 3 ● Produkt 4 — obere Grenze — Soll — untere Grenze

SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3,0\%$ , Förderdruck 5 bar, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3,0\%$ , Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0\%$

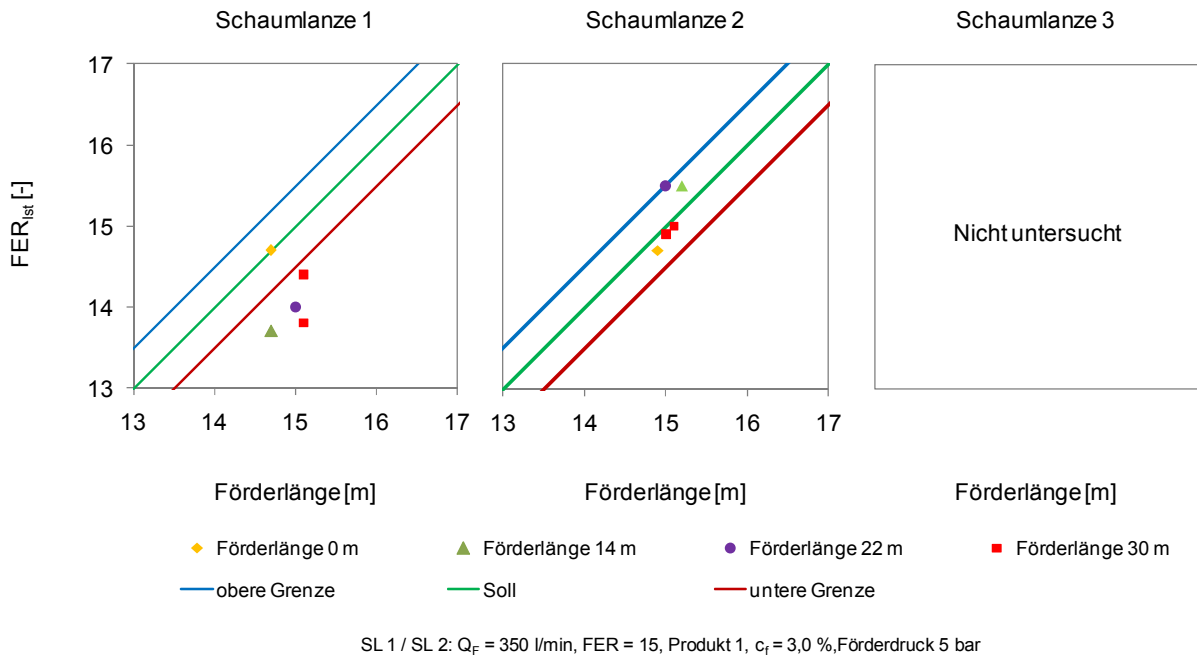
zu Abschnitt 5.1.1:

## Ergebnisse zur Dichtebestimmung von Schäumen

FER<sub>Ist</sub> von Schäumen bei Variation des Förderdrucks



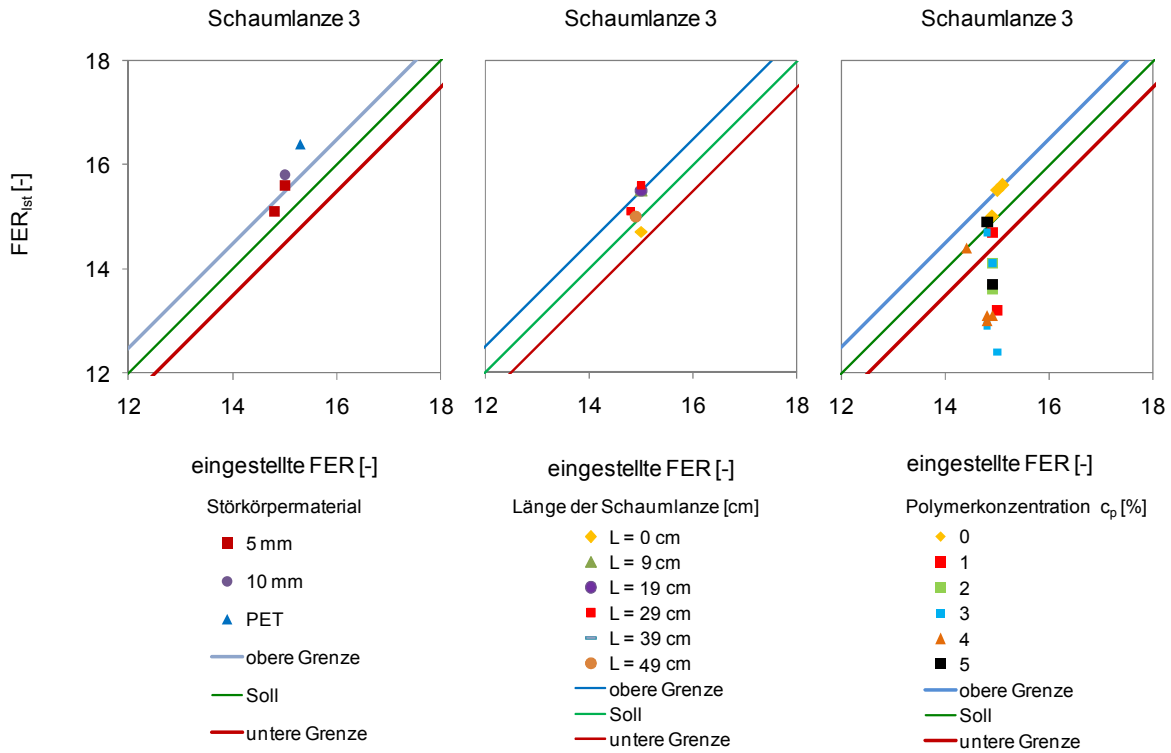
FER<sub>Ist</sub> von Schäumen bei Variation der Förderlänge



zu Abschnitt 5.1.1:

## Ergebnisse zur Dichtebestimmung von Schäumen

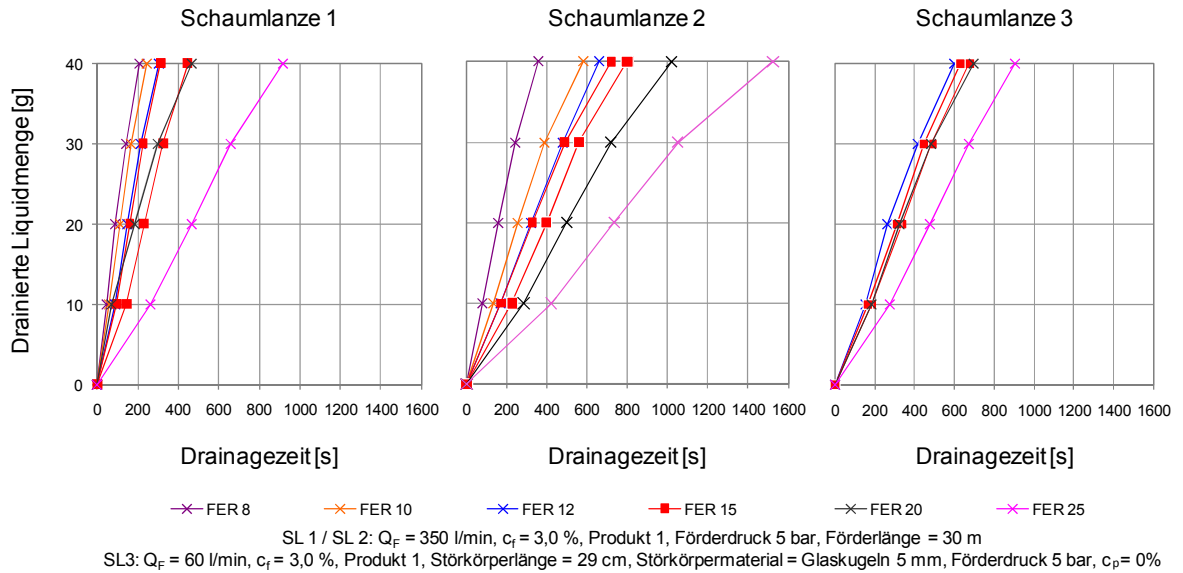
$FER_{ist}$  von Schäumen bei Variation des Störkörpers, der Länge der Schaumlanze und der Polymerkonzentration bei Schaumlanze 3



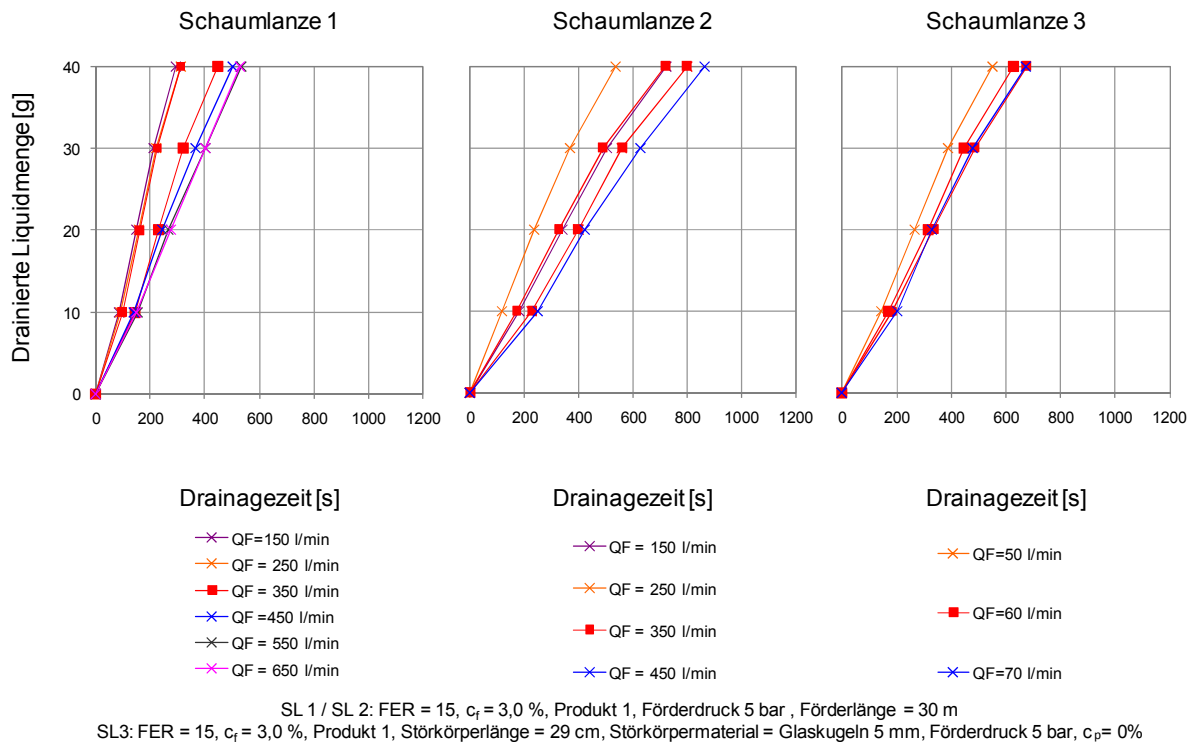
zu Abschnitt 5.1.2:

## Ergebnisse zur Drainagezeit von Schäumen

Drainagezeit von Schäumen bei Variation der eingestellten FER bei unterschiedlichen Schaumlanzen



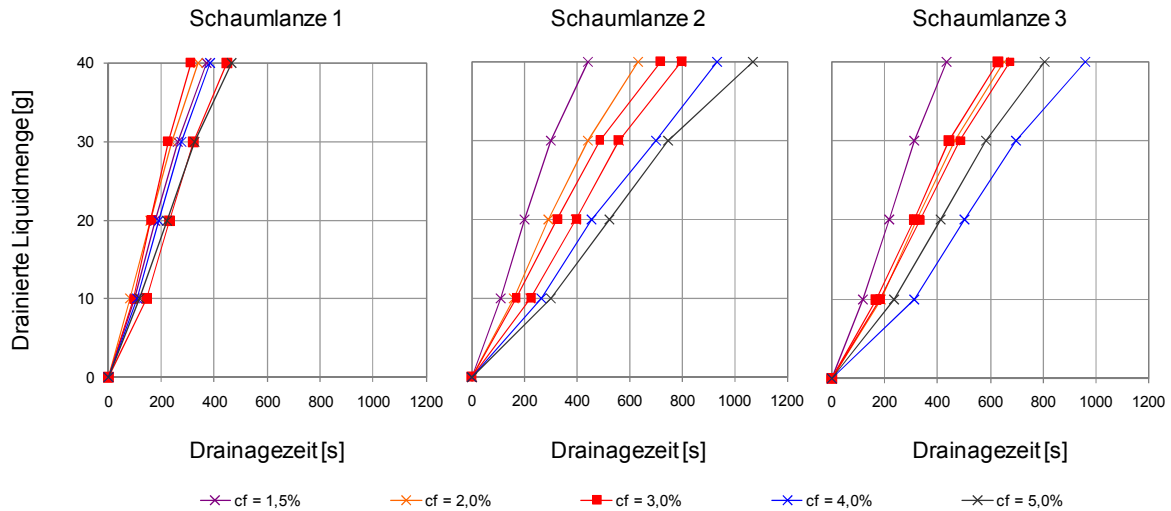
Drainagezeit von Schäumen bei Variation des Volumenstroms des Schaums  $Q_F$



zu Abschnitt 5.1.2:

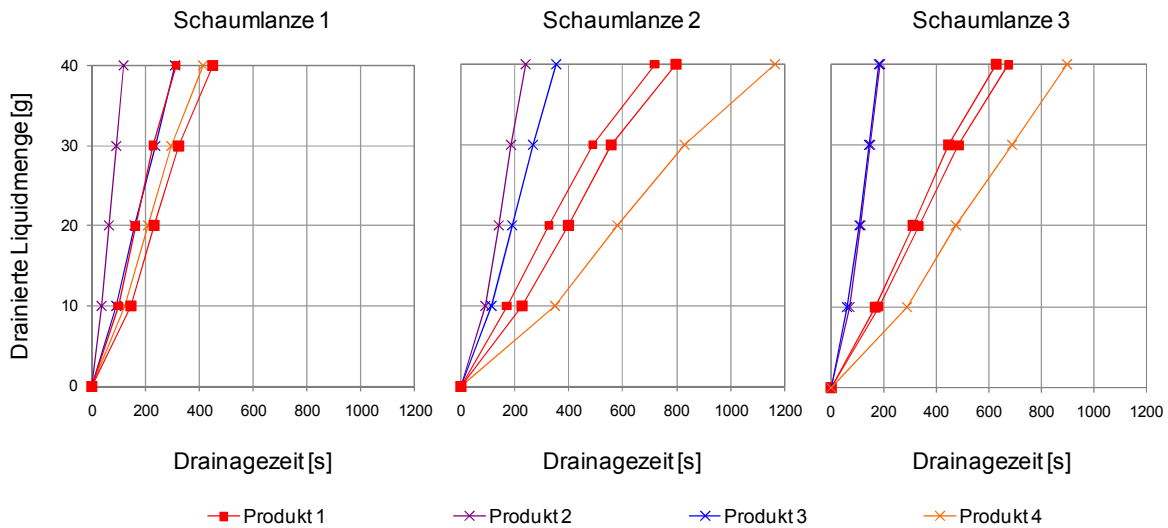
## Ergebnisse zur Drainagezeit von Schäumen

Drainagezeit von Schäumen bei Variation der Tensidkonzentration  $c_f$



SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15, Produkt 1, Förderdruck 5 bar, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15, Produkt 1, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0\%$

Drainagezeit von Schäumen bei Variation des Produkts

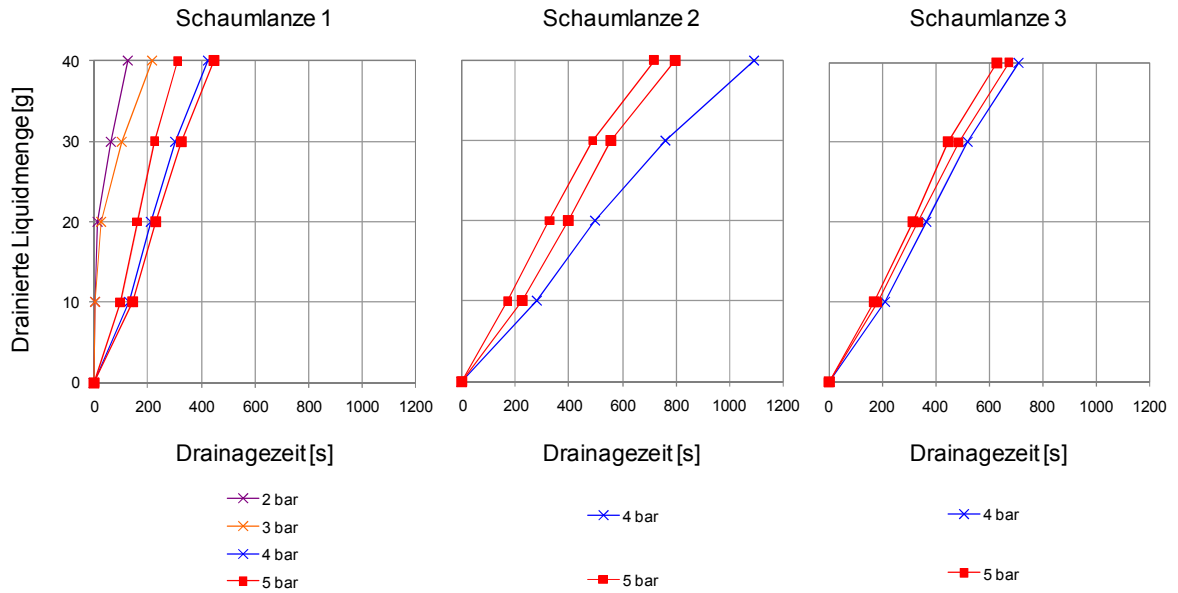


SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3.0\%$ , Förderdruck 5 bar, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15,  $c_f = 3.0\%$ , Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm, Förderdruck 5 bar,  $c_p = 0\%$

zu Abschnitt 5.1.2:

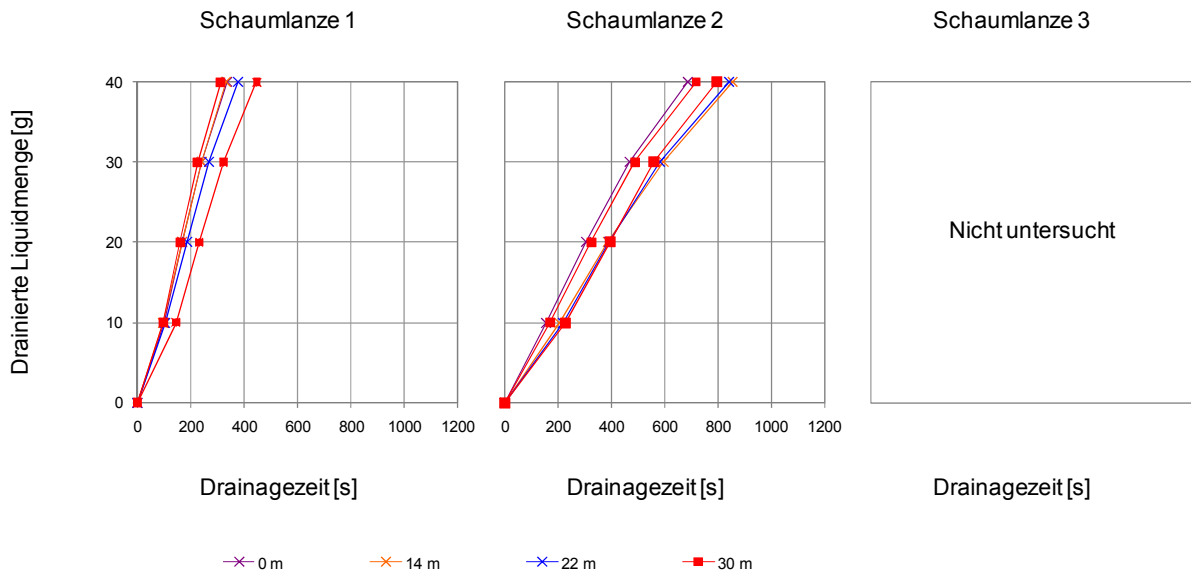
## Ergebnisse zur Drainagezeit von Schäumen

Drainagezeit von Schäumen bei Variation des Förderdrucks



SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %, Förderlänge = 30 m  
 SL3:  $Q_F = 60$  l/min, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %, Störkörperlänge = 29 cm, Störkörpermaterial = Glaskugeln 5 mm,  $c_p = 0$  %

Drainagezeit von Schäumen bei Variation der Förderlänge



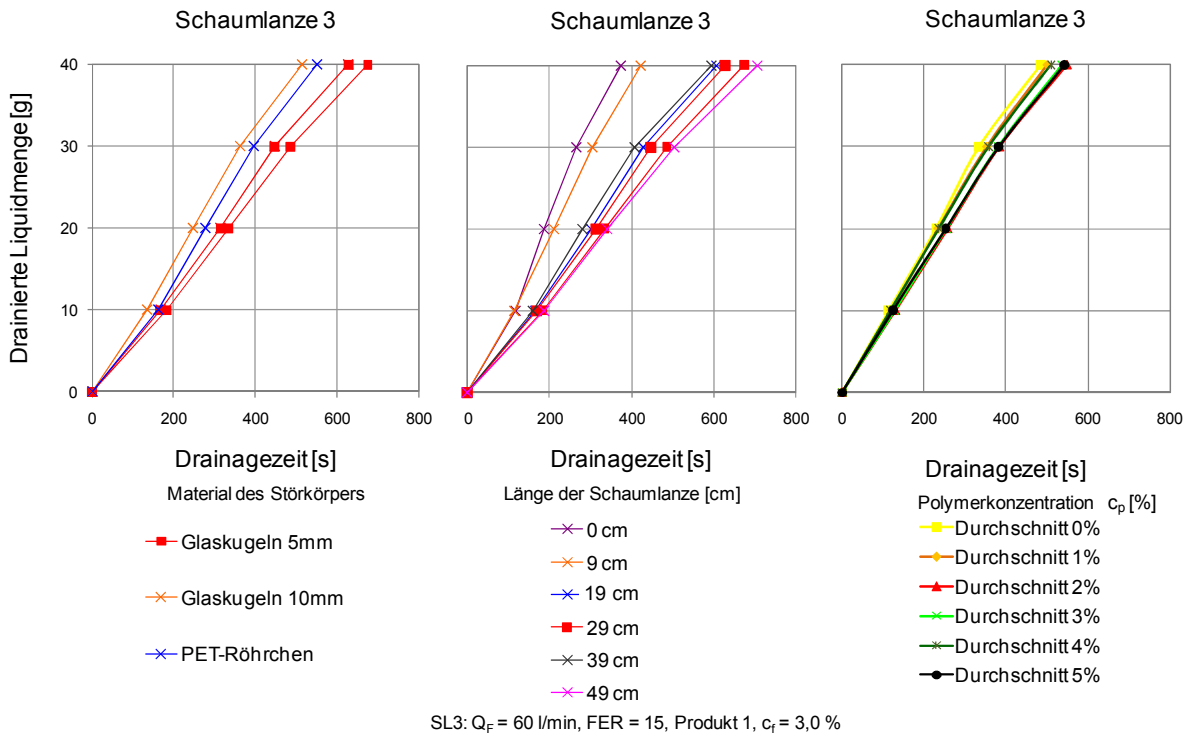
SL 1 / SL 2:  $Q_F = 350$  l/min, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %, Förderdruck 5 bar



zu Abschnitt 5.1.2:

## Ergebnisse zur Drainagezeit von Schäumen

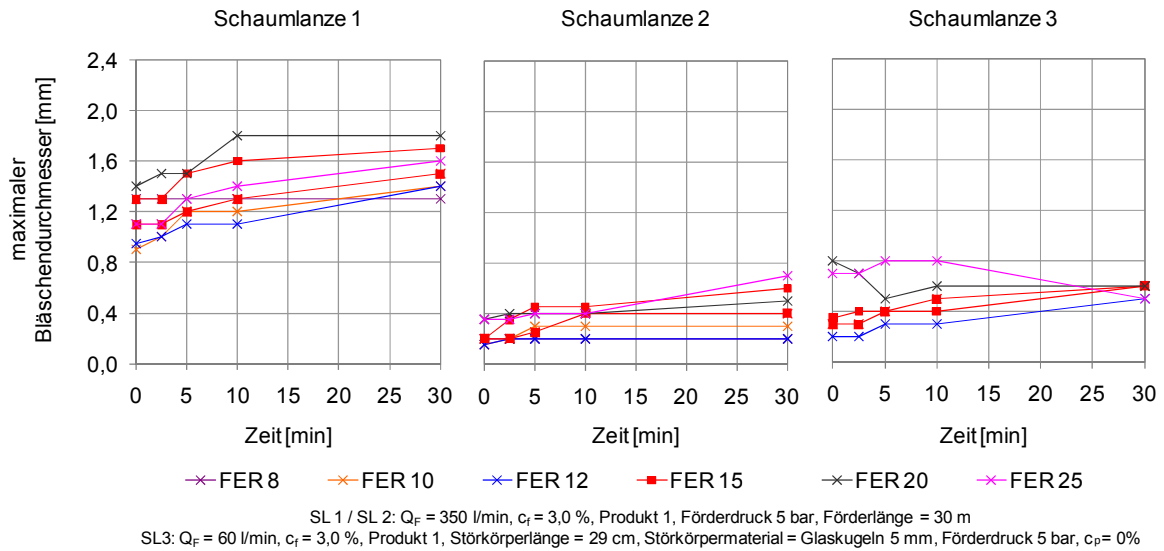
Drainagezeit von Schäumen bei Variation des Störkörpers, der Länge der Schaumlanze und der Polymerkonzentration bei Schaumlanze 3



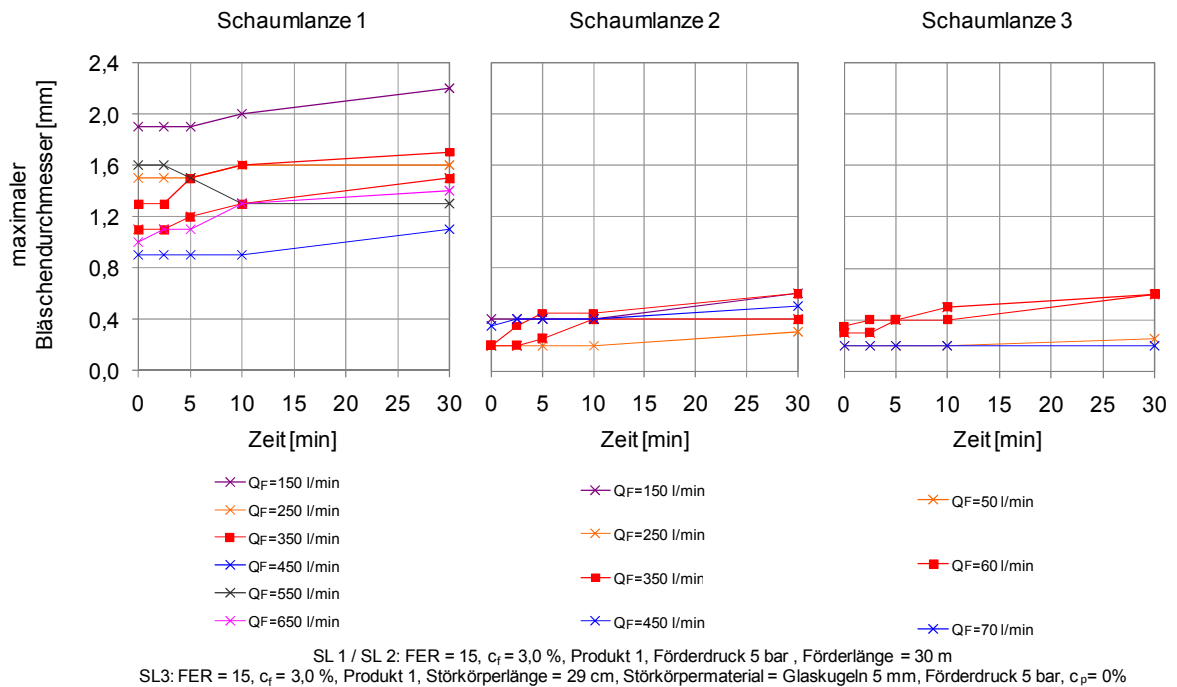
zu Abschnitt 5.1.3:

## Ergebnisse zum maximalen Bläschendurchmesser von Schäumen

Maximaler Bläschendurchmesser von Schäumen bei Variation der eingestellten FER bei unterschiedlichen Schaumlanzen



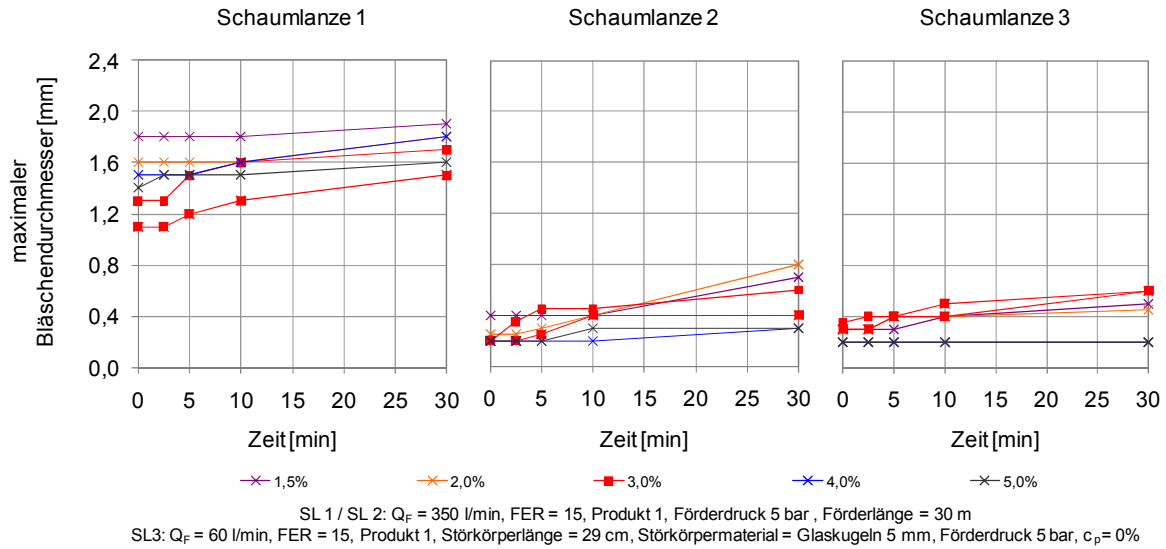
Maximaler Bläschendurchmesser von Schäumen bei Variation des Volumenstroms des Schaums  $Q_F$



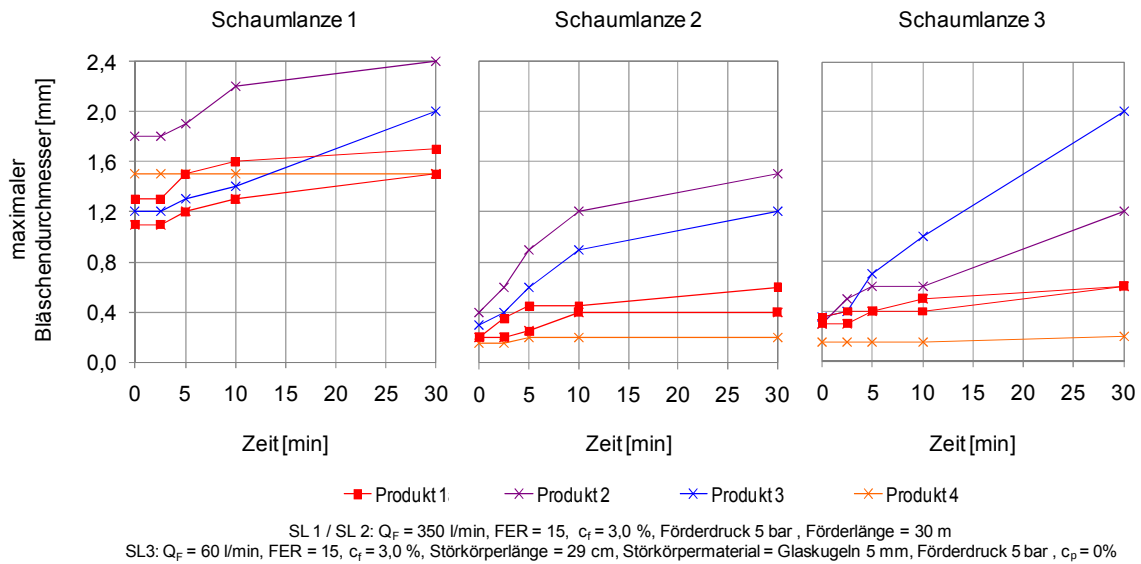
zu Abschnitt 5.1.3:

## Ergebnisse zum maximalen Bläschenmesser von Schäumen

Maximaler Bläschenmesser von Schäumen bei Variation der Tensidkonzentration  $c_T$



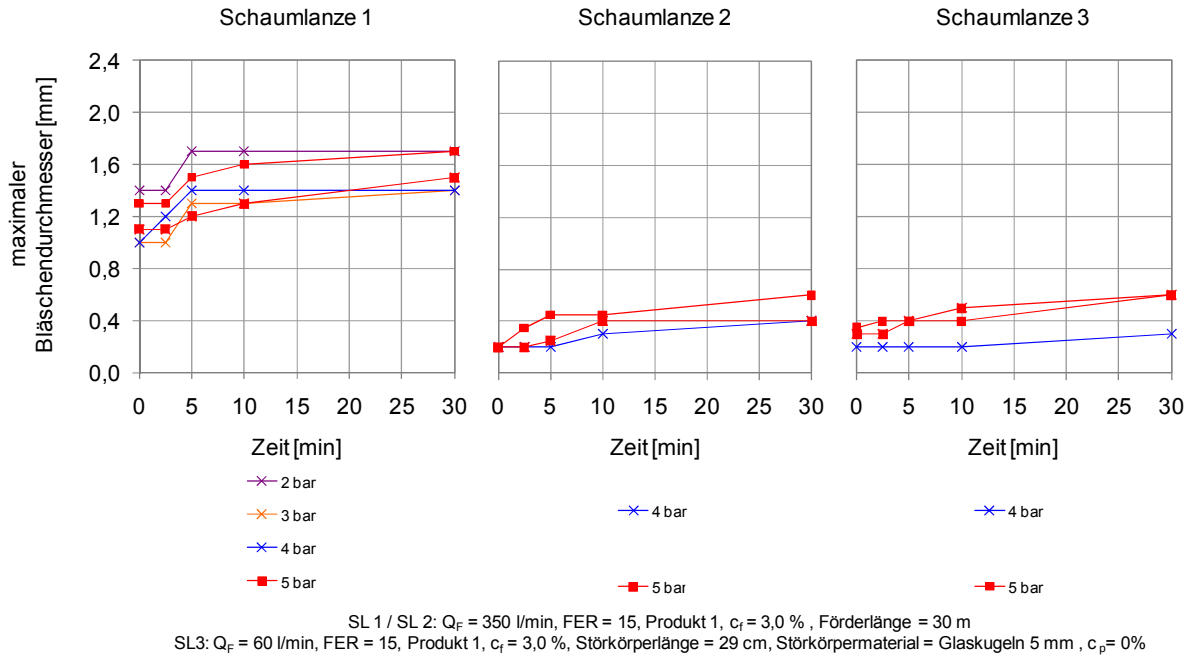
Maximaler Bläschenmesser von Schäumen bei Variation des Produkts



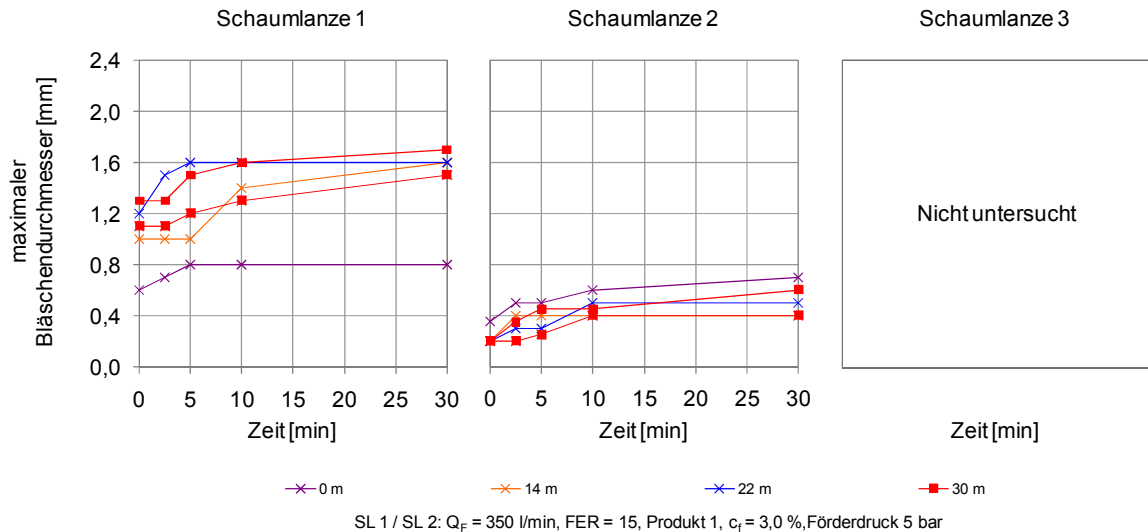
zu Abschnitt 5.1.3:

## Ergebnisse zum maximalen Bläschendurchmesser von Schäumen

Maximaler Bläschendurchmesser von Schäumen bei Variation des Förderdrucks



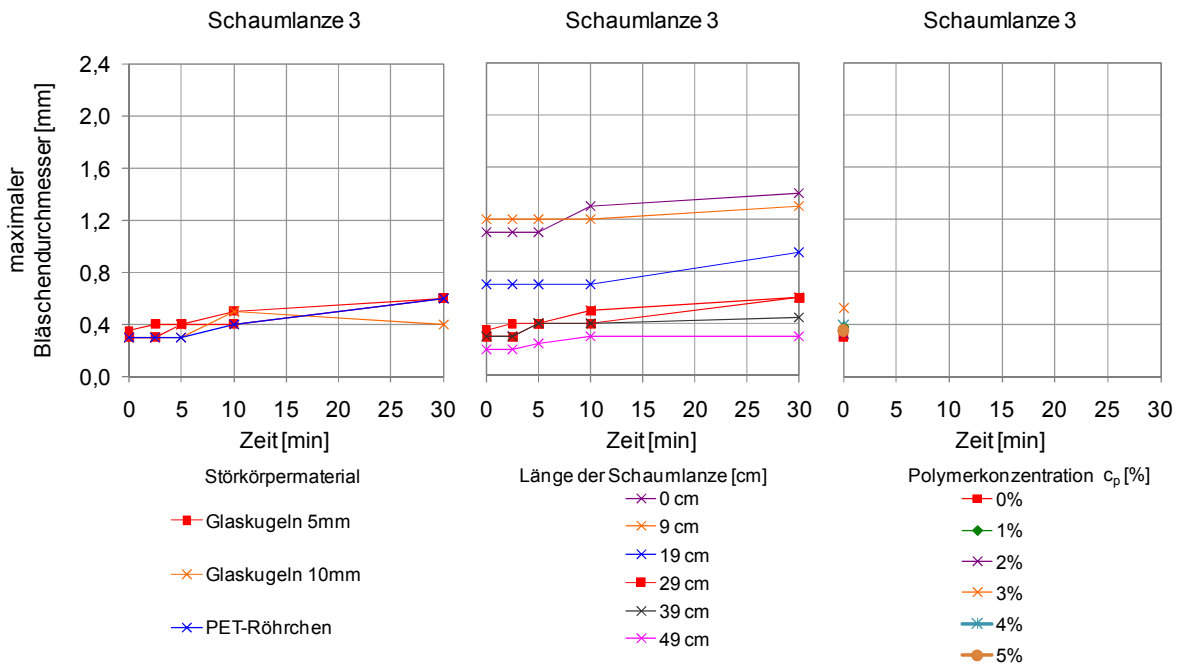
Maximaler Bläschendurchmesser von Schäumen bei Variation der Förderlänge



zu Abschnitt 5.1.3:

## Ergebnisse zum maximalen Bläschendurchmesser von Schäumen

Maximaler Bläschendurchmesser von Schäumen bei Variation des Störkörpers, der Länge der Schaumlanze und der Polymerkonzentration bei Schaumlanze 3



SL3:  $Q_f = 60$  l/min, FER = 15, Produkt 1,  $c_f = 3,0$  %

zu Abschnitt 6.1.1:

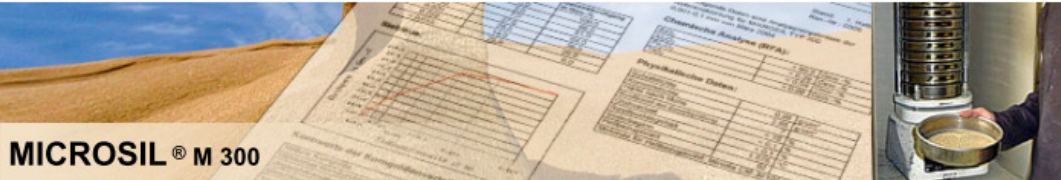
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



## MICROSIL® M 300

Körnung: 0,001 - 0,1 mm  
Lieferwerk: 93  
Quarzmehl gemäß ISO 3262-13 Typ A

Stand: 1. Halbjahr 2010  
Rev.-Nr.: 0004

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
Januar 2009 - Dezember 2009

Nachfolgende Daten sind Analyseergebnisse der Referenzkörnung für MICROSIL M 300  
0,001 - 0,1 mm von 2009

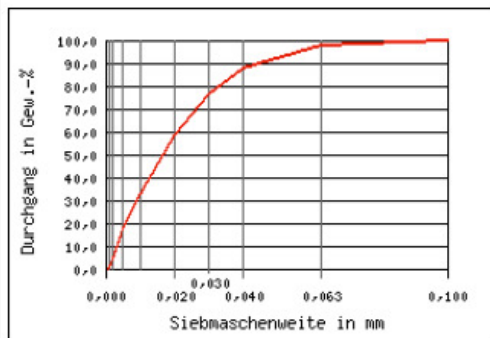
### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
0,100	0,0	100,0
0,063	1,7	98,3
0,040	10,3	88,0
0,030	11,1	76,9
0,020	18,1	58,8
0,010	25,6	33,2
0,005	15,7	17,5
0,002	12,8	4,7
0,001	3,9	0,8
< 0,001	0,8	0,0

### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	99,6	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,113	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,021	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,042	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,007	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,025	Gew.-%
CaO	0,016	Gew.-%
MgO	0,005	Gew.-%

### Sieblinie:



Mittlere Korngröße	0,017 mm
--------------------	----------

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

3116

### Physikalische Daten:

Schüttdichte	0,85	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohdichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Glühverlust	0,15	%
Sinterbeginn	1.575	°C
Hellbezugwert	93,25	
Testmethode Hellbezugwert: Minolta CM-3610d		

### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

pH-Wert	7,8
---------	-----

### EUROQUARZ GmbH

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

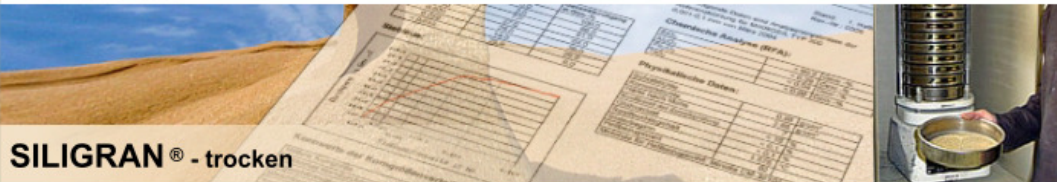
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



### SILIGRAN® - trocken

Körnung: 0,2 - 0,6 mm

Lieferwerk: Dorsten

Quarzsand bzw -kies gemäß EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Stand: 1. Halbjahr 2011

Rev.-Nr.: 0014

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
Juli 2010 - Oktober 2010

Nachfolgende Daten sind Analysenergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN  
0,71 - 1,25 mm von März 2005

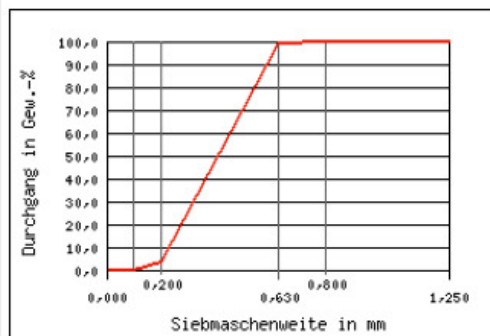
#### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
1,250	0,0	100,0
0,800	0,0	100,0
0,630	0,3	99,7
0,200	96,1	3,6
0,100	3,5	0,1
< 0,100	0,1	0,0

#### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	> 96	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,03	Gew.-%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,48	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,67	Gew.-%
CaO	0,23	Gew.-%

#### Sieblinie:



Mittlere Korngröße	0,408 mm
--------------------	----------

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

#### Physikalische Daten:

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreibprüfung	< 15	%
Glühverlust	< 0,2	%
Restfeuchtegehalt	< 0,3	%
Sinterbeginn	1.575	°C

#### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

Chrom	365	µg/g
Kupfer	6	µg/g
Mangan	21	µg/g
Nickel	1	µg/g
Quecksilber	3,3	µg/g
pH-Wert	6,5 - 7,0	
säurelösliche Bestandteile	< 0,1	%
spez. Leitfähigkeit	10 +/- 5	µS/cm
Stoffe organ. Ursprungs	farblos	

### EUROQUARZ GmbH

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

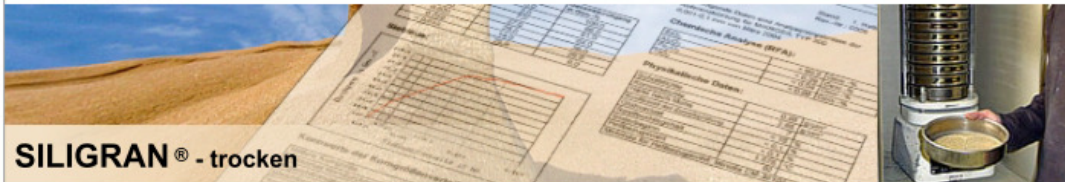
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



### SILIGRAN® - trocken

Körnung: 0,5 - 1 mm

Lieferwerk: Ottendorf-Okrilla

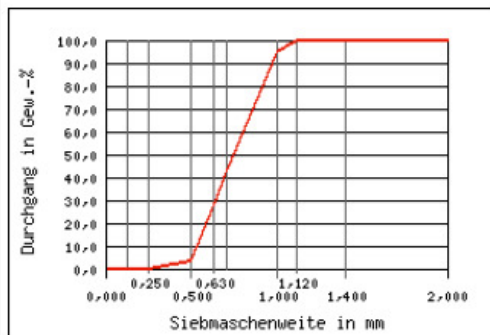
Quarzkies in Anlehnung an EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums: November 2010

#### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
2,000	0,0	100,0
1,400	0,0	100,0
1,120	0,0	100,0
1,000	4,6	95,4
0,710	52,4	43,0
0,630	14,5	28,5
0,500	24,5	4,0
0,250	3,4	0,6
0,125	0,5	0,1
< 0,125	0,1	0,0

#### Sieblinie:



Mittlere Korngröße: 0,749 mm

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

Stand: 1. Halbjahr 2011  
Rev.-Nr.: 0008

Nachfolgende Daten sind Analysenergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN 0,71 - 1,25 mm von November 2005

#### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	98	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,15	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	< 0,1	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,63	Gew.-%
CaO	< 0,01	Gew.-%

#### Physikalische Daten:

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreißprüfung	< 15	%
Glühverlust	< 0,2	%
Restfeuchtegehalt	< 0,2	%
Sinterbeginn	1.575	°C

#### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

Antimon	< 0,002	µg/g
Arsen	0,005	µg/g
Blei	< 0,005	µg/g
Cadmium	< 0,0005	µg/g
Chrom	< 0,005	µg/g
Nickel	< 0,005	µg/g
Quecksilber	< 0,0002	µg/g
Selen	< 0,002	µg/g
pH-Wert	6,6	
säurelösliche Bestandteile	0,17	%
Stoffe organ. Ursprungs	farblos	

### EUROQUARZ GmbH

Würschnitzer Str. 2 | 01936 Laußnitz | Telefon: 035205/527-0 | Telefax: 035205/527-12 | E-Mail: qwo@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH



zu Abschnitt 6.1.1:

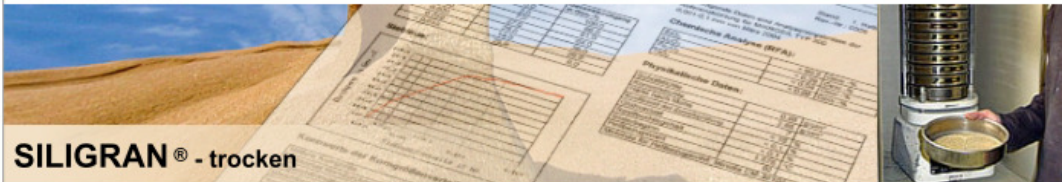
# Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



**Produktdatenblatt**



## SILIGRAN® - trocken

**Körnung: 1 - 2 mm**  
**Lieferwerk: Dorsten**  
 Quarzsand bzw -kies gemäß EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Stand: 1. Halbjahr 2011  
 Rev.-Nr.: 0003

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
 Juli 2010 - November 2010

Nachfolgende Daten sind Analyseergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN  
 0,71 - 1,25 mm von März 2005

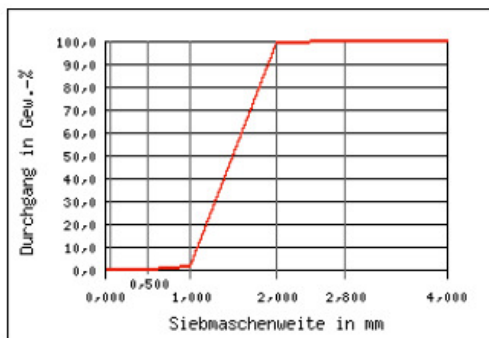
**Korngrößenverteilung:**

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
4,000	0,0	100,0
2,800	0,0	100,0
2,000	0,7	99,3
1,000	97,6	1,7
0,500	1,6	0,1
0,063	0,1	0,0
< 0,063	0,0	0,0

**Chemische Analyse (RFA):**

SiO <sub>2</sub>	> 96	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,03	Gew.-%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,48	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,67	Gew.-%
CaO	0,23	Gew.-%

**Sieblinie:**



Mittlere Korngröße	1,495 mm
--------------------	----------

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

**Physikalische Daten:**

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreibprüfung	< 0,15	%
Glühverlust	< 0,2	%
Restfeuchtegehalt	< 0,2	%
Sinterbeginn	1.575	°C

**Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):**

Chrom	365	µg/g
Kupfer	6	µg/g
Mangan	21	µg/g
Nickel	1	µg/g
Quecksilber	3,3	µg/g
pH-Wert	6,5 - 7,0	
spez. Leitfähigkeit	10 +/- 5	µS/cm
Stoffe organ. Ursprungs	farblos	

**EUROQUARZ GmbH**

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

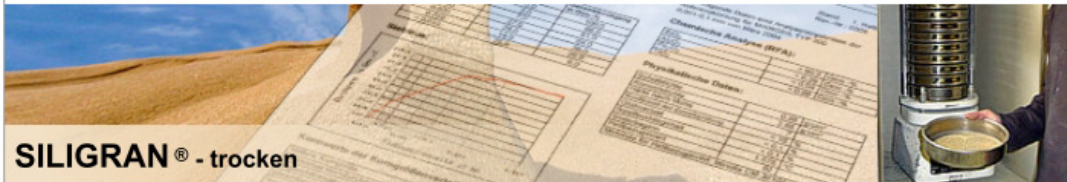
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



### SILIGRAN® - trocken

**Körnung: 2 - 4 mm**

**Lieferwerk: Dorsten**

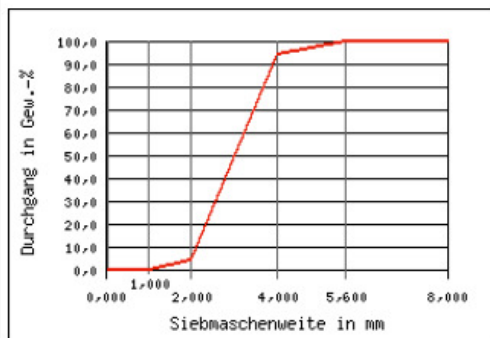
Quarzsand bzw -kies gemäß EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
Juli 2010 - Oktober 2010

#### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
8,000	0,0	100,0
5,600	0,0	100,0
4,000	5,1	94,9
2,000	90,1	4,8
1,000	4,6	0,2
0,063	0,1	0,1
< 0,063	0,1	0,0

#### Sieblinie:



Mittlere Korngröße	3,003 mm
--------------------	----------

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

Stand: 1. Halbjahr 2011  
Rev.-Nr.: 0018

Nachfolgende Daten sind Analysenergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN  
0,71 - 1,25 mm von März 2005

#### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	> 96	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,03	Gew.-%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,48	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,67	Gew.-%
CaO	0,23	Gew.-%

#### Physikalische Daten:

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreibprüfung	< 15	%
Glühverlust	< 0,20	%
Restfeuchtegehalt	< 0,30	%
Sinterbeginn	1.575	°C

#### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

Chrom	365	µg/g
Kupfer	6	µg/g
Mangan	21	µg/g
Nickel	1	µg/g
Quecksilber	3,3	µg/g
pH-Wert	6,5 - 7,0	
säurelösliche Bestandteile	< 0,1	%
spez. Leitfähigkeit	10 +/- 5	µS/cm
Stoffe organ. Ursprungs	farblos	

### EUROQUARZ GmbH

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

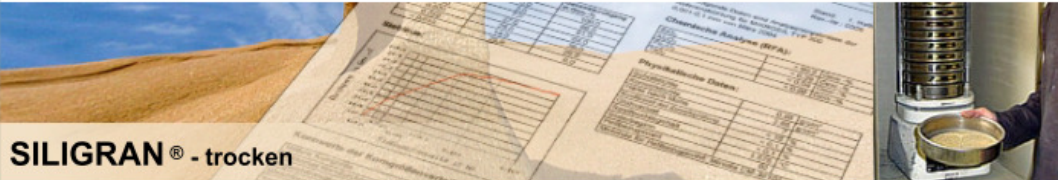
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



### SILIGRAN® - trocken

Körnung: 5 - 8 mm

Lieferwerk: Dorsten

Quarzsand bzw -kies gemäß EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Stand: 1. Halbjahr 2011

Rev.-Nr.: 0014

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
Oktober 2010 - November 2010

Nachfolgende Daten sind Analyseergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN  
0,71 - 1,25 mm von März 2005

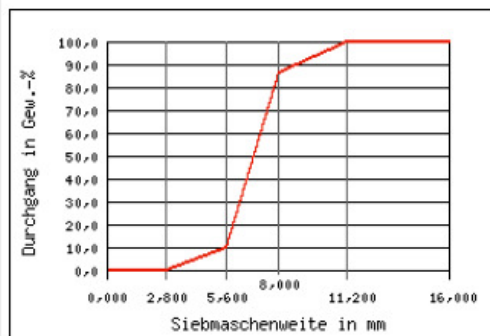
#### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
16,000	0,0	100,0
11,200	0,0	100,0
8,000	12,9	87,1
5,600	76,9	10,2
2,800	10,1	0,1
< 2,800	0,1	0,0

#### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	> 96	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,03	Gew.-%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,48	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,67	Gew.-%
CaO	0,23	Gew.-%

#### Sieblinie:



Mittlere Korngröße	6,842 mm
--------------------	----------

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

#### Physikalische Daten:

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreibprüfung	< 15	%
Glühverlust	< 0,20	%
Restfeuchtegehalt	< 0,30	%
Sinterbeginn	1.575	°C

#### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

Chrom	365	µg/g
Kupfer	6	µg/g
Mangan	21	µg/g
Nickel	1	µg/g
Quecksilber	3,3	µg/g
pH-Wert	6,5 - 7,0	
säurelösliche Bestandteile	< 0,1	%
spez. Leitfähigkeit	10 +/- 5	µS/cm
Stoffe organ. Ursprungs	farblos	

### EUROQUARZ GmbH

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

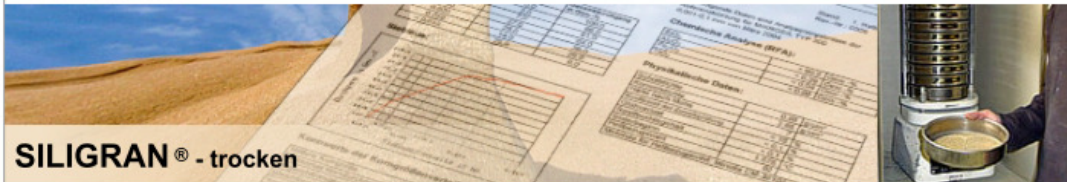
## Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



### Produktdatenblatt



### SILIGRAN® - trocken

Körnung: 8 - 16 mm

Lieferwerk: Ottendorf-Okrilla

Quarzkies in Anlehnung an EN 12620, EN 13139 und EN ISO 3262-21

Stand: 1. Halbjahr 2011  
Rev.-Nr.: 0003

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
November 2010

Nachfolgende Daten sind Analysenergebnisse der Referenzkörnung für SILIGRAN  
0,71 - 1,25 mm von November 2005

#### Korngrößenverteilung:

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
31,500	0,0	100,0
26,500	0,0	100,0
16,000	2,1	97,9
13,200	13,3	84,6
12,500	5,0	79,6
11,200	20,0	59,6
8,000	53,8	5,8
5,600	4,8	1,0
3,150	0,5	0,5
< 3,150	0,5	0,0

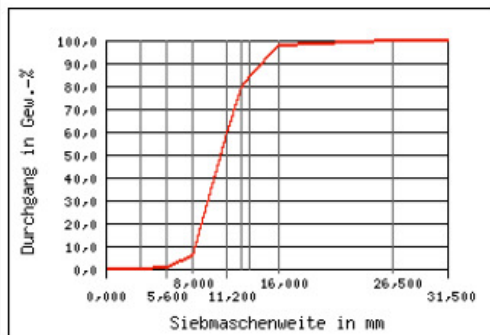
#### Chemische Analyse (RFA):

SiO <sub>2</sub>	98	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,15	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	< 0,1	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,63	Gew.-%
CaO	< 0,01	Gew.-%

#### Physikalische Daten:

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreißprüfung	< 15	%
Glühverlust	< 0,2	%
Restfeuchtegehalt	< 0,2	%
Sinterbeginn	1.575	°C

#### Sieblinie:



Mittlere Korngröße	10,629	mm
--------------------	--------	----

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

#### Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):

Antimon	< 0,002	µg/g
Arsen	0,005	µg/g
Blei	< 0,005	µg/g
Cadmium	< 0,0005	µg/g
Chrom	< 0,005	µg/g
Nickel	< 0,005	µg/g
Quecksilber	< 0,0002	µg/g
Selen	< 0,002	µg/g
pH-Wert	6,6	
säurelösliche Bestandteile	0,17	%
Stoffe organ, Ursprungs:	farblos	

### EUROQUARZ GmbH

Würschnitzer Str. 2 | 01936 Laußnitz | Telefon: 035205/527-0 | Telefax: 035205/527-12 | E-Mail: qwo@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.1:

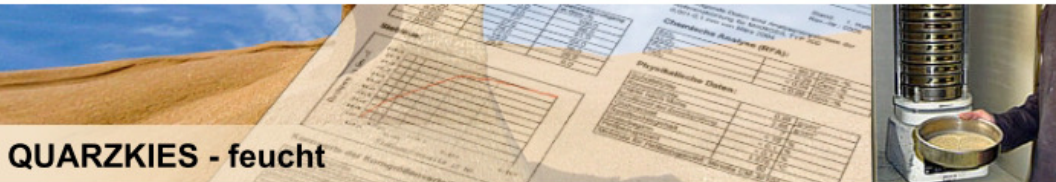
# Eigenschaften der verwendeten Körnungen



Mineralische Rohstoffe: Klassiert - Getrocknet - Gemahlen



**Produktdatenblatt**



## QUARZKIES - feucht

**Körnung: 16 - 32 mm**  
**Lieferwerk: Dorsten**

Stand: 1. Halbjahr 2011  
Rev.-Nr.: 0008

Nachfolgende Werte sind Durchschnittswerte der laufenden Produktionskontrolle des Zeitraums:  
Juli 2010 - November 2010

Nachfolgende Daten sind Analyseergebnisse der Referenzkörnung für QUARZKIES  
0,71 - 1,25 mm von März 2005

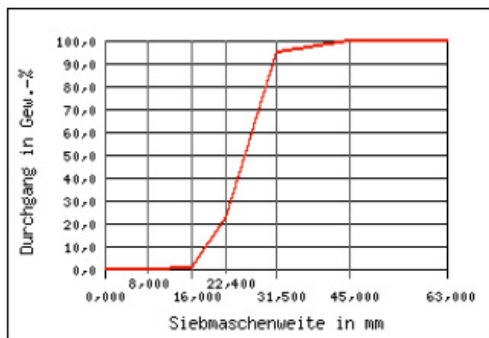
**Korngrößenverteilung:**

Prüfsiebgröße in mm	Rückstandsanteil in Gew.-%	Gesamtdurchgang in Gew.-%
63,000	0,0	100,0
45,000	0,0	100,0
31,500	5,0	95,0
22,400	71,9	23,1
16,000	21,9	1,2
8,000	1,1	0,1
0,063	0,0	0,1
< 0,063	0,1	0,0

**Chemische Analyse (RFA):**

SiO <sub>2</sub>	> 96	Gew.-%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	Gew.-%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	Gew.-%
TiO <sub>2</sub>	0,03	Gew.-%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015	Gew.-%
Na <sub>2</sub> O	0,48	Gew.-%
K <sub>2</sub> O	0,67	Gew.-%
CaO	0,23	Gew.-%

**Sieblinie:**



**Physikalische Daten:**

Schüttdichte	1,6	g/cm <sup>3</sup>
Kornrohddichte	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Härte nach Mohs	7	
Koeffizient der Zerreibprüfung	<15	%
Sinterbeginn	1.575	°C
Schüttdichte: Wert	für trockenens	Materia

Mittlere Korngröße	25,805	mm
--------------------	--------	----

**Chemische Analyse (div. Analysen-Verfahren):**

Chrom	365	µg/g
Kupfer	6	µg/g
Mangan	21	µg/g
Nickel	1	µg/g
Quecksilber	3,3	µg/g
pH-Wert	6,5 - 7,0	
säurelösliche Bestandteile	< 0,1	%
spez. Leitfähigkeit	10 +/- 5	µS/cm
Stoffe organ. Ursprungs:	farblos	

Bitte berücksichtigen Sie, dass es sich bei den vorgenannten Produktdaten um statistische Werte handelt; Abweichungen sind naturgemäß möglich.

**EUROQUARZ GmbH**

Kirchhellener Allee 53 | 46282 Dorsten | Telefon: +49 2362 2005-0 | Telefax: +49 2362 2005-99 | E-Mail: post@euroquarz.de

(c)2006 by EUROQUARZ GmbH

zu Abschnitt 6.1.2:

### Setzmaß des Bodens L in Abhängigkeit von w und FIR

Wassergehalt w [M-%]	FIR [Vol-%]	Setzmaß [cm]
0	50	-
2	30	2
2	40	10
2	50	14
4	20	1
4	30	13
4	40	16
4	50	20
6	10	1
6	20	11
6	40	20
6	30	15
8	10	8
8	20	15
8	30	18
8	40	23
8	50	25
10	0	1
10	10	14
10	20	17
10	30	22
10	40	25
12	10	13
12	20	21
14	10	16
14	20	21
16	10	17
16	20	21
18	10	-
20	0	1
20	10	-

- = keine  
homogene Probe

zu Abschnitt 6.1.3:

## Herleitung der Formel zur Bestimmung der erforderlichen Schaummenge $m_F$

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ bzw. } V = \frac{m}{\rho}$$

$$V_F = V_d * \frac{FIR}{100}$$

$$\frac{m_F}{\rho_F} = \frac{m_d}{\rho_d} * \frac{FIR}{100}$$

$$m_F = m_d * \frac{\rho_F}{\rho_d} * \frac{FIR}{100}$$

$$\frac{V_F}{V_L} = FER$$

$$m_F = m_L$$

$$\frac{\frac{m_F}{\rho_F}}{\frac{m_L}{\rho_L}} = FER$$

$$\frac{\rho_L}{\rho_F} = FER$$

$$\frac{\rho_L}{FER} = \rho_F$$

$$m_F = m_d * \frac{\frac{\rho_L}{FER}}{\rho_d} * \frac{FIR}{100}$$

$$m_F = m_d * \frac{\rho_L}{\rho_d} * \frac{FIR/100}{FER}$$

- mit
- $FER$  = Foam Expansion Ratio (engl.) = Aufschäumrate [-]
  - $FIR$  = Foam Injection Ratio (engl.) = Schauminjektionsrate [%]
  - $m$  = Masse [kg]
  - $m_d$  = Masse des trockenen Bodens [kg]
  - $m_F$  = Masse des Schaums [kg]
  - $m_L$  = Masse der Tensidlösung [kg]
  - $V$  = Volumen [m<sup>3</sup>]
  - $V_d$  = Volumen des trockenen Bodens [m<sup>3</sup>]
  - $V_F$  = Volumen des Schaums [m<sup>3</sup>]
  - $V_L$  = Volumen der Tensidlösung [m<sup>3</sup>]
  - $\rho$  = Dichte [kg/m<sup>3</sup>]
  - $\rho_d$  = Dichte des trockenen Bodens [kg/m<sup>3</sup>]
  - $\rho_F$  = Dichte des Schaums [kg/m<sup>3</sup>]
  - $\rho_L$  = Dichte der Tensidlösung [kg/m<sup>3</sup>]

zu Abschnitt 6.2:

### Zusammensetzung der Versuchsböden

Fraktionen	Kornbereich [mm]	Bezeichnung	Fraktionen																		Boden V						
			1						2						3						4			5		6	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
	Nummer des Bodens		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V			
	Buchstabe des Bodens																										
			Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Feinkies	Mittelkies	Grobkies	feinsandiger Mittelkies	mittelsandiger Grobsand	grob sandiger Feinkies	feinkiesiger Mittelkies	mittelkiesiger Grobkies	Sand	feinkiesiger Mittel- und Grobsand	grob sandiger Mittel- und Feinkies	Kies	feinkiesiger Sand	Mittelsand-Mittelkies	Grob sand-Grobkies	Feinsand-Mittelkies	Mittelsand-Grobkies	Feinsand-Grobkies				
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
a	0,001 - 0,1	Feinkorn (Microsil M300)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
b	0,063 - 0,25	Größtenteils Feinsand	100	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	25	0	0	0	0	20	0	20	0	13	5			
c	0,2 - 0,6	Mittelsand	0	100	0	0	0	0	50	20	0	0	0	25	20	0	0	25	17	20	14	13	10				
d	0,5 - 1,0	Größtenteils Grobsand	0	0	50	0	0	0	0	50	20	0	0	25	25	15	0	18	17	10	14	13	20				
e	1,0 - 2,0	Grobsand	0	0	50	0	0	0	0	30	40	0	0	25	25	20	0	18	17	10	14	13	30				
f	2,0 - 4,0	Feinkies	0	0	0	70	0	0	0	0	40	29	0	0	25	25	25	17	17	10	14	13	20				
g	5,0 bzw. 5,6 - 8,0	Fein- und Mittelkies	0	0	0	30	10	0	0	0	0	40	8	0	5	20	25	2	17	10	14	13	10				
h	8,0 - 16,0	Mittelkies	0	0	0	0	85	0	0	0	0	29	27	0	0	20	25	0	17	20	14	13	0				
i	16,0 - 32,0	Mittel- und Grobkies	0	0	0	0	5	100	0	0	0	2	65	0	0	0	25	0	0	0	14	13	0				

nicht untersucht





zu Abschnitt 6.2:

## Eigenschaften der Versuchsböden

Nummer des Bodens	Fraktionen																				Boden V										
	1					2					3					4						5					6				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		21	22								
Buchstabe des Bodens	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V									
Einheit	Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Feinkies	Mittelties	Grobties	feinsandiger Mittelties	mittelsandiger Grobsand	grobsandiger Feinkies	feinkiesiger Mittelties	mitteltiesiger Grobties	Sand	feinkiesiger Mittel- und Grobsand	grobsandiger Mittel- und Feinkies	Kies	feinkiesiger Sand	Mittelsand-Mittelties	Grobsand-Grobties	Feinsand-Mittelties	Mittelsand-Grobties	Feinsand-Grobties	Boden V									
Hauptgruppe (DIN 18196)	grobkörniger Boden																														
d <sub>10</sub>	0,07	0,15	0,6	2,2	6	18	0,08	0,3	0,7	2,5	9	0,1	0,35	0,8	2,8	0,13	0,45	1	0,25	0,8	0,3	0,12									
d <sub>60</sub>	0,15	0,35	1,1	4	9	30	0,25	0,85	2	8	25	0,65	1,5	4,8	12	0,9	3,5	7,5	2	6	3	1,5									
Ungleichförmigkeitszahl C <sub>u</sub>	2,14	2,33	1,83	1,8	1,5	1,7	3,13	2,83	2,9	3,2	2,8	6,5	4,29	6	4,3	6,92	7,78	7,5	8	7,5	10	12,5									
Gruppe (DIN 18196)	Sand	Sand	Sand	Kies	Kies	Kies	Sand	Sand	Kies	Kies	Kies	Sand	Sand	Kies	Kies	Sand	Kies	Kies	Kies	Kies	Kies	Sand									
Bezeichnung DIN 18196	SE	SE	SE	GE	GE	GE	SE	SE	GE	GE	GE	SI	SE	GE	GE	SI	GI	GW	GI	GI	GI	SW									
Kornrohdichte	2,65	2,65	2,65	2,7	2,7	2,7	2,65	2,65	2,7	2,7	2,7	2,65	2,65	2,7	2,7	2,65	2,65	2,65	2,65	2,7	2,65	2,65									
Flügelscherfestigkeit	9,0	9,7	9,3	8,7	9,7	-	8,7	9,3	9,0	9,7	10,0	10,0	8,7	9,7	10,0	9,0	8,3		9,3	8,0	9,0	9,0									
Dichte lockerste Lagerung	1,36	1,38	1,46	1,48	1,44	1,38	1,45	1,45	1,59	1,52	1,55	1,50	1,65	1,67	1,63	1,67	1,71		1,81	1,79	1,85	1,73									
Dichte dichteste Lagerung	1,64	1,68	1,76	1,65	1,58	1,48	1,67	1,70	1,78	1,68	1,61	1,82	1,84	1,87	1,73	1,85	1,90		2,02	2,00	2,05	1,96									
Dichte Versuche*	1,64	1,63	1,72	1,66	1,51	1,53	1,68	1,75	1,78	1,68	1,65	1,81	1,85	1,85	1,68	1,89	1,95		1,97	1,86	2,01	1,98									
Poranteil n	38	39	35	37	43	42	37	34	33	37	38	32	30	30	37	29	27		26	30	24	25									
max n	49	48	45	44	46	48	45	45	40	43	41	44	38	37	39	37	35		32	32	30	35									
Wasserdurchlässigkeit [l=6]	1,6*10 <sup>-4</sup>	2,2*10 <sup>-1</sup>	2,8*10 <sup>-4</sup>				1,5*10 <sup>-4</sup>	2,5*10 <sup>-4</sup>				1,7*10 <sup>-4</sup>	2,2*10 <sup>-4</sup>						2,5*10 <sup>-4</sup>	-	5,0*10 <sup>-4</sup>	1,1*10 <sup>-4</sup>									
Wassergehalt w	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0		10,0	10,0	10,0	6,0									

\*Versuchsdurchführung wie zur Bestimmung der Dichte des konditionierten Materials - geringfügig höher Dichten als beim Versuch " Dichte dichteste Lagerung" aufgrund Untersuchungsmethode

- nicht untersucht

zu Abschnitt 6.2:

## Setz- und Setzfließmaß\* von mit Schaum konditionierten Lockergesteinen

Boden		FIR	Setzmaß	Setzfließmaß*	gute Konditionierung
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[cm]	[cm]	ja/nein
A	Feinsand	39	10,0	25,5	ja
		43	11,5	27,0	ja
		47	12,0	27,0	ja
		52	15,5	51,5	ja
		56	14,0	52,5	ja
		60	18,5	36,5	ja
		65	20,0	38,0	ja
B	Mittelsand	4	4,5	22,0	ja
		9	12,0	24,5	ja
		13	16,0	28,5	ja
		17	21,0	36,5	ja
		21	22,5	38,0	ja
C	Grobsand	5	19,5	34,5	ja
		9	21,5	43,0	ja
		14	24,0	50,5	ja
D	Feinkies	9	17,0	38,5	nein
		17	18,5	38,5	nein
		52	19,5	39,5	nein
E	Mittelkies	0	20,5	44,0	nein
		40	20,5	42,0	nein
F	Grobkies	0	20,5	41,5	nein
		40	19,5	43,0	nein
G	Fein- und Mittelsand	13	2,0	21,0	ja
		18	6,0	21,0	ja
		22	10,5	23,5	ja
		44	19,5	39,5	ja
		49	20,5	39,5	ja
		53	21,5	40,0	ja
H	Mittel- und Grobsand	5	15,0	29,0	ja
		9	20,0	38,0	ja
		14	25,5	52,5	ja
I	Grobsand und Feinkies	11	16,0	39,0	nein
		19	14,5	37,5	nein
		37	18,0	36,5	nein
		56	17,0	37,0	nein
J	Fein- und Mittelkies	0	20,0	42,0	nein
		44	19,0	39,0	nein
K	Mittel- und Grobkies	0	19,5	43,0	nein
		52	20,0	42,5	nein
L	Sand	5	2,0	21,0	ja
		10	13,5	22,5	ja
		19	18,0	29,5	ja
		24	19,0	30,5	ja
		29	22,0	40,5	ja
M	kiesiger Sand	5	19,5	35,0	ja
		5	20,0	35,0	ja
		10	20,5	36,5	ja
		15	21,5	39,0	ja
		19	22,5	46,5	ja
N	sandiger Kies	10	16,5	41,0	nein
		92	17,0	41,0	nein
O	Kies	0	18,5	43,0	nein
		53	19,0	44,0	nein

<b>Boden</b>		FIR	Setzmaß	Setzfließmaß*	gute Konditionierung
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[cm]	[cm]	ja/nein
P	feinkiesiger Sand	5	10,0	23,0	ja
		10	18,0	31,0	ja
		15	17,5	30,5	ja
		20	19,0	31,0	ja
		25	22,5	41,0	ja
		30	24,0	42,0	ja
Q	Mittelsand - Mittelkies	5	16,0	32,5	nein
		10	17,0	38,0	nein
		15	17,0	37,5	nein
R	Grobsand-Grobkies	nicht untersucht			
S	Feinsand - Mittelkies	5	14,5	24,5	nein
		10	18,0	28,0	ja
		16	20,0	32,5	ja
T	Mittelsand - Grobkies	5	16,0	36,5	nein
		10	16,0	38,0	nein
U	Feinsand – Grobkies	0	12,0	48,3	nein
		5	12,0	22,5	nein
		11	18,5	36,0	nein

zu Abschnitt 6.2:

## Spezifische Oberfläche ausgewählter Böden

Kürzel	Kornbereich [mm]	durchschnittliche spezifische Oberfläche pro Volumen [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Buchstabe des Bodens					spezifische Oberfläche [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]
			A Feinsand	B Mittelsand	C Grobsand	D Feinkies	G feinsandiger Mittelkies	
a	0,001 - 0,1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
b	0,063 - 0,25	810,28	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
c	0,2 - 0,6	180,02	0,0	100,0	0,0	0,0	50,0	20,0
d	0,5 - 1,0	90,94	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	50,0
e	1,0 - 2,0	45,91	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	30,0
f	2,0 - 4,0	23,32	0,0	0,0	0,0	70,0	0,0	0,0
g	5,6 - 8,0	12,22	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0
h	8,0 - 16,0	5,86	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
i	16,0 - 32,0	2,93	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>spezifische Oberfläche [cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>810,28</b>	<b>180,02</b>	<b>68,42</b>	<b>19,99</b>	<b>495,15</b>	<b>95,25</b>

Kürzel	Kornbereich [mm]	durchschnittliche spezifische Oberfläche pro Volumen [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Buchstabe des Bodens					spezifische Oberfläche [cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> ]
			L Sand	M feinkiesiger Mittel- und Grobsand	P feinkiesiger Sand	S Feinsand- Mittelkies		
a	0,001 - 0,1	-	0,0	0,0	0,0	0	0	
b	0,063 - 0,25	810,28	25,0	0,0	20,0	20,0	20,0	
c	0,2 - 0,6	180,02	25,0	20,0	25,0	20,0	20,0	
d	0,5 - 1,0	90,94	25,0	25,0	18,0	10,0	10,0	
e	1,0 - 2,0	45,91	25,0	25,0	18,0	10,0	10,0	
f	2,0 - 4,0	23,32	0,0	25,0	17,0	10,0	10,0	
g	5,6 - 8,0	12,22	0,0	5,0	2,0	10,0	10,0	
h	8,0 - 16,0	5,86	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	
i	16,0 - 32,0	2,93	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
<b>spezifische Oberfläche [cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>]</b>			<b>281,79</b>	<b>76,66</b>	<b>235,90</b>	<b>216,47</b>		

zu Abschnitt 6.5:

### Setz- und Setzfließmaß\* von mit Feinstoffsuspensionen konditionierten Lockergesteinen

Boden		SIR	Setzmaß	Setzfließmaß*	gute Konditionierung
Nummer	Bezeichnung	[%]	[cm]	[cm]	ja / nein
C	Grobsand	0,0	14,0	7,0	nein
		5,0	11,0	8,0	nein
		10,0	11,0	10,5	nein
		14,0	9,5	12,3	nein
		19,0	2,5	11,3	ja
		24,0	4,0	14,5	ja
		29,0	7,5	18,8	ja
		33,0	19,0	27,0	ja
		33,0	15,0	28,8	ja
		38,0	23,5	31,8	ja
D	Feinkies	43,0	28,0	36,5	nein
		0,0	20,0	10,0	nein
		5,0	19,5	12,3	nein
		9,0	19,0	14,5	nein
		14,0	20,0	17,5	nein
		18,0	19,5	19,8	nein
		23,0	21,5	23,3	nein
E	Mittelkies	0,0	19,0	9,5	nein
		8,0	19,0	14,5	nein
		17,0	21,0	20,5	nein
F	Grobkies	0,0	19,0	9,5	nein
		9,0	21,0	15,5	nein
		17,0	20,0	20,0	nein
I	Grobsand - Feinkies	0,0	18,0	9,0	nein
		5,0	15,0	10,0	nein
		10,0	15,0	12,5	nein
		15,0	18,5	16,8	nein
		20,0	13,5	16,8	nein
		25,0	21,0	23,0	nein
Q	Mittelsand - Mittelkies	0,0	18,0	41,0	nein
		5,0	14,5	35,0	nein
		11,0	17,5	36,5	nein
		16,0	12,0	34,0	nein
S	Feinsand - Mittelkies	0,0	10,0	36,5	nein
		5,0	11,5	44,0	nein
		11,0	3,5	20,5	ja
		11,0	8,0	27,5	ja
		16,0	19,0	32,5	ja
		16,0	20,0	38,5	ja
T	Mittelsand - Grobkies	0,0	16,0	42,0	nein
		5,0	17,0	44,5	nein
		10,0	12,0	46,5	nein
		15,0	22,0	56,5	nein
U	Feinsand - Grobkies	0,0	12,0	48,5	nein
		5,0	1,0	21,0	ja
		5,0	11,0	43,5	ja
		11,0	15,5	43,5	nein

zu Abschnitt 6.6:

### Setz- und Setzfließmaß\* von mit mehreren Konditionierungsmitteln aufbereiteten Lockergesteinen

Boden		SIR	$c_{susp}$	PIR	$c_f$	FIR	$c_f$	Setzmaß	Setzfließmaß*	gute Konditionierung
Buchstabe	Bezeichnung	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[cm]	[cm]	ja/nein
Q	Mittelsand - Mittelkies	11	55	0,1	100	0	3	4,5	34,0	nein
		16	55	0,1	100	0	3	10,0	36,8	nein
		16	55	0,2	100	0	3	13,0	27,5	nein
		0	55	0,1	100	16	3	8,0	32,0	nein
		0	55	0,2	100	16	3	16,5	29,5	ja
		0	55	0,3	100	16	3	20,0	32,0	ja
		11	55	0,1	100	0	3	16,0	47,0	nein
		11	55	0,2	100	0	3	1,0	20,0	ja
		11	55	0,3	100	0	3	15,5	41,0	nein
		5	55	0,0	100	5	3	17,0	34,0	nein
		5	55	0,1	100	5	3	15,5	40,5	nein
		5	55	0,2	100	5	3	14,0	34,5	nein
		5	55	0,3	100	5	3	8,0	35,5	nein
		5	55	0,1	100	11	3	0,0	0,0	nein
		5	55	0,3	100	11	3	13,0	35,5	nein
S	Feinsand - Mittelkies	16	55	0,1	100	0	3	7,0	51,0	nein
		16	55	0,2	100	0	3	0,3	20,0	ja
		16	55	0,3	100	0	3	1,0	20,0	ja
		0	55	0,1	100	5	3	5,5	42,0	nein
		5	55	0,0	100	5	3	17,5	28,3	ja
		5	55	0,1	100	5	3	6,0	31,5	nein
T	Mittelsand - Grobkies	0	55	0,1	100	5	3	16,0	38,5	nein
		0	55	0,2	100	5	3	5,5	34,0	nein
		0	55	0,3	100	5	3	15,5	28,0	nein
		0	55	0,1	100	10	3	14,0	37,5	nein
		0	55	0,2	100	10	3	17,0	30,5	nein
		0	55	0,3	100	10	3	16,0	30,5	nein
U	Feinsand - Grobkies	11	55	0,1	100	0	3	0,0	20,0	ja
		11	55	0,2	100	0	3	2,5	20,5	ja
		11	55	0,3	100	0	3	13,2	24,3	ja
		0	55	0,1	100	11	3	1,0	20,0	ja
		0	55	0,1	100	17	3	19,0	30,3	ja
		5	55	0,0	100	6	3	20,0	33,3	ja
		5	55	0,1	100	6	3	0,5	20,0	ja
		5	55	0,2	100	6	3	2,5	20,0	ja
		5	55	0,3	100	6	3	5,0	20,5	ja

zu Abschnitt 7.3:

## Ergebnisse der numerischen Berechnungen bzw. Untersuchungen zum effektiven Stützdruck

Berechnungsbezeichnung			1	2	3	4	5
Variation			im Baugrund				
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,48	1,35	1,33	1,33	1,33
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	40,34	39,65	39,56	39,55	39,55
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	35,61	35,01	34,94	34,93	34,93
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,66	31,11	31,04	31,04	31,04
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	28,34	27,85	27,79	27,78	27,78
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,53	25,09	25,03	25,03	25,03

Berechnungsbezeichnung			6	2	7	8	9	10	11
Variation			in der Abbaukammer						
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,35	1,35	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	39,66	39,65	39,63	39,63	39,63	39,63	39,63
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	35,02	35,01	35,00	34,99	34,99	34,99	34,99
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,12	31,11	31,10	31,10	31,10	31,10	31,10
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	27,85	27,85	27,84	27,83	27,83	27,83	27,83
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,10	25,09	25,08	25,08	25,08	25,08	25,08

Berechnungsbezeichnung			12	2	13	14	15	16	17
Variation			in der Förderschnecke						
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,33	1,35	1,5	2,33	3,23	3,41	3,43
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	39,56	39,65	40,43	44,56	49,05	49,99	61,88
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	34,93	35,01	35,69	39,32	43,41	44,28	56,95
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,04	31,11	31,74	35,06	38,75	39,53	52,84
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	27,78	27,85	28,41	31,40	34,78	35,50	49,36
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,03	25,09	25,59	28,30	31,35	32,00	46,45



Berechnungsbezeichnung			18	2	19	20	21	22	23
Variation			in der Abbaukammer und in der Förderschnecke						
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,33	1,35	1,48	2,75	10,17	19,97	22,3
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	39,56	39,65	40,34	46,95	87,53	143,85	157,50
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	34,94	35,01	35,61	41,47	79,52	132,84	145,81
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,04	31,11	31,66	37,02	72,58	123,15	135,53
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	27,79	27,85	28,34	33,22	66,52	114,56	126,38
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,03	25,09	25,53	29,97	61,23	106,92	118,22

Berechnungsbezeichnung			18	6	24	25	26	27	28
Variation			in der Abbaukammer und in der Förderschnecke						
Wasserdurchlässigkeit	im Baugrund	[m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	in der Abbaukammer	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
	in der Förderschnecke	[m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1
durchschnittliches $\Delta h$ in der Tunnelachse		[m]	1,33	1,35	1,62	1,66	1,66	1,66	1,66
effektiver Stützdruck $s'$ in Abhängigkeit des Winkels $\varphi$	$\varphi = 30,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	39,56	39,65	40,23	41,03	41,23	41,25	41,26
	$\varphi = 32,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	34,94	35,01	35,52	36,22	36,40	36,42	36,42
	$\varphi = 35,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	31,04	31,11	31,58	32,23	32,39	32,41	32,41
	$\varphi = 37,5^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	27,79	27,85	28,26	28,84	28,98	29,00	29,00
	$\varphi = 40,0^\circ$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25,03	25,09	25,46	25,99	26,12	26,14	26,14

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten:**

Name: Christoph Budach  
Titel: Dipl.-Ing.  
Geburtsdatum: 01.08.1977  
Geburtsort: Essen  
Familienstand: verheiratet  
E-Mail-Adresse: Christoph.Budach@gmx.de

### **Beruflicher Werdegang:**

Seit Nov. 2011 Technischer Koordinator bei der HOCHTIEF Solutions AG,  
Civil Engineering and Tunneling, Essen  
Feb. 2006 – Sept. 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau,  
Leitungsbau und Baubetrieb an der Ruhr-Universität Bochum  
Sept. 2003 – Jan. 2006 Mitarbeiter im Bereich Tief- und Ingenieurbau bei der Wiemer &  
Trachte AG, Dortmund  
Okt. 1998 – April 2003 Studium des Bauingenieurwesens an der Ruhr-Universität  
Bochum und Abschluss zum Diplom-Ingenieur

### **Schulbildung:**

1984 – 1988 Johann-Peter Hebel Grundschule, Essen  
1988 – 1997 Gymnasium Essen-Überruhr,  
Abschluss der allgemeinen Hochschulreife