

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	5
2 Bisherige Erkenntnisse	9
2.1 Einfluss der Suspensionsstützung auf die Boden-Bauwerk Interaktion . . .	9
2.2 Eigenschaften der Bentonitsuspension	17
2.3 Feststoffbewegungen der Stützsuspension	21
2.4 Scherfestigkeit in Relation zum Konsolidierungszustand	27
3 Referenzbaustellen	32
3.1 Baugrube der U-Bahnstation "Conradstraat"	32
3.1.1 Geologie und Hydrogeologie	32
3.1.2 Probenahme	33
3.1.3 Auswertung und Ergebnisse	37
3.2 City-Tunnel Leipzig	43
3.2.1 Geologie und Hydrogeologie	43
3.2.2 Baugrube Haltepunkt Markt	44
3.2.3 Baugrube "Haltepunkt Hauptbahnhof"	50

3.3	Baugrube "Severinstraße" der U-Bahnerweiterung	55
3.3.1	Geologie und Hydrogeologie	55
3.3.2	Probenahme und Auswertung	56
3.4	Zusammenstellung von Ergebnissen der untersuchten Filterkuchen	61
4	"Grundkorn" des Filterkuchens	66
4.1	Theorie	66
4.2	Maßgebende Kornfraktion des Filterkuchens	71
4.2.1	Filterkuchen FK-Ro "Conradstraat"	71
4.2.2	Filterkuchen FK-LM "Haltepunkt Markt"	72
4.2.3	Filterkuchen FK-LH "Haltepunkt Hauptbahnhof"	74
4.2.4	Filterkuchen FK-Ko "Severinstraße"	76
5	Versuche zur Entstehung des Filterkuchens	78
5.1	Versuchsaufbau 1	79
5.2	Versuchsmaterialien	80
5.2.1	Boden	80
5.2.2	Suspensionen	82
5.3	Versuchsprogramm	84
5.4	Versuchsergebnisse	84
5.4.1	Kornverteilung des Filterkuchens	84
5.4.2	Filtration der Suspension in den Boden	88
5.4.3	Filterkuchendicke	91
5.5	Einfluss des Druckniveaus	93
5.5.1	Versuchsaufbau 2 und Versuchsprogramm	93
5.5.2	Versuchsergebnisse	95

6	Kontaktzone Boden-Schlitzwand	99
6.1	Versuchsaufbau "Schlitzwandelementversuch"	99
6.2	Versuchsmaterialien	101
6.2.1	Boden	101
6.2.2	Suspension	101
6.2.3	Filterkuchen	102
6.2.4	Zementmörtel	103
6.3	Versuchsprogramm "Schlitzwandelementversuch"	104
6.4	Versuchsergebnisse "Schlitzwandelementversuch"	104
6.4.1	Versuchsergebnisse SW-BSP _i	104
6.4.2	Versuchsergebnisse SW-SP2-i	107
6.5	Zementverfestigung	107
6.6	Kontrollversuche und Schlussfolgerung	110
7	Der kompressible Filterkuchen	114
7.1	Modell zur Entstehung des Filterkuchens	115
7.2	Porenzahl und Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke	121
8	An der Erdwandung haftender Filterkuchen	128
8.1	Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons	129
8.2	Scherfestigkeit des Frischbetons	131
9	Die Scherfestigkeit des Filterkuchens	134
9.1	Der Frischbetondruck	135
9.2	Entwicklung des Frischbetondrucks nach Loreck [51]	136
9.3	Konsolidierung des Filterkuchens	140
9.3.1	Einfluss der Schlitzgeometrie	146
9.3.2	Filterkuchen bei langer Suspensionsstandzeit	148
9.4	Die Scherfestigkeit des Filterkuchens aus Kohäsion und Reibung	153

10 Zusammenfassung	160
Literaturverzeichnis	178
I Kornverteilungsbänder der Referenzbaustellen	179
I.1 Baustelle "Haltepunkt Markt"	179
I.2 Baustelle "Haltepunkt Hauptbahnhof"	181
I.3 Baustelle "Severinstraße"	183
II Zur Ausbildung des Filterkuchens, Kapitel 5	185
II.1 Kornverteilung der Suspension und des Filterkuchens	185
II.2 Verdrängtes Filtratwasservolumen, Versuche V-FK	189
III Berechnung der Filterkuchenbildung	190
III.1 Filterkuchenbildung, Modellrechnung	190
III.2 Filterkuchenbildung, FE-Berechnung	196
III.2.1 Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke	196
III.2.2 Porenwasserüberdruck und effektive Spannung über die Zeit	197
IV Oedometerversuche	199
V Betondruckverläufe	204

Symbolverzeichnis

a_0	[kN/m ²]	Ausgangsgröße der Fließfläche
A	[cm ²]	Querschnittsfläche
A_i	[h]	Einbaualter eines Elementes nach [51]
c	[kN/m ²]	Kohäsion
c_u	[kN/m ²]	undrained Kohäsion
c_G	[g/l]	Feststoffkonzentration
c_v	[m ² /s]	Konsolidierungsbeiwert
C_1	[-]	Parameter nach [100]
d	[mm]	Korndurchmesser
d_{BE}	[mm]	Korndurchmesser des Beikorns nach [89, 90, 91]
d_{FK}	[mm]	Filterkuchendicke
$d_{FK,n,A}(t_i)$	[mm]	Filterkuchendicke der Schicht n am Anfang des Schrittes i
$d_{FK,n,E}(t_i)$	[mm]	Filterkuchendicke der Schicht n am Ende des Schrittes i
$d_{FK,ges,A}(t_i)$	[mm]	gesamte Filterkuchendicke am Anfang des Schrittes i
$d_{FK,ges,E}(t_i)$	[mm]	gesamte Filterkuchendicke am Ende des Schrittes i
d_{GR}	[mm]	Korndurchmesser des Grundkorns nach [89, 90, 91]
d_p	[mm]	Porenquerschnitt nach [120]
d_{10}	[mm]	Korngröße bei 10 Gew.-% Siebdurchgang
d_{15}	[mm]	Korngröße bei 15 Gew.-% Siebdurchgang
d_{50}	[mm]	Korngröße bei 50 Gew.-% Siebdurchgang
d_{85}	[mm]	Korngröße bei 85 Gew.-% Siebdurchgang
D	[%]	Lagerungsdichte
D_{max}	[mm]	maximaler Korndurchmesser des Filters
e	[-]	Porenzahl
E_i	[h]	Einbauzeitpunkt eines Elementes nach [51]
E_s	[MN/m ²]	Steifemodul
f	[cm ³]	Filtratwasserabgabe

$FK-L$	[mm]	Filterkuchenprobelänge im Rahmenscherversuch
$FK-H$	[mm]	Höhe der Filterkuchenschicht im Rahmenscherversuch
h_k	[mm]	analytisch berechnete Filterkuchendicke nach [118]
h_E	[mm]	Höhe der Volumenelemente nach [51]
I_D	[-]	spezifische Lagerungsdichte
I_P	[-]	Plastizitätszahl
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
K	[-]	Konusformfaktor
K_0	[-]	Erdruchdruckbeiwert
K_{ah}	[-]	aktiver Erddruckbeiwert
L_F	[cm]	Filterlänge
m	[mm]	Anzahl der Filterebenen nach [120]
M	[-]	Steigung der CSL
n	[-]	Porenanteil
p_b	[N/m ²]	Druckprofil
p	[N/m ²]	mittlere Normalspannung
p_c	[kN/m ²]	Vorbelastungsspannung im p' - q - Diagramm
q	[N/m ²]	Deviatorspannung
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
R_{max}	[mm]	maximale Rauhtiefe
R_n	[-]	Rauhigkeit nach [69]
s	[mm]	Setzung
t	[s]	Zeit
t_M	[s]	Marsch-Zeit
T	[°]	Temperatur
u	[N/m ²]	Porenwasserüberdruck
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_b	[m/s]	Betoniergeschwindigkeit
v_w	[%]	Reichweite des Korneinflusses nach [89, 90, 91]
V_{gl}	[%]	Organikgehalt
V_L	[cm ³]	Filtratvolumen
V_{Susp}	[cm ³]	Suspensionsvolumen
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
w	[%]	Wassergehalt

w_L	[%]	Wassergehalt an der Fließgrenze
z	[m]	Tiefe
<hr/>		
β	[-]	Formfaktor
γ	[kN/m ³]	Wichte
γ'	[kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb
γ_d	[kN/m ³]	Trockenwichte
γ_F	[kN/m ³]	Wichte einer stützenden Flüssigkeit
γ_{FB}	[kN/m ³]	Wichte des Frischbetons
γ_w	[kN/m ³]	Wichte des Wassers
$\dot{\gamma}$	[-]	Schergefälle
δ	[°]	Wandreibungswinkel
δ_p	[°]	Wandreibungswinkel für passiven Erddruck
Δh	[m]	Druckhöhe
Δp	[kN/m ²]	Suspensionsüberdruck
ε	[-]	Porosität
η	[Ns/m ²]	Viskosität
λ	[-]	Kompressionsbeiwert
$\lambda(t)$	[-]	Seitendruckkoeffizient
κ	[-]	Schwellbeiwert
ν	[-]	Poissonzahl
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_L	[g/cm ³]	Flüssigkeitsdichte
ρ_s	[g/cm ³]	Feststoffdichte
φ	[°]	Winkel der inneren Reibung
φ_c	[°]	Winkel der Kohäsion
φ_s	[°]	Winkel der Gesamtscherfestigkeit
σ	[kN/m ²]	Normalspannung
$\sigma_{v,RS}$	[kN/m ²]	Konsolidierungsspannung bei oedometrischen Verhältnissen
σ_v	[kN/m ²]	Vorbelastungsspannung im $\tau - \sigma'$ -Diagramm
τ	[kN/m ²]	Schubspannung, Scherfestigkeit
$\tau(B_i)$	[kN/m ²]	mobilisierbare Schubspannung im Element i nach [51]
τ_F	[N/m ²]	Fließgrenze einer stützenden Flüssigkeit
τ_{FB}	[N/m ²]	Fließgrenze des Frischbetons

Index

<i>A</i>	Anfangzeitpunkt des Schrittes im Berechnungsmodell
<i>E</i>	Endzeitpunkt des Schrittes im Berechnungsmodell
<i>F</i>	Stützsuspension
<i>FB</i>	Frischbeton
<i>FK</i>	Filterkuchen
<i>ges</i>	gesamt
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung

Schlitzwände werden häufig für Baugruben innerstädtischer Bauwerke eingesetzt, da die zu erwartenden Wandverformungen gering sind. Die Herstellung erfolgt überwiegend im konventionellen Zweiphasenverfahren durch Fertigung aneinander gereihter Lamellen. Der Aushub wird im Schutze einer nichterhärtenden Stützflüssigkeit, meist einer Bentonitsuspension, hergestellt. Während des Aushubprozesses vermischt sich der anstehende Boden mit der Stützflüssigkeit wodurch feine Bodenpartikel in dieser suspendiert vorliegen. Bedingt durch die Druckdifferenz zwischen Suspension und Grundwasser entsteht eine Strömung der Suspension in Richtung des anstehenden Bodens, die gekoppelt mit physikalischen Vorgängen entlang der Erdwandung die Bildung eines sogenannten "äußeren" Filterkuchens herbeiführt, der aus Feststoffen der Suspension besteht. Vor dem Einbringen der Bewehrungskörbe wird die Suspensionsdichte überprüft und ggf. ausgetauscht, DIN 4126 [18]. Im Kontraktorverfahren wird darauf folgend der Frischbeton eingebracht, und verdrängt gleichzeitig auf Grund seiner höheren Dichte sowie rheologischen Eigenschaften die Stützsuspension sowie Teile des Filterkuchens. Der angesichts seiner höheren Scherfestigkeit an der Erdwandung verbleibende Filterkuchen erfährt durch den Differenzdruck zwischen Frischbeton und Grundwasser bis zum Erstarren des Betons eine Konsolidierung und gewinnt an Festigkeit. Dem zu Folge resultiert der im Endzustand ausgebildete Kontaktbereich der Schlitzwand mit dem anstehenden Boden aus unterschiedlichen physikalischen Vorgängen bedingt durch die Herstellungsphasen.

Die Entstehung des Kontaktbereichs, insbesondere die Filterkuchenschicht, ist vom an-

grenzenden Baugrund abhängig. Auf Grund der Druckdifferenz zwischen Suspension und Grundwasser kommt es zu einer Filtration der Suspension an der Erdwandung, siehe hierzu Walz & Steinhoff [114] sowie auch [98, 83, 105]. Die Grenzfläche zwischen Suspension und Boden stellt hierbei eine Filtrationsfläche dar.

Sind die Feststoffpartikel der Suspension größer als der maximale Porendurchmesser des anstehenden Bodens, wie z.B. im bindigen Baugrund, können die suspendierten Partikel nicht in den Boden eindringen. In Folge der Flüssigkeitsdruckdifferenz entsteht eine Strömung des Wassers in den anstehenden Boden bei gleichzeitigem Zurückhalten der Feststoffe der Suspension auf der Erdwandung. Diese Strömung ist jedoch durch die geringe Durchlässigkeit des Bodens sowie die großen Bindungskräfte zwischen fester und flüssiger Phase gering. So bildet sich an der Wandung des anstehenden Bodens nur eine geringmächtige Schicht als "äußerer" Filterkuchen aus. Diese Schicht wird in der Literatur oft als Membran idealisiert, auf dem der hydrostatische Suspensionsdruck wirkt und die Erdwandung stabilisiert.

Sind die Suspensionsbestandteile dagegen kleiner als die maximalen Porendurchmesser des anstehenden Bodens, wie z.B. im nichtbindigen Baugrund, so dass die Suspension in das Korngerüst eindringen kann, stagniert sie jedoch nach einer bestimmten Eindringtiefe auf Grund ihrer Fließgrenze. Das Porenvolumen innerhalb des Eindringbereichs ist somit mit Suspension gefüllt. Daraufhin bildet sich bei gleichzeitiger Abfiltration der Suspensionsfeststoffe an der Erdwandung und Eindringen der Wasserphase aus der Stützsuspension in das Erdreich der "äußere" Filterkuchen aus. Diese Filterkuchenbildung ist ein zeitabhängiger Effekt, wodurch der Filterkuchen im Bereich des Filtermediums, dem anstehenden Boden, auf Grund der Strömungskräfte stärker konsolidiert ist als in Richtung des offenen Schlitzes. Der Übergang zwischen "äußerem" Filterkuchen und Suspension im Schlitz verläuft daher fließend. Sind einzelne Porenengstellen im Korngerüst des anstehenden Bodens vorhanden, so dass größere Partikel der Suspension nicht mehr passieren können, wird die Stagnation der Suspension neben der Fließgrenze von der hierbei hervorgerufenen Kolmatation unterstützt. Ist der Boden grobkörnig und überwiegt der Kolmatationseffekt bei der Stagnation der Suspension im Erdreich, wird sich der Filterkuchen schon im Boden beginnend, rückschreitend in Richtung des offenen Schlitzes gerichtet, ausbilden und über die Oberfläche der Erdwandung hinauswachsen. Hierbei setzen sich die Porenkanäle des Bodens mit den Feststoffpartikel der Suspension zu, konsolidieren im Erdreich, und bilden so den "inneren" Filterkuchen. Die Stützkraftübertragung bzw. der Abbau des Differenzdrucks zwischen Suspension und Grundwasser erfolgt bis zur Bildung des Filterkuchens über die Eindringtiefe der Suspension im anstehenden Boden und ab dem Zeitpunkt des

Filterkuchenaufbaus, gleich wie bei bindigen Böden, in der Filterkuchenschicht, da diese einen viel größeren hydraulischen Gradienten als der anstehende Boden besitzt.

Da die Filterkuchenschicht nicht absolut wasserundurchlässig ist, lässt sich die Umwandlung von Flüssigkeitsdruck in horizontale effektive Kornspannungen mit der Vorstellung von Strömungskräften erklären. Die Filterkuchenschicht wird vom Wasser der Stützflüssigkeit durchströmt, wobei die Kornstruktur auf Grund von Strömungsmassenkräften konsolidiert. Nach der Durchströmung hat das Wasser den Flüssigkeitsdifferenzdruck auf das Korngerüst des Filterkuchens übertragen. Da das Filterkuchengerüst auf dem des anstehenden Bodens aufliegt, wird die horizontale Druckspannung in das angrenzende Erdreich eingeleitet und so die Schlitzwandung stabilisiert.

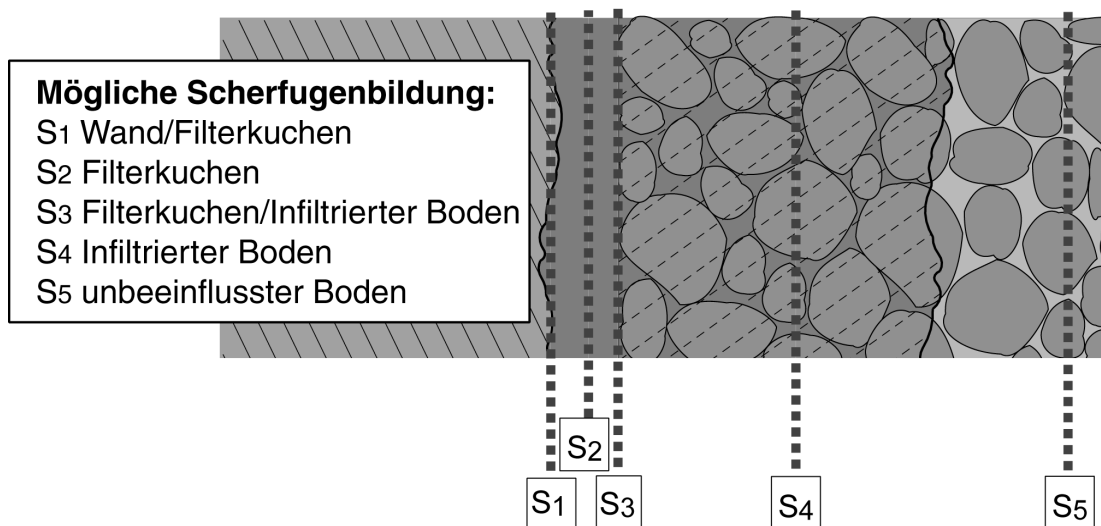


Bild 1.1: Mögliche Scherfugenbildung in der Kontaktzone Boden-Schlitzwand

Der sich ausbildende Kontaktbereich wird idealisiert als Schichtensystem definiert und besteht aus folgenden Komponenten: aus der Schlitzwand, der "äußeren" Filterkuchenschicht, dem Eindringbereich der Suspension in den Baugrund bzw. bei sehr grobkörnigen Böden der "inneren" Filterkuchenschicht und dem unbeeinflussten Bodenbereich, Bild 1.1. Abhängig von der Bodenart sind die Schichten unterschiedlich stark ausgeprägt. Angenommen wird, dass die Scherfuge mit der kleinsten Scherfestigkeit diejenige ist, die das Wandreibungsverhalten und damit den Wandreibungswinkel bestimmt. Auf Grund der Oberflächenrauigkeit der Schlitzwand sowie der Verzahnung des Filterkuchens mit dem anstehenden Erdreich wird von einem Versagen im Filterkuchen selbst oder im anstehen-

den Boden ausgegangen (Scherfugen S_2 , S_4 und S_5). Die Scherfugen Wand-Filterkuchen S_1 (siehe Kapitel 6.2.2) und Filterkuchen-Boden S_3 sind daher von untergeordnetem Interesse zumal ein Korn- bzw. Strukturbruch ausgeschlossen wird.

Seit Beginn der Schlitzwandbauweise wird über die Schubkraftübertragung aus dem Boden über den Filterkuchen in das Erdreich diskutiert. Die national gültigen Normen und Empfehlungen geben für Verbauwandberechnungen von Zweiphasenschlitzwänden einen Wandreibungswinkel von $|\delta| \leq \varphi/2$ vor, siehe DIN 4126 [18, 22] und EAB [23, 24]. Der Winkel der inneren Reibung φ steht hierbei für den anstehenden Boden. Dieser Ansatz basiert auf wenigen Großversuchen, Weiß [116, 117] siehe Kapitel 2.1. Grundlegende Elemente der Schlitzwandbauweise sind erfasst worden, jedoch die Ausbildung der Kontaktzone im Detail, insbesondere der Filterkuchenschicht, wurden nur begrenzt wiedergegeben. Dieser in der Wandstatik anzusetzende Wandreibungswinkel von $|\delta| \leq \varphi/2$ ist daher für die immer weitere Optimierung der Berechnungsansätze nur eine grobe Näherung und gibt Anlass das Thema neu aufzugreifen.

Signifikant für den Ansatz des Wandreibungswinkels erscheint die Vermischung von Schwebstoffen aus dem Boden mit der Betonitsuspension während der Aushubphase. Der daraus resultierende Filterkuchen besteht aus einem gemischtkörnigen Material, der dem zu Folge eine weit höhere Scherfestigkeit als ein reiner Bentonitfilterkuchen besitzen muss. Dass Stützsuspensionen mit Feinpartikel des Baugrundes aufgeladen sind, erscheint trivial und einschlägig bekannt, jedoch wurde dieser Aspekt nie konsequent verfolgt, obgleich Studien wie von Martak [53] oder Möbius et al. [54] diesen Effekt aufgreifen. In den Großversuchen von Weiß [116, 117] für den Ansatz der EAB bzw. DIN 4126 als auch bei den Versuchen von Ruppert [78] zur Bestimmung des Druckgefälles f_{s0} , die in der DIN 4126 berücksichtigt werden, ist z.B. mit reinen Betonitsuspensionen gearbeitet worden. Darüber hinaus gibt die DIN 4126 einen Wandreibungswinkel von $|\delta| = 0$ vor, wenn zwischen Beginn des Aushubs und Beginn des Betonierens mehr als 30 h liegen. Auch hier wird der Filterkuchen als Schmierschicht ohne wesentliche Eigenfestigkeit betrachtet und damit die Beschaffenheit des Filterkuchenmaterials außer Acht gelassen.

Zumal die Oberflächenstruktur einer Schlitzwand meist uneben bzw. im Verhältnis die Filterkuchenschicht relativ dünn ist, wird bei einem Scherversagen vermutlich der Verlauf der Scherfläche überwiegend in den anstehenden Boden gezwungen. Vollkommen auszuschließen ist jedoch nicht, dass zumindest Teilbereiche der Scherfläche die Filterkuchenschicht schneidet. Im bindigen Baugrund ist jedoch der Ansatz der Wandreibung basierend auf der Scherfestigkeit des anstehenden Bodens begründet, da der Filterkuchen

eine äußerst geringe Mächtigkeit besitzt. Im Rahmen der hier folgenden Untersuchungen werden die Ausbildung des Kontaktbereichs Boden-Schlitzwand und die daraus resultierenden Vorstellungen zur Wandreibung für einen nichtbindigen Baugrund erarbeitet.

Gegenwärtig werden neben den analytischen Ansätzen auch numerische Berechnungen für Verbauwände herangezogen. Die DIN 1054 [13] hat für Verformungsprognosen die Methode der Finiten Elemente etabliert. Neben der Wahl der Eingangsparameter und Stoffgesetze werden auch Modellierungen der Bauabläufe sowie die Kontaktformulierungen entscheidend. Studien zeigen mittlerweile 3D Finite-Elemente-Berechnungen der Gesamtverformung aus Wand- und Baugrubenherstellung für Zweiphasenschlitzwände, siehe z.B. [51, 80, 92, 63, 64, 11, 49]. Diese an der Praxis orientierten numerischen Modelle enthalten jedoch für die Wandreibung nur grobe Annahmen. Verfeinerte Kenntnisse über die Wandreibung stehen noch aus.

Ziel dieser Arbeit ist es, physikalische Ansätze für die Kontaktzone Boden-Schlitzwand, wie für die Entstehung, Zusammensetzung und Scherfestigkeit herauszuarbeiten damit ein plausibler Ansatz für die Wandreibung von Zweiphasenschlitzwänden abgeleitet werden kann. Darüber hinaus soll mit den neuen Kenntnisstand eine Basis für die Weiterentwicklung von Kontaktformulierungen in der Numerik geschaffen werden.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Für Berechnungen von Zweiphasenschlitzwänden gilt gemäß den national gültigen Normen und Empfehlungen der Ansatz des Wandreibungswinkels von $|\delta| \leq \varphi/2$. Dieser Ansatz beruht demzufolge auf einer Abminderung der Reibungsfestigkeit des anstehenden Bodens und ist für die unterschiedlichen Bodenarten identisch. In Abhängigkeit des Baugrundes werden zur Bildung der Kontaktzone verschiedene physikalische Vorgänge hervorgerufen, die im Ansatz unberücksichtigt bleiben. Ein Scherversagen der Kontaktzone tritt in der Schicht mit der geringsten Scherfestigkeit auf, Bild 1.1, solange die Ausbildung der Scherfläche nicht bedingt durch die makroskopische Oberflächenstruktur der Schlitzwand in den anstehenden Boden gezwungen wird. Für das komplexe Kontaktverhalten des Boden-Schlitzwandensystems ist daher der Ansatz von $|\delta| \leq \varphi/2$ nur eine grobe Näherung.

Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit soll mittels Baustellen- und Laboruntersuchungen das Kontaktverhalten des Boden-Schlitzwandensystems analysiert werden. Hierbei ist die Beschaffenheit des Filterkuchens von besonderem Interesse, da die Filterkuchenschicht zwischen Boden und Beton in der Praxis oft als Schmierschicht aus Bentonit mit einer

geringen Scherfestigkeit betrachtet wird. Die Filterkuchenfestsubstanz ist jedoch, wie eigene Baustellenuntersuchungen sowie Quellen aus der Literatur gezeigt haben, ein Gemisch aus Bentonit und dem anstehenden Boden, siehe z.B. [53, 73]. Durch die Aushubarbeiten vermischt sich der anstehende Boden mit der Suspension, wobei die feinen Kornfraktionen durch die Fließgrenze der Suspension in Schwebelage gehalten werden. Feststoffanteile der Suspension lagern sich bedingt durch den Filtrationsprozess als "äußerer" Filterkuchen an der Erdwandung ab. Untersucht wird, welche Kornfraktionen im Filterkuchen vertreten sind und dadurch das mechanische Verhalten prägen.

Der an der Erdwandung entstehende Filterkuchen wird für die Modellierung von Filtrationsvorgängen häufig vereinfacht als starr und inkompressibel angesehen. In Wirklichkeit erfährt der Filterkuchen jedoch während seiner Bildung durch die Strömungskräfte eine fortlaufende Konsolidierung. Charakteristisch für solche kompressiblen Filterkuchen ist die Ausbildung einer stark konsolidierten Grundsicht am Filtermedium, Tiller [102], eines etwas weniger konsolidierten mittleren Bereichs und eines fließend verlaufenden Übergangs zwischen Filterkuchen und Suspension in Richtung des offenen Schlitzes. Die Entstehung des Filterkuchens führt bis zu dem Verdrängungsprozess der Stützsuspension durch den Kontraktorbeton zu inhomogenen Materialeigenschaften über die Filterkuchendicke. Ferner ist die Scherfestigkeit des Filterkuchens, die mit dem Konsolidierungszustand korreliert (Krey-Tiedemann siehe hierzu z.B. [36, 67, 44, 84]), im Bereich der Erdwandung am größten. Der im Schlitz aufsteigende Kontraktorbeton wird den Filterkuchen nicht vollständig verdrängen können. Nachfolgend erfährt der Filterkuchen durch den Differenzdruck zwischen Frischbeton und Grundwasser eine Konsolidierung und gewinnt an Festigkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das schwächste Glied der Boden-Schlitzwandkontaktzone ermittelt und untersucht. Hierbei wird anhand einer umfassenden Analyse der Filterkuchenbildung im Hinblick auf die auftretenden physikalischen Vorgänge, die Beschaffenheit und Festigkeit des Filterkuchens nach der Schlitzfertigstellung erfasst. Zur Bearbeitung der Fragestellungen werden Versuchsprogramme erarbeitet und entsprechende Versuchsaufbauten entwickelt.

Von vier Schlitzwandbaugruben werden in-situ Proben des Filterkuchens und des anstehenden Bodens entnommen. Im bodenmechanischen Labor des Lehrstuhls werden die Kornverteilungen und Zustandsparameter ermittelt. Für die Bestimmung der Scherfestigkeit werden entsprechend der Kornverteilung der in-situ Filterkuchenproben, Filterkuchenproben im Labor künstlich hergestellt. Ferner wird die Oberflächenstruktur der

in-situ Schlitzwand durch Entnahme von Gipsabdrücken mit einem Laser-Distanz-Sensor bestimmt und die Rautiefe R_{max} ermittelt. In der Weise wird die Art der Schubkraftübertragung in der Kontaktzone Wand-Filterkuchen analysiert.

Die Simulation der Kontaktzone Baugrund-Schlitzwand und die Bestimmung der Eigenschaften der einzelnen Systemkomponenten erfolgt in unterschiedlichen Versuchsreihen.

Die Entstehung des Filterkuchens in Abhängigkeit der Suspensionsaufladung sowie die Messung des Filtrationsverhaltens über die Zeit wird in einem Gerät verwirklicht, welches eine Filtration der Suspension an einer Sandoberfläche mit gleichzeitiger Filterkuchenbildung in horizontaler Richtung, ähnlich den in-situ Verhältnissen, ermöglicht. Die Bewegungen in der Suspension, bedingt durch die Aushubwerkzeuge, wird durch zwei in vertikaler Richtung auf und ab fahrender Löchplatten simuliert. Darüber hinaus wird das Filtrationsverhalten in Abhängigkeit der Zeit bei Variation der Druckverhältnisse in einem Gerät nach DIN 4126, welches auf den Arbeiten von Müller-Kirchenbauer [59, 60] basiert, untersucht. Das Scherverhalten der Kontaktzone Baugrund-Schlitzwand wird mit einem Versuchsaufbau analysiert, der es ermöglicht, direkt in einem Großrahmenscherkasten ($B \times H \times L = 300 \times 300 \times 100$ mm) aus Plexiglas, den Kontaktbereich Schlitzwand-Boden ähnlich zu den in-situ Verhältnissen herzustellen. Nach dem Abschervorgang kann die Ausbildung der Scherfläche lokalisiert werden. Ferner werden zum Vergleich Rahmenscherversuche der Kontaktzone Baugrund-Schlitzwand in einem konventionellen Rahmenschergerät ($B \times H \times L = 100 \times 100 \times 20$ mm) durchgeführt.

Mittels der experimentell gewonnenen Erkenntnisse können unter den genannten Randbedingungen Annahmen für typische Kornverteilungen von Filterkuchen getroffen werden. Ferner wird eine Bandbreite der Reibungsgröße von Filterkuchenmaterialien angegeben. Die Scherfestigkeit des Filterkuchens korreliert mit seinem Konsolidierungszustand (Krey-Tiedemann), der für den Kohäsionsanteil maßgebend wird. Der Konsolidierungszustand des Filterkuchens wird von Beginn seiner Entstehung an bis zur Konsolidierung durch den Frischbeton beschrieben. Es wird hierfür ein analytisches Modell entwickelt, welches das Anwachsen eines kompressiblen Filterkuchens an der Erdwandung, idealisiert als Schichtesystem, simuliert. Daraus wird der Konsolidierungszustand des Filterkuchens vor dem Verdrängungsprozess der Stützsuspension durch den aufsteigenden Frischbeton abgeleitet. Nachfolgend wird mittels Grundlagen aus der Strömungsmechanik gezeigt, dass der im Kontraktorverfahren aufsteigende Frischbeton den Filterkuchen nicht maßgebend verdrängen kann. Der Filterkuchen erfährt durch den Differenzdruck zwischen Frischbeton und Grundwasser eine zeitabhängige Konsolidierung, die am Anfang durch die Entwässe-

rung des Frischbetons aufgrund von Strömungskräften aktiviert wird und dann in eine annähernd statische Last übergeht. Die Größe des Frischbetondrucks sowie der zeitliche Verlauf in Abhängigkeit der Schlitztiefe und Betoniergeschwindigkeit werden mit dem Berechnungsmodell von Loreck [51] ermittelt. Die mit dem analytischen Modell beschriebene Entstehung des Filterkuchens wird numerisch nachmodelliert. Es wird der Filterkuchen als Mehr-Schicht-System abgebildet und nach Erreichen seiner Endtiefe mit dem Betondruckverlauf beansprucht. Aus der Konsolidierung unter dem Betondruck wird die Vorbelastungsspannung ermittelt unter welcher der Filterkuchen auskonsolidiert ist. Daraus kann die Kohäsion abgeleitet werden.

In Abhängigkeit der physikalischen Vorgänge während der Filterkuchenentstehung sowie verfahrenstechnischer Randbedingungen kann so die Scherfestigkeit des Filterkuchens in einem nichtbindigen Baugrund plausibel abgeschätzt werden.

Kapitel 2

Bisherige Erkenntnisse

2.1 Einfluss der Suspensionsstützung auf die Boden-Bauwerk Interaktion

In den national gültigen Normen und Empfehlungen hat sich für die Berechnungen von Schlitzwänden im GZ 1 ein Wandreibungswinkel von $|\delta| \leq \varphi/2$ etabliert. Bei genauerer Betrachtung finden sich jedoch Widersprüche auf der Erdwiderstandsseite.

Die EAB 1994 [23] gab konventionell einen Wandreibungswinkel bei Schlitzwänden von maximal $-\delta_p = \varphi/2$ auf der Grundlage gekrümmter Gleitflächen und von $-\delta_p = \varphi/3$ auf der Grundlage ebener Gleitflächen vor. Bei weichen bindigen Böden war $\delta_p = 0$ zu setzen. Die EAB 2005 [24] gibt nun sowohl für gekrümmte als auch für ebene Gleitflächen einen Wandreibungswinkel von $-\delta_p \leq \varphi/2$ an und entspricht somit der E DIN 4126 [22], die ferner einen Wandreibungswinkel von $\delta_p = 0$ verlangt, sobald die Suspensionsstandzeit 30 h überschreitet. Nach der DIN 1054-2005 [13] darf der axiale Widerstand von Schlitzwänden wahlweise über den Mantelreibungswiderstand oder die Reibungskraft $B_{h,k} \cdot \tan\delta_p$ ermittelt werden. Der auf Erfahrungswerten basierende Mantelreibungswiderstand der Tabellen B.1 bis B.4 der DIN 1054 ist für verrohrt und unverrohrt bei Verwendung einer Stützflüssigkeit hergestellten Ortbetonbauwerken gleich groß. Somit wird hier der Suspensionseinfluss gegenüber einer möglichen Auflockerung bei der verrohrten Bohrung nicht als reibungsreduzierend gewertet. Die EAB 2005 differenziert dagegen weiterhin zwischen der Wandrauigkeit einer Pfahl- und einer Schlitzwand. Bei Pfahlwänden ist ein Wandreibungswinkel von $-\delta_p \leq \varphi$ auf der Grundlage gekrümmter und $-\delta_p \leq 2/3\varphi$ auf der Grundlage

ebener Gleitflächen anzusetzen, weil die Wandoberfläche als "verzahnt" mit dem anstehenden Boden betrachtet wird. Bei Schlitzwänden wird die Wandoberfläche als "weniger rau" charakterisiert und so nur ein kleinerer Wandreibungswinkel ($-\delta_p \leq \varphi/2$) als bei Pfahlwänden für die statische Berechnung zugelassen.

Zusammenfassend wird hiermit gezeigt, dass zwischen den Mantelreibungswiderstand von verrohrt und unverrohrt bei Verwendung einer Stützflüssigkeit hergestellten Bohrpfehlen nicht differenziert wird. Auf der anderen Seite jedoch für die Wandreibung von Schlitzwänden, die physikalisch den selben Widerstand wie die Mantelreibung beschreibt, kleinere Werte als für Pfahlwände anzusetzen sind.

Der Ansatz der DIN 4126 und EAB von $|\delta_p| \leq \varphi/2$ beruht unter anderem auf Großversuchen, die 1962 im Rahmen des Baus einer Straßenbahnunterführung in München durchgeführt wurden, Weiß [116, 117]. Vor dieser Zeit wurde der Wandreibungswinkel oft sicherheitshalber zu $\delta = 0$ gesetzt, weil die Filterkuchenschicht zwischen Boden und Beton als Schmierschicht betrachtet wurde. Weder die Möglichkeit des durch die Unebenheit

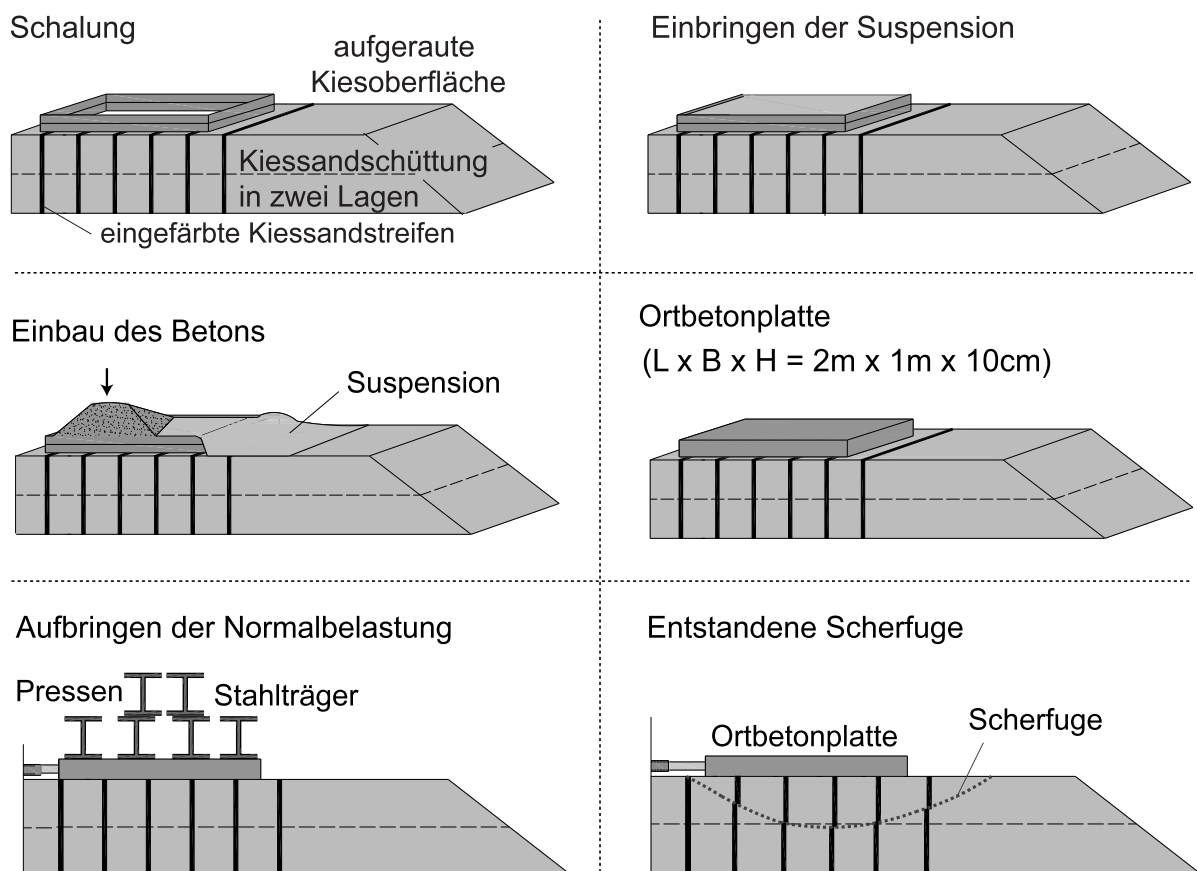


Bild 2.1: Großversuch, Weiß 1965 [116, 117]

der Wand bedingten teilweisen Verlauf der Scherfläche durch den Boden ($\delta = \varphi$) noch eine eventuell vorhandene Eigenfestigkeit des Filterkuchens wurden in Betracht gezogen. Die Wirtschaftlichkeit des Schlitzwandverfahrens bei diesem Bauprojekt hing davon ab, ob der Wandreibungswinkel $|\delta_p| \geq \varphi/2$ gesetzt werden konnte. Hierzu verlangte der Bauherr einen experimentellen Nachweis der Wandreibung. Die Versuchsanordnung bestand aus zwei nebeneinander auf einer künstlichen Kiessandschüttung (Münchner Baugrund, $\varphi = 38^\circ$) betonierten Platten, die unter Normalbelastung mittels hydraulischer Pressen abgesichert wurden, Bild 2.1. Die Normalbeanspruchung wurde durch Aufsetzen von Stahlträgern eingeleitet, die jedoch ungleichmäßige Setzungen hervorriefen. Um nach dem Versuch mögliche Verformungen im Kiessand festzustellen wurden vertikale Streifen der Schüttung schwarz eingefärbt. Alle in der Natur vertikal ablaufenden Vorgänge verliefen im Versuch horizontal. Das Versuchsprogramm sah drei Versuche bei unterschiedlichen Suspensionsstandzeiten (10 min, 2 d und 5 d) und einen Referenzversuch ohne Suspension vor. Als Stützsuspension kam eine Bentonit-Wassermischung zum Einsatz. Der hydraulische Gradient resultierte aus dem Suspensionseigengewicht mit einer Standhöhe von rd. 10 cm. Nach den Versuchen wurden die Betonplatten von der Kiessandschüttung abgehoben und es konnte unter dem Betonkörper eine Filterkuchen- und Kiessandschicht beobachtet werden, die als zementverfestigt beschrieben wird und bei den Versuchen mit langer Standzeit der Suspension etwas dicker ausgeprägt war. Es wird jedoch keine Auskunft darüber gegeben, woran die Zementverfestigung im Filterkuchen zu erkennen war. In allen Versuchen lag der ermittelte Reibungswinkel in der Größenordnung des Reibungswinkels des Bodens. Auf der sicheren Seite liegend wurde so bei diesem Bauprojekt der Wandreibungswinkel zu $|\delta_p| = \varphi/2$ gesetzt. Dieser Ansatz etablierte sich in den Normen und Empfehlungen und besteht bis heute.

Bei genauerer Betrachtung dieser Versuche stellt sich die Frage, ob der auf der Kiesschüttung simulierte Abschervorgang überhaupt mit einem Versagensvorgang einer Schlitzwand verglichen werden kann. Die nach den Versuchen beobachtete Scherfuge liegt sehr tief im Boden. Auffällig, wenn man Bild 2.1 genauer betrachtet, ist, dass sich die Scherfuge in Scherrichtung bis weit über den Randbereich der Betonplatte hinaus ausbildet. Es scheint fast so, als ob ein Grundbruchversagen aufgetreten ist. Des Weiteren hätte zur Abbildung der in-situ Verhältnisse eine mit Bodenfeinanteilen beaufschlagte Suspension eingesetzt werden müssen und nicht eine reine Bentonitsuspension. Auch der Filterkuchen konnte sich auf Grund des geringen Druckes nicht in dem Maß ausbilden, wie das bei der Herstellung einer Schlitzwand der Fall ist. Grundlegende Elemente der Schlitzwandbauweise wurden mir diesem Versuchsaufbau erfasst, jedoch die Ausbildung der Kontaktzone im

Detail, insbesondere der Filterkuchenschicht, wurden nur begrenzt wiedergegeben.

Der Einfluss von Bentonitsuspensionen auf die Mantelreibung unverrohrte hergestellter Ortbetonkörper war Anlass für eine Vielzahl von in-situ Versuchen.

Von Soos berichtet in [112] über Großversuche an suspensionsgestützten Ortbetonkörpern. Für die Verankerungskonstruktion des Zeltdachs des Olympiastadiums in München wurden unter anderem Schlitzwandelemente gewählt. Durch Zugversuche an drei Lamellen sollte die Wandreibung zwischen dem anstehenden Boden und den Schlitzwandelementen ermittelt werden (Bild 2.2). Elemente A und B besaßen die gleichen Abmessungen, hinge-

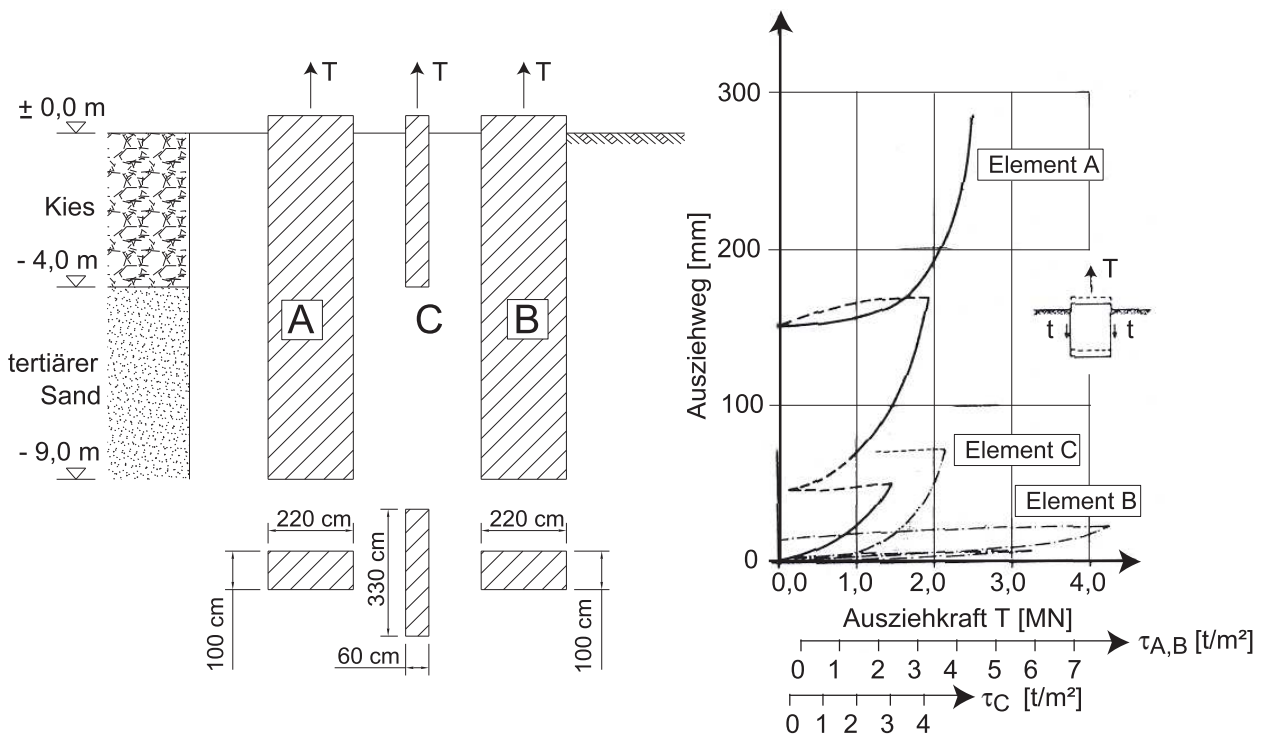


Bild 2.2: Zugversuche an Schlitzwandelementen, von Soos [112]

gen reichte Element C nur in den oberen Kieshorizont. Trotz gleicher Schlitzgeometrie fiel der Mantelreibungswiderstand des Elementes A viel geringer als der des Elementes B aus. Begründet wurden diese hohen Abweichungen durch die lange Standzeit der Suspension von zwei Tagen wegen eines Herstellungsstillstandes im Schlitz A und der daraus resultierenden größeren Filterkuchendicke. Konkrete Angaben über die Filterkuchenmächtigkeit liegen jedoch nicht vor. Bei genauerer Betrachtung von Bild 2.2 fällt auf, dass die maximal aktivierte Mantelreibung von Element B, gemittelt über die Kies- und Sandschicht, im Vergleich zu den anderen beiden Schlitzelementen sehr groß ist und mit einem sehr kleinen

Ausziehweg korreliert. Die Mantelreibung von Element C, welches nur in die Kiesschicht einbindet, ist in etwa halb so groß wie die des Elementes B, bei einem deutlich größeren Ausziehweg. Element A besitzt eine noch kleiner Mantelreibung. Dass eine größere Filterkuchendicke auf Grund der längeren Suspensionsstandzeit eine so große Reduktion der Wandreibung hervorruft, erscheint zweifelhaft. Bedingt durch die makroskopische Rauigkeit von Schlitzwandelementen sollte der Mantelreibungswiderstand von Element A und B weiterhin in derselben Größenordnung liegen. Vermutet wird, dass die hohe Wandreibung von Element B, andere vielleicht versuchsbedingte Ursachen hat.

Reese et al. [73] berichten von drei Probelastungen an unter Suspensionsstützung hergestellten Pfählen ($\varnothing = 75 - 90$ cm; $L = 13 - 22$ m). Der obere Bereich des Baugrundes war steifer Ton, der untere eine wasserführende Feinsandschicht. Nach den Probelastungen wurden die Pfähle herausgezogen, Länge und Durchmesser gemessen sowie der Kontaktbereich Boden-Pfahl untersucht. Annähernd über die gesamte Pfahllänge hatte sich eine Filterkuchenschicht ausgebildet, die neben Bentonit auch aus Sandfraktionen bestand. Der Scherbruch trat im anstehenden Boden und nicht in der Filterkuchenschicht auf, was mit einer höheren Scherfestigkeit des Filterkuchens als der des anstehenden Bodens begründet wurde.

Stocker [97] berichtet über ein weiteres umfangreiches Pfahlversuchsprogramm. Hierfür wurden 12 Pfähle mit einer Länge von je 6 m in einem Sandboden hergestellt. Um den Einfluss der Herstellungsmethode auf die Pfahltragfähigkeit zu untersuchen, wurden 5 Pfähle verrohrt, 2 unverrohrt unter Bentonitstützung, 2 unverrohrt jedoch mit einer durchgehenden Bohrschnecke und 3 verrohrt mit Wasserspülung abgeteuft. Es wurden Maximallasten von 2000 kN mit Hydraulikpressen aufgebracht. Die Probelastungen zeigten, dass bei gleichen geometrischen Abmessungen kein wesentlicher Unterschied des Tragverhaltens zwischen einem verrohrt und einem mit Bentonitsuspension hergestellten Pfahl festzustellen war. Beim Freilegen der Pfähle konnte bei den Suspensionsgestützten ein größerer Schaftdurchmesser und eine größere Verzahnung beobachtet werden. Die Scherfläche lag im Sand und nicht wie vermutet im Filterkuchen, der als 1 bis 3 mm dickes Zement-Bentonitgemisch beschrieben wird.

Voigh & Hohler [111] berichten von vier statischen axialen Zugprobelastungen an verrohrt und an suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen im Frankfurter Ton. Die Pfahllänge variierte zwischen 8 bis 9 m, der Pfahldurchmesser lag bei 78 cm und die max Grenzlast betrug 1650 kN. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass bei den verrohrt hergestellten Pfählen ein deutliches Versagen beim Erreichen der Grenzmantelreibung eingetreten ist, hingegen bei den suspensionsgestützten Pfählen kein vollständiges Versa-

gen erreicht wurde und so die Mantelreibung sogar geringfügig größer war.

Die in der Literatur beschriebenen in-situ Versuche an suspensionsgestützt hergestellten Ortbetonkörpern, insbesondere an Bohrpfählen, zeigen, dass bei qualitätsgesicherter und überwachter Herstellung weder in bindigen noch in nichtbindigen Böden ein maßgebender tragfähigkeitsmindernder Einfluss der Stützflüssigkeit zu erkennen ist. Zurückgeführt werden kann das auf die große makroskopische Verzahnung mit dem anstehenden Boden oder die hohe Festigkeit des Filterkuchens.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Laborversuche zur Untersuchung des Scherungsverhaltens zwischen suspensionsgestützten Ortbetonkörpern und dem anstehenden Boden.

Farmer et al. [26] berichten über Laborversuche in mit Sand gefüllten Triaxialzellen, in

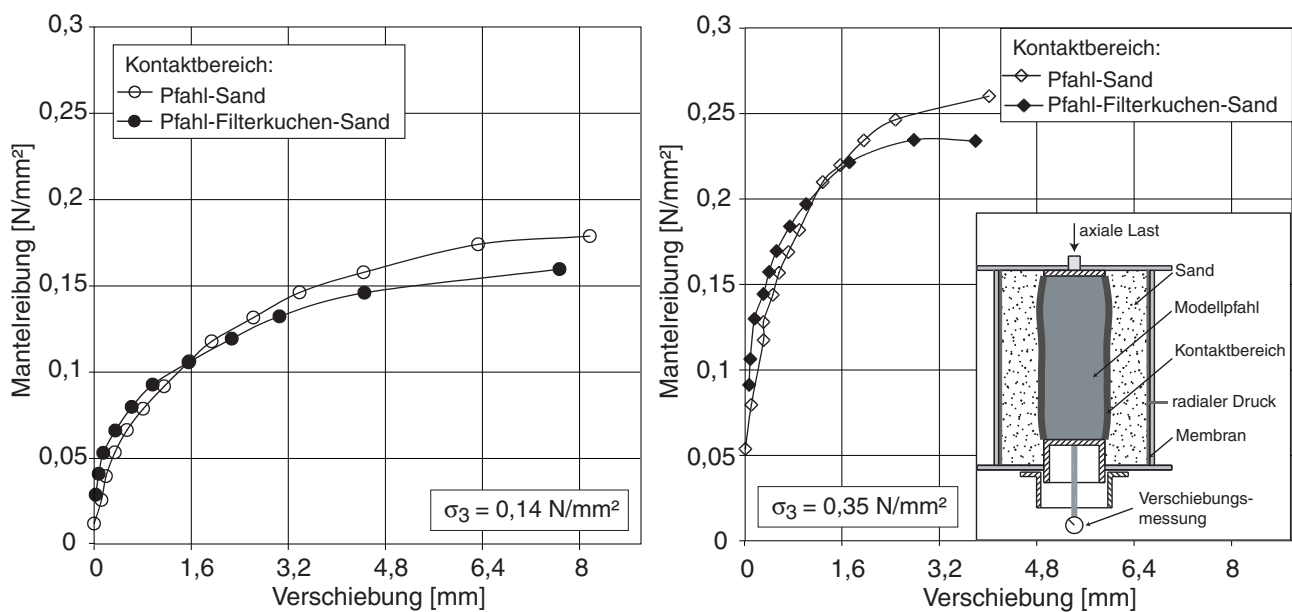


Bild 2.3: Mantelreibung von mit und ohne Suspensionsstützung hergestellten Modellpfählen, Farmer et al. [26]

denen Pfähle ($\varnothing = 150 \text{ mm}$ und $L > 2 \varnothing$) mit und ohne Suspensionsstützung, ähnlich den in-situ Verhältnissen, hergestellt wurden. Bei den suspensionsgestützten Pfählen bildete sich unter Suspensionseigengewicht innerhalb von 1,5 Stunden ein 5 mm mächtiger Filterkuchen aus. Die mit und ohne Suspensionsstützung hergestellten Pfähle wurden bei fünf unterschiedlichen Radialspannungen axial belastet und die Mantelreibung in Abhängigkeit der vertikalen Verschiebung ermittelt und miteinander verglichen. Es zeigt

te sich, dass bei kleinen Verschiebungen die Mantelreibung der mit Suspensionsstützung hergestellten Pfähle größer und bei größeren Verschiebungen kleiner als die der ohne Suspensionsstützung hergestellten Pfähle war, siehe Bild 2.3. Zurückgeführt wurden diese Ergebnisse darauf, dass der für das Wandreibungsverhalten Pfahl-Boden maßgebende Kontaktbereich aus einer Mischung von Bentonit und Bodenmaterial bestand und daher sowohl Reibungs- als auch Kohäsionseigenschaften besaß. Die Kohäsion, herbeiführt aus dem Bentonit, wurde schon bei sehr kleinen Verformungen mobilisiert. Bei großen Verformungen hingegen wirkt das Bentonit im Boden auf die Reibung reduzierend. Zu beachten ist hierbei, dass sich der Filterkuchen mit einem hydraulischen Gradienten aus dem Suspensionseigengewicht ausgebildet hat und so nur sehr gering konsolidiert war. Der anstehende Boden muss sich vollständig in den Filterkuchen hinein gedrückt haben. Bei einen unter in-situ Bedingungen, wie z.B. hohen hydraulischen Gradienten, entstandenen entsprechenden Kontaktbereich bildet sich in Sandböden dagegen aufgrund der Filtrations- und Konsolidierungsprozesse eine eigenständige in sich standfeste Filterkuchenschicht aus. Abweichungen der Mantelreibung hervorgerufen durch die Suspensionsstützung betragen bei diesen Versuchen nie mehr als 10%.

Scherversuche zur Ermittlung der Beton-Filterkuchen-Sand Interaktion sind von Cernak et al. [8] durchgeführt worden. Konkrete Angaben über die Probenherstellung, bis auf die Analogie zu den in-situ Verhältnisse, liegen jedoch nicht vor. Ein Suspensionsüberdruck von 25 kPa wurde angesetzt. Bis zu einer Suspensionsstandzeit von 18 h konnte kein Einfluss des Filterkuchens auf die Scherfestigkeit des Baugrund-Beton-Kontaktbereichs ermittelt werden. Bei einer Suspensionsstandzeit von 168 Stunden erhielt man jedoch einen Reibungswinkel gleich dem des Filterkuchens. Laut Cernak et al. wird die Scherfestigkeit des Filterkuchens erst bei langen Standzeiten, also bei Erreichen einer bestimmten Filterkuchendicke maßgebend, da durch die Unebenheiten des Betons das Scheren zunächst im Boden stattfindet. Nicht beschrieben wird, in welchen Zeitraum die Scherfestigkeit des Bodens aktiviert wird bzw. ab wann die Scherfestigkeit des Filterkuchens maßgebend ist. Der Einfluss der Bentonitsuspension auf die Mantelreibung von Ortbetonbauwerken wurde experimentell des weiteren von Wates & Knight [115] untersucht. In einem mit Mittelsand gefüllten Container wurden an einem mit Suspensionsstützung und an einem verrohrt hergestellten Pfahl Zugversuche ($\varnothing = 160$ mm, Länge = 1200 mm) durchgeführt. Der Einfluss der Bentonitsuspension rief eine Reduzierung der Ausziehungskraft von ca. 28 % hervor. Der für die Pfähle gewählte Beton besaß einen 9 mm Zuschlag. Nach Versagen wurde die Oberfläche der Pfähle untersucht. Die Oberfläche der verrohrt hergestellten Pfähle war relativ glatt mit einer Rautiefe in der Größe des Korndurchmessers des anstehenden Bodens. Die

Oberfläche des unter Bentonitsuspension hergestellten Pfahls war rauer mit einer Rautiefe von $1/3$ der Größe des Zuschlages. Der Querschnitt beider Pfähle war über die Länge relativ konstant. Die makroskopische Oberflächenrauigkeit des unter Bentonitsuspension hergestellten Pfahls war somit kleiner als die mikroskopische, was jedoch in-situ Beobachtungen widerspricht. Die Scherfuge des suspensionsgestützten Pfahles verlief im oberen Bereich (700 mm) im anstehenden Boden und näherte sich im unteren Bereich, den Filterkuchen (Dicke = 5 bis 9 mm) durchlaufend, immer weiter der Pfahloberfläche an. Hierbei war der Filterkuchen definiert als die Bentonitschicht, die ohne weitere Stützung vertikal stehen bleibt. Messungen des Filtratwasservolumens vor dem Einbringen des Betons ermöglichten die Filterkuchendicke rechnerisch abzuschätzen. Die analytisch bestimmte Filterkuchendicke betrug in etwa 12 mm. Dies zeigt, dass der im Kontraktorverfahren eingebrachte Frischbeton den entstandenen Filterkuchen nicht wesentlich verdrängt hatte. Ferner erläutern Farmer et al. [26] auf der Basis von Messergebnissen von Jones [42] (Bentonitsuspension), Powers [71] (Frischbeton) und Veder [110] (Filterkuchen), dass der Frischbeton den Filterkuchen nicht ohne Weiteres verdrängen kann, zumal die Scherfestigkeiten im folgenden Verhältnis zueinander stehen: Bentonitsuspension/Frischbeton/Filterkuchen = $1/16/123$.

In der Literatur finden sich Beiträge über eine Verfestigung des Filterkuchens im Kontaktbereich eines suspensionsgestützten Ortbetonbauwerks und dem anstehenden Boden durch den Eintrag von Zementschlämmen aus dem Beton. Weiß [116, 117] beschreibt z.B. die Filterkuchen- und angrenzende Kiessandschicht als zementverfestigt. Der Hydraulische Gradient in diesen Versuchen resultierte jedoch nur aus dem Suspensionseigengewicht bei einer Standhöhe von rd. 10 cm, so dass sich kein Filterkuchen mit großer Dichte ausbilden konnte. Beim Betoniervorgang konnte sich möglicherweise Zement mit der Suspension vermischt haben und zusammen in den Baugrund eingedrungen sein und so eine verfestigte Bodenzone unter der Betonplatte hervorgerufen haben (Versuchsaufbau siehe Bild 2.1). Des Weiteren gibt Weiß keine Auskunft darüber, woran die Zementverfestigung im Filterkuchen zu erkennen war. Auch Wates & Knight [115] sowie Pettry & Rich [70] berichten von einer Erhöhung der Festigkeit des Filterkuchens durch Eintrag von Natriumhydroxid aus dem Beton in den Filterkuchen (Röntgenbeugungsanalysen). Da jedoch Zementpartikel in Anwesenheit von Wasser (erste Hydratationsphase bis ca. vier Stunden) durch das auf der Oberfläche entstandene Trisulfat lange Nadeln bilden, die die Zementpartikel miteinander verbinden (siehe [35]), ist es schwer vorstellbar, dass Zement in die Plättchenstruktur des konsolidierten Filterkuchens maßgebend eindringen kann. Cernak [8] konnte

kein Eindringen von Zementpartikel in einen unter 25 kPa Suspensiondruck hergestellten Filterkuchen beobachten. Aufgrund der widersprüchlichen Literaturstellen wird eine mögliche Zementverfestigung untersucht, Kapitel 6.5.

2.2 Eigenschaften der Bentonitsuspension

Die rheologischen Eigenschaften von viskosen Flüssigkeiten, insbesondere der Bentonitsuspensionen, werden in Rahmen dieser Arbeit mehrfach aufgegriffen. Darauf Bezug nehmend werden folgend die wichtigsten Grundlagen dargelegt.

Stützsuspensionen bei Schlitzwänden im Zweiphasenverfahren bestehen in ihrem Ausgangszustand üblicherweise aus Wasser und Bentonit. Unter Suspensionen versteht man eine feine Verteilung von nicht gelösten Stoffen in einer Trägerflüssigkeit. Der Massenanteil des Bentonitpulvers beträgt bei typischen Stützsuspensionen ca. 3 bis 6 % des Suspensionsgewichtes [105]. Wichtige Eigenschaften von Bentonitsuspensionen im Schlitzwandbau sind die Stabilität (Beständigkeit gegen Entmischen im Laufe der Zeit), die Wichte γ_F , die Fließgrenze τ_F und die Viskosität η .

Bentonit ist ein hochquellfähiger Ton mit hohem Montmorillonitanteil (60 - 80 %). Montmorillonit gehört zur Gruppe der Dreischichtminerale und besteht aus zwei außen angeordneten Silicium-Tetraederschichten und einer dazwischen liegenden Aluminium-Oktaederschicht. Ein Teil der Aluminiumionen (Al^{3+}) der Oktaederschicht können durch niederwertige Magnesium-Ionen (Mg^{2+}) ersetzt werden. Auch die Siliciumionen (Si^{4+}) der Tetraederschichten können durch Aluminiumionen (Al^{3+}) niedrigerer Wertigkeit isomorph ausgetauscht werden. Wegen der niedrigeren Wertigkeit der ausgetauschten Ionen entsteht eine negative Oberflächenladung, die durch Adsorption von Kationen wie Calcium- (Ca^{2+}) oder Natriumionen (Na^+) neutralisiert werden kann. Je nach Art der Kationenanlagerung spricht man dann von Natrium- oder Calciumbentoniten. Der Schichtflächenabstand und somit die Kräfte, die die Silicatschichten zusammenhalten, hängen stark von der Hydratation (innerkristalline Quellung) der austauschbaren Kationen ab, da sich durch das Einbinden von Schichtwasser der Abstand von zwei Silikatschichten vergrößert. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Natriumbentonite liegt bei ca. 700 %, hingegen können Calciumbentonite nur ca. 300 % Wasser einlagern, [88]. Bei Vorhandensein von Na-Zwischenschichtkationen erfährt das "Kristallgitter", d. h. der Abstand der Lamellen (je ein dreischichtiges Mineral), unter Wassereinbindung eine Aufweitung (Aufquellen in Abhängigkeit der äußeren Bedingungen ist variabel [40]), die so groß werden

kann, dass der Zusammenhalt der Schichtsilicate verloren geht und eine Aufteilung des Montmorillonit-Kristalls in jeweils 15 bis 20 Einzellamellen eintritt [113]. Die Flächen der einzelnen Lamellen haben eine negative Ladung, die Kanten sind positiv geladen und werden so in der Bentonitsuspension über dünne Wasserbrücken in Form einer so genannten Kartenhausstruktur elektrostatisch miteinander "verklebt", [31]. Aufgrund dieser Kartenhausstruktur besitzt die Suspension eine sogenannte "Fließgrenze τ_F ", die Walz [113] folgendermaßen definiert: Wird in einer Suspension mit einer ausreichenden Menge an Bentonit eine Flügelsonde mit einem definierten, zylindrischen Körper abgeschert, wird eine große Anzahl elektrostatischer Kontakte zwischen den Silikatlamellen verschoben oder durchtrennt. Das Verschieben oder Zerstören eines elektrostatischen Kontaktes erfordert nur eine winzige Kraft, die sich in der Summe über die Anzahl der Kontaktstellen auf der Mantelfläche des zylindrischen Körpers als "Scherfestigkeit" der Suspension äußert. Die Scherfestigkeit, die auch als "Fließgrenze τ_F " bezeichnet wird, ist zum einen von der Anzahl der Kontakte und zum anderen von der Größe der Festigkeiten der einzelnen "Kationenbrücken" zwischen den Silikatlamellen abhängig. Bei intensiven Bewegungen der Suspension wird ein Großteil der elektrostatischen Kontakte zerstört, so dass die Fließgrenze relativ klein ist. Kommt die Suspension aber zur Ruhe, werden zerrissene "Kationenbrücken" allmählich wieder aufgebaut, da es sich um elektrostatische Kontakte handelt. Die relativ kleine Scherfestigkeit einer stark durchgerührten Bentonitsuspension (dynamische Fließgrenze) nimmt daher im Laufe einer "Ruhezeit" zu und erreicht asymptotisch einen Grenzwert (statische Fließgrenze). Dieser reversible Vorgang der zeitweiligen Reduzierung der Scherfestigkeit durch Verformungsarbeit und ihres Wiederaufbaus bei Ruhe wird "Thixotropie" genannt. Jessberger [41] definiert die Thixotropie als die isotherme und reversible Änderung der physikalischen Eigenschaften eines Stoffes. Diese äußert sich in einer Verringerung des Verformungswiderstandes bei mechanischer Beanspruchung und in einer zeitabhängigen Rückkehr in einen Zustand größeren Verformungswiderstandes, sobald die mechanische Beanspruchung beendet ist. Bei einem Calcium-Bentonit gelingt das Aufspalten des Bentonits in einzelne Silikatlamellen weniger gut als bei Natrium-Bentonit, so dass bei gleichem Tongehalt eine Natrium-Bentonit-Suspension wegen der mindestens um den Faktor 10 größeren Teilchenanzahl eine wesentlich höhere Fließgrenze als die Suspension aus Calcium Bentonit entwickelt, [113]. Es lassen sich jedoch in einem chemischen Prozess ("Aktivierung" durch Basenumtausch [4]) Ca-Ionen gegen Na-Ionen austauschen und so die günstigen Eigenschaften übertragen.

Im Allgemeinen kann jede Flüssigkeit, wie auch eine Bentonitsuspensionen, auf Grund

ihres rheologischen Verhaltens in rein bzw. linear viskose (Newton'sche) und nicht rein viskose Stoffgruppen unterteilt werden, siehe Bild 2.4. Unter Viskosität η versteht man den Fließwiderstand rheologischer Stoffe und ist ein Maß für die innere Reibung einer Substanz. Aufgrund dieser inneren Reibung setzt die Substanz einer plastischen Verformung (Strömung) einen Widerstand entgegen. Sowohl gasförmige als auch flüssige und feste Substanzen besitzen eine gewisse Viskosität. Die Viskosität wird durch folgenden Grundversuch, der in Bild 2.4 schematisch dargestellt ist, verdeutlicht: Man betrachtet zwei parallele Platten in einem Abstand H zueinander. Zwischen diesen Platten befindet sich eine zähe Flüssigkeit. Die obere Platte wird mit einer Kraft F und einer daraus resultierenden Geschwindigkeit v_0 gezogen, wobei auf die Flüssigkeit eine Schubspannung τ übertragen wird. Die untere Platte bleibt in Ruhe. An der Grenzfläche Obere Platte/Flüssigkeit berechnet sich die Schubspannung τ zu:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

Die Geschwindigkeit v_0 der Flüssigkeit nimmt über die Tiefe x , vereinfacht linear angenommen, ab und erzeugt ein Geschwindigkeitsprofil, da die zähe Flüssigkeit aufgrund von Adhäsionskräften sowohl an der oberen als auch an der unteren Platte haftet. Das

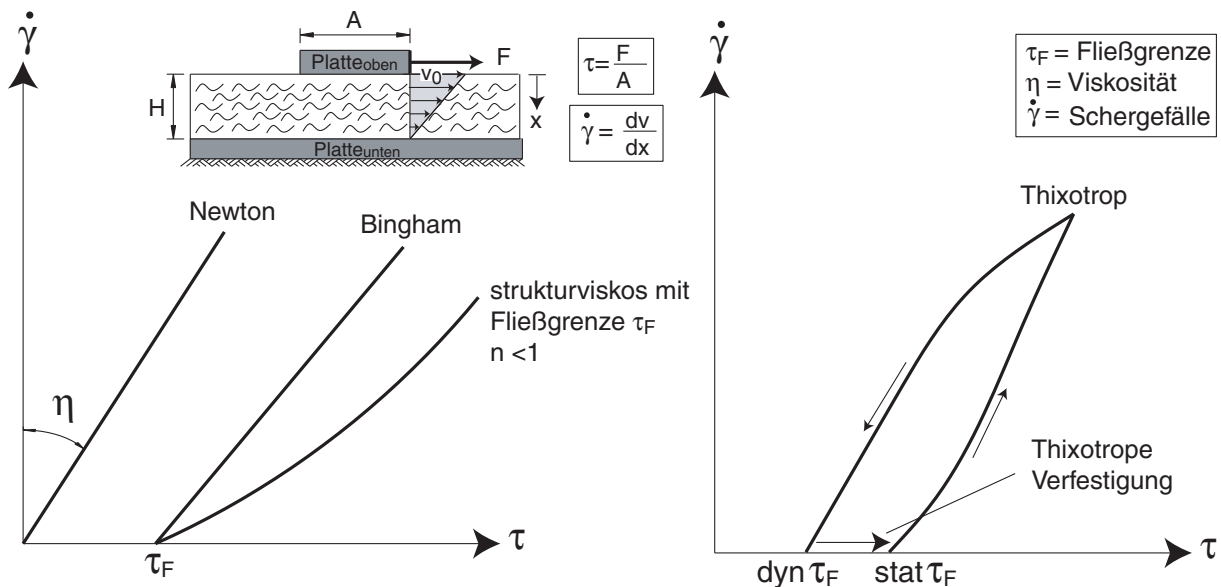


Bild 2.4: Fließkurven von unterschiedlich rheologischen Flüssigkeiten

Verhältnis der Geschwindigkeitsdifferenz dv bezogen auf die Tiefe x wird als Schergaengefaelle

$\dot{\gamma}$ bezeichnet:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx} \quad (2.2)$$

Dem Schergefälle $\dot{\gamma}$ ist die angreifende Schubspannung τ bei rein viskosen Flüssigkeiten, wie Wasser oder Öle, proportional, wobei es sich bei dem Proportionalitätsfaktor um die Viskosität η handelt:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ bzw. } \tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Unter nicht rein viskosen Flüssigkeiten versteht man solche Stoffe, deren Viskosität vom Schergefälle oder/und von der Dauer der Scherbeanspruchung abhängt und so keine Konstante darstellt. Hierzu zählen z.B. strukturviskose Flüssigkeiten, die bei einem wachsenden Schergefälle eine ständige Viskositätsabnahme (auch "shear thinning oder pseudoplastisch" genannt [39]) aufzeigen:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

Dieses strukturviskose Verhalten ist begründet durch den Abbau struktureller Verbindungen im Scherfeld [29]. Ist eine Suspension in Bewegung kommt es zu einer Ausrichtung von plättchen- oder kettenförmigen Dispersionsbestandteilen, wodurch amorphe Strukturen zerstört und die inneren Reibungskräfte reduziert werden. Auch so genannte Bingham'sche Flüssigkeiten (z.B. Zementleim, Mörtel und Frischbeton) gehören zur Gruppe der nicht rein viskosen Substanzen. Im Unterschied zu rein viskosen Flüssigkeiten besitzen sie einen so genannten Anlasswert f , der auch oft Fließgrenze τ_F oder Schwellwert genannt wird. Der Anlasswert gibt die Schubspannung an, bei deren Einwirken gerade bleibende Formänderungen oder plastisches Fließen beginnt, [41]. Dies bedeutet, dass die Flüssigkeit Schubspannungen bis zu einem Wert τ_F aufnehmen kann ohne dass eine plastische Deformation eintritt. In diesem Fall ist die Viskosität η konstant, also nicht von dem aufgetragenen Schergefälle $\dot{\gamma}$ abhängig. Das Fließgesetz lautet dementsprechend:

$$\tau = \tau_F + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Baustoffe, die Zusatzmittel wie Methylcellulose, Bentonit oder ähnliches enthalten, weichen in ihrer Fließkurve deutlich von der Geradenform des Bingham'schen Körpers ab und besitzen demnach eine Strukturviskosität. Der allgemeine rheologische Ansatz lautet:

$$\tau = \tau_F + \eta \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

Bentonitsuspensionen (Tonsuspensionen) sind weder Newton'sche noch Bingham'sche sondern thixotrope Flüssigkeiten, siehe z.B. [56, 41, 87, 105] und besitzen wie schon erläutert

eine dynamische und statische Fließgrenze. Durch eine mechanische Scherverformung (z.B. Rühren) der sich in Ruhe befindenden Suspension wird diese bei einer gleichzeitigen Abnahme der Fließgrenze von ihrem Maximalwert (statische Fließgrenze) bis hin zu ihrem Minimalwert (dynamische Fließgrenze) verflüssigt. Wird die Suspension daraufhin in Ruhe gelassen, verfestigt sie sich wieder und baut ihre ursprüngliche Fließgrenze innerhalb einer gewissen Zeit wieder auf (siehe thixotrope Fließkurve im Bild 2.4).

2.3 Feststoffbewegungen der Stützsuspension

Zu den Feststoffverlagerungen einer Stützsuspension zählt neben der Sedimentation innerhalb des Schlitzes die bereits in Kapitel 3.4 erläuterte Penetration der Suspension in das angrenzende Erdreich und die Filtration der Suspension an der Schlitzwandung in den anstehenden Boden.

Die Sedimentation beschreibt das Ablagern bzw. Absetzen von Teilchen aus Flüssigkeiten oder Gasen unter dem Einfluss der Gravitation. Während des Absinkens der Teilchen in der Suspension wird in der Regel das Wasser nach oben verdrängt, so dass bei einer vollständigen Sedimentation oberhalb einer Feststoffmatrix eine Säule aus abgeklärtem Wasser entsteht, Müller-Kirchenbauer et al. [61]. Aufgrund der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Teilchen kann es zu Platzwechselfvorgängen zwischen den einzelnen Feststoffen kommen. Die Feststoffe bleiben aber weiterhin im Dispersionsmittel suspendiert. Die Sinkgeschwindigkeit v eines Bodenteilchens idealisiert als Kugel mit dem Durchmesser d in der Trägerflüssigkeit (Wasser bzw. Newton'schen Flüssigkeit) kann nach dem Gesetz von Stokes nach Gleichung 2.7 bestimmt werden. Diese Gleichung gilt für eine Kugel in einem unendlich ausgedehnten Medium.

$$v = \frac{(\gamma_{Kugel} - \gamma_{Wasser}) \cdot d^2}{18 \cdot \eta_{dyn}} \quad (2.7)$$

Die dynamische Zähigkeit ist von der Temperatur abhängig und beträgt für Wasser $\eta_{dyn}(10^\circ) = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ bzw. $\eta_{dyn}(20^\circ) = 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$. Demnach hat eine bestimmte Korngröße d die Tiefe H nach einer Zeit t mit der Geschwindigkeit v erreicht. Die Korngröße berechnet sich zu:

$$d = \sqrt{18 \cdot \eta_{dyn} \cdot H/t \cdot (\gamma_{Kugel} - \gamma_{Wasser})} \quad (2.8)$$

Einen Beitrag zum Sedimentations- und Stabilitätsverhalten von mit Sand beaufschlagten Bentonitsuspensionen liefert Möbius et al. [54]. Es wurden mit drei Bentonitsorten

(Bentonit 1 ist rein aktiviert, Bentonite 2 und 3 sind chemisch modifiziert) unterschiedlich konzentrierte Suspensionen (Bentonitgehalt: 30, 45 und 60 g/l) hergestellt. Die Bentonitsuspensionen wurden mit den im Bild 2.5 dargestellten Sanden beaufschlagt, indem man zu jeweils 1 l Suspension 100 g Sand beimengt. Bei einer Versuchsreihe wurde der Sand nach einer Minute Quellzeit in die Suspension eindispersiert und bei einer zweiten Versuchsreihe erst nach 24 Stunden. Die Suspensionen konnten das Sandmaterial nicht

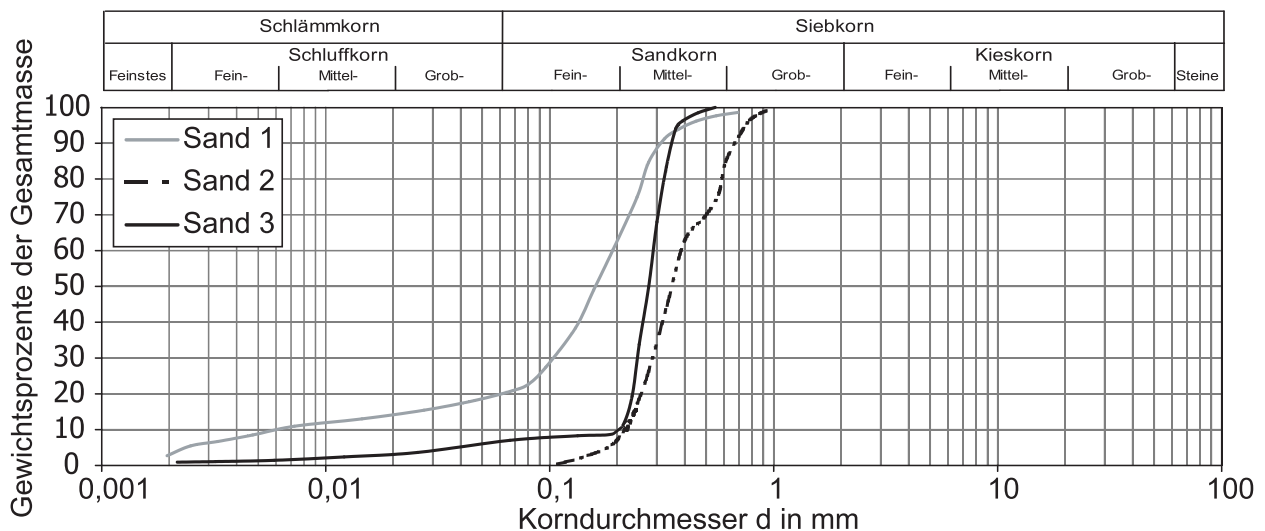


Bild 2.5: Kornverteilungskurven der verwendeten Sande, [54]

vollständig in Schwebelage halten. Welche Sandmengen bei den jeweiligen Suspensionen nach fünf Tagen noch in Schwebelage vorlagen zeigt Tabelle 2.1.

Die Auswertung der Versuche ergab, dass kein Unterschied der rheologischen Eigenschaften zwischen den Suspensionen, auf Grund der Vermischung mit den drei unterschiedlichen Sanden, aber auch kein deutlich verschiedenes Verhalten der drei Bentonitsorten beobachtet werden konnte. Die drei Bentonitgehalte zeigten keinen eindeutig feststellbaren Einfluss auf das Sedimentationsverhalten der Sande. Praktisch alle Materialkennwerte der Suspensionen wurden durch den Sandzusatz erhöht. Soweit bei den rheologischen Eigenschaften Unterschiede zwischen vorgequollenen und nicht vorgequollenen Suspensionen überhaupt feststellbar waren, sind die Werte der vorgequollenen Suspension meist höher. Hinsichtlich der Filterverluste verhielten sich die drei Sande sehr verschieden: Sand 1 erhöhte in allen Fällen die Messwerte stark, die Sande 2 und 3 verringerten überraschenderweise alle Werte. Bei den vorgequollenen Suspensionen sind die Veränderungen deutlich geringer als bei den nicht vorgequollenen. Bei den Filterverlusten war eine beträchtliche

Tabelle 2.1: Sandgehalte der Suspensionen nach 5 Tagen Sedimentation in g/l aus der Dichte errechnet, [54]

Sand	1			2			3		
Bentonitgehalt [g/l]	30	45	60	30	45	60	30	45	60
Susp. mit Bentonit 1 (vorgequollen)	86	100	82	52	92	98	82	79	100
Susp. mit Bentonit 1 (nicht vorgequollen)	65	97	93	16	100	91	44	87	87
Susp. mit Bentonit 2 (vorgequollen)	73	88	87	38	75	95	46	82	77
Susp. mit Bentonit 2 (nicht vorgequollen)	93	98	99	37	93	85	80	88	95
Susp. mit Bentonit 3 (vorgequollen)	96	73	96	90	90	100	85	77	95
Susp. mit Bentonit 3 (nicht vorgequollen)	93	89	100	73	90	88	81	93	90

Abhängigkeit vom Bentonitgehalt der Suspension festzustellen.

Die Stabilität und die Feststoffbewegungen einer Suspension sowie insbesondere das Filtrationsverhalten von Stützsuspensionen wurden des Weiteren von Weiß [118] und Schlötzer [83] untersucht. Beiträge über Filtrationsprozesse mit gleichzeitiger Filterkuchenbildung sind auch im Rahmen der industriellen Prozesstechnik vorhanden. Neben Schweiger [93] berichten z.B. auch Ruth et al. [79], Müller [58], Anlauf [2] und Alles [1] über die Kuchenbildung auf Filtern. Eine Durchströmungsgleichung für poröse Systeme zur Quantifizierung der Darcyschen Konstante und der Permeabilität wurde von Carman [6] aufgestellt. Die Filterkuchenbildung an einem porösen Medium, wie z.B. dem Baugrund, ist ein Filtrationsprozess. Dabei werden nach Stagnation der Suspension im anstehenden Boden (Filter) die in der Suspension dispergierten Feststoffteilchen zunächst im Filtermedium selbst abgeschieden. Vorausgesetzt wird hierbei, dass die Porengröße des Baugrundes ein Eindringen der Suspensionsfeststoffe zulässt. Mit zunehmender Filtrationsdauer lagern sich weitere Partikel auf der Oberfläche des Filtermediums ab, wodurch sich eine Feststoffschicht, der Filterkuchen, bildet. Die kontinuierliche Kuchenbildung kann vereinfacht über eine Massenbilanz zwischen Feststoffanteil in der Suspension und der Masse des durch Filtration gebildeten Filterkuchens beschrieben werden. Wie aus Bild 2.6 zu ersehen ist, wird das Suspensionsvolumen V_{Susp} mit der Feststoffkonzentration c_G aufgeteilt in ein Filtratvolumen V_L und einen Filterkuchen mit der Dicke h_k , der Grundfläche A und der Porosität ε . Die Masse des Feststoffes im Kuchen entspricht derjenigen Masse des Feststoffes, der in den Boden infiltrierten Suspension, d.h. $M_{s,Filterkuchen} = M_{s,Suspension}$

([93]):

$$h_k \cdot A \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s = (V_L + \varepsilon \cdot A \cdot h_k) \cdot \rho_L \cdot \frac{c_G}{1 - c_G} \quad (2.9)$$

mit : $\rho_s = \text{Feststoffdichte}$

$\rho_L = \text{Flüssigkeitsdichte}$

Bei diesem Ansatz werden Annahmen wie Inkompressibilität des Filterkuchens getroffen und somit über seine Dicke ein konstanter Filtrationswiderstand sowie eine konstante Porosität.

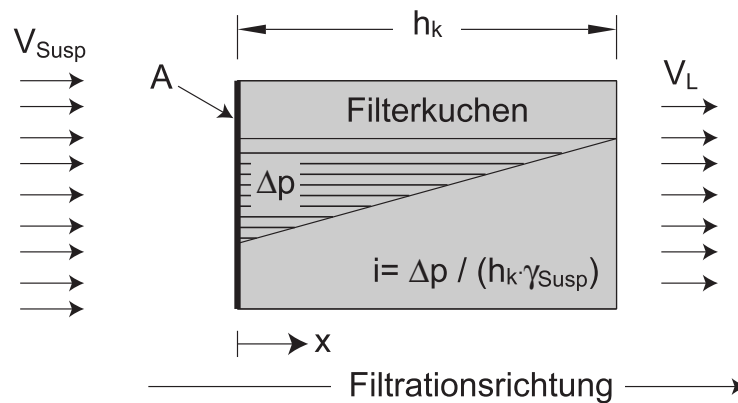


Bild 2.6: Bildung des Filterkuchens

Auf Grund seiner Entstehung ist der Filterkuchen genau betrachtet ein inhomogenes Material. Der Filterkuchen ist im Bereich des Filtermediums stärker konsolidiert als in Richtung des offenen Schlitzes. Der Übergang zwischen Suspension und Filterkuchen verläuft fließend, so dass keine eindeutige Grenzlinie definiert werden kann. Die Porenzahl, der Wassergehalt und die Durchlässigkeit sowie die daraus abzuleitenden Materialparameter des Filterkuchens sind daher über die Dicke nicht konstant, sondern im Bereich des Filtermediums am kleinsten, Tiller [102]. Komplizierte theoretischen Modelle für die Entstehung kompressibler Filterkuchen, wie sie beispielsweise Tiller et al. [103] und Shirato et al. [94] entwickelten, haben kaum Eingang in die Praxis gefunden, da sie geschlossen analytisch nicht lösbar sind.

Einen Beitrag zur Infiltration von Stützsuspensionen in den anstehenden Boden und dem daraus resultierenden "inneren" Filterkuchen in den Poren des Erdreiches liefert Martak [53]. Martak beschreibt die Schlitzwandsuspension als fiktives Korngemenge. Die Feststoffe der Suspension stammen aus dem anstehenden Boden. Um die Kolmation bzw.

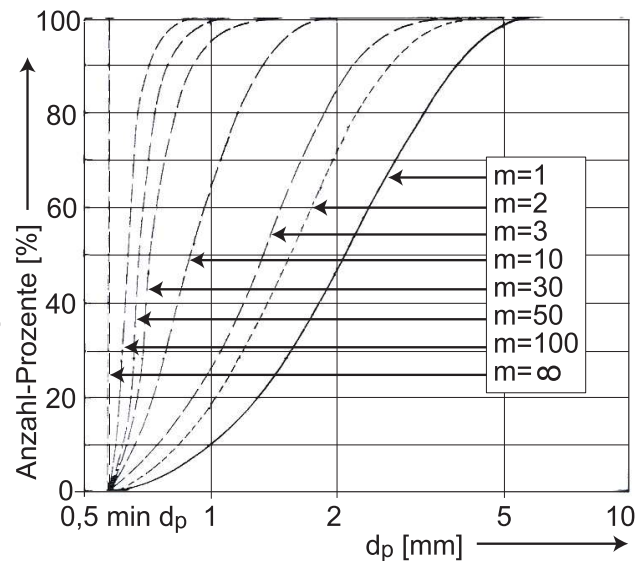
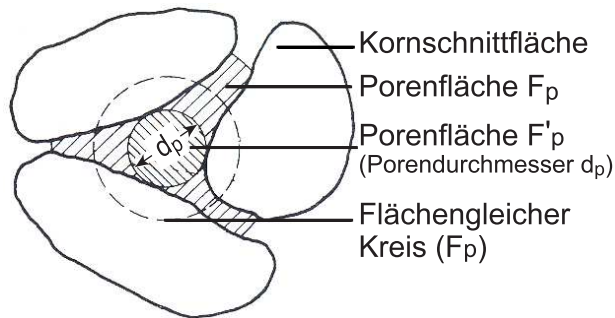
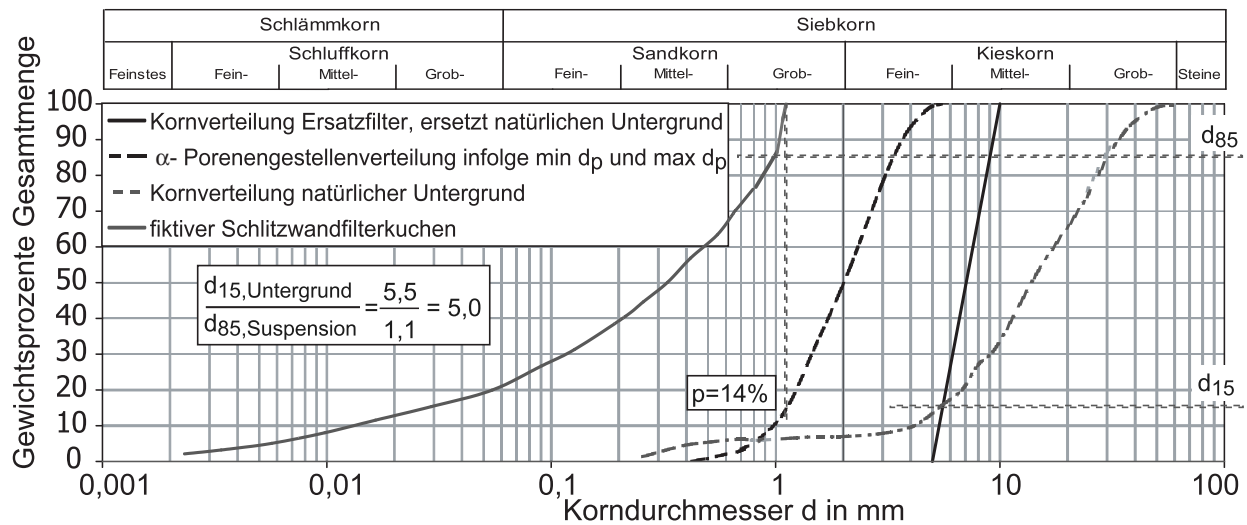


Bild 2.7: Darstellung eines Elementes einer Porenschnittfläche, [120]

Bild 2.8: α -Porenstellenverteilung für Kies 5-10 mm in Abhängigkeit von der Filterebenzahl m , [120]

die Suffosion der Suspension im anstehenden Boden (Filter) quantitativ zu erklären, hat Wittmann [120] auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis ein erweitertes Kriterium der Filterstabilität entwickelt, bei dem die Korndurchmesserverteilung des Filterstoffes als Porenstellenverteilung dargestellt wird. Daraus folgt für das abzufiltrierende Kornmenge (Suspension), bei welchem Größtkorn dieses durch den Filter "durchgewaschen" wird, bzw. ab welchem Kleinstkorn das Kornmenge vollständig zurückgehalten wird (filterfester Bereich). Als m wird nach Wittmann die Anzahl der erforderlichen Filterebenen bezeichnet, die notwendig sind, um ein abzufiltrierendes Kornmenge zumindest selektiv zurückzuhalten. Der Abstand der Filterebenen, der mit der Anzahl m multipliziert, die Filterlänge L_F ergibt, wird als das für eine signifikante Änderung der Porenweite erforderliche Längenmaß definiert, das sich mit der Verteilung und dem Bereich der Porengrößen ändert. Mit dem Hintereinanderschalten von m Filterebenen, das der GesamtfILTERlänge gleichkommt, verringert sich der maximale Porendurchmesser von im Extremfall $m = \infty$ auf den kleinstmöglichen Porendurchmesser des Filters, siehe Bild 2.8. Nur Korngrößen die kleiner als diese Minimalpore sind, werden nicht abgefiltert.

Martak überträgt dieses Filterkonzept auf die Schlitzwandsuspension. Der anstehende Untergrund mit bekannter Kornverteilungskurve fungiert gegenüber der Schlitzwandsuspension als Filter, wobei seine Porenstellenverteilungskurve zu ermitteln ist. Wittmann



$d_F = 1$ mm, Filterkuchendicke im Presswasserversuch
 $p =$ Verbleibende Porenanteile als Funktion des Erwartungswertes $p^* = 99,99\%$
 $L_F = 50$ cm Filtrationslänge aus Baustellendaten
 $m = 61$ Anzahl der Filterebenen

Bild 2.9: Filterkriterium für Schlitzwandfilterkuchen; Untergrund: enggestufter Kies, [53]

misst für einen Filterkies 5 mm bis 10 mm die Porenweiten mit einem Digitalplanimeter. Martak leitet aus der Kornverteilung des Filtermaterials die Porenengestellenverteilung mittels der maximalen und minimalen Porenquerschnitte, $\max d_p$ und $\min d_p$, für einen Filterkies 5 mm bis 10 mm, einen Filtersand 1 mm bis 2,2 mm und einen Feinsand 0,5 mm bis 1,5 mm her, siehe repräsentativ Bild 2.9.

$$\max d_p \approx D_{max} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (2.10)$$

mit: $D_{max} =$ maximaler Korndurchmesser des Filters
 $\alpha \approx 0,3$ nach Wittmann

$$\min d_p \approx 0,1547 \cdot D_{min} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (2.11)$$

mit: $D_{min} =$ minimaler Korndurchmesser des Filters
 $\alpha \approx 0,3$ nach Wittmann

Baustellenerfahrungen zeigen Suspensionseindringtiefen für einen Filterkies (5 mm - 10 mm, $d_{15} = 5,5$ mm) in der Größenordnung von ca. $L_F = 50$ cm. Bei einer Erhöhung des Sandgehalts der Suspension mit Schwebestoffen aus dem anstehenden Boden wird eine reduzierte Eindringtiefe beobachtet. Aus der Filterlänge L_F lässt sich auf der α -Porenengestellenverteilungskurve der fiktive Größtkorndurchmesser des "inneren" Filterkuchens abschätzen, Bild 2.9. Gleichzeitig wird so das Größtkorn angegeben, das aus

der Suspension in den anstehenden Boden noch eindringen kann und nicht sofort an der Bodenoberfläche abfiltriert wird. Ein Vergleich der Kornverteilungen des anstehenden Bodens mit der des fiktiven "inneren" Filterkuchens zeigt, dass das Verhältnis $d_{85,FK} / d_{15,Untergrund}$ um 5 liegt. Auch bei den weiteren zwei untersuchten Kornmischungen liegt das Verhältnis in der selben Größe, was an die Filterregel von Terzaghi erinnert, [53].

2.4 Scherfestigkeit in Relation zum Konsolidierungszustand

Der sich an der Erdwandung ausbildende Filterkuchen einer Zweiphasenschlitzwand ist, auf Grund der Vermischung des anstehenden Bodens mit der Stützsuspension während der Herstellungsphase, ein gemischtkörniges Material. Das Bentonit der Suspension sowie Tonpartikel aus dem anstehenden Boden verleihen dem Filterkuchen kohäsive Eigenschaften. Wie schon in der Einleitung, Kapitel 3.4, beschrieben, erfährt der Filterkuchen nach seiner Bildung durch den Differenzdruck zwischen Frischbeton und Grundwasser bis zum Erstarren des Betons eine Konsolidierung und so, eine eingeprägte Vorbelastung.

Die Scherfestigkeit bindiger Böden wird durch einen Reibungs- und einen Kohäsionsanteil beschrieben. Es ist einschlägig bekannt, dass vorbelastete bindige Böden eine größere Scherfestigkeit besitzen als erstbelastete bindige Böden. Der Kohäsionsanteil ist von der Vorbelastungsspannung σ'_v und damit vom Überkonsolidierungsgrad abhängig. Bei erstbelasteten bindigen Böden ist die Kohäsion vernachlässigbar gering.

In modernen Stoffgesetzen wird die Vorbelastungsspannung über die Fließfläche beschrieben. Hierzu zählt z.B. das "Modified Cam-Clay Model", auch MCC-Modell genannt, was aufbauend auf einer großen Anzahl von Triaxialversuchen an wassergesättigten Tonböden entwickelt wurde, Bild 2.10.

Das MCC-Modell, basierend auf Roscoe & Burland [76] und Schofield & Wroth [85], formuliert in Form von Spannungsinvarianten p' und q , wobei p' für die mittlere Normalspannung und q für die Deviatorspannung steht. Es wird eine assoziierte Fließregel vorausgesetzt, bei der die Richtung \mathbf{m} des plastischen Dehnungsincrementes senkrecht zur Fließfläche steht. Die Fließfläche bzw. die Fließfunktion f wird als ein auf der p' -Achse symmetrisches Ellipsoid definiert und kann isotrope Materialien zutreffend beschreiben, siehe hierzu [96]. Die isotrope Vorbelastung p'_c ist ein Verfestigungsparameter. Dieser

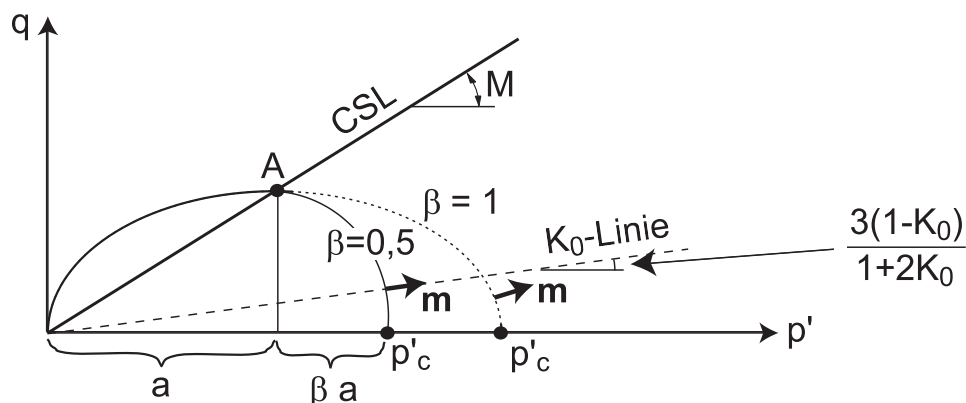


Bild 2.10: "Modified Cam-Clay Model"

Parameter beschreibt den Durchmesser der Ellipse gemessen entlang der p -Achse. Die Ellipse kann infolge der Verfestigung oder Entfestigung sowohl größer als auch kleiner werden. Das p'_c kann sich also ändern. Unterhalb des Ellipsoids verhält sich das Material elastisch. Die "Critical State Line" bzw. CSL schneidet die Fließfläche in ihrem Maximum, dem Punkt A im p' - q -Diagramm. Critical State beschreibt über die "kritische Porenzahl" den Zustand, bei welchem der Boden beim plastischen Scheren weder dilatiert noch kontrahiert. Diese somit stationären Spannungszustände liegen im p' - q -Diagramm auf einer Geraden, der CSL, mit der Steigung M :

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi'_s}{3 - \sin \varphi'_s} \quad (2.12)$$

mit: $\varphi'_s =$ Winkel der Gesamtscherfestigkeit [°]

Hierbei wird unterstellt, dass bei erstbelasteten bindigen Böden, die Restscherfestigkeit gleich der Gesamtscherfestigkeit ist. Bei Spannungspfaden unterhalb der CSL (wet side) wird verfestigendes bzw. kontraktantes und oberhalb der CSL (dry side) entfestigendes bzw. dilatantes Materialverhalten vorausgesetzt.

Die allgemeine Form der elliptischen Fließfläche lautet:

$$f = p'^2 + \left(\frac{q}{M}\right)^2 - p' \cdot p'_c = 0 \quad (2.13)$$

Nach Gleichung 2.13 liegen die oedometrischen Spannungsverhältnisse im Vergleich zu dem empirischen Erdruhedruckbeiwert $K_0 \approx 1 - \sin \varphi'_s$ zu hoch, so dass für eine realistische K_0 -Prognose der unterkritische Bereich ($|q/p'| < M$) mit dem Faktor β modifiziert wird, Bild 2.10.

Für $q < M \cdot p'$ lautet f :

$$f = [p' + (\beta - 1) \cdot p'_c]^2 - \beta^2 \cdot \left[p'^2 + \frac{q^2}{M^2} \cdot (\beta^2 - 1) \right] = 0 \quad (2.14)$$

Für $q > M \cdot p'$ lautet f :

$$f = p'_c - \left(p' + \frac{q}{M} \right) \cdot \frac{1 + \beta}{2} = 0 \quad (2.15)$$

Niemunis bestimmt in [67] für die oedometrischen Spannungsverhältnisse den neuen K_0 -Wert in Abhängigkeit von β , wobei die Fließrichtung \mathbf{m} parallel zu der K_0 -Linie verläuft, Bild 2.10:

$$K_0 = \frac{-81 \cdot \beta^2 + 81 \cdot \beta^4 - 9 \cdot M^2 + 9 \cdot \beta^2 \cdot M^2 - 2 \cdot M^4 + 9 \cdot M^2 \cdot \sqrt{9 \cdot \beta^2 + M^2}}{-81 \cdot \beta^2 + 81 \cdot \beta^4 - 9 \cdot M^2 + 36 \cdot \beta^2 \cdot M^2 + 4 \cdot M^4} \quad (2.16)$$

Ist $K_0 \approx 1 - \sin \varphi'_s$ bekannt, kann analog aus Gleichung 2.16 β für den unterkritischen Teil der Vorbelastungsfläche bestimmt werden.

Der Schnittpunkt A zwischen Ellipsoid und CSL beschreibt den Übergang zwischen Vorbelastung und Erstbelastung. In der Praxis wird vielfach für die Beschreibung der Scherfestigkeit von bindigen Böden das bilineare Kriterium von Krey-Tiedemann (siehe hierzu z.B. [36, 67, 44, 84]) herangezogen, Bild 2.11. Das Kriterium wird wie folgt beschrieben:

$$\tau = \begin{cases} c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' & : \sigma' < \sigma'_v \text{ überkonsolidierter Zustand} \\ \sigma' \cdot \tan \varphi'_s & : \sigma' = \sigma'_v \text{ normalkonsolidierter Zustand} \end{cases} \quad (2.17)$$

mit: $c' = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c$ [kN/m²]

$\varphi'_c =$ Winkel der Kohäsion [°]

$\sigma'_v =$ Vorbelastungsspannung, der Porezahl äquivalente Vertikalspannungskomponente während des Scherversagens [kN/m²]

$\varphi' =$ wirksamer Winkel der inneren Reibung [°]

$\varphi'_s =$ Winkel der Gesamtscherfestigkeit [°]

$\sigma' =$ effektive Normalspannung [kN/m²]

Bei normalkonsolidierten Verhältnissen bestimmt sich die Scherfestigkeit über den Winkel der Gesamtscherfestigkeit. Ist der Boden überkonsolidiert besteht die Scherfestigkeit aus einem Reibungs- und einem Kohäsionsanteil. Der Reibungsanteil ist vom aktuellen Spannungszustand σ' abhängig, wohingegen die Kohäsion proportional zur Vorbelastung σ'_v ist.

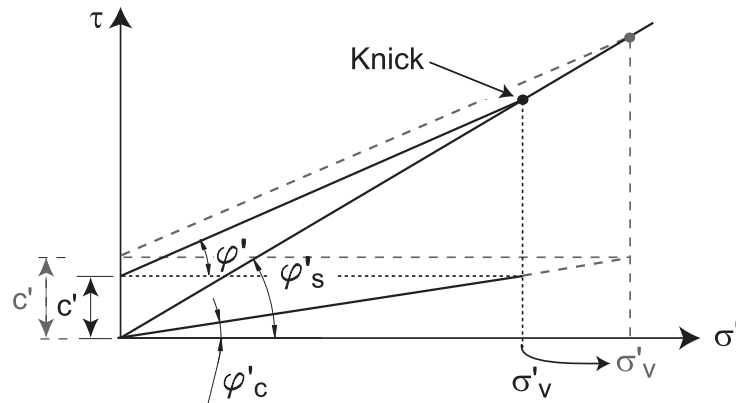


Bild 2.11: Schergesetz von Krey-Tiedemann

Die Vorbelastung σ'_v beschreibt die im Scherversagen der aktuellen Porenzahl äquivalente Vertikalspannungskomponente. Bei steigender Vorbelastungsspannung steigt somit auch die Kohäsion mit dem konstanten Faktor: $\tan \varphi'_c$ an. Der Übergang zwischen überkonsolidiertem und normalkonsolidiertem Zustand wird durch den Knick im Bild 2.11 definiert, der bei der Vorbelastungsspannung σ'_v liegt.

Pysikalisch gesehen beschreiben der Knick im $\tau - \sigma'$ -Diagramm von Krey-Tiedemann und der Punkt A im $p' - q$ -Diagramm des MCC-Modells den selben Spannungszustand. Niemunis verifiziert in [67] die Lage des Knicks, indem er den Punkt A des MCC-Modells in das $\tau - \sigma'$ -Diagramm überführt und so die Vorbelastungsspannung σ'_v im Knick bestimmt. Bild 2.12 zeigt die Vorgehensweise.

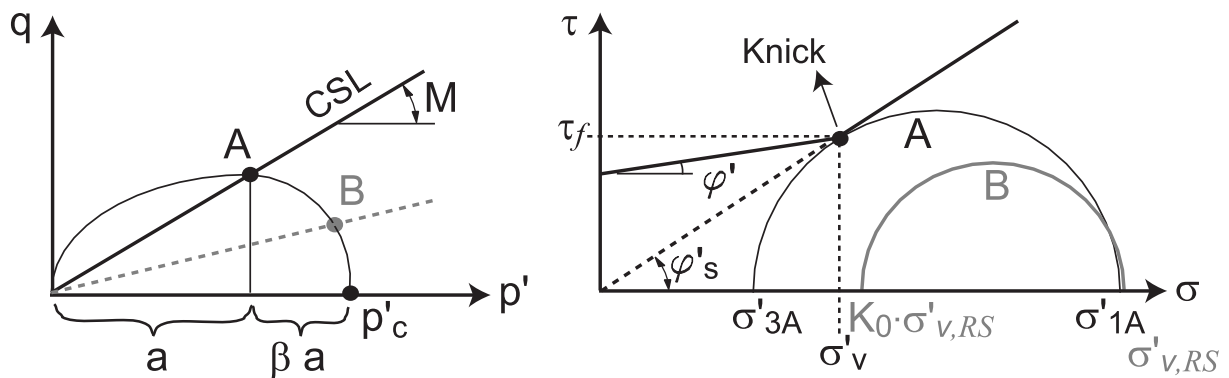


Bild 2.12: Der Knick von Krey-Tiedemann nach Niemunis [67]

Bekannt sind die oedometrischen Spannungsverhältnisse wie sie z.B. im Rahmenscher-

sich vorliegen. Aus der vertikalen Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$ berechnen sich p' und q zu:

$$p' = \frac{\sigma'_{v,RS} \cdot (1 + 2 \cdot K_0)}{3} \quad (2.18)$$

$$q = \sigma'_{v,RS} \cdot (1 + K_0) \quad (2.19)$$

mit: $\sigma'_{v,RS}$ = vertikale Konsolidierungsspannung im Rahmenscherversuch [kN/m^2]

und zeigen den K_0 -Zustand auf der MCC-Fließfläche, Punkt B. Mit Gleichung 2.14 kann so die isotrope Vorbelastung p'_c ermittelt werden, Bild 2.12. Die Vorbelastung p'_c kann über den Punkt A mit den Koordinaten (p'_A/q_A) ausgedrückt werden:

$$p'_c = p'_A \cdot (1 + \beta) \quad (2.20)$$

Aus Gleichung 2.20 wird p'_A ermittelt und mit der Steigung M der CSL die deviatorische Spannung q_A :

$$q_A = p'_A \cdot M \quad (2.21)$$

Aus den Gleichungen

$$p'_A = \frac{\sigma_{1A} + 2 \cdot \sigma_{3A}}{3} \quad \text{und} \quad q_A = \sigma_{1A} - \sigma_{3A} \quad (2.22)$$

folgen die Hauptspannungen σ_{1A} und σ_{3A} mit denen im $\tau - \sigma'$ -Diagramm der Mohr'sche Spannungskreis des Grenzzustandes für die vertikale Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$ gezeichnet werden kann. Das Anlegen einer Tangente durch den Ursprung an den Spannungskreis liefert im Berührungspunkt die Scherfestigkeit τ_F im Grenzzustand (maximales Verhältnis von τ/σ') und damit auch die dazugehörige vertikale Spannungskomponente σ'_v . Der im $p' - q$ - Diagramm deviatorische Spannungszustand im Punkt A auf der Fließfläche wird somit als Spannungskreis des Grenzzustandes in das $\tau - \sigma'$ -Diagramm übertragen. Hiermit ist die Scherfestigkeit τ_F im Grenzzustand bestimmt, die den Knickpunkt und daher auch hier den Übergang zwischen Vor- und Erstbelastung bildet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die untersuchten Filterkuchenmaterialien die Lage des Knicks und damit die Vorbelastung σ'_v , wie hier beschrieben, analytisch ermittelt. Aus normal- und überkonsolidierten Rahmenscherversuchen wird der Knickpunkt jedes Materials auch experimentell bestimmt. So werden die Abweichungen zwischen analytisch bestimmter und experimentell ermittelter Vorbelastung σ'_v aufgezeigt.

Kapitel 3

Referenzbaustellen

Für die Untersuchung der Kontaktzone Boden-Schlitzwand im nichtbindigen Baugrund werden vier Referenzbaustellen mit unterschiedlichen Randbedingungen ausgewählt. Es werden in-situ Proben des Filterkuchens und des anstehenden Bodens entnommen. Insbesondere wird der Filterkuchen im Hinblick auf seine Zusammensetzung und sein mechanisches Verhalten untersucht. Dieses Kapitel dient als Grundlage für die in den nachfolgenden Kapitel durchgeführten Laborversuche sowie analytischen Überlegungen.

3.1 Baugrube der U-Bahnstation "Conradstraat"

3.1.1 Geologie und Hydrogeologie

Die erste Baustelle ist die Baugrube der U-Bahnstation "Conradstraat" in Rotterdam (Niederlande). Die Baugrube ist mit rd. 41 m tiefen Zweiphasenschlitzwänden umschlossen. Die Stadt Rotterdam liegt im Einflussbereich der Nordsee und des Rheindeltas, die bestimmend für die großräumige und lokale Geologie sind. Die Geländeoberfläche im Bau- feld ist eben und liegt bei rd. 0,25 bis 0,35 m ü. NN. Bis in eine Tiefe von rd. 5,5 - 7 m u. NN stehen zunächst anthropogene aufgefüllte Sande (Fein- bis Mittelsande) an. Darunter folgen bis in eine Tiefe von rd. 17-19 m u. NN holozäne Weichschichten ("Westland-Formation") aus Klei und Torf sowie entsprechende Übergangsbereiche. Bis rd. 37 m u. NN folgen dann nichtbindige Fein- bis Mittelsande des Pleistozän. Mit der Tiefe zunehmend kommen grobsandige und feinkiesige Anteile hinzu. Unterhalb von 37 m u. NN folgen weitere pleistozäne Böden (Formation von Kedichem / Tegelen), die an der Oberfläche

aus kiesigen Sanden, darunter aus Schichtpaketen nichtbindiger und bindiger Böden, sowie Braunkohle bestehen und in diese die Schlitzwänden einbinden, siehe Bild 3.2. Im Rahmen des Bauprojektes ist zu Konsolidierungszwecken auf die anthropogen aufgefüllten Sande eine 3 m hohe künstliche Aufschüttung aufgebracht worden. Der Grundwasserspiegel liegt bei ungefähr -3 m u. NN.

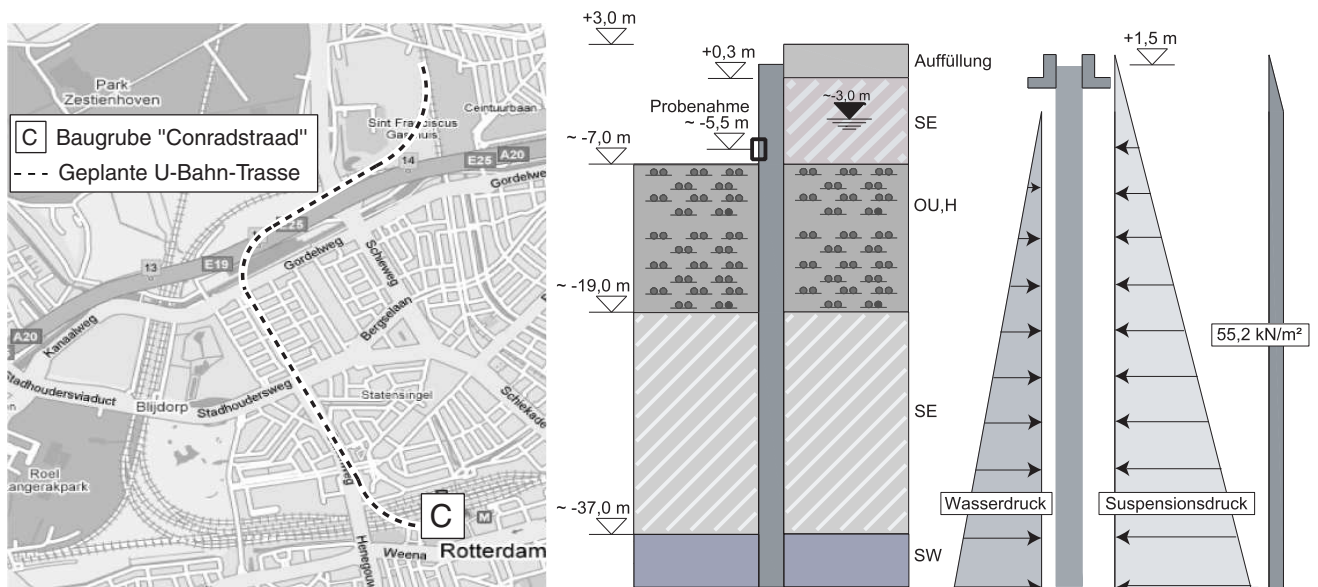


Bild 3.1: Lageplan der U-Bahn-Baugrube "Conradstraat" (Niederlande)

Bild 3.2: Baugrundsituation der U-Bahn-Baugrube "Conradstraat", [106]

3.1.2 Probenahme

Es werden in der Baugrube der U-Bahnstation "Conradstraat" parallel zu laufenden Ausubarbeiten an einem frisch freigelegten Wandbereich Boden- und Filterkuchenproben in einer Tiefe von rd. 5,5 m u. NN im Bereich der anthropogen aufgefüllten Sande sowie Proben der darunter beginnenden Kleischicht entnommen und im Labor des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum die Kornverteilungen bestimmt. Der Suspensionsüberdruck während des Schlitzens lag bei ungefähr 50 kPa, da sich der Suspensionspiegel in einer Höhe von ca. 1,5 m ü. NN befand. In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Zustandsparameter der im Bereich der Probenahmestelle vorliegenden Böden (Fein- bis Mittelsandes und des holozänen Kleis) aufgelistet. Tabelle 3.2 zeigte exemplarisch die wichtigsten Daten der in-situ eingesetzten Stützsuspension.

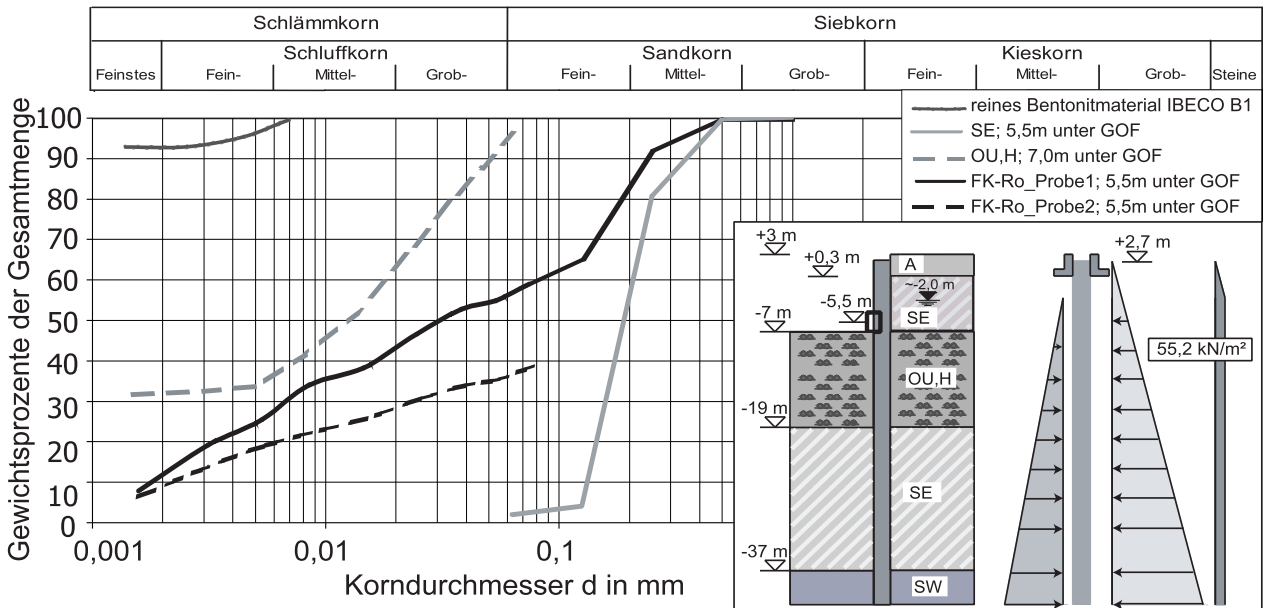


Bild 3.3: Kornverteilung der Boden- und Filterkuchenproben, "Conradstraat"

Filterkuchen FK-Ro

Die Entnahme der Filterkuchenproben erfolgt durch horizontales Einpressen eines Zylinders $\varnothing \times h = 100 \times 120$ mm sowie einer quadratischen Ausstechform $B \times L = 60 \times 60$ mm an die Schlitzwand. Auch werden würfelförmige Proben mit einem Spachtel von der Schlitzwand gelöst, Bild 3.4. Auffällig ist hierbei, dass der Filterkuchen relativ stark an der Wandoberfläche haftet. Der Kontakt des Filterkuchens mit dem anstehenden Boden ist hingegen weniger stark ausgeprägt. Der durch die Kapillarkräfte standfeste Sandkörper kann einfach durch Anheben des Sandkörpers vom Filterkuchen gelöst werden. Bild 3.3 zeigt die Kornverteilungen von zwei entnommenen in-situ Filterkuchenproben sowie die der angrenzenden Bodenschichten (anthropogen aufgefüllter Fein- bis Mittelsande und

Tabelle 3.1: Zustandsparameter des aufgefüllten Fein- bis Mittelsandes und des holozänen Kleis, aus Baugrundgutachten [77] und Laborergebnisse des Lehrstuhls

	e	γ	γ'	γ_d	k	E_s	φ'	φ'_s	c'	c_u
	[-]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[m/s]	[MN/m ²]	[°]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
SE		20	9,5		$5 \cdot 10^{-3}$	10,5	29-33	37	0	0
OU,H	1,5-2	14,7-16	4,7-6	8-10	$5 \cdot 10^{-10}$	6	17,5 ¹⁾	21-27	2,5 ¹⁾	45 ²⁾

1) bei einer Verformung von $\epsilon = 1 \%$

2) mit Flügelsonde, in-situ

Tabelle 3.2: Stützsuspension der Baustelle "Conradstraat"

Zusammensetzung: 45 g Bentonit / l Wasser				
	Einheit	Zulauf	vor Regenerierung	nach
Dichte ρ_F	g/cm^3	1,04	1,05 - 1,15	1,06
Marsh-Zeit	sec	37	39	37
Fließgrenze τ_F	N/m^2	11,6	13,6	11,7
Sandgehalt	%	1	14	1,5
Filtratwasserabgabe f	cm^3	13,5	12	13
pH-Wert	-	10	10	10
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	6	8	9

holozäner Klei) und repräsentativ für einen fiktiven reinen Bentonitfilterkuchen die Kornverteilung des Bentonitmaterials Aktiv-Natriumbentonit IBECO B1.

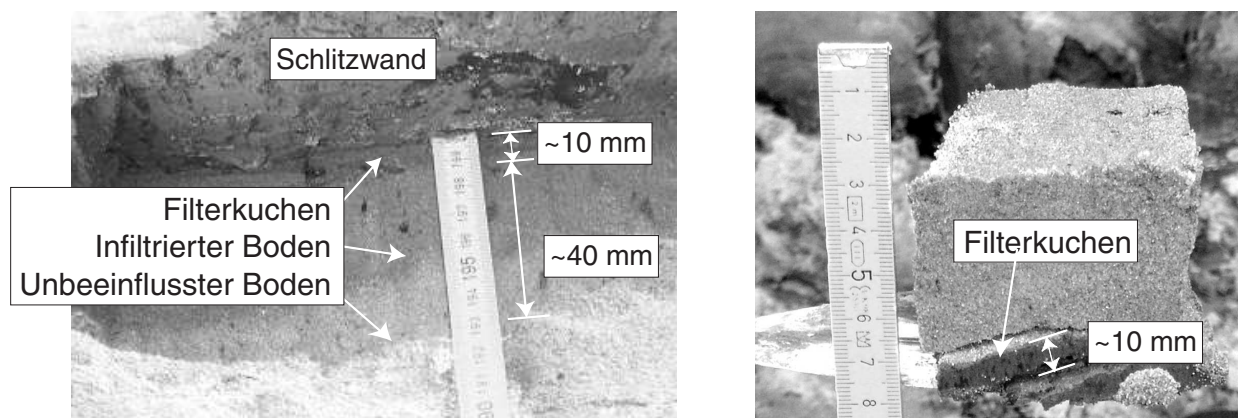


Bild 3.4: Kontaktbereich Boden-Filterkuchen-Wand, "Conradstraat"

Die Filterkuchenschicht verläuft bei diesen Bodenverhältnissen gleichmäßig über die gesamte Wandoberfläche mit einer Dicke von ca. 10 mm. Der anstehende Boden besitzt hier eine Durchlässigkeit von $k = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, Tabelle 3.1. Der Wassergehalt des Filterkuchens bewegt sich in einem Bereich von $w = 91 - 197 \%$. Diese großen Schwankungen können auf den hohen Organikgehalt ($V_{gl} \approx 7 \%$) der Proben zurückgeführt werden. Die Kornverteilungen der Filterkuchenproben zeigen die intensive Einarbeitung der Schwebstoffe aus dem Baugrund (Aufladung) in die Suspension während des Schlitzens. Der Tonanteil liegt nur

bei ca. 10 Gew.-% der Gesamtprobenmasse. Das Größtkorn des Filterkuchenmaterials mit einem Durchmesser von rd. 0,5 mm entspricht dem Größtkorn des anstehenden Bodens. Eine Filterkuchenschicht aus reinem Bentonit zwischen Schlitz- und Erdwand wird hier nicht beobachtet. Der Filterkuchen kann stichhaltig als gemischtkörniges Bodenmaterial bezeichnet werden. Daraus wird geschlossen, dass der Filterkuchen eine Scherfestigkeit besitzen muss, die weit größer als die des reinen Bentonitmaterials ist.

Baugrund

Proben des anstehenden Baugrundes werden zum einen im Bereich der visuell erkennbaren Stagnationstiefe und zum anderen aus dem suspensionsunbeeinflussten Baugrund entnommen (Bild 3.4). Es soll dadurch der Einfluss der in das Erdreich (SE) eingedrun- genen Suspension auf die Scherfestigkeit des anstehenden Bodens ermittelt werden. Die angetroffene Stagnationstiefe beträgt ca. 40 - 60 mm. (Mit einer abgeschätzten Suspensionsfließgrenze von 50 N/mm^2 und $d_{10} = 0,13 \text{ mm}$ ergäbe sich eine rechnerische Sta- gnationstiefe von rd. 70 mm.) Der Sand im Stagnationsbereich der Suspension zeigt eine scheinbare Kohäsion, die ihm für die Probenahme eine ausreichende Standfestigkeit ver- leiht. Die Proben (Ro-UP1-3) werden durch horizontales Einpressen eines Zylinders $\emptyset \times h = 100 \times 120 \text{ mm}$ an die Schlitzwand ungestört herausgelöst. Zum Vergleich wird eine gestörte Probe des anstehenden Sandes außerhalb der Stagnationstiefe entnommen (Eimerprobe P_{Ro}).

Rauigkeit der Schlitzwand

Die mikroskopische Rauigkeit der Schlitzwand wird durch drei Gipsabdrücke mit den Abmessungen $L \times B = 15 \times 15 \text{ cm}$ bestimmt. Mittels der Rautiefe R_{max} soll ein Scher- versagen in der Kontaktfuge Wand-Filterkuchen (Bild 1.1, Scherfuge S_1) auf Grund der großen Verzahnung des Filterkuchens mit der Wandoberfläche ausgeschlossen werden. Die Schubkraftübertragung findet demzufolge unabhängig von der Rauigkeit der Wand im angrenzenden Bodenmaterial statt. Die Rautiefe R_{max} wird an fünf Schnitten durch abscannen der Gipsoberflächen mit einem Laser-Distanz-Sensor bestimmt, der auf einem Triangulationsprinzip beruht und eine Auflösung von $1 \mu\text{m}$ hat, Bild 3.5.

Die Rauigkeit R_n ist definiert als der Quotient der Rautiefe R_{max} der Wand und der Korngröße d_{50} des anstehenden Bodens ($R_n = R_{max}/d_{50}$) (Kishida & Uesugi [43], Yoshimi & Kishida [121] und Garnier & König [30]). Paikowsky et al. [69] haben den Einfluss der Rauigkeit R_n auf die Scherkraftübertragung in der Kontaktfläche zwischen körnigen Materialien und der Oberfläche von Feststoffen untersucht und wie in Tabelle 3.3 zusam- mengefasst beschrieben.

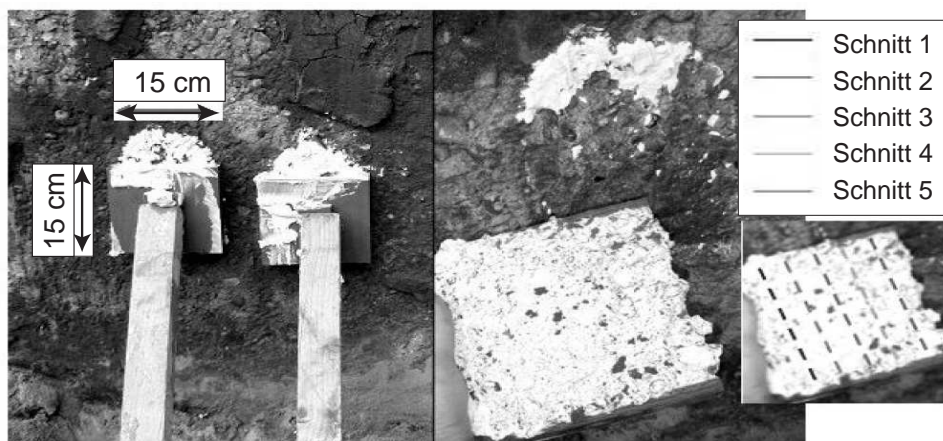


Bild 3.5: Gipsabdrücke der Schlitzwandoberfläche "Conradstraat" und Schnittlinien der Oberflächen-Laserscanning (rechts)

Tabelle 3.3: Rauigkeit R_n zwischen körnigen Materialien und der Oberfläche von Feststoffen, [69]

$R_n < 0,02$	Kontaktzone ist glatt, τ_{max}/σ ist klein, keine Dilatanz
$0,02 \leq R_n < 0,5$	τ_{max}/σ steigt mit ansteigenden R_n
$0,5 \leq R_n < 1,0$	Kontaktfläche ist sehr rau, τ_{max} ist unabhängig von R_n

3.1.3 Auswertung und Ergebnisse

Filterkuchen FK-Ro

Die Menge des auf der Baustelle entnommenen Filterkuchenprobenmaterials und die Geometrie ungestört gewonnener Proben reichen nicht für die Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Scherfestigkeit. Für Rahmenscherversuche (CD-Versuche: $B \times L \times H = 100 \times 100 \times 20$ mm) und Triaxialversuche (CU-Versuche: $\varnothing = 50$ mm; $H = 100$ mm) wird entsprechend der Kornverteilung des in-situ Filterkuchens, Filterkuchenprobenmaterial im Labor künstlich hergestellt. Die Materialzusammensetzung zeigt Bild 3.6. Die Herstellung des Probenmaterials erfolgt durch Anmischen bei einem Wassergehalt von ca. $w = 150\%$ und einer Vorkonsolidierung unter der jeweiligen Normalspannung.

Bild 3.7 zeigt den in normalkonsolidierten Triaxial- und Rahmenscherversuchen ermittelten Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s des Laborfilterkuchens. Auf Grund der in der Suspension dispergierten und in den Filterkuchen eingetragenen Kornfraktionen aus dem anstehenden Boden besitzt der Filterkuchen eine beachtliche Scherfestigkeit. Der Winkel

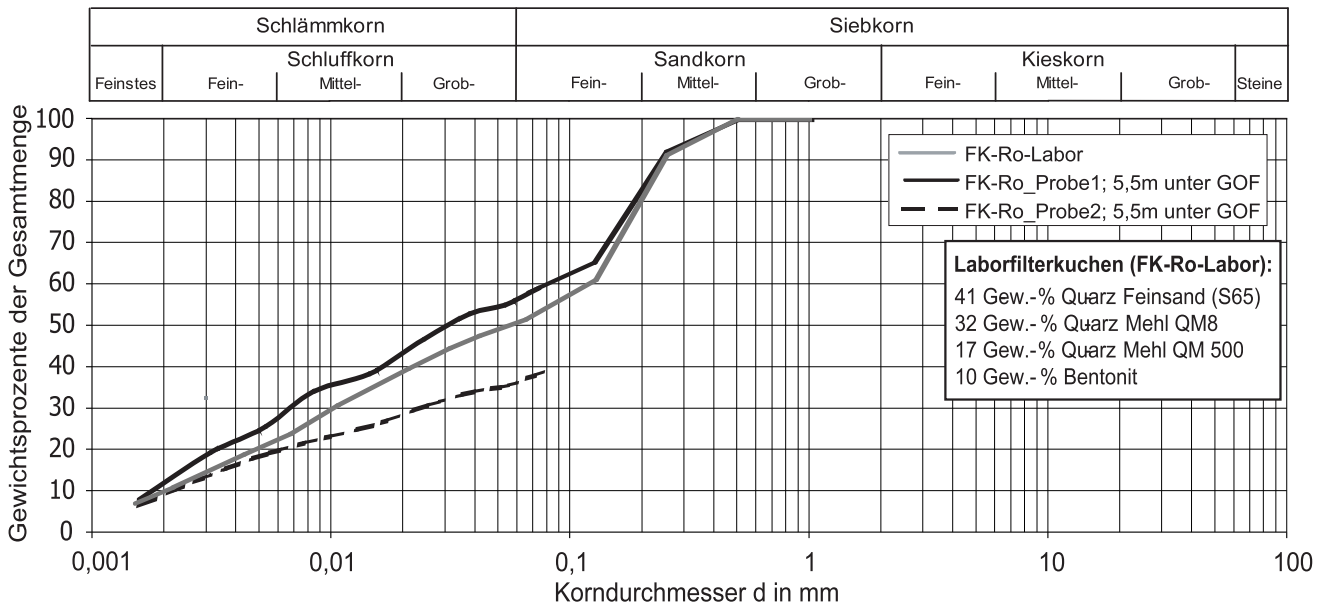


Bild 3.6: Kornverteilung des Laborfilterkuchens FK-Ro-Labor

der Gesamtscherfestigkeit liegt bei etwa $\varphi'_s \approx 30^\circ$. Im Vergleich dazu liegt die Scherfestigkeit des reinen Bentonitmaterials mit $\varphi_s = 10 - 14^\circ$ deutlich niedriger (siehe Kapitel 6).

Während der Schlitzherstellungsphase überkonsolidiert der Frischbeton (siehe Kapitel 9.1) den Filterkuchen kurzzeitig. Daher wird auch die Scherfestigkeit des Filterkuchens im überkonsolidierten Zustand bestimmt. Der Kohäsionsanteil c' ist im überkonsolidierten

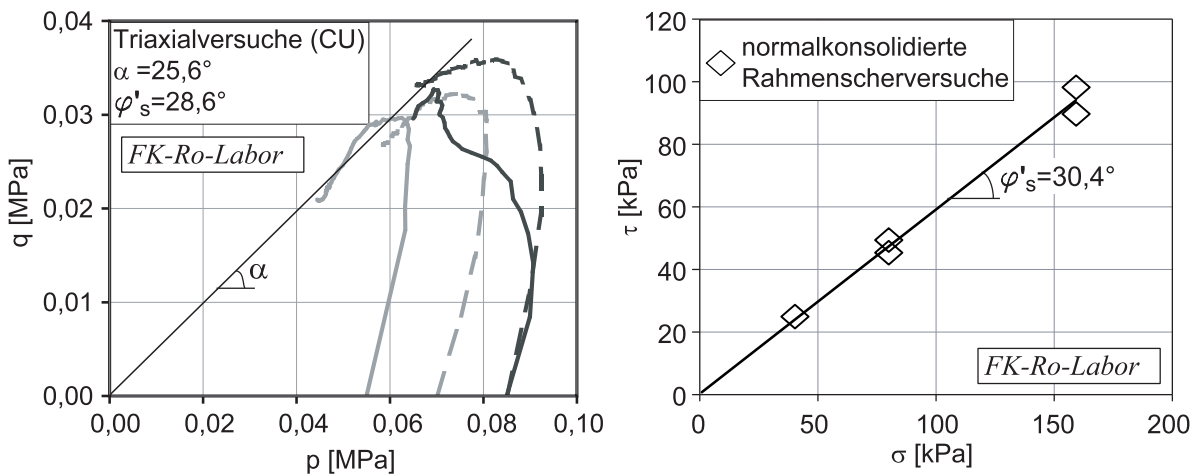


Bild 3.7: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , FK-Ro-Labor

Zustand von der Vorbelastung σ'_v abhängig. Wie im Kapitel 2.4 erläutert entspricht die Vorbelastung σ'_v der Porenzahl äquivalenten Vertikalspannungskomponente während des Schervorganges und im $\tau - \sigma'$ -Diagramm beschreibt sie den Vertikalspannungsanteil des Knickpunktes im Übergang zwischen normal- und überkonsolidierten Spannungszustand (Bild 3.8). Die überkonsolidierte Scherfestigkeit des Filterkuchenmaterials wird nach Krey-Tiedemann, Gleichung 2.17, mit dem Winkel der inneren Reibung φ' und dem Winkel der Kohäsion φ'_c beschrieben. So kann für eine beliebige Vorbelastung die Kohäsion mit $c' = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c$ bestimmt werden.

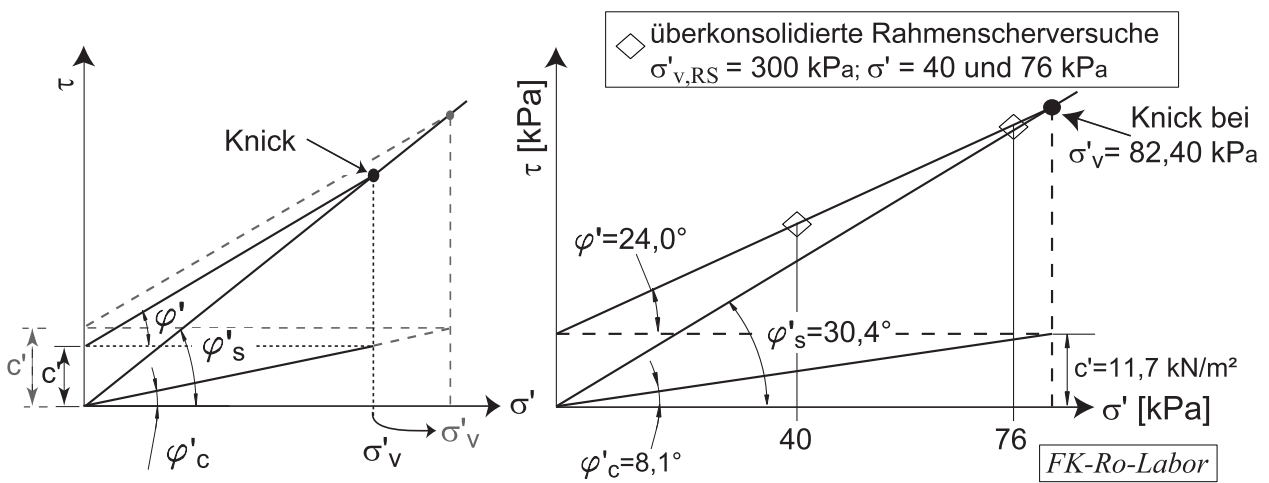


Bild 3.8: Scherfestigkeit im überkonsolidierten Zustand nach Kapitel 2.4, FK-Ro-Labor

Überkonsolidierte Rahmenscherversuche werden bei einer vertikalen Konsolidierungsspannung von $\sigma'_{v,RS} = 300$ kPa und bei Abscherspannungszuständen im Bereich von $\sigma' = 40$ und 80 kPa durchgeführt. Aus den Versuchen ergibt sich ein Winkel der inneren Reibung

Tabelle 3.4: Scherparameter, Vorbelastung σ'_v , Wichte und Wassergehalt des Laborfilterkuchens FK-Ro-Labor, "Conradstraat"

φ'_s [°]	φ'_s [°]	φ' [°]	φ'_c [°]	σ'_v [kN/m ²]	σ'_v [kN/m ²]	w_{mittel} [%]	γ_{mittel} [kN/m ³]
TRIAX	SCHER	SCHER	SCHER	SCHER	ANALYT.	n. Versuch	n. Versuch
bei $\sigma'_{v,RS} = 300$ kN/m ²							
28,6	30,4	23,96	8,1	82,4	145,9	26,7	19,6

von $\varphi' = 23,96^\circ$ und ein Winkel der Kohäsion von $\varphi'_c = 8,1^\circ$, siehe Bild 3.7 und 3.8 sowie Tabelle 3.4. Die hier experimentell ermittelte Vorbelastung σ'_v (Knick im $\tau - \sigma'$ -Diagramm) liegt mit 82,4 kPa bei etwa 30% der vertikalen Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$. Die nach Kapitel 2.4 analytisch bestimmte Spannung σ'_v beträgt 145,9 kPa und nimmt eine Größenordnung von etwa 50% der Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$ ein. Es wird deutlich, dass der Ansatz aus Kapitel 2.4 die Lage des Überganges zwischen normal- und überkonsolidierten Spannungszustand überschätzt. Da der analytische Ansatz jedoch auf Annahmen, wie z.B. der Form der Fließfläche als Ellipsoid basiert, ist diese vom experimentellen Wert auftretende Abweichung zu erwarten. Für realistische Werte der Vorbelastung σ'_v sind daher Versuche notwendig und somit der analytische Ansatz alleine nicht ausreichend.

Baugrund

Bild 3.9 zeigt einen Vergleich der Kornverteilungen des Sandes innerhalb und außerhalb des Stagnationsbereiches. Es zeigt sich eine geringe Anhebung des Feinkornanteils ($d \leq 0,06$ mm) um rd. 2 Gew.-%. Beide Sande sind damit nach DIN 18196 [17] als nichtbindige Sande ohne bautechnisch relevante Feinkornanteile ($<5\%$) einzustufen. Die Probenzylin-

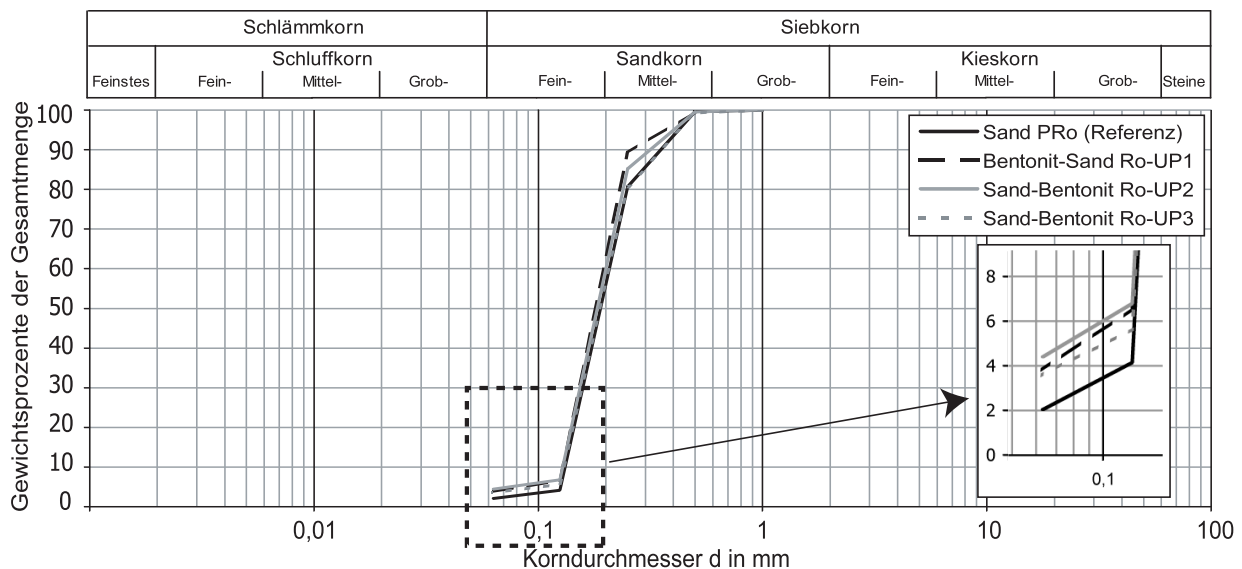


Bild 3.9: Kornverteilung des anstehenden Bodens der Baustelle "Conradstraat"

der werden im bodenmechanischen Labor ausgepresst und aus dem Stagnationsbereich eine Scherprobe mit einem Scherrahmen 60 x 60 mm ausgestochen. Insgesamt werden drei Rahmenscherversuche an dem Sand aus dem Stagnationsbereich durchgeführt. Vergleichend werden 5 Rahmenscherversuche mit dem Sand der gestörten Probe ohne Ben-

Tabelle 3.5: Rahmenscherversuche 60 x 60 mm: Einbaudaten und Scherparameter der Bodenproben der Baustelle "Conradstraat"

Ro-UP1-3 (Sand-Bentonit)						Eimerproben PRo					
Ro-UP1		Ro-UP2		Ro-UP3		Mittelwerte					PRo & RoUP1-3
ρ_{Einbau} [g/cm ³]	W [%]	ρ_{Einbau} [g/cm ³]	W [%]	ρ_{Einbau} [g/cm ³]	W [%]	ρ_{Einbau} [g/cm ³]	W [%]	ρ_{min} [g/cm ³]	ρ_{max} [g/cm ³]	I_D [-]	φ' [°]
1,62	23,9	1,54	26,1	1,51	27,6	1,59	-	1,37	1,72	0,3	34,4

tonitbeeinflussung fertig gestellt. Der Einbau in den Scherrahmen erfolgt dabei mit einer Wichte (Lagerungsdichte), die derjenigen der ungestörten Sandproben aus dem Stagnationsbereich entspricht. Zur Absicherung des absolut gemessenen Reibungswinkels erfolgen drei weitere Scherversuche mit dem bentonitunbeeinflussten Sand im Triaxialgerät (CD-Versuche). Bild 3.11 zeigt einen Vergleich der Peak-Scherfestigkeiten im Druck-

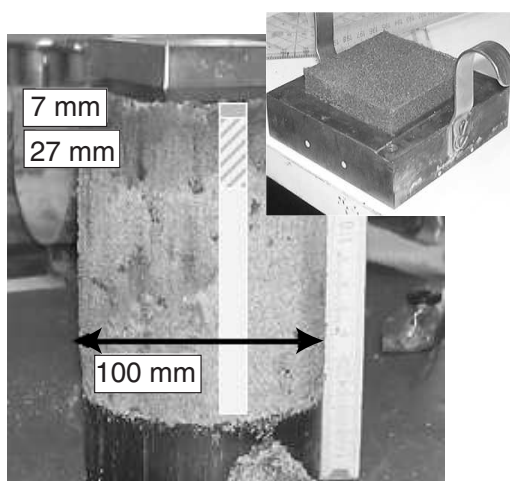


Bild 3.10: In Scherrahmen eingebaute Sandprobe Ro-UP2 ("Conradstraat")

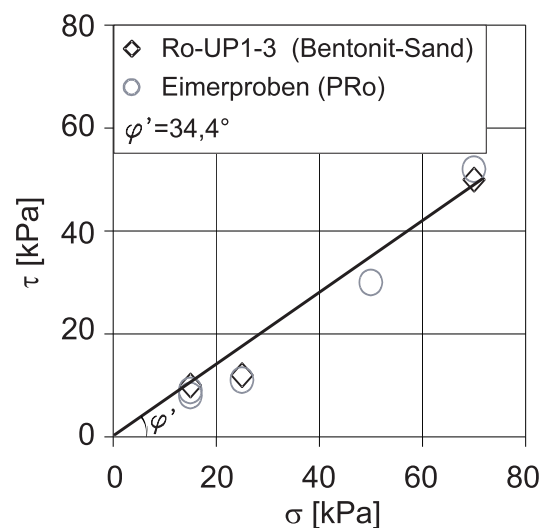


Bild 3.11: Rahmenscherversuche der Bodenproben ("Conradstraat")

Scherkraft-Diagramm. Der Reibungswinkel des Sandes mit und ohne Bentonitbeeinflussung kann im Rahmen der versuchsüblichen Abweichungen mit einer gemeinsamen Ausgleichsgeraden dargestellt werden, die einem Reibungswinkel von 34,4° entspricht. Damit ist keine eindeutige Tendenz veränderter Scherfestigkeiten auf Grund der eingedrungenen Suspension zu erkennen. Der im Triaxialversuch gemessene Reibungswinkel beträgt

Tabelle 3.6: Vergleich der Scherfestigkeiten von suspensionsdurchmischten und suspensionsfreier Sandproben, [106]

	Sand A		Sand B	
	dicht φ_{Peak} [°]	locker φ_{Rest} [°]	dicht φ_{Peak} [°]	locker φ_{Rest} [°]
Wasser	42	34	40	33
Suspension	41	33	40	35

36,7°, was wiederum innerhalb der bekannten versuchsbedingten Abweichungen beider Versuchsarten liegt.

Triantafyllidis et al. [106] hat Versuche mit künstlich suspensionsdurchmischten und suspensionsfreien Sandproben durchgeführt. Es wurden zwei Sande untersucht. Die Bentonit-suspension besaß eine Konzentration von 51 g Bentonit / 1 Wasser ($\rho_F = 1,03 \text{ t/m}^3$). Sand A war ein Mittel- bis Grobsand mit einer Körnung von 0,2 - 2,0 mm und einem $d_{10} = 0,26$ mm. Sand B dagegen war ein Grobsand mit einer Körnung von 1,4 - 2,5 mm und einem $d_{10} = 1,5$ mm. Die Untersuchung des Scher-Verformungsverhaltens erfolgte durch dränier-te Triaxialversuche (CD) mit einer Prüfkörpergröße von $\emptyset \times h = 100 \times 200$ mm. Der Sand wurde jeweils vorab mit der Bentonitsuspension bzw. Wasser durchmischt und mit dichter Lagerung ($D \approx 100\%$) oder lockerer Lagerung ($D \approx 20\%$) eingebaut. Tabelle 3.6 zeigt die im Versuch ermittelten Reibungswinkel. Die festgestellten Abweichungen zwischen den Versuchen mit Suspensions- und Wassersättigung liegen im Rahmen der üblichen Schwankungen dieser Versuchsart. Damit ist auch bei diesen Versuchen keine eindeutige Tendenz veränderter Scherfestigkeiten bei einer Suspensionstränkung erkennbar.

Da die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich die Scherfestigkeit bei Sandböden durch die Infiltration der Suspension nicht maßgebend ändert, werden die im Bild 1.1 dargestellten Scherfugen S_4 und S_5 nicht mehr getrennt voneinander betrachtet.

Rauigkeit der Schlitzwand

Der Korndurchmesser d_{50} des in-situ Filterkuchens (siehe Bild 3.6) mit 0,05 mm sowie auch die Geometrie der Bentonitplättchen mit einer Dicke $\approx 1\mu\text{m}$ und einer Länge ≈ 100 bis $300\mu\text{m}$ sind viel kleiner als die Rautiefe $R_{max} = 3,3 - 6,4$ mm der Schlitzwandoberfläche ($R_n \gg 1$, Bild 3.12). Ein Scherbruchversagen in der Kontaktfläche Wand-Filterkuchen (Scherfuge S_1 im Bild 1.1) wird hiermit ausgeschlossen. Bei Betrachtung der Kontaktzone

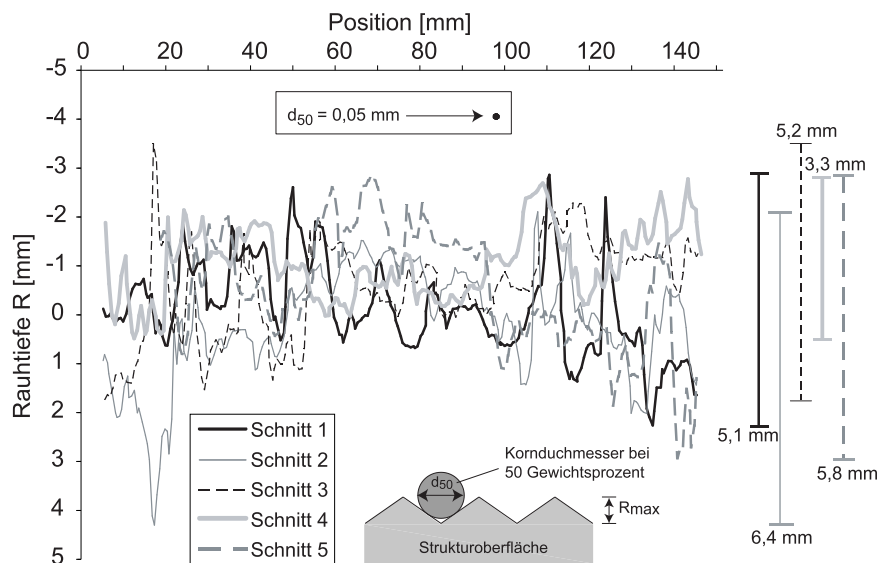


Bild 3.12: Oberfläche der Schlitzwand "Conradstraat", mikroskopische Rauigkeit

Wand-Filterkuchen wird gegebenenfalls nur unabhängig von der Rauigkeit der Wand ein Scherversagen im Filterkuchen selbst auftreten.

3.2 City-Tunnel Leipzig

3.2.1 Geologie und Hydrogeologie

In Leipzig liegen zwei Referenzbaustellen. Sie sind beide Bestandteil des Bauvorhabens City-Tunnel Leipzig, der Haltepunkt "Markt" und der Haltepunkt "Hauptbahnhof". Bild 3.13 zeigt ein schematisches geologisches Profil der Gesamttrasse des Tunnels. Aus dem Baugrundgutachten (CDM Jessberger Leipzig GmbH und Dr. Spang Ingenieurgesellschaft [81]) geht hervor, dass der Baugrund durch geologische Erosions- und starke Akkumulationsprozesse im Pleistozän mit ihren Auswirkungen auf die tertiäre Schichtenfolge geprägt ist. Insgesamt werden 13 quartäre und 10 tertiäre Schichten auskartiert. Besonders im Süden und im mittleren Abschnitt der Trasse befinden sich unter den Auffüllungen bis 10 m mächtige, pleistozäne Geschiebemergel mit ihren Bändertonen. Es folgen ca. 17 m mächtige Flussschotter der Weißen Elster. Im Nordteil hingegen lagern unter den Auffüllungen und den Auesedimenten ca. 10 m mächtige Flussschotter der Mulde. Unter den Flussschottern liegt im Zentrum der Trasse die bis ca. 9 m mächtige Folge des Bitterfelder Flözkomplexes. Sie besteht aus Mittelsanden mit Braunkohlenschluff- und -tonlagen

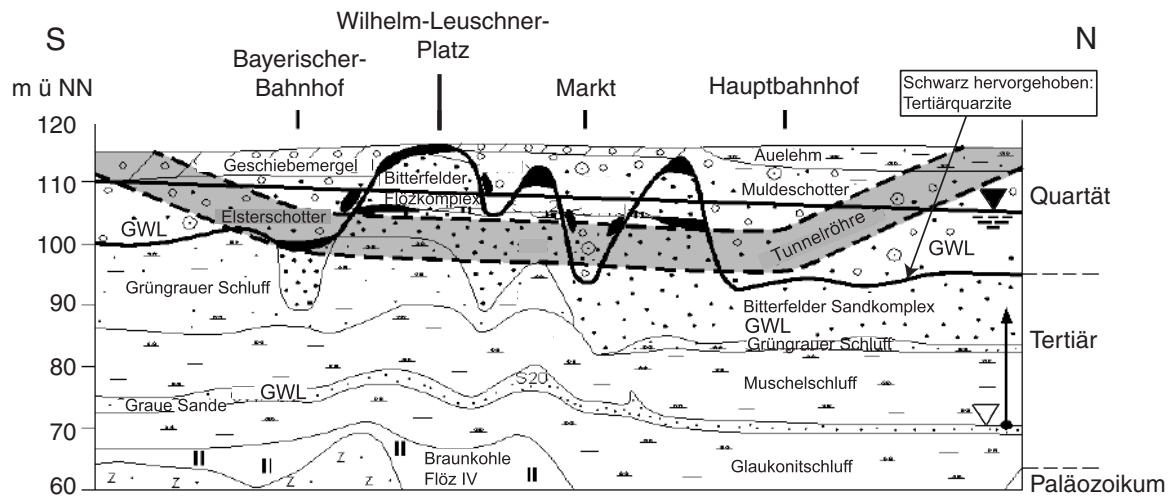


Bild 3.13: Schematisches geologisches Modell der Gesamttrasse, [81]

sowie in Senken abgelagerten, geringmächtigen Braunkohlenflözresten. Des Weiteren befinden sich in zwei Horizonten, im Hangenden und Liegenden, die bis 4 m mächtigen silifizierten Tertiärquarzite in linsenförmiger Ausbildung. Die darunter folgenden tertiären Schichten bestehen im Zentral- und Nordteil aus Fein- und Mittelsanden des so genannten Bitterfelder Sandkomplexes mit einer Mächtigkeit von 7 m bis 16 m. Ihnen schließt sich, besonders im Süd- und Zentralteil, der bis 15 m mächtige, so genannte Grüngraue Schluff an. Schließlich ist entlang der gesamten Tunneltrasse die markante Schichtenfolge des so genannten Muschelschluffes als regionalgeologisch bedeutender Stauer mit 4 m bis 8 m Mächtigkeit ausgebildet. Besonders kompliziert gestalten sich die Lagerungsbedingungen im mittleren Abschnitt der Tunneltrasse. Die weitgehend flachwellige Struktur der tertiären Schichten wird hier durch tiefe pleistozäne Erosionsrinnen durchbrochen. Der regionale Grundwasserstand der oberen Grundwasserleiter GWL liegt bei 105 m bis 111 m ü NN. Die Grundwasserflurabstände entlang der geplanten Trasse sind sehr unterschiedlich und liegen zwischen ca. 3 m und 18 m.

3.2.2 Baugrube Haltepunkt Markt

Probenahme und Auswertung

Die Baugrube "Haltepunkt Markt" wird mit rd. 29 m tiefen Schlitzwänden umschlossen. Analog zur Baugrube "Conradstraat" werden auch hier Proben des anstehenden Bodens und des Filterkuchens an einem neu freigelegten Wandbereich entnommen. Die Entnah-

mestelle befindet sich in einer Tiefe von ca. 92 m ü. NN (ca. 21 m unter GOK). Der

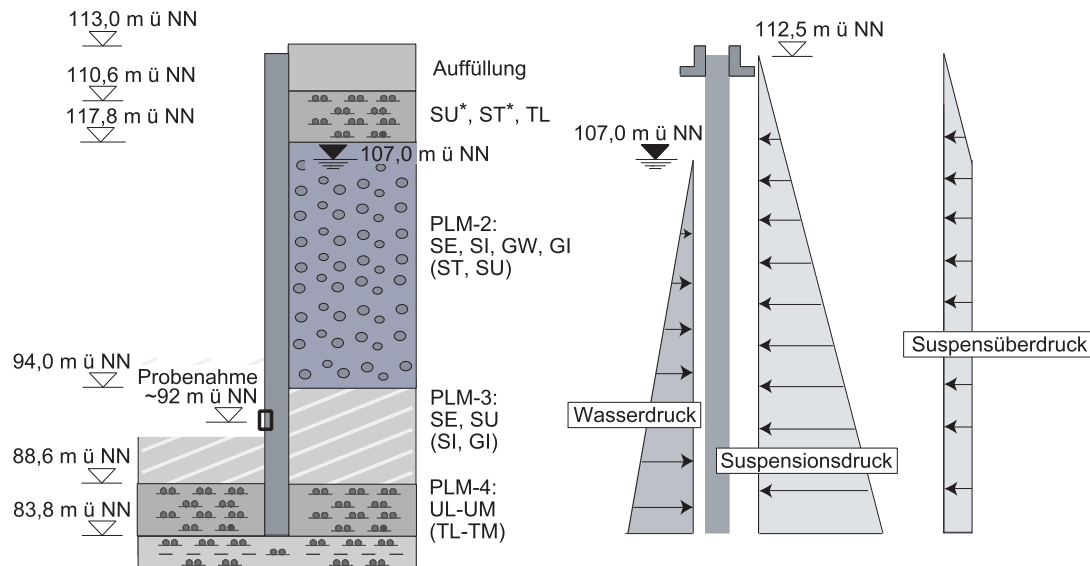


Bild 3.14: Baugrundsituation der Baugrube "Haltepunkt Markt"

Grundwasserspiegel liegt hier in einer Tiefe von ca. 107 m ü NN was einen Suspensionsüberdruck während des Schlitzens von ca. 55 kPa zu Folge hatte. In Tabelle 3.7 sind die wichtigsten Zustandsparameter des im Bereich der Probenahmestelle vorliegenden Bodenschichten (Geschiebelehm/-mergel: SU*, ST*, TL; Flussschotter: SE, SI, GW, GI (ST, SU); Bitterfelder Sande SE, SU (SI, GI); Grüngrauer Schluff: UL-UM (TL-TM)) wiedergegeben und Tabelle 3.8 zeigt die wichtigsten Daten der in-situ eingesetzten Stützsuspension aus dem Aktiv-Natriumbentonit IBECO B Super.

Filterkuchen FK-LM und Baugrund

Die Entnahme der Filterkuchenproben erweist sich als schwierig. Die Filterkuchenschicht ist nur wenige Millimeter dick und klebt an der Oberfläche der Schlitzwand. Es ist bereits visuell zu erkennen, dass die Rautiefe der Schlitzwand (R_{max}) viel größer als die Dicke des Filterkuchens ist. Der Filterkuchen muss regelrecht von der Wand abgekratzt werden um eine geringe Menge an Probenmaterial (FK-LM) zu erhalten, Bild 3.15. Eimerproben (PLM-1) werden gestört dem anstehenden Baugrund entnommen. Die Stagnationstiefe der Suspension in das Erdreich ist hier anders als bei der Baugrube "Conradstraat" auf Grund der dunklen Farbe des anstehenden Bodens visuell nicht erkennbar. Der Wassergehalt des Bodens liegt bei $w_{Mittel} \approx 25\%$ und der des Filterkuches bei ca. $w \approx 50\%$. Im Bild 3.16 sind die Kornverteilungen der anstehenden Bodenschichten der Kornvertei-

Tabelle 3.7: Zustandsparameter des anstehenden Bodens der Baugrube "Haltepunkt Markt", Geotechnischer Bericht [108]

		SU*, ST*, TL	SE, SI, GW, GI (ST, SU)	SE, SU (SI, GI)	SU*, UL-UM (TL-TM)
γ	kN/m^3	21,5	19,1	18,6	19,4 - 20,8
γ_d	kN/m^3	-	-	14,8	15,4 - 17
k	m/s	-	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-10}$ - $5,6 \cdot 10^{-9}$
φ'	$^\circ$	29	34,7	33,3	-
c'	kN/m^2	22	0	2,4	-
e	-	0,438	0,494	0,686	0,591 - 0,763
w	%	20,1	-	-	39,5 - 46,0
w_L	%	42,1	-	-	29,6 - 42,9
I_P	-	0,193	-	-	0,039 - 0,18
d<0,063 mm	%	57,4 - 90,7	0,3 - 7,5	1,4 - 12	39,5 - 46,0
V_{GL}	%	-	-	2,9	-

lung des Filterkuchens (FK-LM) gegenübergestellt. Kurve PLM-1 wird aus der Eimerprobe bestimmt, hingegen werden die Kornverteilungskurven PLM-2, PLM-3 und PLM-4 dem Geotechnischen Bericht [108] entnommen. Auffällig ist, dass die Kornverteilung der Eimerprobe PLM-1 einen Schluffanteil von über 15 Gew.-% aufweist. Nach dem Geotechnischen Bericht [108] sollte PLM-1 aus der Bitterfeldersandschicht PLM-3 (SE, SU (SI, GI)) entnommen worden sein, jedoch ist die Eimerprobe PLM-1 deutlich feinkörniger als der Bitterfeldersand PLM-3, siehe Bild 3.16. Der erhöhte Schluffanteil kann aus

Tabelle 3.8: Stützsuspension der Baustelle "Haltepunkt Markt"

	Einheit	Zulauf	vor Regenerierung	nach
Dichte ρ_F	g/cm^3	1,05 - 1,19	1,14	1,04
Marsh-Zeit	sec	38	35 - 38	37
Fließgrenze τ_F	N/m^2	17,98	14,45	15,75
Sandgehalt	%	0	-	0,5

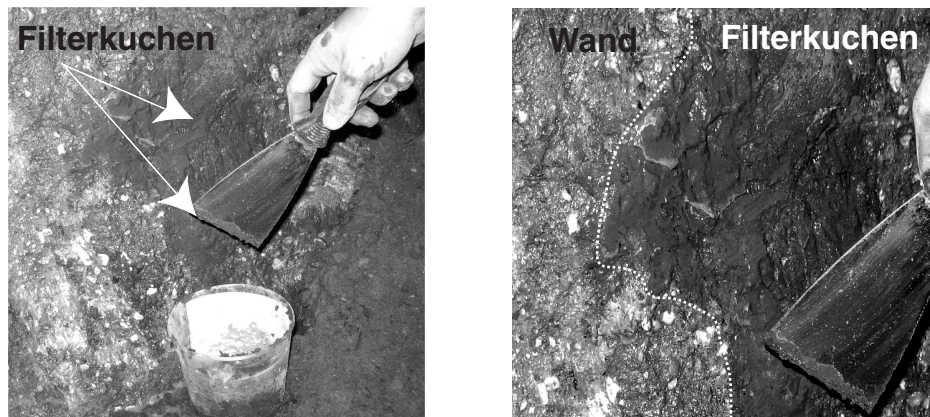


Bild 3.15: Entnahme der Filterkuchenproben, Baugrube "Haltepunkt Markt"

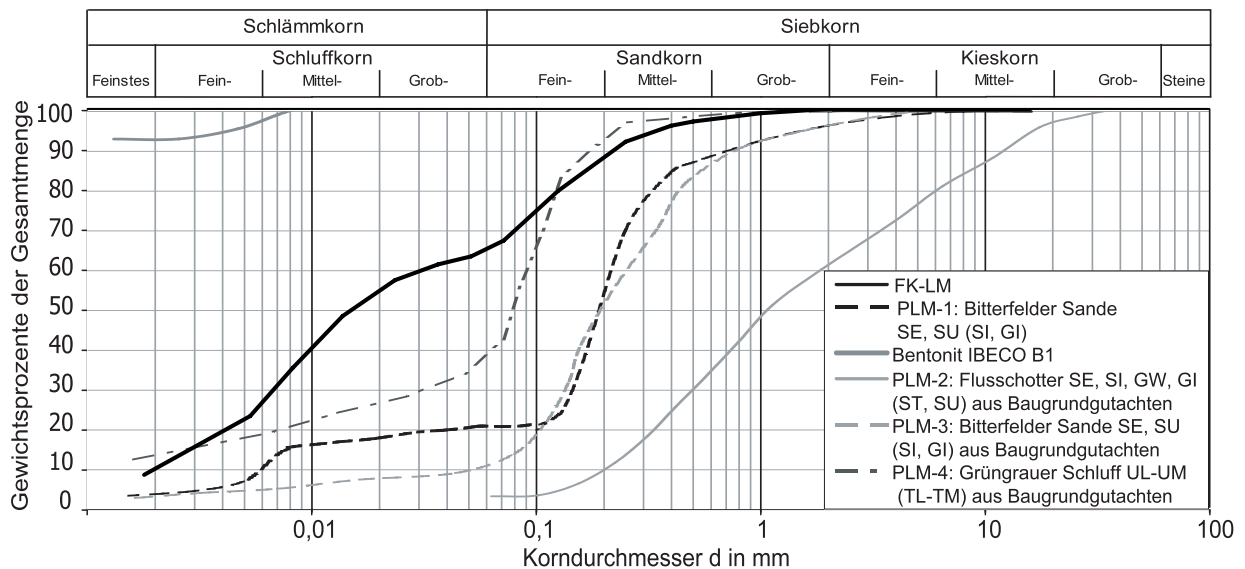


Bild 3.16: Kornverteilung des Filterkuchens und der anstehenden Bodenschichten, "Haltepunkt Markt"

dem darunter liegenden Grüngrauen Schluff stammen, der eine Durchlässigkeit von $k = 8 \cdot 10^{-10} - 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ besitzt. Die Durchlässigkeit des an dieser Probenahmestelle anstehenden Bodenschicht muss daher viel kleiner sein als die des Bitterfeldersandes, bei dem ein k -Wert von $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ermittelt worden ist, Tabelle 3.7. Die geringe Durchlässigkeit dieser anstehenden Bodenschicht PLM-1 erklärt auch die geringe Mächtigkeit des Filterkuchens FK-LM. In Anlage I.1 sind ferner die Kornverteilungsbänder der anstehenden Bodenschichten dargestellt, aus diesen die Kornverteilungskurven PLM-2, PLM-3 und PLM-4 stammen. Ähnlich wie der Filterkuchen FK-Ro besteht auch dieser Filterkuchen FK-LM aus einer gemischtkörnigen Zusammensetzung. Der prozentuale Tonanteil des Fil-

terkuchens liegt hier nur bei ca. 8 Gew.-%. Der größte Anteil der Kornfraktionen (über 80 Gew.-%) stammt aus den anstehenden Bodenschichten. Das Größtkorn des Filterkuchens hat einen Durchmesser von rd. 1 mm.

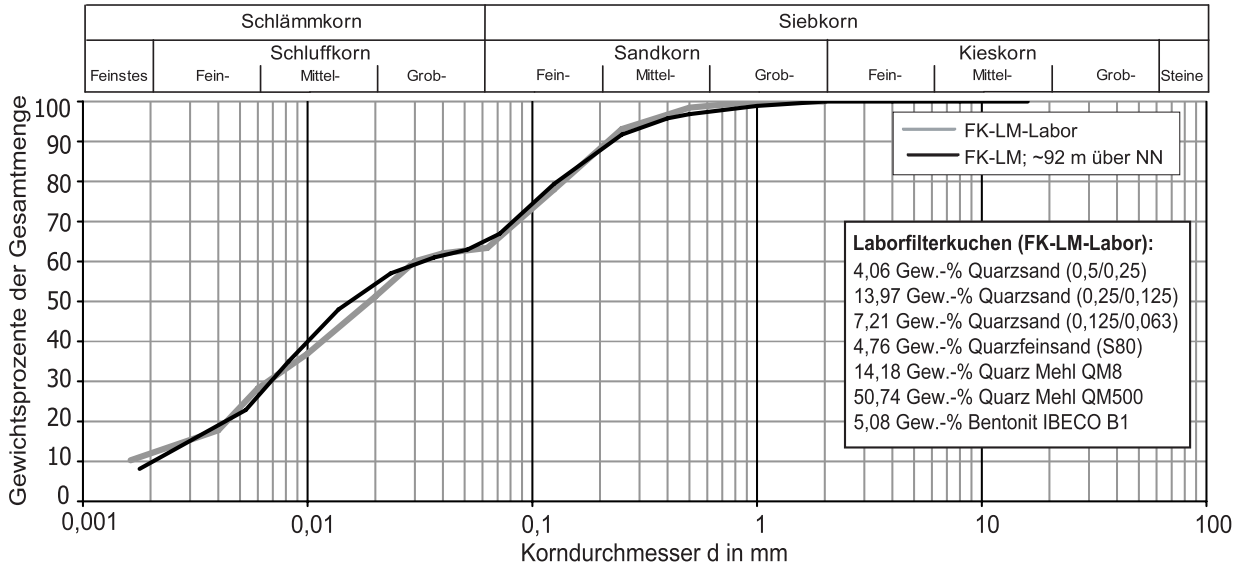


Bild 3.17: Kornverteilung des Laborfilterkuchens FK-LM-Labor

Zur Bestimmung der Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-LM wird im Labor ein entsprechendes Filterkuchenmaterial FK-LM-Labor künstlich hergestellt (siehe Bild 3.17) und mit diesem Rahmenscherversuche (B x L x H = 100 x 100 x 20 mm) durchgeführt.

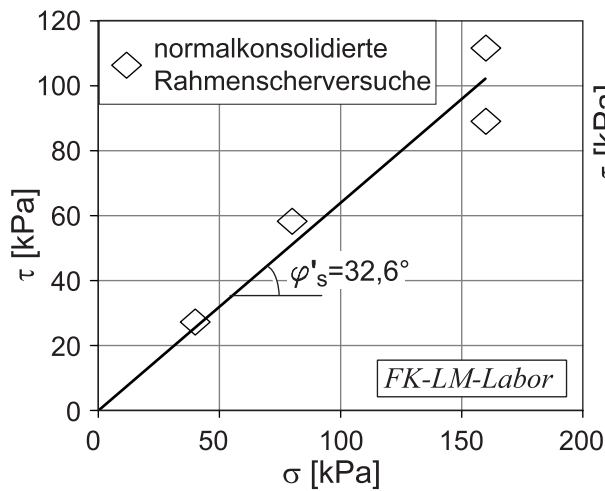


Bild 3.18: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , FK-LM-Labor

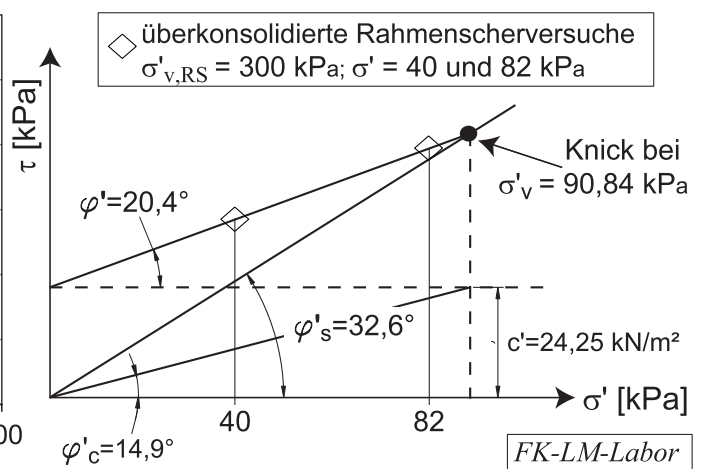


Bild 3.19: Schergesetz nach Krey-Tiedemann, FK-LM-Labor

Tabelle 3.9: Scherparameter, Vorbelastung σ'_v , Wichte und Wassergehalt des Laborfilterkuchens FK-LM-Labor

φ'_s [°]	φ' [°]	φ'_c [°]	σ'_v [kN/m ²]	σ'_v [kN/m ²]	w_{mittel} [%]	γ_{mittel} [kN/m ³]
SCHER	SCHER	SCHER	SCHER	ANALYTISCH	n. Versuch	n. Versuch
bei $\sigma'_{v,RS} = 300 \text{ kN/m}^2$						
32,6	20,4	14,9	90,84	136,28	27,6	19,3

Bild 3.18 zeigt den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s und Bild 3.19 den Winkel der inneren Reibung φ' sowie den Winkel der Kohäsion φ'_c nach Krey-Tiedemann (Gleichung 2.17). Für die überkonsolidierten Versuche wird auch hier analog zu dem Filterkuchen FK-Ro-Labor eine Konsolidierungsspannung von $\sigma'_{v,RS} = 300 \text{ kPa}$ gewählt, wobei die Abscherspannungszustände bei etwa $\sigma' = 40$ und 80 kPa liegen.

Es zeigt sich, dass der Winkel der Gesamtscherfestigkeit mit $\varphi'_s = 32,6^\circ$ eine ähnliche Größenordnung einnimmt wie der des Filterkuchens FK-Ro-Labor. Der Winkel der inneren Reibung liegt bei $\varphi' = 20,4^\circ$ und der Winkel der Kohäsion bei $\varphi'_c = 14,9^\circ$, Tabelle 3.9. Die experimentell ermittelte Vorbelastung σ'_v beträgt hier $90,84 \text{ kPa}$ und liegt wiederum bei etwa 30% der gewählten vertikalen Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$. Die nach Kapitel 2.4 analytisch bestimmte Vorbelastung mit $\sigma'_v = 136,28 \text{ kPa}$, liefert lediglich einen Anhaltswert, ist jedoch für die Charakterisierung des Konsolidierungszustandes eines Materials und den Eingang in erdstatische Berechnungen zu ungenau.

Rauigkeit der Schlitzwand

Von der Schlitzwandoberfläche werden Gipsabdrücke genommen und im Labor mit der Lasertechnik die Rautiefe bestimmt. Auch hier zeigt sich, dass die mikroskopische Rauigkeit der Wand kein Scherversagen in der direkten Kontaktfläche Wand-Filterkuchen zulässt, da die Rauigkeit $R_n \gg 1$ ist, Tabelle 3.3. Der Korndurchmesser d_{50} des in-situ Filterkuchens beträgt in etwa $0,012 \text{ mm}$ (siehe Bild 3.16) und ist somit viel kleiner als die Rautiefe $R_{max} = 7,2 - 10,7 \text{ mm}$ der Schlitzwandoberfläche, Bild 3.20.

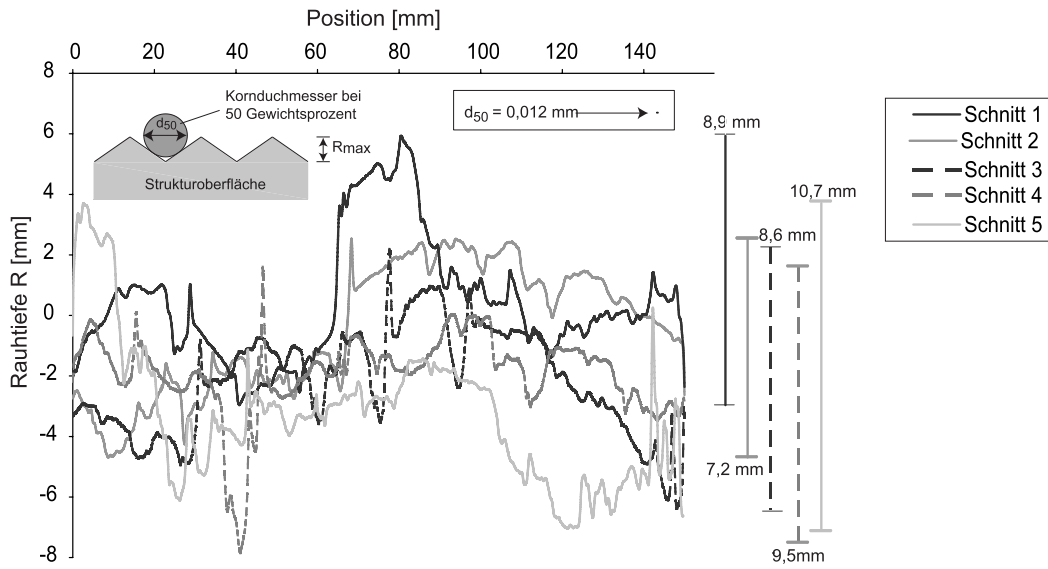


Bild 3.20: Oberfläche der Schlitzwand "Haltepunkt Markt", mikroskopische Rauigkeit

3.2.3 Baugrube "Haltepunkt Hauptbahnhof"

Probenahme und Auswertung

Ähnlich wie die Baustelle "Haltepunkt Markt" ist auch die Baugrube "Haltepunkt Hauptbahnhof" mit rd. 29 m tiefen Schlitzwänden umschlossen. Die Boden- und Filterku-

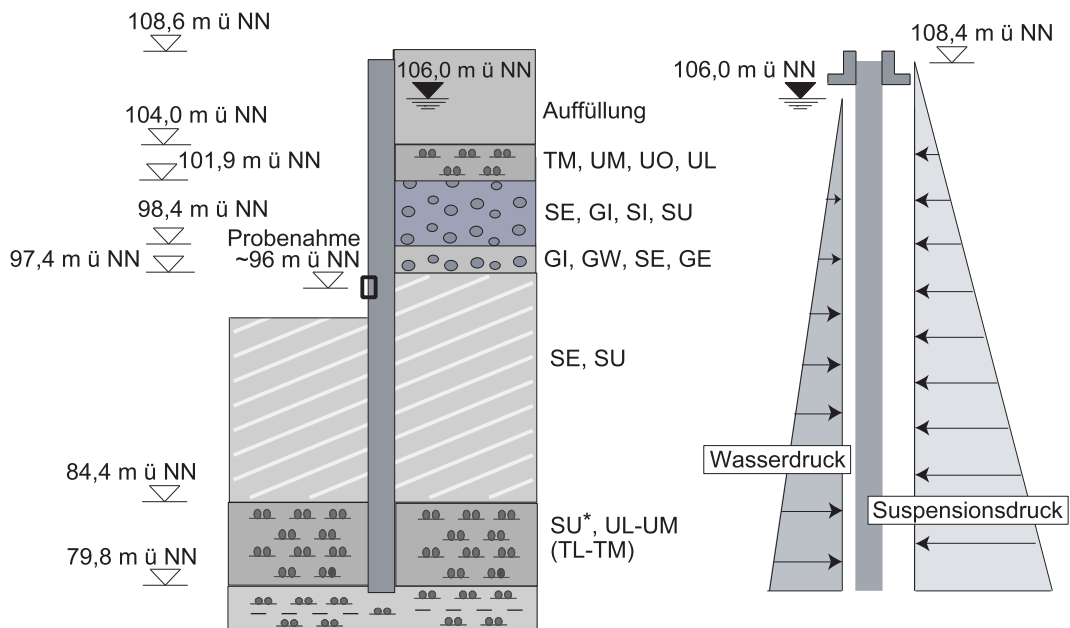


Bild 3.21: Baugrundsituation der Baugrube "Haltepunkt Hauptbahnhof"

Tabelle 3.10: Zustandsparameter des anstehenden Bodens der Baugrube "Haltepunkt Hauptbahnhof", Geotechnischer Bericht [108]

		TM, UM, UO, UL	SE, GI, SI, SU GI, GW, SE, GE	SE, SU	SU*, UL-UM (TL-TM)
γ	kN/m^3	-	17,5 - 18,5	19,8	19,8 - 20,1
γ_d	kN/m^3	-	-	16	15,7 - 16,1
k	m/s	-	$1,7 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
φ'	$^\circ$	-	30,3	35,1	-
c'	kN/m^2	-	5	2	-
e	-	-	0,488 - 0,660	0,653	0,686 - 0,713
w	%	48,3 - 80	-	22,7 - 23,6	34,6 - 43,6
w_L	%	31,7 - 36,3	-	-	34,6 - 43,6
I_P	-	0,098 - 0,118	-	-	0,081 - 0,116
d<0,063 mm	%	75,5 - 83,1	0,3 - 3,9	1,0 - 8,5	39,4 - 60,8
V_{GL}	%	1,9 - 6,0	0,3 - 0,6	0,2 - 2,1	-

chenproben werden hier aus ca. 96 m ü. NN entnommen, was einer Tiefe von ungefähr 12,5 m unter der GOK entspricht. Der natürliche Grundwasserspiegel liegt bei ca. 106 m ü. NN. Infolgedessen ist während des Schlitzens ein Suspensionsüberdruck von 25 kPa aktiviert worden. Bild 3.21 zeigt die Baugrundsituation der Baustelle sowie die Probenentnahmestelle. Tabelle 3.10 gibt aus dem Geotechnischen Bericht [108] einen Überblick über die Zustandsparameter der anstehenden Bodenschichten (Auelehm: TM, UM, UO, UL; Flussschotter: SE, GI, SI, SU und GI, GW, SE, GE; Bitterfelder Sande: SE, SU; Grüngrauer Schluff: SU*, UL-UM (TL-TM)) und Tabelle 3.11 zeigt Kennwerte der in-situ eingesetzten Stützsuspension (Aktiv-Natriumbentonit IBECO B1).

Tabelle 3.11: Stützsuspension der Baustelle "Haltepunkt Hauptbahnhof"

	Einheit	Zulauf	vor Regenerierung	nach
Dichte ρ_F	g/cm^3	1,03	1,08 - 1,10	1,06 - 1,07
Marsh-Zeit	sec	40	37 - 41	33 - 34
Fließgrenze τ_F	N/m^2	24,96	17,38 - 23,92	17,62 - 17,50
Sandgehalt	%	0	5 - 10	2

Filterkuchen FK-LH und Baugrund

Eine homogene, deutlich ausgebildete, ca. 12 mm dicke Filterkuchenschicht hat sich zwischen der Schlitzwand und dem anstehenden Boden gebildet, Bild 3.22. Auf Grund der dunklen Farbe des anstehenden Boden ist auch hier der Infiltrationsbereich der Stützsuspension in den Baugrund nicht visuell erkennbar.

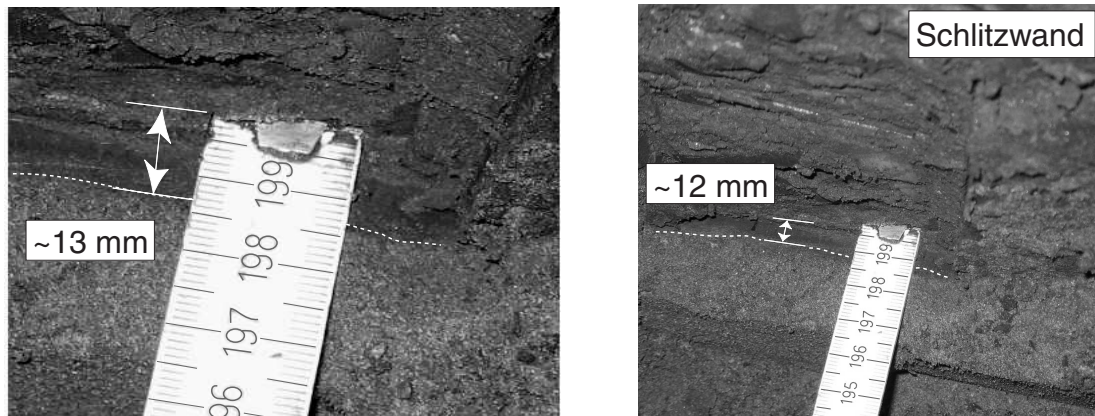


Bild 3.22: Filterkuchenschicht, "Haltepunkt Hauptbahnhof"

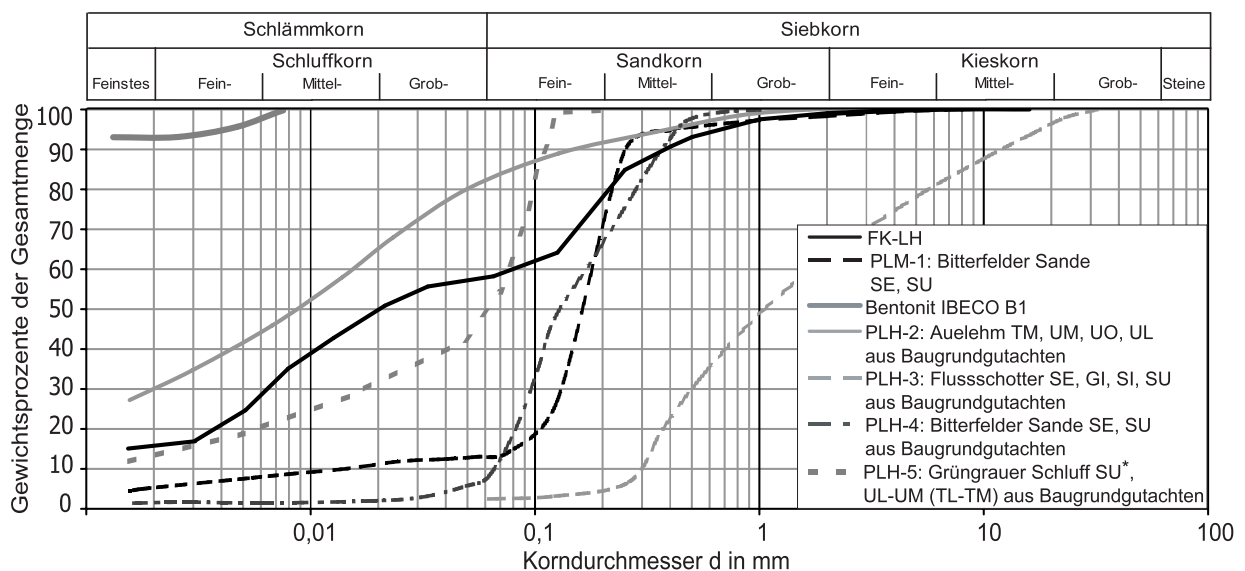


Bild 3.23: Kornverteilung des Filterkuchens sowie der anstehenden Bodenschichten, "Haltepunkt Hauptbahnhof"

Proben werden vom Filterkuchenmaterial (FK-LH) und vom anstehenden Boden (Ei-

merproben PLH-1) entnommen, sowie Gipsabdrücke von der Schlitzwandoberfläche angefertigt. Im Geotechnischen Bericht [108] wird für den angrenzenden Baugrund eine Durchlässigkeit von $k = 5,9 \cdot 10^{-5}$ m/s angegeben, Tabelle 3.10. Der Wassergehalt des Bodens liegt in etwa bei $w = 16$ % und der des Filterkuchens bei ungefähr $w = 43$ %. Die Kornverteilungskurven der anstehenden Bodenschichten und die des Filterkuchens (FK-LH) zeigt Bild 3.23. Die Kurve PLH-1 wird im Labor aus der Eimerprobe bestimmt, wohingegen die Kornverteilungskurven PLH-2, PLH-3, PLH-4 und PLH-5 aus dem Geotechnischen Bericht [108] stammen. Die Kornverteilungsbänder des Geotechnischen Berichtes [108] zeigt Anlage I.2. Wieder weist die Kornverteilung des Filterkuchens FK-LH eine gemischt-körnige Charakteristik auf. Gegenüber der Filterkuchen FK-Ro und FK-LM liegt der Tonanteil mit ca. 15 Gew.-% um mehr als 5 Gew.-% höher. Auch das Größtkorn des Filterkuchens FK-LH liegt mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm über dem der Filterkuchen FK-Ro und FK-LM.

Gleich wie bei den anderen Filterkuchen der Referenzbaustellen reicht die Menge des in-situ entnommenen Probenmaterials nicht für die Durchführung von Scherversuchen, so dass im Labor ein entsprechender Filterkuchen FK-LH-Labor künstlich hergestellt wird, Bild 3.24. Mit Rahmenscherversuchen ($B \times L \times H = 100 \times 100 \times 20$ mm) wird dann die Scherfestigkeit ermittelt.

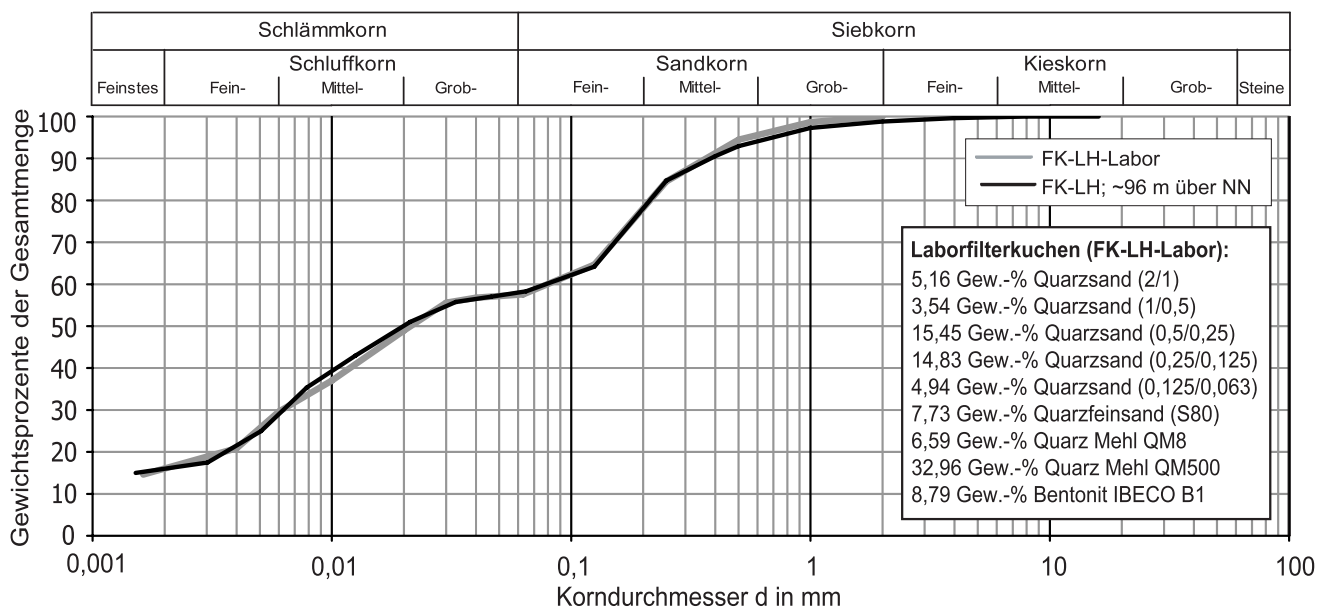


Bild 3.24: Kornverteilung des Laborfilterkuchens FK-LH-Labor

Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit des Filterkuchens FK-LH-Labor wird in Bild 3.25 aus normalkonsolidierten Versuchen zu $\varphi'_s \approx 29,6^\circ$ bestimmt. Bild 3.26 zeigt den Win-

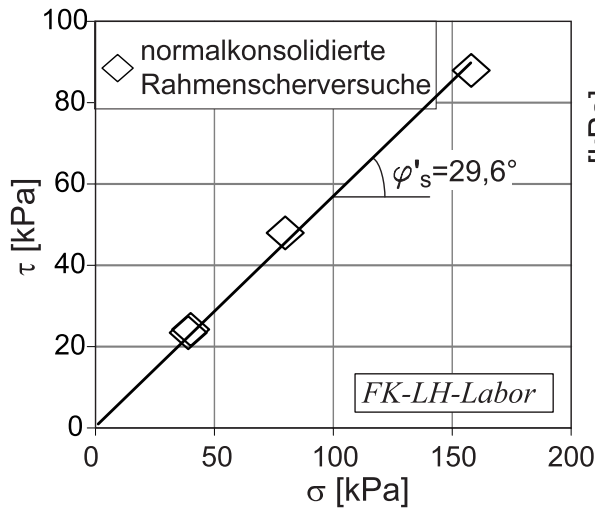


Bild 3.25: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , FK-LH-Labor

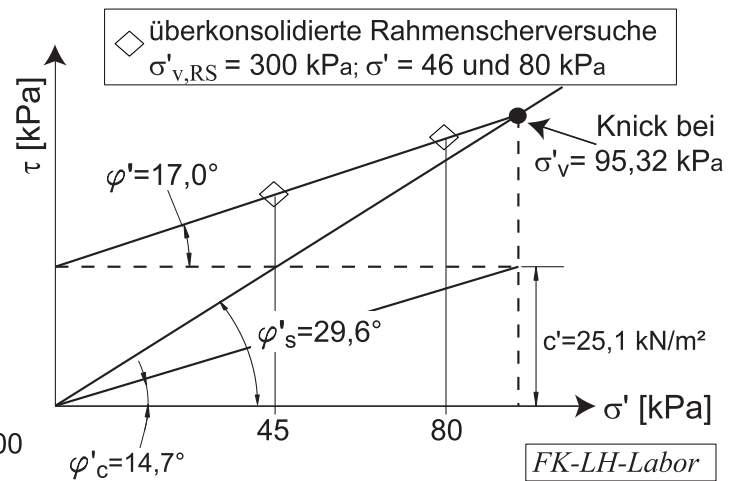


Bild 3.26: Schergesetz nach Krey-Tiedemann, FK-LH-Labor

kel der inneren Reibung $\varphi' = 17,0^\circ$ und den Winkel der Kohäsion $\varphi'_c = 14,7^\circ$ nach Krey-Tiedemann, siehe Gleichung 2.17, für den überkonsolidierten Bereich. Gleich wie bei den anderen Filterkuchenmaterialien wird für die Bestimmung der überkonsolidierten Scherfestigkeit eine Konsolidierungsspannung von $\sigma'_{v,RS} = 300$ kPa gewählt und Abscherspannungszustände von $\sigma' = 46$ und 80 kPa. Der experimentell ermittelte Übergang zwischen normal- und überkonsolidierten Zustand wird für diese Spannungsverhältnisse zu $\sigma'_v = 95,32$ kPa bestimmt. Auch hier liegt σ'_v etwas über 30% der vertikalen Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$ und damit deutlich unter der analytisch ermittelten Vorbelastung

Tabelle 3.12: Scherparameter, Vorbelastung σ'_v , Wichte und Wassergehalt des Laborfilterkuchens FK-LH-Labor

φ'_s [°]	φ' [°]	φ'_c [°]	σ'_v [kN/m ²]	σ'_v [kN/m ²]	w_{mittel} [%]	γ_{mittel} [kN/m ³]
SCHER	SCHER	SCHER	SCHER	ANALYTISCH	n. Versuch	n. Versuch
bei $\sigma'_{v,RS} = 300$ kN/m ²						
29,6	17,0	14,7	95,32	149,14	27,6	20,0

von $\sigma'_v = 149,14$ kPa. Tabelle 3.12 fasst die Ergebnisse der Rahmenscherversuche am Filterkuchenmaterial FK-LH-Labor zusammen.

Rauigkeit der Schlitzwand

Die von der Schlitzwandoberfläche angefertigten Gipsabdrücke werden im Labor ausge-

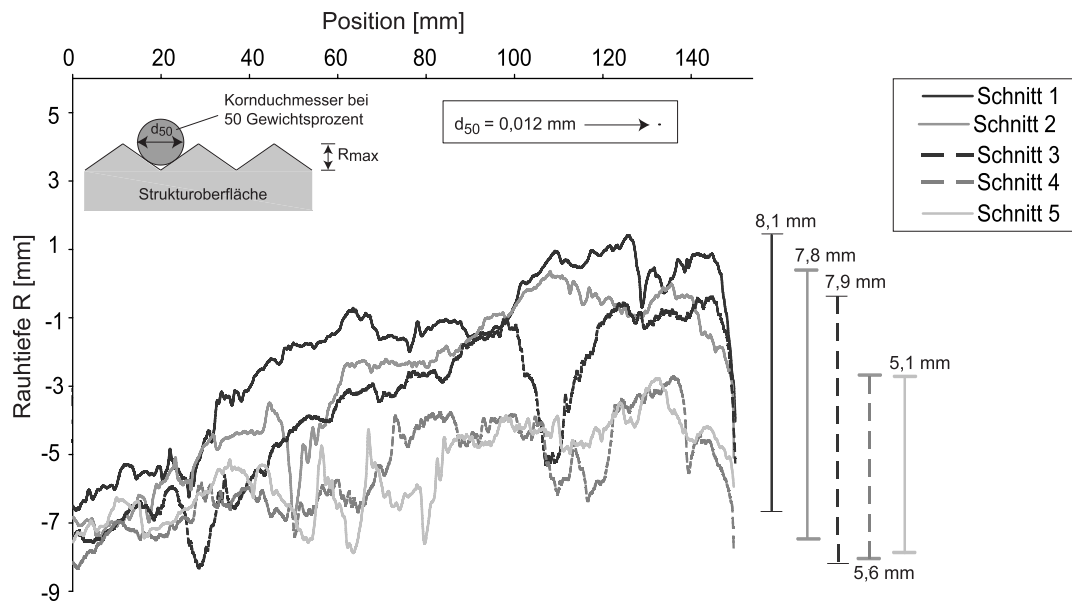


Bild 3.27: Oberflächenstruktur der Schlitzwand "Haltepunkt Hauptbahnhof"

wertet und die mikroskopische Rauigkeit bestimmt. Der Korndurchmesser d_{50} des in-situ Filterkuchens beträgt in etwa 0,012 mm, siehe Bild 3.23. Da die maximale Rautiefe R_{max} der Schlitzwandoberfläche zwischen 5,1 - 8,1 mm liegt, ergibt sich eine Rauigkeit $R_n \gg 1$, Bild 3.20. Demnach kann, wie auch schon bei den Baustellen "Conradstraat" und "Markt" gezeigt, kein Scherversagen in der direkten Kontaktfläche Wand-Filterkuchen auftreten.

3.3 Baugrube "Severinstraße" der U-Bahnerweiterung

3.3.1 Geologie und Hydrogeologie

Als letzte Baustelle wird die Baugrube "Severinstraße" (Nordbaugrube) der U-Bahnstrecke in Nord-Südrichtung der Stadt Köln gewählt. Der anstehende Boden ist hier, abweichend von den anderen Referenzbaustellen, grobkörniger. Anstatt von Mittel- bis Feinsand liegt

hier ein kiesiger Baugrund vor. Genauer beschrieben liegt der Großraum Köln im südöstlichen Teil der Niederrheinischen Bucht und gehört großtektonisch zur Kölner Scholle. Nach dem Ergebnis der Baugrunduntersuchung des ELE Erdbaulaboratorium Essen [25] befinden sich ab der Geländeoberkante im gesamten Trassenbereich angeschüttete Bodenschichten (Auffüllung). Im südlichen Trassenbereich weisen diese für das Stadtgebiet von Köln übliche Dicken bis zu 5 m auf, jedoch können sie maximal bis ca. 13 m dick sein. Dort, wo die Anschüttungsdicken nur relativ gering sind, stehen als oberste Zone des gewachsenen Bodens bindige Böden in Form von Schluffen und Grobschluffen mit unterschiedlichem Sandanteil an (Hochflutsedimente bzw. Auelehm). Die Dicke des Auelehms wird mit maximal 7 m nachgewiesen. Die angeschütteten Böden bzw. die bindigen Deckschichten werden unterlagert von quartären Rheinablagerungen in Form von Sand, Kiessand und Kies mit einer Mächtigkeit von 15 - 35 m. Oberflächennah bestehen diese gewachsenen grobkörnigen Böden überwiegend aus Sanden, die örtlich auch verlehmt sein können. In den tieferen Zonen überwiegen die Kiessande und Kiese. Generell ist eine Wechsellagerung von Kies- und Sandschichten vorhanden. Örtlich kommen z.T. reine Kiese mit offenen Strukturen vor. Steineinlagerungen sind in allen Zonen der Sande/Kiese vorhanden. Die Oberkante der Tertiärs befindet sich etwa 30 bis 40 m u. GOK. Diese Lockersedimente gehören zur Stufe des Oligozäns und Miozäns. Es handelt sich hierbei um gut sortierte, dicht gelagerte, marine Sande im Wechsel mit konsolidierten Tonen und tonigen Schluffen. In den Sanden treten auch Ton-, Schluff- und Braunkohleeinlagerungen auf. Der tiefere Untergrund wird aus paläozoischen Festgestein gebildet. Der oberste Grundwasserspiegel befindet sich in einer Tiefe von rd. 38 m ü NN (bauzeitlich maximaler Grundwasserstand: HGW= 41 m ü NN).

3.3.2 Probenahme und Auswertung

Umschlossen wird die Baugrube mit ca. 43 m tiefen Zweiphasenschlitzwänden. Analog zu den anderen Baustellen werden auch hier an einem frisch freigelegten Wandbereich Proben des Filterkuchens und des anstehenden Bodens entnommen. Die Probenahmestelle liegt ca. bei 39 m ü. NN bzw. befindet sich etwa 9,5 m unter der GOK. Der Suspensionsüberdruck während des Schlitzens betrug ungefähr 95 kPa. Tabelle 3.13 zeigt die Zustandparameter der im Bereich der Probenahmestelle vorliegenden Bodenschichten (quartären Rheinablagerungen in Form von Sand, Kiessand und Kies) aus dem Baugrundgutachten [25] und Tabelle 3.14 führt Daten der in-situ eingesetzten Stützsuspension, die aus dem aktivierten Bentonit TIXOTON aus süddeutschen Rohtonen besteht, auf.

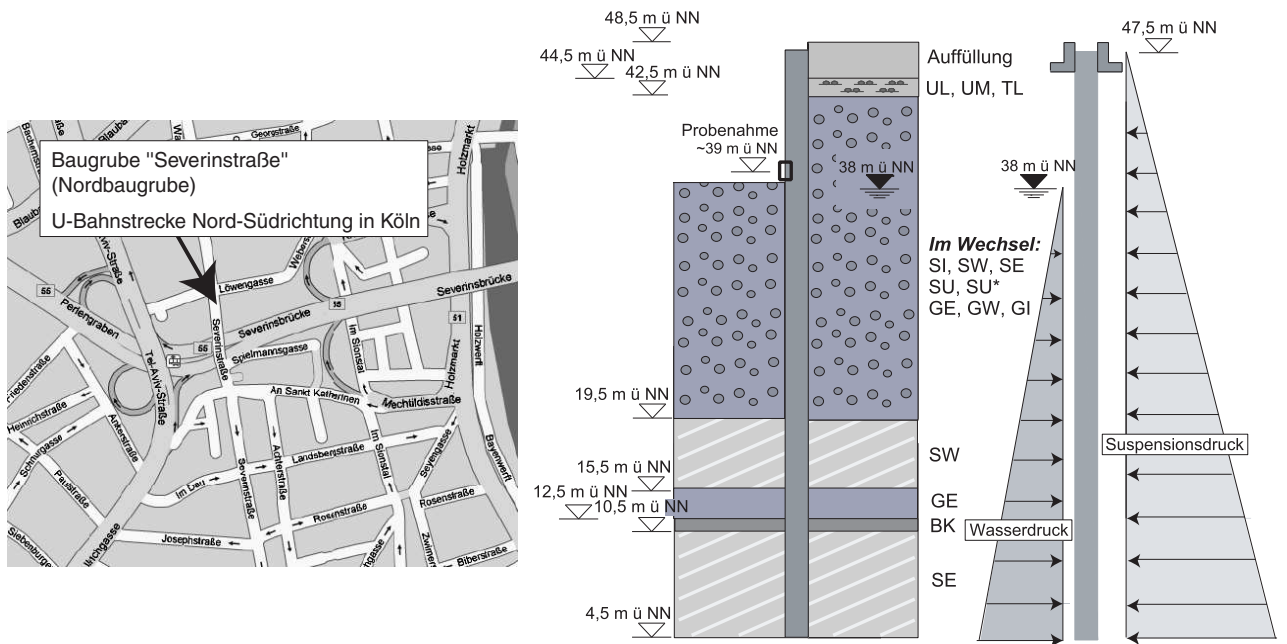


Bild 3.28: Lageplan der U-Bahn-Baugrube "Severinstraße" (Köln)

Bild 3.29: Baugrundsituation der U-Bahn-Baugrube "Severinstraße", [25]

Tabelle 3.13: Zustandsparameter der quartären Rheinablagerung in Form von Sand, Kies-sand und Kies, aus Baugrundgutachten [25]

	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	k [m/s]	E_s [MN/m ²]	φ' [°]	φ'_s [°]	c' [kN/m ²]
Anschüttung	16-23	-	-	-	-	20-35	-
UL, UM, TL	19	11	$1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-6}$	20	27,5	-	15
SI, SW, SE, SU*	20	11	-	30-40	32,5	-	0-10
GE, GW, GI	20	11	$6 \cdot 10^{-3}$	> 70	35-37,5	-	0

Filterkuchen FK-Ko und Baugrund

Auf Grund des kiesigen Baugrundes ist eine Entnahme von ungestörten Filterkuchen- bzw. Bodenproben nicht möglich. Die Dicke der Filterkuchenschicht schwankt enorm. In einigen Bereichen ist der äußere Filterkuchen bis zu 30 mm dick, hingegen in anderen Bereichen die Schichtdicke nur einige Millimeter beträgt. Kieskörner sowie einzelne Steine reichen durch die Filterkuchenschicht hindurch bis zur Wandoberfläche. Eine eindeutige Trennung zwischen äußerem und innerem Filterkuchen ist daher nicht möglich. Der Filterkuchen stellt eine vom Inneren des Erdreichs beginnend nach außen wachsende Schicht dar. Die Entnahme der Probe ist daher schwierig. Filterkuchenmaterial wird vorsichtig von der

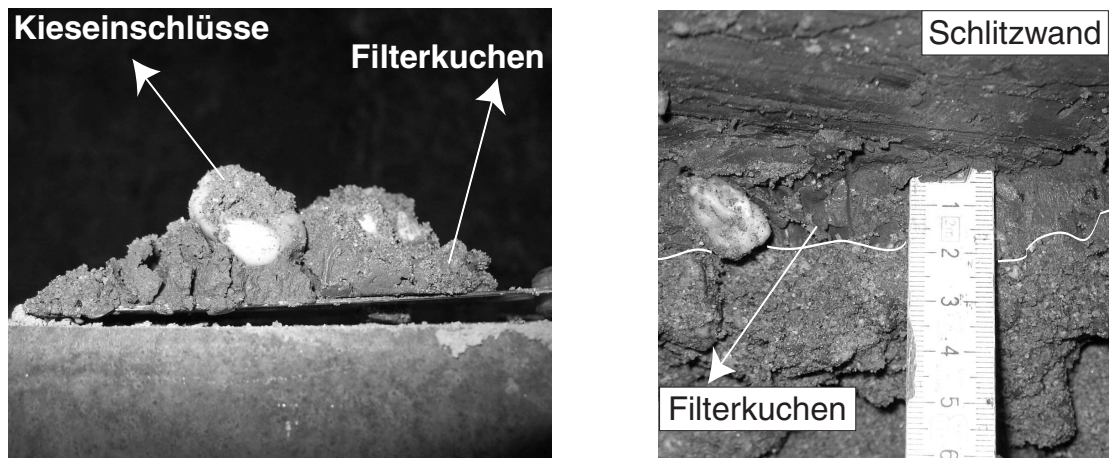


Bild 3.30: Filterkuchen FK-Ko der Baugrube "Severinstraße"

Wand gelöst und vom anstehenden Erdreich gesäubert. Bild 3.30 zeigt den Filterkuchen mit einzelnen Kieseinschlüssen die bis hin zur Wandoberfläche reichen. Vom anstehenden Boden werden gestörte Eimerproben (PKo-1 und PKo-2) genommen. Die Durchlässigkeit des angrenzenden Bodens wird im Bodengutachten [25] mit $k = 6 \cdot 10^{-3}$ angegeben, Tabelle 3.13. Die Stagnationstiefe kann visuell nicht ermittelt werden. Der im Labor ermittelte Wassergehalt des Filterkuchens beträgt $w_{Mittel} \approx 127\%$ und die Feuchtwichte liegt bei etwa $\gamma_{Mittel} = 13,8 \text{ kN/m}^3$. Bild 3.31 zeigt die Kornverteilung des Filterkuchens FK-Ko im Vergleich zu den Kornverteilungen der anstehenden Bodenschichten. Die Kornverteilungen FK-Ko, PKo-1 und PKo-2 werden im bodenmechanischen Labor bestimmt, wo hingegen die Kornverteilungen PKo-3 und PKo-4 dem Bodengutachten [25] entnommen werden. Ein Vergleich mit den Kornverteilungen der anderen drei Filterkuchen (FK-Ro, FK-LM

Tabelle 3.14: Stützsuspension der Baustelle "Severinstraße"

Zusammensetzung: 40 g Bentonit / 1 Wasser				
	Einheit	Zulauf	vor Regenerierung	nach
Dichte ρ_F	g/cm^3	1,03	1,07	1,03
Marsh-Zeit	sec	38	40	37
Fließgrenze τ_F	N/m^2	13,7	16,5	13,7
Sandgehalt	%	0	12	0
Filtratwasserabgabe f	cm^3	12	13	11
pH-Wert	-	11,2	11,5	11
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	14	14	14,2

und FK-LH) zeigt, dass der prozentuale Anteil des Schluffkornes mit etwa 25 Gew.-% gering ist. Der prozentuale Anteil des Schluffkornes beträgt in etwa bei FK-Ro: 50 Gew.-%, FK-LM: > 50 Gew.-% und FK-LH: > 40 Gew.-%. Der Tonanteil des Filterkuchens FK-Ko ist hingegen mit ca. 20 Gew.-% höher als die der anderen Filterkuchen (FK-Ro: 10 Gew.-%, FK-LM: 8 Gew.-% und FK-LM: 15 Gew.-%). Es liegt die Vermutung nahe, dass auch die Scherfestigkeit dieses Filterkuchens FK-Ko zu abweichenden Ergebnissen führt. Trotz des grobkörnigen anstehenden Bodens besitzt der Filterkuchen ein Größtkorn mit einem Durchmesser von nur rd. 1 bis 2 mm.

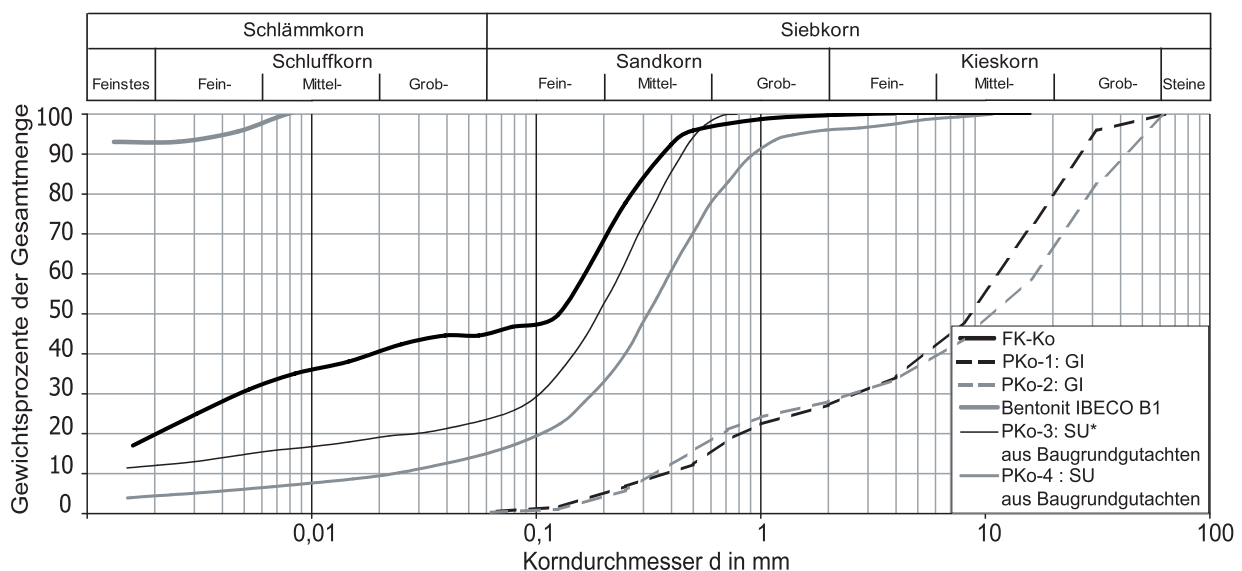


Bild 3.31: Kornverteilung des Filterkuchens sowie der Bodenschichten, "Severinstraße"

Die Menge des auf der Baustelle entnommenen Filterkuchenprobenmaterials reicht auch hier nicht zur Bestimmung der Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ko. Der Filterkuchen wird im Labor künstlich nachgebaut, Bild 3.32. Die Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ro-Labor wird wieder mit Rahmenscherversuchen ($B \times L \times H = 100 \times 100 \times 20$ mm) bestimmt. Bild 3.18 zeigt den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s (ermittelt aus normalkonsolidierten Versuchen) und Bild 3.19 den Winkel der inneren Reibung φ' und den Winkel der Kohäsion φ'_c .

Bei den überkonsolidierten Rahmenscherversuchen beträgt die Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS} = 300$ kPa und die Spannungszustände während des Scherens liegen bei $\sigma' = 40$ und 80 kPa. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit des Laborfilterkuchens FK-Ko-Labor beträgt $\varphi'_s \approx 21,5^\circ$. Der Winkel der inneren Reibung liegt bei $\varphi' = 0^\circ$ und der Winkel

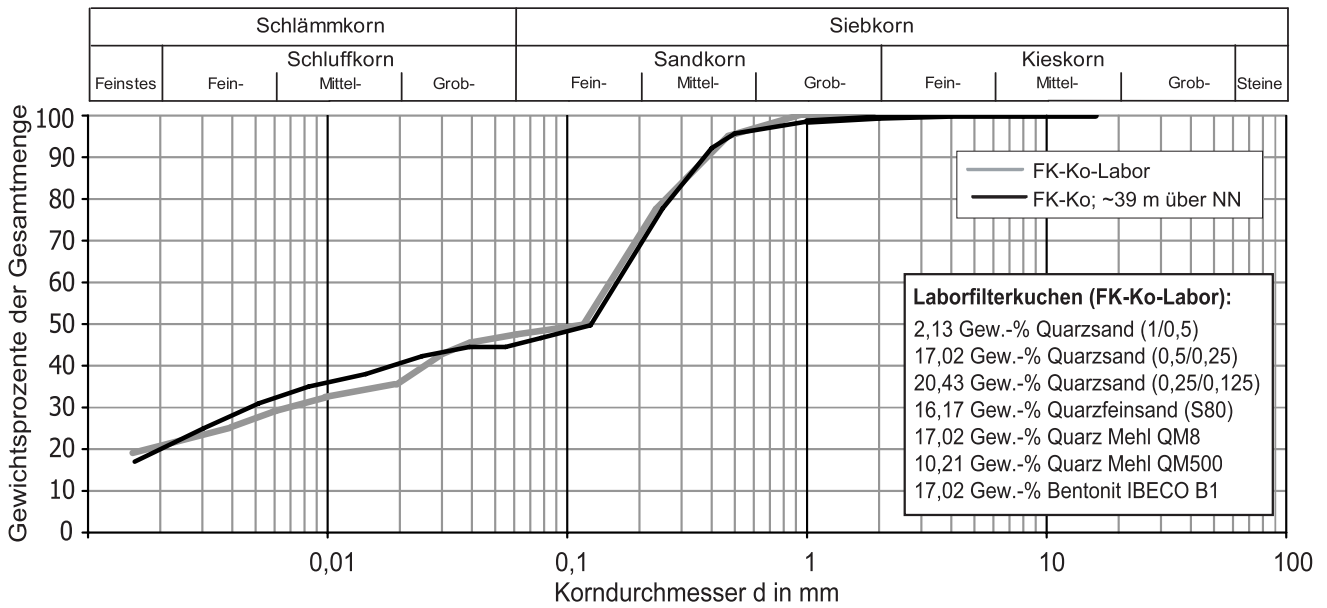


Bild 3.32: Kornverteilung des Laborfilterkuchens FK-Ko-Labor

der Kohäsion bei $\varphi'_c = 0^\circ$.

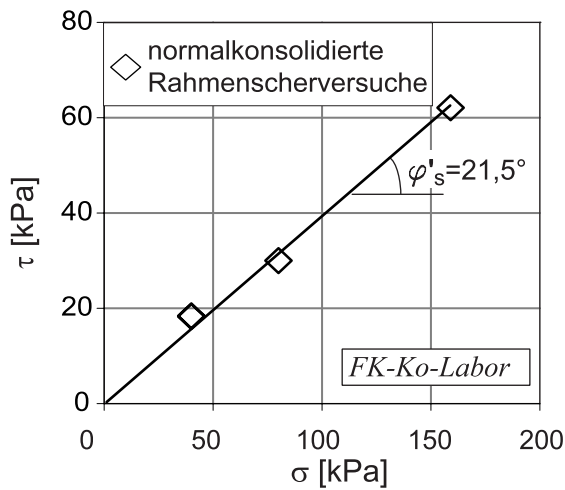


Bild 3.33: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , FK-Ko-Labor

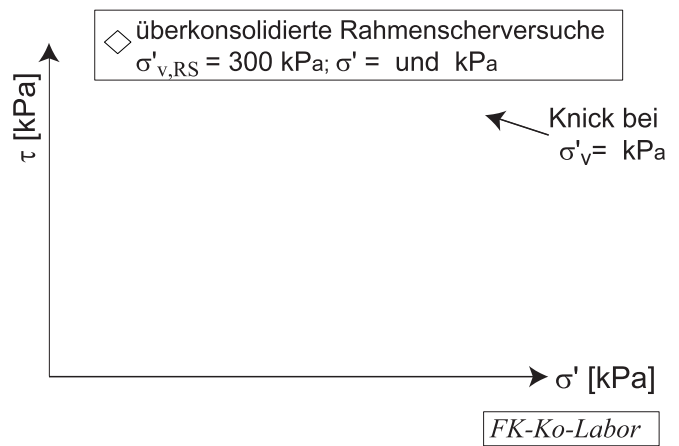


Bild 3.34: Schergesetz nach Krey-Tiedemann, FK-Ko-Labor

Der Anteil aus der Reibung ist kleiner als der der anderen Filterkuchenmaterialien. Da der Tonanteil im Filterkuchen FK-Ko-Labor um bis zu 10 % höher liegt, sind diese Abweichungen jedoch zu erklären. Ein weiteres Indiz für einen stärkeren Bentoniteinfluss ist der Wassergehalt, der um ca. 7 % höher ist als der der anderen Filterkuchen. Auch der schon

Tabelle 3.15: Scherparameter, Vorbelastung σ'_v , Wichte und Wassergehalt des Laborfilterkuchens FK-Ko-Labor

φ'_s [°]	φ' [°]	φ'_c [°]	σ'_v [kN/m ²]	σ'_v [kN/m ²]	w_{mittel} [%]	γ_{mittel} [kN/m ³]
SCHER	SCHER	SCHER	SCHER	ANALYTISCH	n. Versuch	n. Versuch
bei $\sigma'_{v,RS} = 300 \text{ kN/m}^2$						
21,5				185,67	34,6	18,6

oben erläuterte abweichende Schluffanteil des Filterkuchens FK-Ko kann das veränderte Reibungsverhalten hervorrufen. Die Kombination aus hohen Ton- und geringen Schluffanteil kann somit zu dieser niedrigeren Scherfestigkeit geführt haben. Anzumerken ist somit, dass bei stark kiesigen Baugrund mit geringen Schluffkomponenten der Filterkuchen eine geringere Scherfestigkeit besitzt, als Filterkuchen von anstehenden Feinsand und Schluffböden. Auf Grund der Feinsand- und Schluffanteile im Boden ist die Aufladung der Stützsuspension feinkörniger, was sich in der Kornzusammensetzung des Filterkuchens widerspiegelt.

Die experimentell ermittelte Vorbelastung σ'_v beträgt hier kPa und liegt bei etwa % der gewählten vertikalen Konsolidierungsspannung $\sigma'_{v,RS}$. Die nach Kapitel 2.4 analytisch bestimmte Vorbelastung ist mit $\sigma'_v = 185,67 \text{ kPa}$ deutlich höher als die experimentell ermittelte und beschreibt somit wiederum die Wirklichkeit nicht in einem ausreichenden Maße.

3.4 Zusammenstellung von Ergebnissen der untersuchten Filterkuchen

In-situ Filterkuchenproben werden an frisch freigelegten Schlitzwandoberflächen von vier Referenzbaustellen entnommen. Der an den Probenahmestellen gewachsene Boden ist bei allen vier Baustellen nichtbindig. Die Kornverteilung wird im Labor aus gestörten Bodenproben bestimmt. Die folgend angegebenen Durchlässigkeiten dieser Bodenschichten sind dem jeweiligen Baugrundgutachten entnommen.

Das Filterkuchenmaterial FK-Ro wird aus einer Tiefe von ca. 8,5 m u. GOK entnommen. Die Filterkuchenschicht verläuft dort mit einer gleichmäßigen Dicke von rd. $d_{FK} = 10 \text{ mm}$.

Der Wassergehalt der Filterkuchenproben schwankt auf Grund des hohen Organikgehalts und liegt zwischen $w = 91 - 197\%$. Das Größtkorn des Filterkuchens wird zu $d_{max} = 0,5$ mm ermittelt. Der in dieser Tiefe anstehenden Baugrund wird als Fein- bis Mittelsand klassifiziert, der eine Durchlässigkeit in der Größenordnung von $k = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s besitzt. Der Suspensionsüberdruck während des Schlitzens lag bei ca. $\Delta p = 50$ kPa.

Das Probematerial des zweiten in-situ Filterkuchens FK-LM wird aus einer Tiefe von ca. 21 m u. GOK entnommen. Hier besitzt die Filterkuchenschicht nur eine sehr geringe Mächtigkeit von wenigen Millimetern. Der Filterkuchenwassergehalt beläuft sich auf ca. $w \approx 50\%$ und das Größtkorn beträgt $d_{max} = 1$ mm. Der anstehende Boden der Probenahmestelle wird zu einem Feinsand, stark mittelsandig, schluffig, schwach grobsandig bestimmt. Im Vergleich zu den anstehenden Böden der anderen Filterkuchen ist dieser Baugrund am feinkörnigsten. Die Größe der Durchlässigkeit kann nur abgeschätzt werden, da die Kornverteilung der hier entnommenen Bodenprobe von der entsprechenden des Geotechnischen Berichtes [108] abweicht. Der hier anstehende Boden weist einen hohen Schluffanteil auf, der aus dem Grüngrauen Schluff stammen muss. Im Geotechnischen Bericht [108] wird für den Grüngrauen Schluff (SU*, UL-UM (TL-TM)) eine Durchlässigkeit von $k = 8 \cdot 10^{-10} - 5,6 \cdot 10^{-9}$ m/s angegeben, Tabelle 3.7. Die hier somit angenommene geringe Durchlässigkeit der anstehenden Bodenschicht erklärt auch die geringe Filterkuchenmächtigkeit. Während des Schlitzens betrug der Suspensionsüberdruck etwa $\Delta p = 55$ kPa.

Die Filterkuchenproben FK-LH werden aus einer Tiefe von ca. $d_{FK} = 12,5$ m u. GOK entnommen. Die Mächtigkeit der Filterkuchenschicht liegt bei ca. 12 mm und verläuft ähnlich wie bei FK-Ro gleichmäßig. Der Filterkuchenwassergehalt wird zu $w \approx 43\%$ bestimmt. Das Größtkorn des Filterkuchens liegt bei $d_{max} = 1$ bis 2 mm. Der anstehende Boden ist hier ein Feinsand, stark mittelsandig, schwach schluffig, der eine Durchlässigkeit in der Größenordnung von $k = 5,9 \cdot 10^{-5}$ m/s besitzt. Der Suspensionsüberdruck während des Schlitzens belief sich auf rd. $\Delta p = 25$ kPa.

Das vierte Filterkuchenprobematerial FK-Ro wird aus einer Tiefe von rd. 9,5 m u. GOK entnommen. Die Dicke der Filterkuchenschicht schwankt enorm und liegt im Bereich von $d_{FK} =$ wenige bis zu 30 mm. Kieskörner sowie einzelne Steine gelangen durch die Filterkuchenschicht hindurch bis zur Wandoberfläche. Der Wassergehalt der Filterkuchenproben liegt bei ungefähr $w \approx 127\%$ und das Größtkorn bei $d_{max} = 1$ bis 2 mm. Der anstehende Baugrund wird als Mittelkies, feinkiesig, schwach grob- und mittelsandig klassifiziert. Im grobkörnigen Baugrund, wie der hier vorliegende, bildet sich erstmal vorwiegend

auf Grund von Kolmationseffekten ein Filterkuchen im Inneren des Erdreiches aus (siehe Kapitel "innerer Filterkuchen"), der in Richtung des offenen Schlitzes anwächst und auch über die Erdwandung hinaus reichen kann. Eine Filterkuchenschicht zwischen Wandoberfläche und Erdwandung mit einer definierten Dicke ist hier nicht zu erkennen. Die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens beläuft sich auf $k = 6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Der Suspensionsüberdruck während des Schlitzens lag bei ca. $\Delta p = 95$ kPa.

Ein Vergleich der vier Filterkuchenkornverteilungen, Bild 3.35, zeigt, dass keine Korndurchmesser größer als 2 mm vorkommen. Dies führt zu der Annahme, dass das Größtkorn eines Filterkuchenmaterials einen Korndurchmesser von 2 mm nicht übersteigen kann. Im Kapitel 5 wird diese Annahme mit Modellversuchen überprüft.

Da die Menge des Probematerials der Filterkuchen nicht für die Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Scherfestigkeiten ausreicht, wird im Labor Probematerial künstlich hergestellt und an diesem Rahmenscherversuche durchgeführt. Bild 3.35 zeigt die Kornverteilungen der vier Laborfilterkuchen.

Bestimmt wird die Scherfestigkeit der Filterkuchen im normalkonsolidierten Zustand über den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s .

Da während der Schlitzherstellungsphase der Frischbeton (siehe Kapitel 9.1) den Filterkuchen kurzzeitig überkonsolidiert, wird auch die überkonsolidierte Scherfestigkeit nach Krey-Tiedemann, Gleichung 2.17, mit dem Winkel der inneren Reibung φ' und dem Winkel der Kohäsion φ'_c ermittelt. Überkonsolidierte Rahmenscherversuche werden hier bei einer vertikalen Konsolidierungsspannung von $\sigma'_{v,RS} = 300$ kPa und bei Abscherspan-

Tabelle 3.16: Filterkuchen nach Wandfertigstellung bei Ausbildungsrandbedingungen

	FK-Ro-Labor	FK-LM-Labor	FK-LH-Labor	FK-Ko-Labor
Filterkuchen nach Wandfertigstellung				
d_{FK} [mm]	10	bis 4	12	bis 30
w [%]	91-197	50	43	127
d_{max} [mm]	0,5	1	1-2	1-2
anstehender Boden				
k [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-10}$ - $6 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Suspensionsüberdruck				
Δp [kN/m ²]	50	55	25	95

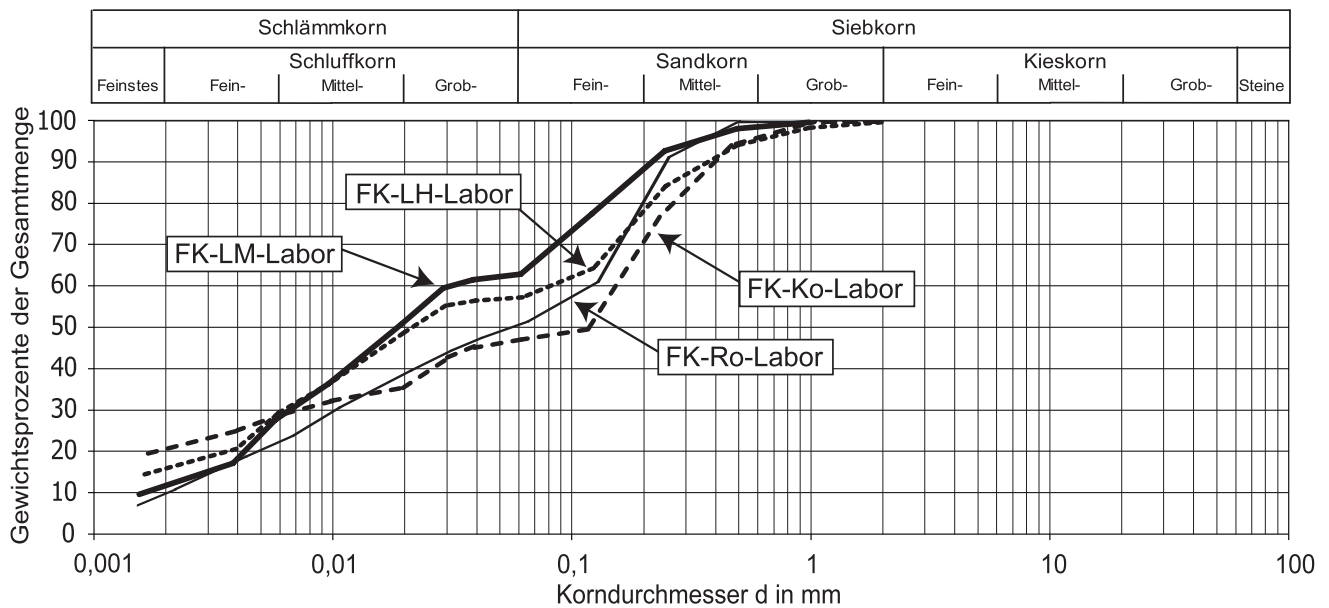


Bild 3.35: Kornverteilungen der künstlich hergestellten Laborfilterkuchen

nungszuständen im Bereich von $\sigma' = 40$ und 80 kPa durchgeführt.

Tabelle 3.17 zeigt eine Zusammenstellung der in diesem Kapitel ermittelten maßgebenden Parameter zur Beschreibung der Filterkuchenscherfestigkeiten. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , der die Scherfestigkeit im normalkonsolidierten Zustand beschreibt, ist bei den ersten drei Filterkuchenmaterialien sehr ähnlich. Mit Werten von $\varphi'_s = 29,6$ bis $32,6^\circ$ werden Gesamtscherfestigkeiten erreicht, die zu den Angaben von Gudehus in [36] für tonigen Schluff mit $\varphi'_s = 30^\circ$ passen. Die Kornverteilung des Filterkuchens FK-Ko-

Tabelle 3.17: Parameter zur Beschreibung der Filterkuchenscherfestigkeiten

	FK-Ro-Labor	FK-LM-Labor	FK-LH-Labor	FK-Ko-Labor
φ'_s [°]	30,4	32,6	29,6	21,5
φ' [°]	24,0	20,4	17,0	FK-Ko
φ'_c [°]	8,1	14,9	14,7	FK-Ko
σ'_v ¹⁾ [kN/m ²]	82,4	90,84	95,32	FK-Ko
$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v,RS}}$ ¹⁾ [-]	0,28	0,30	0,32	FK-Ko
σ'_v ²⁾ [kN/m ²]	145,9	136,28	149,14	185,67

¹⁾ experimentell ermittelt

²⁾ mit analytischem Ansatz aus Kapitel 2.4 ermittelt

Labor ist stark intermittierend gestuft. Auffällig ist, dass Kornanteile des Mittel- und Feinschluffes im Filterkuchen FK-RKo-Labor nur zu ca. 15 Gew.-% vertreten sind, hingegen bei allen anderen Filterkuchen dieser Anteil über 30 Gew.-% beträgt. Da ferner der Tonanteil mit rd. 20 Gew.-% am größten ist, wird vermutet, dass der im Vergleich zu den anderen Filterkuchenmaterialien niedrigere Winkel der Gesamtscherfestigkeit mit $\varphi'_s = 21,5^\circ$ auf diese Effekte zurückzuführen ist. Den größten Winkel der inneren Reibung φ' und zugleich kleinsten Winkel der Kohäsion φ'_c zeigt Filterkuchen FK-Ro-Labor auf, der mit 10 Gew.-% den kleinsten Tonanteil besitzt.

Aus Tabelle 3.17 wird weiterhin deutlich, dass das Verhältnis der Vorbelastung zur Konsolidierungsspannung $\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v,RS}}$ bei allen Filterkuchenmaterialien um 0,3 liegt. Dieser Verhältniswert wird somit als typisch für Filterkuchenmaterialien angesehen. Die nach Kapitel 2.4 analytisch bestimmte Vorbelastung σ'_v weicht zu stark von der experimentell ermittelten ab, so dass diese mathematische Berechnung die überkonsolidierten Versuche nicht ersetzen kann.

Kapitel 4

”Grundkorn” des Filterkuchens

4.1 Theorie

Die Kornverteilungen der in-situ Proben haben gezeigt, dass der Filterkuchen ein gemischtkörniges Material ist, Kapitel 6.2.2. Der Tonanteil schwankt zwischen 8 - 20 Gew.-%. Bis zu einem Größtkorn mit einem Durchmesser von ca. 2 mm findet sich die gesamte Bandbreite der Kornfraktionen aus dem anstehenden Boden im Filterkuchen. Sind bestimmte Kornfraktionen im anstehenden Boden wenig vertreten, sind diese auch im Filterkuchen nur zu einem geringen Anteil vorhanden, siehe hierzu Kapitel 5.

Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, welche Kornfraktion das mechanische Verhalten und damit theoretisch auch die Scherfestigkeit des Filterkuchens maßgebend steuert. Die Scherfestigkeiten der Filterkuchenproben weisen sowohl Reibungs- als auch Kohäsionseigenschaften auf, siehe Kapitel 6.2.2. Mit dem Verfahren von Schwanda [89, 90, 91] wird die so genannte maßgebende ”Grundkornfraktion” eines Korngemisches ermittelt und so das mechanische Verhalten des Filterkuchens diesem somit maßgebenden Körnungsbe- reich zugeordnet, [52, 51, 74, 46]. Dieses Verfahren dient grundsätzlich zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Zementschüttungen und Betonzuschlägen. Die bestehende Kornverteilung wird in Teilfraktionen unterteilt, wobei innerhalb einer Fraktion das Größtkorn höchstens den doppelten Durchmesser des kleinsten Korn aufweisen darf, [89]. Diese Teilfraktionen werden als Einkornschüttung betrachtet und so die Kornverteilung als Summe von Einkornfraktionen idealisiert, [51]. Aus den Teilkornfraktionen wird jeweils die minimale Porenzahl e_{min} bestimmt. Danach werden alle Kornfraktionen der Reihe nach miteinander kombiniert, wobei immer zwei Kornfraktionen miteinander folgendermaßen

verglichen werden:

Fall 1: Grobkorn als "Grundkorn", Feinkorn ist Beikorn

Die feinere Fraktion passt in die Zwickel der gröberen und füllt so die Poren. Die Porenzahl der Mischung aus zwei Kornfraktionen ergibt sich aus der Differenz der Porenzahl der gröberen Fraktion und des Feststoffvolumens der feineren Fraktion und berechnet sich zu:

$$e = \frac{V_{P,grob} - V_{s,fein}}{V_{s,grob} - V_{s,fein}} \quad (4.1)$$

Hierbei steht $V_{P,grob}$ für das Porenvolumen des Grobkorns als Einkornschüttung bei dichter Lagerung sowie $V_{s,grob}$ bzw. $V_{s,fein}$ für das Feststoffvolumen des Grobkorns bzw. des Feinkorns als Einkornschüttung bei dichter Lagerung. Die Porenzahl der Mischung aus den zwei Einkornschüttungen kann außerdem mit der Porenzahl e_{grob} der gröberen Fraktion und dem Feststoffraumanteil des Feinkorns s_{fein} berechnet werden:

$$e = e_{grob} - (e_{grob} + 1) \cdot s_{fein} \quad (4.2)$$

Fall 2: Feinkorn als "Grundkorn", Grobkorn ist Beikorn

Der Porenraum der gröberen Fraktion ist kleiner als der Feststoffanteil der feinen Fraktion, so dass die gröberen Körner im Feinkorn "schwimmen". Da die feinen Körner nicht nur in den Poren der groben platziert sind, erhöhen sie das Gesamtvolumen. Da somit der Hohlraumgehalt der Mischung gleich dem Hohlraumgehalt der feinen Fraktion ist, wird das Feinkorn zum "Grundkorn". Die Porenzahl der Mischung berechnet sich zu:

$$e = \frac{V_{P,fein}}{V_{s,grob} + V_{s,fein}} \quad (4.3)$$

Desweiteren kann die Porenzahl analog zu Gleichung 4.2 bestimmt werden:

$$e = e_{fein} - e_{fein} \cdot s_{grob} \quad (4.4)$$

Fall 1 und 2 stellen zwei Grenzwerte dar. Diese werden allgemein mit der Gleichung 4.5 beschrieben:

$$e = e_{GR} - a \cdot s_{BE} \quad (4.5)$$

Hierbei steht e_{GR} für die minimale Porenzahl der betrachteten Grundkornfraktion und s_{BE} für den Feststoffraumanteil des Beikorns. Der Parameter e beschreibt die minimale

Porenzahl des gesamten Korngemisches. Im dazwischen liegenden Übergangsbereich behindern sich die Körner der beiden Fraktionen gegenseitig, [74]. Die feine Fraktion passt auf Grund ihrer Größe und Geometrie nicht in die Zwickel der größeren Fraktion. Dies hat auf Grund der entstehenden Teilchenbehinderung eine Vergrößerung des Volumens zur Folge. Diese Erhöhung des Porenanteils bzw. Reduzierung der Lagerungsdichte wird durch den Parameter a berücksichtigt. Im trivialen Fall der Mischung zweier Einkornfraktionen mit gleichem Durchmesser bleibt der Porenanteil der Mischung gleich dem der Einkornfraktion. Für diesen Fall wäre der Faktor $a = 0$, [91, 51]. Der Bereich derjenigen Größenverhältnisse zwischen Grund- und Beikorn in denen die Teilchenbehinderung auftritt, wird mit der so genannten "Reichweite des Korneinflusses" v_w beschrieben und berechnet sich zu:

$$v_w = \log \frac{d_{BE}}{d_{GR}} \quad [-v_w \leq \log \frac{d_{BE}}{d_{GR}} \leq +v_w] \quad (4.6)$$

Der Parameter d_{GR} gibt den Korndurchmesser des "Grundkorns" an und d_{BE} steht für den Korndurchmesser des Beikorns. Bild 4.1 veranschaulicht den mathematische Zu-

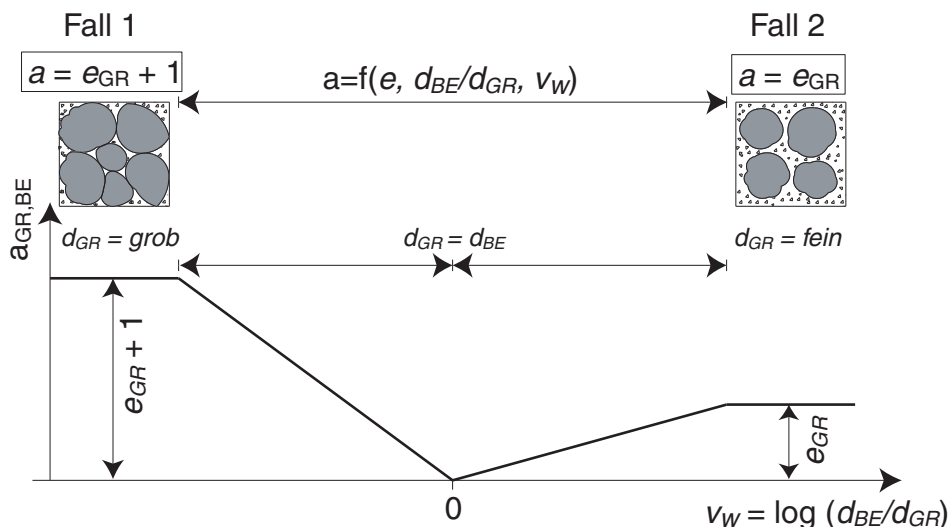


Bild 4.1: Funktion $a_{GR, BE}$ des Hohlraumgehaltes des "Grundkorns" e_{GR} und der Reichweite der Teilchenbehinderung v_w in Abhängigkeit vom Verhältnis des Beikorns d_{BE} zum "Grundkorn" d_{GR} , [74]

sammenhang der Parameter e_{GR} , v_w , d_{BE}/d_{GR} und a , wobei für den Porenanteil des "Grundkorns" e_{GR} der Minimalwert genommen wird ($e_{GR} = e_{GR, min}$). Die Parameter e_{GR} und v_w beschreiben die "Art des Kornes" und sind daher Materialkonstanten, die von der

Form und Oberflächenbeschaffenheit der Körner sowie von dem Medium abhängen, in das die Körner eingebettet sind. Je rauer, kantiger und unregelmäßiger die Körner geformt sind, desto größer sind e_{GR} und v_w , [89]. Schwanda [91] zeigt, dass zwei Korngemische mit gleichen Sieblinien aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien bestehend (Korngemisch 1 besteht aus gebochenen Basalt und Korngemisch 2 aus Rheinmaterial) unterschiedliche Größen für e_{GR} und v_w aufweisen (gebochener Basalt: $e_{GR}=0,7$; $v_w=2,18$ und Rheinmaterial: $e_{GR}=0,6$; $v_w=1,44$), da die "Art des Korn" vom Ausgangsmaterial abhängt. Nach Schwanda [91] hat daher jede Fraktion i eines Gemisches bestehend aus dem gleichen Ausgangsmaterial, die selbe "Art", so dass die Porenzahlen e_{GR} bzw. $e_{Gr,min}$ und v_w bei allen Teilfraktionen einer Mischung gleich sind und Konstanten bilden.

Zur Ermittlung der maßgebenden Kornfraktion ("Grundkorn") einer Kornverteilung, werden nach Aufteilung dieser in n Teilfraktionen immer zwei Kornfraktionen miteinander verglichen. Hierbei wird die Rechnung bei n Kornklassen n -Mal durchgeführt, so dass jede Kornfraktion einmal als "Grundkorn" d_{GR} eingesetzt wird. Es wird somit für jedes "Grundkorn" d_{GR} die Porenzahl e der gesamten Kornverteilung (Mischung) dadurch bestimmt, dass die minimale Porenzahl des "Grundkorns" ($e_{GR} = e_{GR,min}$) um den entsprechenden Feststoffraumanteil des Beikorns s_i aller anderen Kornfraktionen unter Berücksichtigung des Parameters a (Teilchenbehinderung) verringert wird, Gleichung 4.7. Die Kornfraktion, die als "Grundkorn" die größte Porenzahl e der gesamten Kornverteilung liefert, ist die maßgebende Kornfraktion der Mischung und somit das wahre "Grundkorn".

$$e = e_{GR} - \sum_{i=1}^n (a_i \cdot s_i) \quad (4.7)$$

Loreck [51] hat für Kornfraktionen mit Durchmessern im Bereich 0,125 bis 32 mm die Porenzahlen $e_{GR,min}$ (Einkornfraktion) mit dem Schlaggabelversuch nach DIN 18126 [14] bestimmt, Tabelle 4.1. Die minimalen Porenzahlen der feineren Fraktionen werden hier mit dem Proctorversuch ermittelt, Tabelle 4.2. Das für die feinen Fraktionen der Tabelle 4.2 gewählte Quarzmehl stammt von der Firma Euroquarz aus Dorsten. Somit haben die

Tabelle 4.1: Minimale Porenzahlen $e_{GR,min}$ unterschiedlicher Fraktionen, [51]

	Kornfraktion							
Korn-Ø in mm	0,125 - 0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 16	16 - 32
e_{min} [-]	0,60	0,64	0,59	0,62	0,66	0,67	0,73	0,75

Tabelle 4.2: Minimale Porenzahlen $e_{GR,min}$ der feinen Fraktionen

	Kornfraktion		
Korn-Ø in mm	< 0,04	0,04 - 0,08	0,08 - 0,125
e_{min} [-]	0,730	0,760	0,744

Kornfraktionen dasselbe Ausgangsmaterial, womit nach Schwanda [91] für jede Fraktion $e_{GR,min}$ und v_w gleich groß sind. Innerhalb dieses Körnungsbereiches dürfen somit die Fraktionsgrenzen beliebig verschoben werden.

Die Ermittlung des Reichweitenfaktors v_w erfolgt durch experimentelle Bestimmung der minimalen Porenzahl des gesamten Korngemisches im Proctorversuch. Dann wird Gleichung 4.7 bei gleichzeitiger Variation von v_w so lange zurück gerechnet bis die aus der Berechnung resultierende maßgebende Porenzahl des gesamten Korngemisches gleich groß ist wie die experimentell ermittelte.

Für die Ermittlung des "Grundkorns" werden die Filterkuchenkornverteilungen in 13 Fraktionen unterteilt. Hierbei wird besonders der Bereich des Schluffkorns fein diskretisiert, da vermutet wird, dass das "Grundkorn" der Filterkuchen in diesem Körnungsbereich liegt. Tabelle 4.3 zeigt die gewählten einzelnen Fraktionen mit ihren minimalen Porenzahlen $e_{GR,min}$. Die minimalen Porenzahlen $e_{GR,min}$ der feineren Fraktionen werden als gleich groß angenommen, da sie wie schon beschrieben aus demselben Ausgangsmaterial stammen.

Tabelle 4.3: Gewählte Fraktionen und die dazugehörigen minimalen Porenzahlen $e_{GR,min}$

	Kornfraktion						
Fraktion	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Korn-Ø in mm	$< \frac{1}{512}$	$\frac{1}{512} - \frac{1}{341}$	$\frac{1}{341} - \frac{1}{256}$	$\frac{1}{256} - \frac{1}{171}$	$\frac{1}{171} - \frac{1}{128}$	$\frac{1}{128} - \frac{1}{85}$	$\frac{1}{85} - \frac{1}{64}$
$e_{GR,min}$ [-]	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744

	Kornfraktion						
Fraktion	F8	F9	F10	F11	F12	F13	
Korn-Ø in mm	$\frac{1}{64} - \frac{1}{32}$	$\frac{1}{32} - \frac{1}{16}$	$\frac{1}{16} - \frac{1}{8}$	$\frac{1}{8} - \frac{1}{4}$	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} - 1$	
$e_{GR,min}$ [-]	0,744	0,744	0,744	0,600	0,640	0,590	

4.2 Maßgebende Kornfraktion des Filterkuchens

4.2.1 Filterkuchen FK-Ro "Conradstraat"

Für die Bestimmung des "Grundkorns" des Filterkuchenmaterials FK-Ro-Labor wird die Kornverteilung des Filterkuchens FK-Ro-Labor in 13 Fraktionen unterteilt und jeweils die dazugehörigen Gew.-% ermittelt, Bild 4.2.

Tabelle 4.4 zeigt die Berechnung des "Grundkorns". Das "Grundkorn" ist die Fraktion, die in der Berechnung die größte Porenzahl e der gesamten Kornverteilung liefert. Dargestellt sind in Tabelle 4.4 nur die Porenzahlberechnungen e der ersten 7 Fraktionen, da diese Berechnungen bestätigen, dass die "Grundkornfraktionen" der Filterkuchen im feinen Körnungsbereich liegen. Der Reichweitenfaktor wird empirisch zu $v_w = 2,115$ bestimmt. Hierfür wird im Proctorversuch eine minimale Porenzahl der Gesamtmischung von $e = 0,367$ ermittelt. Der Reichweitenfaktor wird solange variiert bis die in Tabelle 4.4 für das "Grundkorn" berechnete maßgebende Porenzahl gleich groß wie die experimentell ermittelte ist.

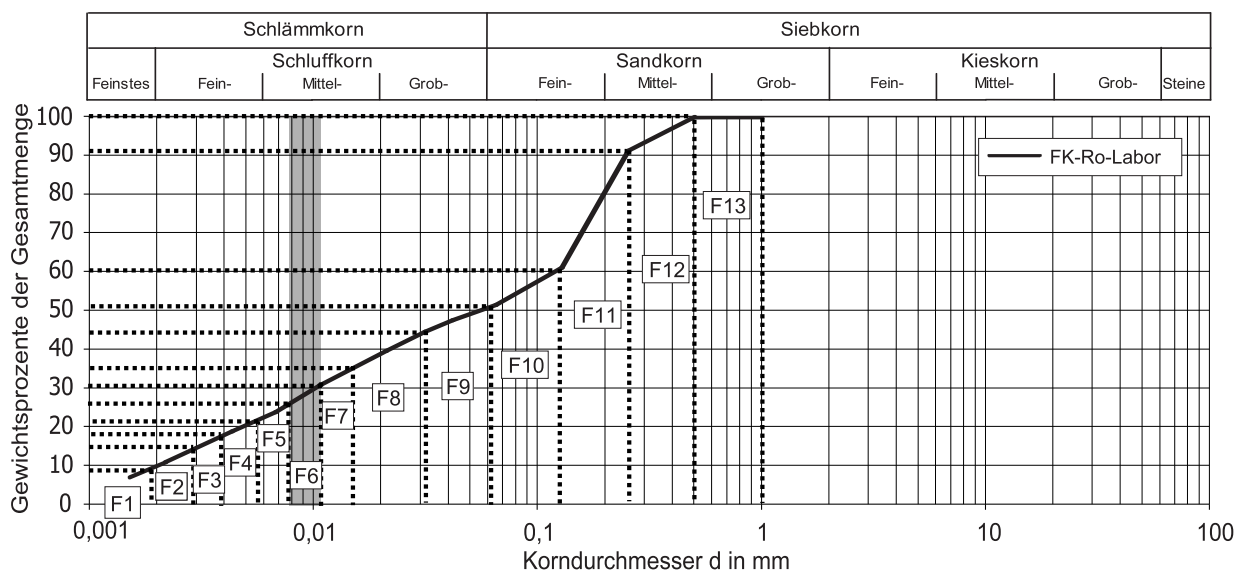


Bild 4.2: Einteilung des Filterkuchens FK-Ro-Labor "Conradstraat" in acht Fraktionen

Als "Grundkorn" des Filterkuchens FK-Ro-Labor wird die Fraktion F6 (Korn-Ø: $\frac{1}{128}$ - $\frac{1}{85}$ mm) ermittelt, da sich mit Fraktion F6 als "Grundkorn" die größte Porenzahl des Gesamtkorngemisches ermitteln lässt, $e = 0,367$. Die Fraktion F6 liegt im Bereich des

Tabelle 4.4: Berechnung der Porenzahl e des Filterkuchens FK-Ro-Labor nach Schwanda [89, 90, 91], Bild 4.1 mit: $v_w = 2,115$ und $e_{GR,min}$ aus Tabelle 4.3

Korn- klasse i	max Korn-Ø [mm]	Festraum- anteil s_i	Grund- korn 1 $a_{1,i} \cdot s_i$	Grund- korn 2 $a_{2,i} \cdot s_i$	Grund- korn 3 $a_{3,i} \cdot s_i$	Grund- korn 4 $a_{4,i} \cdot s_i$	Grund- korn 5 $a_{5,i} \cdot s_i$	Grund- korn 6 $a_{6,i} \cdot s_i$	Grund- korn 7 $a_{7,i} \cdot s_i$
1	$\frac{1}{512}$	0,098	0	0,0142	0,0243	0,0386	0,0486	0,0629	0,730
2	$\frac{1}{341}$	0,067	0,0041	0	0,0069	0,0166	0,0235	0,0333	0,0402
3	$\frac{1}{256}$	0,045	0,0048	0,0020	0	0,0065	0,0112	0,0177	0,0223
4	$\frac{1}{171}$	0,045	0,0076	0,0048	0,0028	0	0,0046	0,0112	0,0158
5	$\frac{1}{128}$	0,035	0,0074	0,0052	0,0037	0,0015	0	0,0051	0,0087
6	$\frac{1}{85}$	0,060	0,0164	0,0127	0,0101	0,0064	0,0037	0	0,0062
7	$\frac{1}{64}$	0,030	0,0095	0,0077	0,0064	0,0045	0,0032	0,0013	0
8	$\frac{1}{32}$	0,105	0,0445	0,0380	0,0334	0,0268	0,0222	0,0157	0,0111
9	$\frac{1}{16}$	0,060	0,0318	0,0280	0,0254	0,0217	0,0191	0,0153	0,0127
10	$\frac{1}{8}$	0,058	0,0368	0,0333	0,0307	0,0271	0,0246	0,0210	0,0184
11	$\frac{1}{4}$	0,317	0,2349	0,2153	0,2014	0,1817	0,1678	0,1482	0,1343
12	$\frac{1}{2}$	0,080	0,0678	0,0628	0,0593	0,0543	0,0508	0,0459	0,0424
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sum(a_i \cdot s_i)$			0,4656	0,4240	0,4043	0,3858	0,3794	0,3775	0,3850
$e = e_{GR,min} - \sum_{i=1}^n(a_i \cdot s_i)$			0,278	0,320	0,340	0,358	0,365	0,367	0,359

Mittelschluffes.

Literaturwerte der Reibungswinkel betragen z.B. nach Gudehus in [36] für tonige Schluffe $\varphi'_s = 30^\circ$. Auch Türke [107] gibt für Schluffe Reibungswinkel an, die in derselben Größenordnung liegen. Der in Kapitel 3.1.3 aus Rahmenscher- und Triaxialversuchen ermittelte Winkel der Gesamtscherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ro-Labor passt mit $\varphi_s \approx 30^\circ$ gut zu den in der Literatur angegebenen Werten.

4.2.2 Filterkuchen FK-LM "Haltepunkt Markt"

Für die Grundkornbestimmung des Filterkuchens FK-LM-Labor "Haltepunkt Markt" wird die Kornverteilung des Laborfilterkuchens wieder in 13 Fraktionen unterteilt und jeweils die dazugehörigen Gew.-% ermittelt, Bild 4.3. Das "Grundkorn" des Filterkuchens FK-LM-Labor wird analog zu FK-Ro-Labor in Tabelle 4.5 bestimmt.

Die minimale experimentell ermittelte Porenzahl des gesamten Korngemisches FK-LM-Labor liegt bei $e = 0,463$. Als "Grundkorn" ergibt sich nach Tabelle 4.5 die Fraktion F5 (Korn-Ø: $\frac{1}{171} - \frac{1}{128}$ mm), da mit dieser Fraktion als "Grundkorn" die größte Porenzahl e ermittelt wird. Der Reichweitenfaktor v_w wird so lange verändert, bis die berechnete Porenzahl der Fraktion F5 gleich der experimentell ermittelten ist, $e = 0,463$. Für den Reichweitenfaktor ergibt sich ein Wert von $v_w = 2,459$.

Das "Grundkorn" des Filterkuchens FK-LM-Labor liegt im Bereich des Mittelschluffes im Übergang zum Feinschluff. Hiermit liegt die "Grundkornfraktion" in derselben Größenordnung wie die des Filterkuchens FK-Ro-Labor, ist jedoch ein wenig feinkörniger. Ein Vergleich der im Kapitel 6.2.2 ermittelten Scherfestigkeiten der beiden Filterkuchen zeigt, dass der Winkel der Gesamtscherfestigkeit beider Materialien ähnlich ist und bei etwa $\varphi'_s = 30,0^\circ$ liegt. Der Winkel der inneren Reibung des Filterkuchens FK-Ro-Labor ist jedoch mit $\varphi' = 24,0^\circ$ höher als der des Filterkuchens FK-LM-Labor, der ein $\varphi' = 20,4^\circ$

Tabelle 4.5: Berechnung der Porenzahl e des Filterkuchens FK-LM-Labor nach Schwanda [89, 90, 91], Bild 4.1 mit: $v_w = 2,459$ und $e_{GR,min}$ aus Tabelle 4.3

Korn- klasse i	max Korn-Ø [mm]	Festraum- anteil s_i	Grund- korn 1 $a_{1,i} \cdot s_i$	Grund- korn 2 $a_{2,i} \cdot s_i$	Grund- korn 3 $a_{3,i} \cdot s_i$	Grund- korn 4 $a_{4,i} \cdot s_i$	Grund- korn 5 $a_{5,i} \cdot s_i$	Grund- korn 6 $a_{6,i} \cdot s_i$	Grund- korn 7 $a_{7,i} \cdot s_i$
1	$\frac{1}{512}$	0,120	0	0,0150	0,0256	0,0406	0,0512	0,0662	0,0769
2	$\frac{1}{341}$	0,040	0,0021	0	0,0035	0,0085	0,0121	0,0171	0,0206
3	$\frac{1}{256}$	0,020	0,0018	0,0008	0	0,0025	0,0043	0,0068	0,0085
4	$\frac{1}{171}$	0,100	0,0144	0,0091	0,0053	0	0,0089	0,0214	0,0302
5	$\frac{1}{128}$	0,050	0,0091	0,0064	0,0046	0,0019	0	0,0062	0,0107
6	$\frac{1}{85}$	0,060	0,0141	0,0109	0,0087	0,0055	0,0032	0	0,0053
7	$\frac{1}{64}$	0,060	0,0164	0,0132	0,0109	0,0077	0,0055	0,0023	0
8	$\frac{1}{32}$	0,155	0,0565	0,0482	0,0424	0,0341	0,0282	0,0200	0,0141
9	$\frac{1}{16}$	0,035	0,0159	0,0141	0,0128	0,0109	0,0096	0,0077	0,0064
10	$\frac{1}{8}$	0,140	0,0765	0,0691	0,0638	0,0563	0,0510	0,0436	0,0383
11	$\frac{1}{4}$	0,160	0,1020	0,0935	0,0875	0,0789	0,0729	0,0644	0,0583
12	$\frac{1}{2}$	0,045	0,0328	0,0304	0,0287	0,0263	0,0246	0,0222	0,0205
13	1	0,015	0,0123	0,0115	0,0109	0,010	0,0096	0,0088	0,0082
$\sum(a_i \cdot s_i)$			0,3541	0,3222	0,3046	0,2834	0,2810	0,2865	0,2980
$e = e_{GR,min} - \sum_{i=1}^n(a_i \cdot s_i)$			0,390	0,422	0,439	0,461	0,463	0,457	0,446

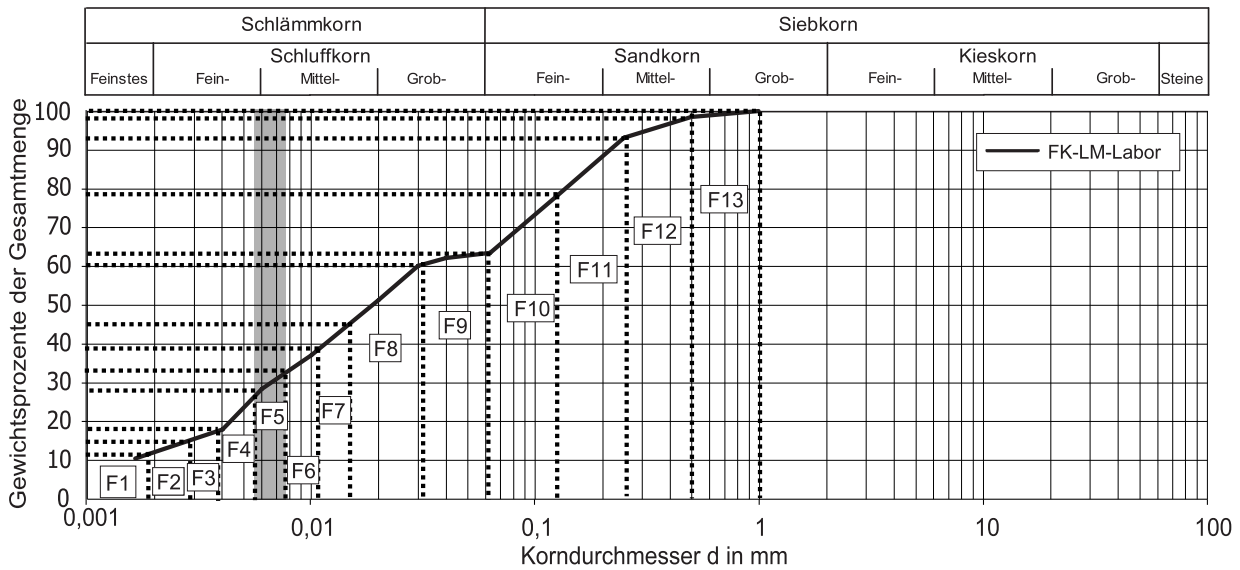


Bild 4.3: Einteilung des Filterkuchens FK-LM-Labor in Fraktionen

besitzt. Der Winkel der Kohäsion wiederum ist bei Filterkuchens FK-Ro-Labor mit $\varphi'_c = 8,1^\circ$ deutlich geringer als der des Filterkuchens FK-LM-Labor mit $\varphi'_c = 14,9^\circ$. Obwohl die "Grundkornfraktionen" der beiden Filterkuchen nur um eine Klasse voneinander abweichen, lässt sich eine Tendenz erkennen. Es scheint so, als weist der Filterkuchen FK-LM-Labor auf Grund seiner etwas feineren "Grundkornfraktion" größere kohäsive Eigenschaften und eine geringere Reibungsfestigkeit als Filterkuchen FK-Ro-Labor auf.

4.2.3 Filterkuchen FK-LH "Haltepunkt Hauptbahnhof"

Die für die Grundkornermittlung des Filterkuchens FK-LH-Labor "Haltepunkt Hauptbahnhof" gewählten 13 Fraktionen mit den dazugehörigen Gew.-% zeigt Bild 4.4. In Tabelle 4.6 wird die Berechnung der "Grundkornfraktion" dargestellt. Die minimale experimentell ermittelte Porenzahl des gesamten Korngemisches FK-LH-Labor liegt bei $e = 0,329$. Die Fraktion F5 (Korn-Ø: $\frac{1}{171} - \frac{1}{128}$ mm) wird als "Grundkorn" des Filterkuchens FK-LH-Labor ermittelt und liegt wie beim Filterkuchen FK-LM-Labor im Bereich des Mittelschluffes im Übergang zum Feinschluff. Der Reichweitenfaktor wird unter der Voraussetzung empirisch zu $v_w = 1,928$ bestimmt, dass die berechnete maßgebende Porenzahl gleich groß ist wie die experimentell ermittelte ($e = 0,329$). Der "Grundkornberechnung" nach zu urteilen sind sich Filterkuchen FK-LH-Labor und FK-LM-Labor in ihrem mechanischen Verhalten auf Grund der gleichen "Grundkornklasse" sehr ähnlich.

Tabelle 4.6: Berechnung der Porenzahl e des Filterkuchens FK-LH-Labor nach Schwanda [89, 90, 91], Bild 4.1 mit: $v_w = 1,928$ und $e_{GR,min}$ aus Tabelle 4.3

Korn- klasse 1	max Korn-Ø [mm]	Festraum- anteil s_i	Grund- korn 1 $a_{1,i} \cdot s_i$	Grund- korn 2 $a_{2,i} \cdot s_i$	Grund- korn 3 $a_{3,i} \cdot s_i$	Grund- korn 4 $a_{4,i} \cdot s_i$	Grund- korn 5 $a_{5,i} \cdot s_i$	Grund- korn 6 $a_{6,i} \cdot s_i$	Grund- korn 7 $a_{7,i} \cdot s_i$
1	$\frac{1}{512}$	0,165	0	0,0263	0,0449	0,0712	0,0899	0,1161	0,1348
2	$\frac{1}{341}$	0,020	0,0014	0	0,0023	0,0054	0,0077	0,0109	0,0132
3	$\frac{1}{256}$	0,025	0,0029	0,0012	0	0,0040	0,0068	0,0108	0,0136
4	$\frac{1}{171}$	0,080	0,0147	0,0093	0,0054	0	0,0090	0,0218	0,0308
5	$\frac{1}{128}$	0,050	0,0116	0,0082	0,0058	0,0024	0	0,0080	0,0136
6	$\frac{1}{85}$	0,050	0,0150	0,0116	0,0092	0,0058	0,0034	0	0,0057
7	$\frac{1}{64}$	0,060	0,0209	0,0168	0,0139	0,0099	0,0070	0,0029	0
8	$\frac{1}{32}$	0,120	0,0558	0,0476	0,0418	0,0337	0,0279	0,0197	0,0139
9	$\frac{1}{16}$	0,010	0,0058	0,0051	0,0046	0,0040	0,0035	0,0028	0,0023
10	$\frac{1}{8}$	0,065	0,0453	0,0409	0,0378	0,0333	0,0302	0,0258	0,0227
11	$\frac{1}{4}$	0,205	0,1667	0,1528	0,1429	0,1290	0,1191	0,1051	0,0953
12	$\frac{1}{2}$	0,100	0,0929	0,0861	0,0813	0,0745	0,0697	0,0629	0,0581
13	1	0,050	0,0523	0,0489	0,0465	0,0431	0,0407	0,0373	0,0349
$\sum(a_i \cdot s_i)$			0,4853	0,4549	0,4365	0,4163	0,4148	0,4241	0,4388
$e = e_{GR,min} - \sum_{i=1}^n(a_i \cdot s_i)$			0,259	0,289	0,308	0,328	0,329	0,320	0,305

Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit des Filterkuchens FK-LH-Labor liegt in derselben Größenordnung wie der der anderen beiden bereits untersuchten Filterkuchen, mit $\varphi'_s = 29,6^\circ$. Der Winkel der Kohäsion passend zu der "Grundkornberechnung" ist annähernd gleich groß wie der des Filterkuchens FK-LM-Labor. Nur der Winkel der inneren Reibung liegt mit $\varphi' = 17^\circ$ unter dem des Filterkuchens FK-Ro-Labor sowie auch dem des Filterkuchens FK-LM-Labor.

Um mögliche Abweichungen der "Grundkornfraktionen" FK-LH-Labor und FK-LH-Labor zu ermitteln und dadurch komplexere Aussagen über das mechanische Verhalten im Vergleich treffen zu können, müssten die Kornverteilungen der Filterkuchen noch feiner diskretisiert werden. Bei einer weiteren Diskretisierung werden jedoch die vorhandenen Gew.-% der jeweiligen Fraktion so klein, dass man eigentlich nicht mehr von repräsentativen Fraktionen sprechen kann.

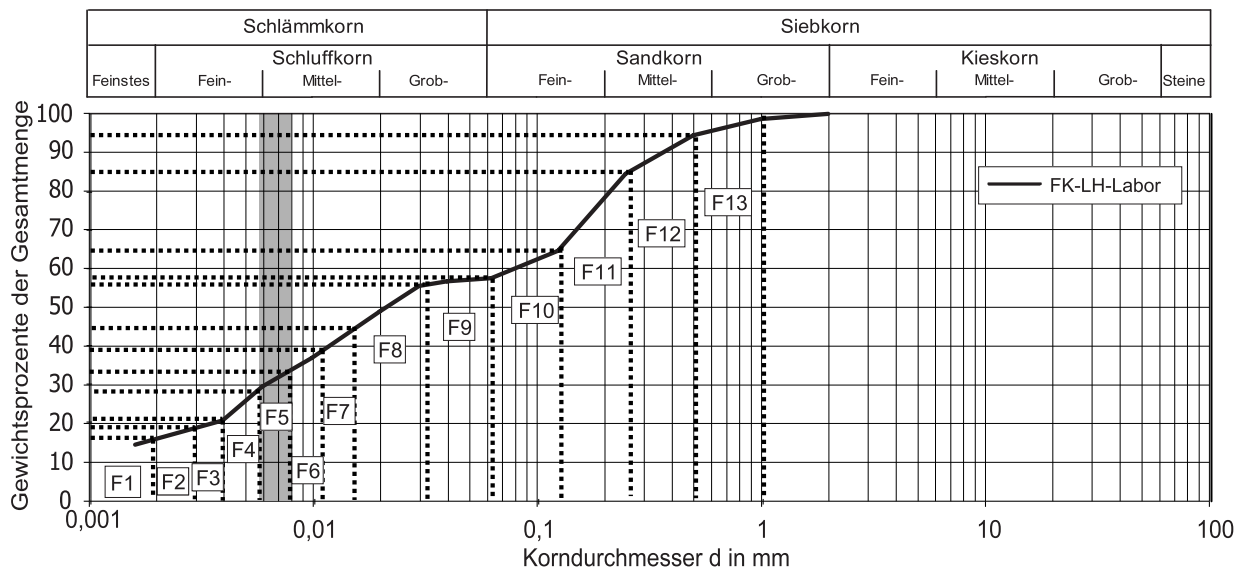


Bild 4.4: Einteilung des Filterkuchens FK-LH-Labor in Fraktionen

4.2.4 Filterkuchen FK-Ko "Severinstraße"

Die Kornverteilung des Filterkuchens FK-Ko-Labor "Haltepunkt Markt" wird für die Grundkornbestimmung ebenfalls in 13 Fraktionen unterteilt und jeweils die dazugehörigen Gew.-% ermittelt, Bild 4.5. Das Korngemisch FK-Ko-Labor hat eine experimentell

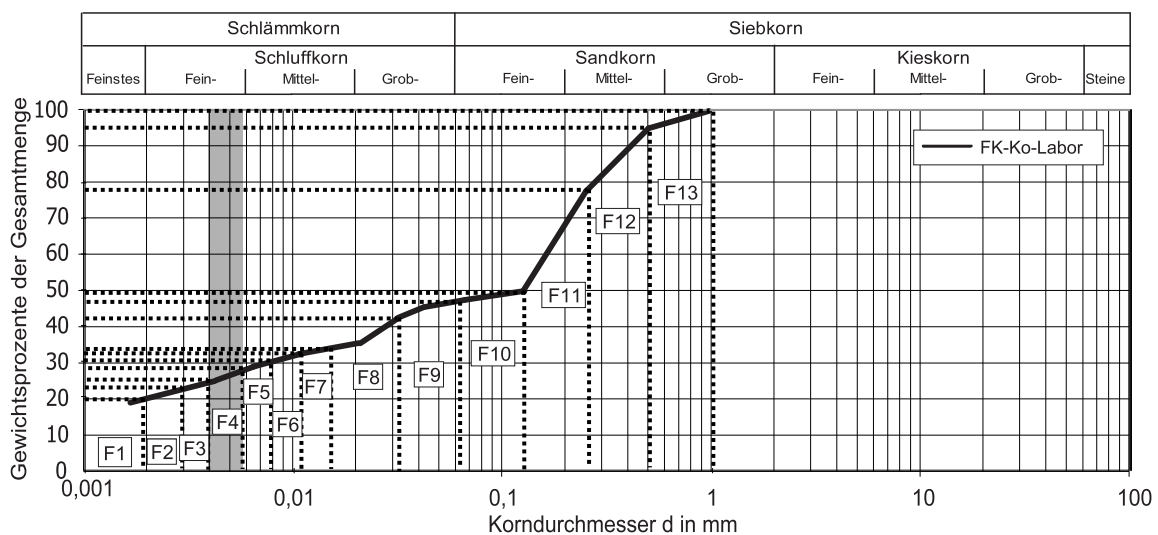


Bild 4.5: Einteilung des Filterkuchens FK-Ko-Labor "Severinstraße" in Fraktionen

ermittelte minimale Porenzahl von $e = 0,314$. Die Grundkornberechnung zeigt Tabelle

Tabelle 4.7: Berechnung der Porenzahl e des Filterkuchens FK-Ko-Labor nach Schwanda [89, 90, 91], Bild 4.1 mit: $v_w = 2,254$ und $e_{GR,min}$ aus Tabelle 4.3

Korn- klasse i	max Korn-Ø [mm]	Festraum- anteil s_i	Grund- korn 1 $a_{1,i} \cdot s_i$	Grund- korn 2 $a_{2,i} \cdot s_i$	Grund- korn 3 $a_{3,i} \cdot s_i$	Grund- korn 4 $a_{4,i} \cdot s_i$	Grund- korn 5 $a_{5,i} \cdot s_i$	Grund- korn 6 $a_{6,i} \cdot s_i$	Grund- korn 7 $a_{7,i} \cdot s_i$
1	$\frac{1}{512}$	0,200	0	0,0272	0,0466	0,0738	0,0932	0,1204	0,1397
2	$\frac{1}{341}$	0,050	0,0029	0	0,0048	0,0116	0,0165	0,0233	0,0281
3	$\frac{1}{256}$	0,030	0,0030	0,0012	0	0,0041	0,0070	0,0111	0,0140
4	$\frac{1}{171}$	0,040	0,0063	0,0040	0,0023	0	0,0039	0,0093	0,0132
5	$\frac{1}{128}$	0,030	0,0060	0,0042	0,0030	0,0012	0	0,0041	0,0070
6	$\frac{1}{85}$	0,010	0,0026	0,0020	0,0016	0,0010	0,0006	0	0,0010
7	$\frac{1}{64}$	0,020	0,0060	0,0048	0,0040	0,0028	0,0020	0,0008	0
8	$\frac{1}{32}$	0,060	0,0238	0,0204	0,0179	0,0144	0,0119	0,0084	0,0060
9	$\frac{1}{16}$	0,020	0,0099	0,0088	0,0079	0,0068	0,0060	0,0048	0,0040
10	$\frac{1}{8}$	0,040	0,0238	0,0215	0,0199	0,0175	0,0159	0,0136	0,0119
11	$\frac{1}{4}$	0,270	0,1878	0,1721	0,1610	0,1453	0,1341	0,1184	0,1073
12	$\frac{1}{2}$	0,180	0,1431	0,1326	0,1252	0,1147	0,1073	0,0968	0,0894
13	1	0,050	0,0447	0,0418	0,0397	0,0368	0,0348	0,0319	0,0298
$\sum(a_i \cdot s_i)$			0,4599	0,4406	0,4339	0,4302	0,4331	0,4430	0,4514
$e = e_{GR,min} - \sum_{i=1}^n(a_i \cdot s_i)$			0,284	0,303	0,310	0,314	0,311	0,301	0,293

4.7. Der empirisch bestimmte Reichweitenfaktor beträgt $v_w = 2,254$. Als "Grundkorn" des Filterkuchens FK-Ko-Labor wird die Fraktion 4 (Korn-Ø: $\frac{1}{256} - \frac{1}{171}$ mm) ermittelt, die im Bereich des Feinschluffes liegt. Es wird hiermit gezeigt, dass Filterkuchen FK-Ko-Labor das Material mit der feinkörnigsten "Grundkornfraktion" ist. Da die im Kapitel 6.2.2 ermittelte Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ko-Labor deutlich geringer als die der anderen Filterkuchen ist, werden die Ergebnisse der hier durchgeführten "Grundkornanalyse" bestätigt.

Die hier durchgeführten Berechnungen zeigen, dass mit dem Verfahren von Schwanda [89, 90, 91], die in einem Korngemisch dominierende Fraktion abgeschätzt werden kann. Bei ähnlichen Korngemischen, wie die hier untersuchten vier Filterkuchenmaterialien, ist ein direkter Vergleich schwierig, jedoch wird zumindest für die berechnete "Grundkornfraktion" eine Tendenz für ihr typisches mechanisches Verhalten ersichtlich.

Kapitel 5

Versuche zur Entstehung des Filterkuchens

Im Kapitel 6.2.2 wird gezeigt, dass der Filterkuchen ein gemischtkörniges Material ist, das sich aus Bentonit und Feinpartikel aus dem anstehenden Boden zusammensetzt. Im Zuge der Aushubarbeiten vermischt sich der Baugrund mit der Suspension, in der feine Kornfraktionen aus dem Boden in Folge der Fließgrenze dispergiert in Schwebelage gehalten werden. Bedingt durch eine Abfiltration der Feststoffe in der Suspension an der Erdwandung entsteht der so genannte "äußere" Filterkuchen.

Die Analyse der Filterkuchenkornverteilung im Kapitel 4 zeigt, dass besonders das Schluffkorn die dominante Kornfraktion des Filterkuchens ist, Verfahren nach [89, 90, 91]. Der Schluffanteil muss daher die mechanischen Eigenschaften maßgebend prägen.

In diesem Kapitel wird die Entstehung des Filterkuchens und die daraus resultierende Filterkuchenkornverteilung untersucht. In der Suspension dispergierte Feststoffe lagern sich als Filterkuchen an der Erdwandung an. Hypothetisch könnten bei diesem Prozess bestimmte Kornfraktionen dominieren und zu einem höheren prozentualen Anteil im Filterkuchen als in der Suspension führen. In den untersuchten in-situ Filterkuchenproben waren nur Korngrößen kleiner 2 mm vertreten, so dass von einem im Filterkuchen vorhandenen "Größtkorn" ausgegangen wird. Anlässlich der Trägheit von größeren Körnern, kann ihre durch die Strömungskräfte bedingte Bewegung in der Suspension eingeschränkt werden. Ferner werden Grobkörner auf Grund ihres Gewichtes sedimentieren und sich daher nicht im Filterkuchen einlagern.

Primär wird die Entstehung des Filterkuchens durch die Abfiltration von Suspensions-

feststoffen an der Erwandung mittels Systemversuche simuliert. Analysiert werden die Kornverteilung der Ausgangssuspension und die des daraus entstandenen Filterkuchens. Des Weiteren wird die Filtratwasserabgabe der Suspension in das Erdreich sowie das Anwachsen der Filterkuchendicke über die Zeit für ein näheres Verständnis der Filterkuchenbildung erfasst.

5.1 Versuchsaufbau 1

In Systemversuchen wird die Entstehung des Filterkuchens während des Aushubprozesses simuliert. An einer künstlichen hergestellten Erwandung dringt die Suspension in den Boden ein und stagniert auf Grund ihrer Fließgrenze, wodurch die freie Bodenoberfläche stabilisiert wird. Durch den darauf einsetzenden Filtrationsprozess bildet sich der Filterkuchen, der mit zunehmender Zeit in Folge der Ablagerung der Feststoffe an der Erwandung an Dicke gewinnt.

Die Versuche werden in einem rechteckigen Plexiglaskasten mit den Maßen $H \times L \times B = 81 \times 21 \times 12$ cm realisiert, Bild 5.1. An eine Seitenwand ist im unteren Drittel ein Zylinder ($\varnothing = 13,94$ cm, $L = 25,39$ cm) horizontal aufgeflanscht. In den Zylinder wird der Versuchsboden mit dichter Lagerung ($I_D \approx 0,8$) eingebracht und wassergesättigt. Die freie vertikale Bodenoberfläche wird vorerst mit einem Schieber an der Kasteninnenseite stabilisiert. Nach Einbringen der Suspension wird der Schieber entfernt, anschließend die Bodenoberfläche durch den Suspensionsdruck gestützt und so der Kontakt Boden-Suspension erzeugt. Um die Probenahme am Filterkuchen zu erleichtern, werden ferner Versuche mit einem Filterpapier durchgeführt, welches auf der Bodenoberfläche platziert wird. Die Bewegung in der Suspension, bedingt durch die Aushubwerkzeuge, wird durch zwei in vertikaler Richtung auf und ab fahrender Lochplatten simuliert. Der Kasten wird geschlossen und unter einen Druck von 0,5 bar gesetzt. Ein Auslaufventil an der Hinterseite des Zylinders, welches über einen Schlauch mit einem Überlaufgefäß kommuniziert, wird geöffnet. Gemessen wird über die Zeit die aus der Suspension in den Boden infiltrierte Wassermenge (Filtratwassermenge), die dem aus dem Boden verdrängten im Überlaufgefäß aufgefangenen Wasservolumen entspricht. Die Versuchsdauer und damit Suspensionsstandzeit beträgt 24 Stunden. Für die Filterkuchenprobenahme wird das Gerät nach Versuchende um 90° gedreht, der Zylinder vom Kasten gelöst und der Filterkuchen freigelegt. Ermittelt werden die Dicke, die Dichte und der Wassergehalt des Filterkuchens.

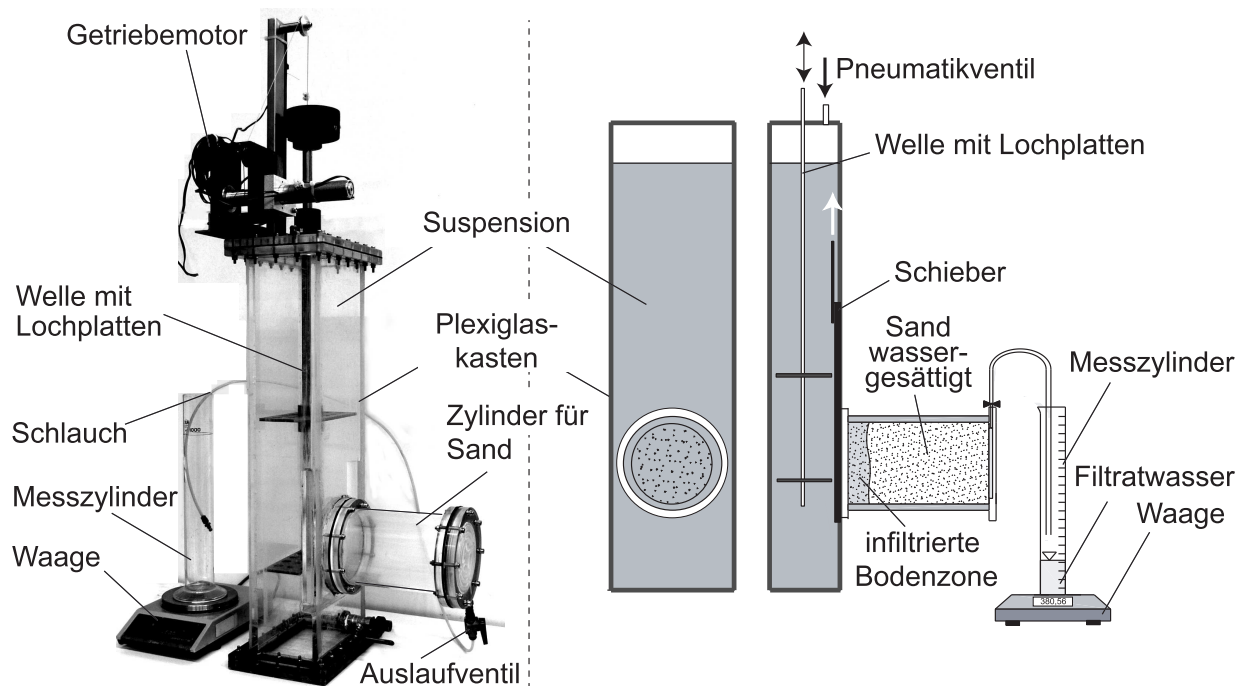


Bild 5.1: Versuchsstand zur Ermittlung der Filterkuchenausbildung

Darüber hinaus wird die Kornverteilung des Filterkuchens bestimmt und mit der Kornverteilung der Suspensionsfestsubstanz (Aufladung) verglichen.

5.2 Versuchsmaterialien

5.2.1 Boden

Der Versuchsboden ist ein schwach feinsandiger, stark grobsandiger Mittelsand (fsacsM-Sa nach DIN EN ISO 14688-1 [20]) mit der in Bild 5.2 dargestellten Kornverteilung, der hiermit die Bezeichnung V-MSa erhält. Kriterium für die Wahl ist die nach DIN 4126 [22] ermittelte Eindringtiefe s einer reinen Bentonitsuspension BSP in den Boden. Bei einem Suspensionsüberdruck von $\Delta p = 50$ kPa berechnet diese sich zu etwa 25 cm und ist somit kleiner als die mit dem Versuchsboden gefüllte Zylinderhöhe. In Tabelle 5.1 sind die Kenngrößen des Sandes V-MSa dargestellt. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des Sandes V-MSa wird nach DIN 18130 [15] für fünf hydraulische Gradienten i bei einer Einbaudichte von $\rho_d = 1,667$ g/cm³ bestimmt, siehe Tabelle 5.2.

Die Scherparameter des Sandes V-MSa werden erstmals mit Triaxialversuchen ermittelt.

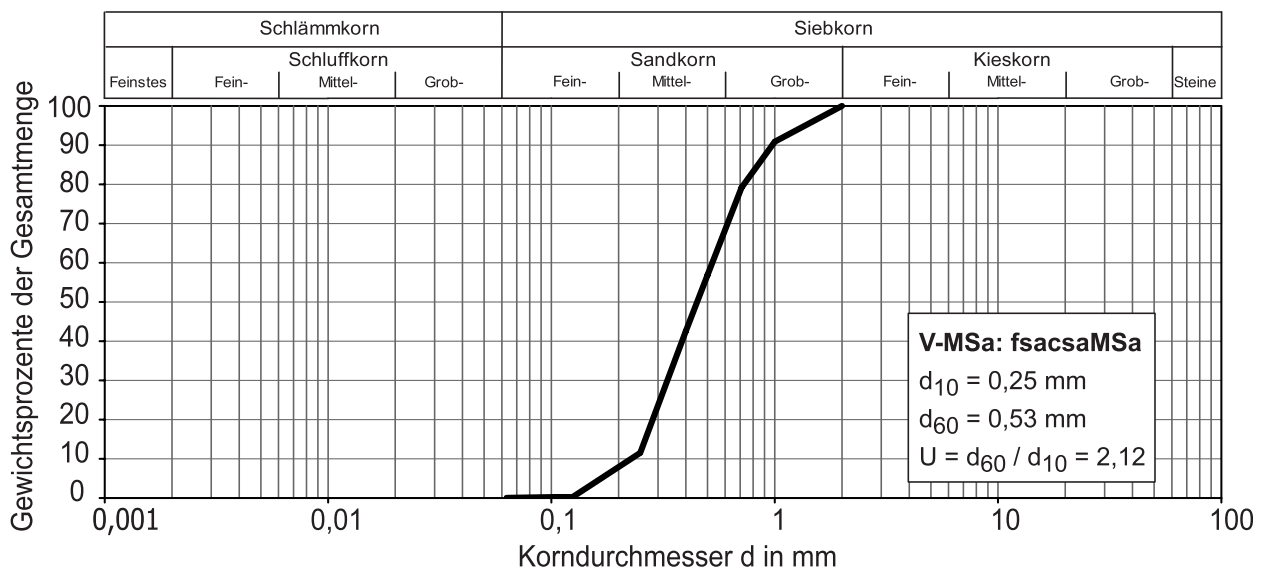


Bild 5.2: Kornverteilung des Versuchsbodens V-MSa

Tabelle 5.1: Kenngrößen des Versuchssandes V-MSa

d_{10} [mm]	d_{60} [mm]	U	ρ_s [kN/m ³]	$\rho_{d,min}$ [kN/m ³]	$\rho_{d,max}$ [kN/m ³]	e_{min} [-]	e_{max} [-]
0,25	0,53	2,12	2,65	1,445	1,775	0,493	0,834

Ferner werden Großrahmenscherversuche ($B \times L \times H = 30 \times 30 \times 10$ cm) durchgeführt, bei dem der obere Rahmen und der Normalbelastungsstempel nach DIN 18137-3 [16] senkrecht parallel geführt sind. Ergänzend wird die Scherfestigkeit in einem Rahmenschergerät ($B \times L \times H = 10 \times 10 \times 2$ cm) mit frei aufliegender Lastplatte und oberer Rahmenhälfte bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt bei beiden Scherkästen um 0,3 mm/min. Tabelle 5.3 zeigt die experimentell ermittelten Scherparameter in Abhängigkeit der Versuchsgeräte.

Tabelle 5.2: Durchlässigkeit des Versuchssandes V-MSa

Einbaudichte: $\rho_d = 1,667$ g/cm ³ bzw. $I_D = 0,72$						
i	[-]	2,988	2,490	1,992	1,494	0,996
k	[m/s]	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Mittelwert: $k = 3,3 \cdot 10^{-4}$ m/s						

Tabelle 5.3: Scherparameter des Sandes V-MSa

	σ [kPa]	τ_{peak} [kPa]	τ_{res} [kPa]	I_D [-]	φ_{peak} [°]	φ_{res} [°]
Großrahmenschergerät B x L x H = 30 x 30 x 10 cm	40	43,8	31,4	0,80	45,5	37,3
	80	77,45	62,4	0,79		
	160	163,8	120,8	0,83		
Schergerät B x L x H = 10 x 10 x 2 cm	40	39,62	30	0,82	41,7	35,7
	80	71,58	57	0,78		
	160	141,54	115	0,81		
Triaxialversuch					42,5	

Bekannt ist, dass Scherparameter von der Gerätekonstruktion, wie z.B. von den vorhandenen Freiheitsgraden der Lastplatte und der Rahmenhälften, abhängig sind, siehe z.B. Goldscheider [32]. Der Peak-Reibungswinkel des Sandes V-MSa variiert zwischen $41,7^\circ$ und $45,5^\circ$. Im parallel geführten Großrahmenschergerät wird der größte Reibungswinkel ermittelt. Der aus den Triaxialversuchen bestimmte Reibungswinkel ist wiederum höher als der des Schergerätes mit frei aufliegender Lastplatte und oberen Rahmen. Auch Goldscheider [32], Stoewahse [99] und Wernick [119] beobachten bei parallel geführten Schergeräten höhere Reibungswinkel als bei Geräten mit beweglicher Lastplatte und oberer Rahmenhälfte. Ferner führen auch Schwankungen der Proben-Lagerungsdichte I_D zu Abweichungen der Reibungswinkel. Besonders bei Sanden hängt der Peakreibungswinkel von der Lagerungsdichte auf Grund des ausgeprägten Dilatanz- und Kontraktanzverhaltens ab.

5.2.2 Suspensionen

Die Ausgangssuspension BSP besteht vollständig aus Wasser und Bentonit mit einem Tongehalt von 55 g / l Wasser. Die Suspensionsdichte beträgt $1,03 \text{ g/cm}^3$. Das verwendete Bentonit ist ein Natrium-Aktiv-Bentonit mit der Bezeichnung IBECO B1. Tabelle 5.4 zeigt die wichtigsten Kenngrößen der Bentonitsuspension BSP.

Die aus dem anstehenden Boden in der Suspension dispergierten Schwebstoffe werden durch Beimengen von Korngemischen (Aufladungen) in die Bentonitsuspension BSP simuliert. Derart werden acht unterschiedlich aufgeladene Suspensionen hergestellt. Bild 5.3 zeigt die Kornverteilungen der Suspensionsfeststoffe.

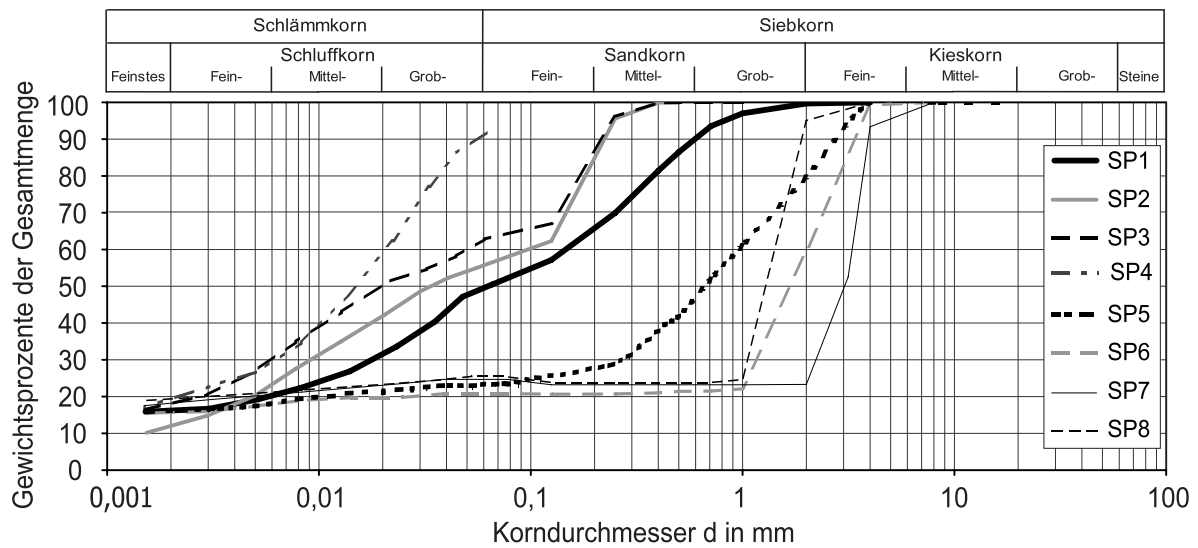


Bild 5.3: Kornverteilung der Suspensionsaufladung, SP1 bis SP8

Gemäß der in-situ Filterkuchenproben (Kapitel 6.2.2) ist die Aufladung der ersten Suspension SP1 so gewählt worden, dass der gesamte vertretene Körnungsbereich (Ton bis Sand, Körnungsbereich ≤ 2 mm) vorhanden ist. Die Suspensionen SP2 bis SP4 werden mit feinerem Material aufgeladen (Körnungsbereich: $< 0,2$ mm), hingegen besteht die Festsubstanz der Suspensionen SP5 bis SP8 aus gröberem Material (Körnungsbereich: $0,1 - 4$ mm). Die Masse der Aufladungen berechnet sich unter der Voraussetzung, dass alle Körner in Schwebelag bleiben und sich so eine Suspensionsdichte von $\rho_F = 1,15 \text{ g/cm}^3$ ergibt. Eine Dichte von $\rho_F \approx 1,15 \text{ g/cm}^3$ liegt in etwa in der Größenordnung von Suspensionen auf der Baustelle vor Regenerierung, wie die Schlitzprotokolle der Referenzbaustellen zeigen. Auf Grund von Sedimentationsprozessen der Grobkörner fällt die Dichte ρ_F bei einigen Suspensionen gleich zu Versuchsanfang bzw. bei anderen während des Versuchs ab. Ferner wird ein Versuch mit einer höheren Suspensionsdichte von $\rho_F = 1,3 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt. Tabelle 5.5 zeigt die Dichten ρ_F und Fließgrenzen τ_F der acht unterschiedlich aufgeladenen Suspensionen.

Tabelle 5.4: Eigenschaften Bentonitsuspension BSP, Tongehalt: 55 g / l Wasser

Dichte $\rho_F \text{ [g/cm}^3\text{]}$	Marsch-Zeit $t_M \text{ [sec]}$	Marsch-Zeit $t_{M1\ 500} \text{ [sec]}$	Temperatur $T \text{ [}^\circ\text{]}$	Kugel-Nr.	Fließgrenze $\tau_F \text{ [N/m}^2\text{]}$
1,03	45 - 56	135 - 155	~ 20	5 - 6	22,45 - 30,64

5.3 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm sieht neun Versuche vor. Vorerst werden die Kornverteilungen der acht Suspensionsaufladungen (SP1 bis SP8) bestimmt und nach Versuchende mit den Kornverteilungskurven der dazugehörigen Filterkuchen (FK-SP1 bis FK-SP8) verglichen. Die Entnahme der Filterkuchenprobe nach Versuchende erweist sich auf Grund der geringen Dicke als schwierig. Der Übergang zwischen entstandenen Filterkuchen und dem anstehenden Boden ist schwer zu lokalisieren. Um die Probenahme zu erleichtern werden daher Versuche mit einem Filterpapier auf der Bodenoberfläche durchgeführt. Das Filterpapier manipuliert die Filtratwassermenge der Suspension in den Boden und dadurch auch die Filterkuchendicke. Andererseits werden jedoch Filterkuchenproben garantiert, die nicht mit Körner des Bodens verunreinigt sind.

Tabelle 5.6 verschafft einen Überblick über die neun Versuche mit ihren Bezeichnungen.

5.4 Versuchergebnisse

5.4.1 Kornverteilung des Filterkuchens

Die Suspensionsaufladung des ersten Versuchs V-SP1 besteht aus dem gesamten Körnungsbereich bis 2 mm Größtkorn, Bild 5.4. Ein Vergleich der Kornverteilungskurven der Suspensionsaufladung SP1 mit der Filterkuchenfestsubstanz FK-SP1 zeigt, dass die Kurven annähernd zusammen fallen. Der Tonanteil des Filterkuchens liegt um gerade 3 Gew.-% höher als der der Suspension. Sedimentationsprozesse werden nach Versuchende durch die Entnahme von Suspensionsproben aus dem unteren und oberen Bereich des Versuchskastens nachgewiesen. Es wird der prozentuale Anteil der Körner $< 0,063$ mm bestimmt.

Tabelle 5.5: Dichte ρ_F und Fließgrenze τ_F der acht aufgeladenen Suspensionen

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8
Dichte ρ_F [g/cm ³]	1,15	1,30	1,15	1,14	1,13	1,06	1,06	1,12
Kugelnummer	6	7	6	6	6	6	6	7
Fließgrenze τ_F [N/m ²]	27,95	35,73	27,95	28,17	28,40	29,97	29,97	36,78
Temperatur T [°C]	22,5	18,8	18,6	18,0	18,2	19,2	16,6	15,2

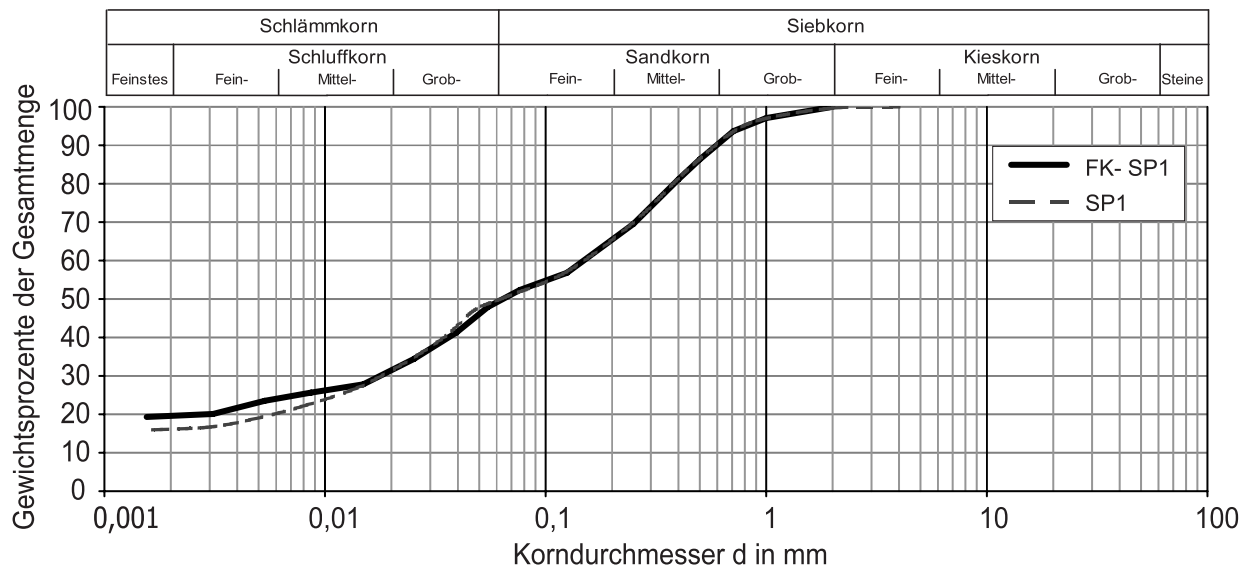


Bild 5.4: Kornverteilung der Suspension SP1 und des Filterkuchens FK-SP1

Im Versuch V-SP1 sind die prozentualen Abweichungen der Suspensionsproben aus dem unteren und oberen Bereich mit 0,5% vernachlässigbar gering, Tabelle 5.7, so dass Sedimentationsprozesse ausgeschlossen werden.

In Anlage II.1 finden sich die weiteren Kornverteilungen der Suspensionsaufladungen, die den dazugehörigen Filterkuchen gegenübergestellt sind. In den Versuchen V-SP2 bis

Tabelle 5.6: Versuchsprogramm und Versuchsbezeichnungen

Versuchsbezeichnung	Bezeichnung der Suspension	Bezeichnung des entstandenen Filterkuchens	Filterpapier
V-SP1	SP1	FK-SP1	nein
V-SP2	SP2	FK-SP2	nein
V-SP3-1	SP3	FK-SP3-1	nein
V-SP3-2	SP3	FK-SP3-2	ja
V-SP4	SP4	FK-SP4	nein
V-SP5	SP5	FK-SP5	nein
V-SP6	SP6	FK-SP6	ja
V-SP7	SP7	FK-SP7	ja
V-SP8	SP8	FK-SP8	ja

V-SP4 zeigen sich ebenfalls annähernd identische Kornverteilungskurven der Suspensionsbeimengungen und der Filterkuchenfestsubstanz. Zumal sich bei diesen Versuchen die Aufladungen aus feinkörnigen Bestandteilen zusammensetzen, wird analog zu Versuch V-SP1 bestätigt, dass sich die Kornfraktionen der Suspension annähernd im gleichen Maße als Filterkuchen an der Erdwandung anlagern.

Der Einfluss des Filterpapiers wird am Versuch V-SP3-1 (ohne Filterpapier) und Versuch V-SP3-2 (mit Filterpapier) kontrolliert. Die Suspensions- und Filterkuchenkornverteilung gleichen sich im Versuch V-SP3-1 annähernd. Der Filterkuchen FK-SP3-2 des Versuchs V-SP3-2 weist einen etwas höheren Tonanteil als die Suspensionsaufladung auf, nämlich 8 Gew.-%. Bedingt durch das Filterpapier kann das Eindringen der Tonpartikel in den Boden beeinträchtigt worden sein, so dass diese verstärkt in der "äußeren" Filterkuchenschicht vorhanden sind.

Der Tonanteil des Filterkuchens FK-SP4 ist um ca. 4 Gew.-% höher als der der Suspension SP4.

Bei feinkörnig aufgeladenen Suspensionen (SP1 bis SP4) finden sich Abweichungen in den Gew.-%en zwischen der Suspensions- und Filterkuchenkornverteilung, die maßgeblich im Feinschluff- und Tonbereich liegen und bis max 8 Gew.-% betragen. Ein wenig abweichend ist, bei Versuch V-SP2, der Anteil des Feinsandes in der Suspension, der um ca. 10 Gew.-% höher als im Filterkuchen ist. Die Dichte der Suspension SP2 liegt different zu den anderen Versuchen bei $\rho_F = 1,3 \text{ g/cm}^3$. Die Suspension besitzt daher bei gleichen Bentonit- und Wassergehalt mehr Aufladung (Festsubstanz). Auf Grund der großen Menge an Körnern in der Suspension, könnten diese sich gegenseitig beeinflussen und die gröberen Fraktionen (hier der Feinsand) mit der Strömung zu einem geringeren prozentualen Anteil in den Filterkuchen gelangen sein.

Die nach Versuche in der Suspension vorhandenen Kornfraktionen $< 0,063 \text{ mm}$ liegen bei den Versuchen V-SP3-1, V-SP3-2 und V-SP4 zu annähernd den selben prozentualen Anteil im oberen und unteren Bereich des Versuchskastens vor. Mit Abweichungen von 0,4 bis 1,2 Gew.-% sind keine nennenswerten Sedimentationsprozesse zu erkennen. Im Versuch V-SP2 liegen die Abweichungen mit 2,5 Gew.-% geringfügig höher. Jedoch wird nicht davon ausgegangen, dass der um 10 Gew.-% geringere Feinsandanteil im Filterkuchen FK-SP2 aus der Sedimentation von Suspensionsfeststoffen resultiert.

Die Aufladungen der Suspensionen SP5 bis SP8 sind grobkörniger. Primär soll mit den Versuchen V-SP5 bis V-SP8, dass im Filterkuchen aus der Suspension noch abgelagerte Größtkorn bestimmt werden. Repräsentativ zeigt Bild 5.5 die Kornverteilung der Sus-

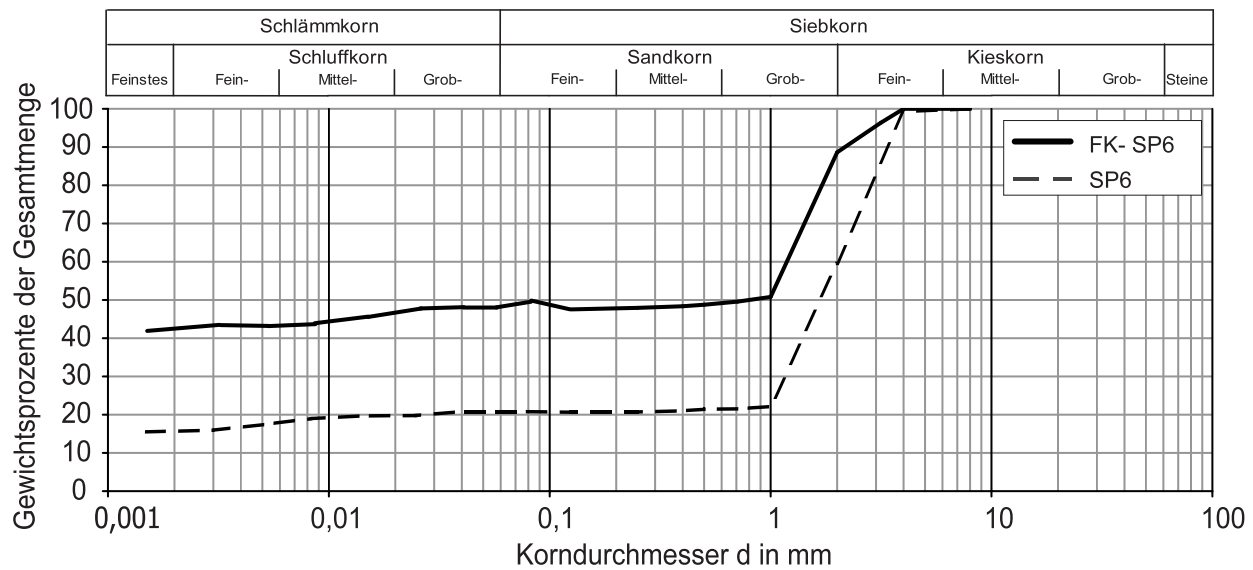


Bild 5.5: Kornverteilung der Suspension SP6 und des Filterkuchens FK-SP6

pensionsaufladung und der Filterkuchenfestsubstanz des Versuches V-SP6. Bis zu einer Korngröße von ca. 2 mm verlaufen die Kornverteilungskurve der Suspension SP6 und die des Filterkuchens FK-SP6 annähernd parallel. Der prozentuale Anteil der Kornfraktion 2 bis 4 mm ist hingegen in der Suspension zu 40 Gew.-% und im Filterkuchen nur zu 10 Gew.-% enthalten. Diese Abweichung wird weitestgehend durch den Tonanteil ausgeglichen, der in der Suspension zu ca. 16 Gew.-% und im Filterkuchen zu ca. 42 Gew.-% vertreten ist. Die Versuche V-SP5, V-SP7 und V-SP8 zeigen tendenziell die gleichen Diskrepanzen zwischen der Kornverteilung der Suspensionsaufladung und der Filterkuchenfestsubstanz, siehe Anlage II.1. Zur Veranschaulichung zeigt Bild 5.6 die Gewichtsprozent der Kornfraktionen der Suspensionsbeimengung SP5 und des Filterkuchens FK-SP5 als Balkendiagramm, wodurch die Abweichungen zwischen den beiden Materialien deutlich werden. Wie beschrieben sind die Diskrepanzen bei den Kornfraktionen > 2 mm und im Tonbereich groß.

Ein Vergleich der nach Versuche aus den Suspensionsproben bestimmte prozentuale Anteil der Körner $< 0,063$ mm im unteren und oberen Bereich des Versuchskastens zeigt Abweichungen von max 7 %. Während der Versuchsphase werden auch hier keine bedeutsamen Sedimentationsprozesse beobachtet. Sedimentationen der Grobkörner am Versuchbeginn werden jedoch hier nicht berücksichtigt. Auf Grund der von $\rho_F = 1,15$ g/cm³ abweichenden Suspensionsdichten in Tabelle 5.7 werden diese Anfangssedimentationen deutlich.

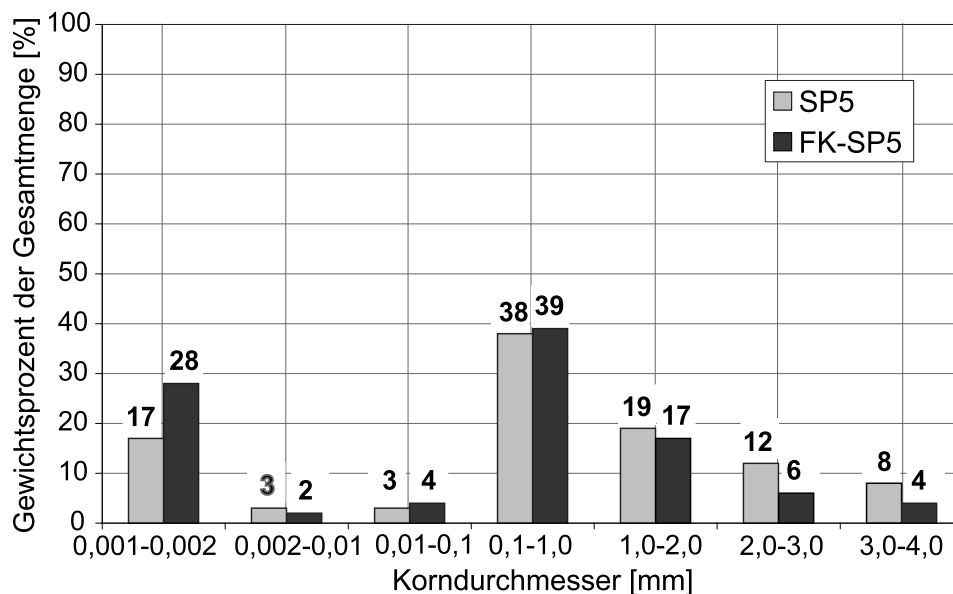


Bild 5.6: Gew.-% der Suspension SP5 und des Filterkuchens FK-SP5

Aus den durchgeführten Versuchen wird ein im Filterkuchen elementar vertretenes Größtkorn von 2 mm bestimmt. Bis zu dieser Kornfraktion sind die Abweichungen zwischen Suspensionsaufladung und Filterkuchenfestsubstanz unwesentlich. Nur der Tonanteil im Filterkuchen liegt geringfügig höher als in der Suspensionsaufladung. Dagegen unterscheiden sich die Gew.-% der Suspension und des Filterkuchen ab einem Korndurchmesser von > 2 mm erheblich. Nur vereinzelt sind Körner > 2 mm im Filterkuchen eingelagert und so für das mechanische Verhalten sekundär. Tabelle 5.7 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Versuche zur Filterkuchenbildung.

5.4.2 Filtration der Suspension in den Boden

Neben der Filterkuchenkornverteilung wird in den Versuchen das Filtrationsverhalten der Suspensionen in den anstehenden Boden untersucht. Die Auswertung beschränkt sich, um versuchsbedingte Randeffekte auszuschließen, auf die Versuche ohne Filterpapier.

Bild 5.7 zeigt die zeitliche Entwicklung des aus den Boden verdrängten Wasservolumens, welches im Überlaufgefäß aufgefangen und gemessen wird. Diese Wassermenge kann fiktiv in zwei Anteile zerlegt werden. Wenn der Porenraum des Bodens groß genug ist, dringt die Suspension bei gleichzeitigem Verdrängen des Porenwassers in den Boden ein. Nach einer bestimmten Eindringstrecke s stagniert die Suspension neben einer möglichen Kolation primär auf Grund ihrer Fließgrenze τ_F . So resultiert der erste Anteil aus dem

Tabelle 5.7: Ergebnisdaten der Versuche V-SP1 bis V-SP8

	VSP1	V-SP2	V-SP3-1	V-SP3-2	V-SP4	V-SP5	V-SP6	V-SP7	V-SP8
Sand									
ρ_d [g/cm ³]	1,73	1,75	1,75	1,76	1,76	1,75	1,76	1,76	1,75
Suspension vor Versuchbeginn									
ρ_F [g/cm ³]	1,15	1,3	1,15	1,15	1,14	1,13	1,04	1,06	1,12
τ_F [N/m ²]	27,95	35,73	27,95	27,95	28,17	28,40	29,97	29,97	36,78
Suspension nach Versuchende									
$\rho_{F,oben}^{1)}$ [g/cm ³]	1,146	1,3	1,15	1,14	1,14	1,06	1,04	1,03	1,04
$\rho_{F,unten}^{2)}$ [g/cm ³]	1,148	1,3	1,15	1,15	1,15	1,10	1,06	1,04	1,03
$\emptyset_{oben} < 0,063\text{mm}$ [%]	81,14	73,82	85,59	86,60	94,88	85,68	97,30	99,34	95,10
$\emptyset_{unten} < 0,063\text{mm}$ [%]	81,50	71,48	85,12	85,04	95,01	81,48	90,35	99,19	93,04
w_{oben} [%]	79,95	65,86	80,01	80,19	80,05	88,68	94,41	94,61	93,22
w_{unten} [%]	79,37	61,92	79,45	78,64	79,50	85,35	90,30	94,38	91,63
Filterkuchen									
ρ [g/cm ³]	1,54	1,58	1,63	1,59	1,54	1,59	1,32	1,55	1,68
w [%]	54,00	44,68	58,27	55,64	55,01	75,30	77,71	77,11	71,80
d_{FK} [mm]	8	17	7	7	10	9,5	6	7,5	7,5
Durchlässigkeit Versuchende k^3 [m/s]	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	-	$3 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	-	-

¹⁾ *oben*: oberer Bereich des Versuchsbehälters

²⁾ *unten*: unterer Bereich des Versuchsbehälters

³⁾ Nur Versuche ohne Filterpapier, k-Wertberechnung: letztes Zeitintervall des verdrängten Wasservolumens

durch die eingedrungene Suspension verdrängten Porenwasser. Dieser Prozess dauert wenige Minuten an. Die hier verdrängte Wassermenge wird Anfangsfiltratvolumen genannt. Nach Stagnation der Suspension setzt an der Bodenoberfläche der Filtrationsprozess ein, sowie die Entstehung des "äußeren" Filterkuchens. Das durch den Filterkuchen hindurch filtrierte Wasser aus der Suspension verdrängt wiederum Porenwasser, das den zweiten Anteil der gemessenen Wassermenge bildet (Filtratwasservolumen).

Das Anfangsfiltratvolumen ist bei der grob aufgeladenen Suspension SP5 mit 250,11 ml viel größer als bei den feinkörnig aufgeladenen Suspensionen, Bild 5.7. Diese Tendenz ist auch bei den feinkörnig aufgeladenen Suspensionen (SP2 bis SP4) untereinander ersichtlich. Aus Suspension SP4 mit der feinsten Aufladung resultiert ein Anfangsfiltratvolumen von 22,62 ml. Die Suspension SP1 besitzt unter den Suspensionen SP1 bis SP

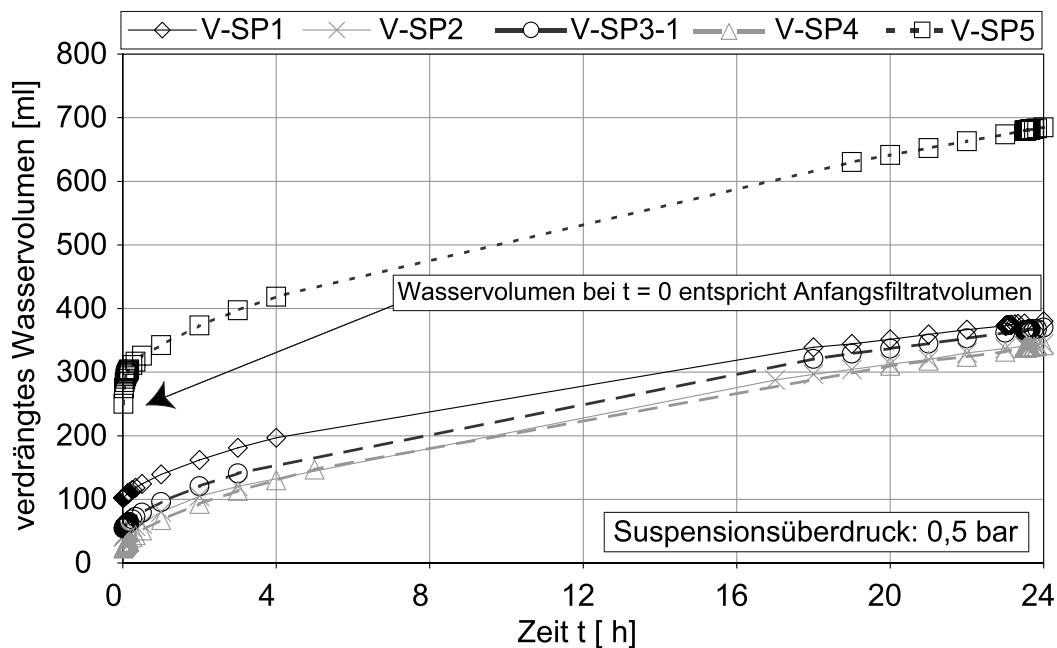


Bild 5.7: Zeitliche Entwicklung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens

4 die grobkörnigste Aufladung und ihr Anfangsfiltratvolumen ist mit 102,1 ml deutlich größer als z.B. das der Suspension SP4.

Der maximale bzw. minimale Porenquerschnitt des Bodens V-MSa berechnen sich zu: $max d_p \approx 1,1$ mm mit Gleichung 2.10 und $min d_p \approx 0,01$ mm mit Gleichung , [53]. Vermutet wird, dass die grobkörnige Festsubstanz der Suspension SP5 nur oberflächennah in den Boden eindringt bzw. an der Bodenoberfläche abfiltriert wird. So wird die in den Boden eingedrungene Suspension primär aus Wasser und Bentonit bestehen und ausschließlich auf Grund der Fließgrenze stagnieren. Im Vergleich zu den feinkörnig aufgeladenen Suspensionen ist somit die Eindringstrecke s groß. Je feinkörniger die Suspension ist, desto mehr wird neben der Fließgrenze die Stagnation von der Kolmation der Feststoffe in den Porenräumen unterstützt und so das Anfangsfiltratvolumen reduziert.

Nach der Stagnation der Suspension im Boden beginnt der Filtrationsprozess. Es kommt daher im weiteren Verlauf zu keinem Eindringen der Suspension in den Boden sondern nur des Suspensionswassers, während die Feststoffe an der Bodenoberfläche abfiltriert werden und den Filterkuchen bilden. Der zeitliche Verlauf dieses Filtratwasservolumens ist exponentiell. Bei allen Versuchen wird nach ungefähr 4 Stunden Suspensionsstandzeit der Zuwachs des Filtratwasservolumens annähernd linear und dadurch die Kurven affin zueinander.

5.4.3 Filterkuchendicke

Für die Entstehung des "äußeren" Filterkuchens, insbesondere des Anwachsens der Dicke über die Zeit, ist der Filtrationsprozess maßgebend. Das Anfangsfiltratvolumen muss daher vom gesamten verdrängten Porenwasservolumen aus Bild 5.7 abgezogen werden. Fernerhin werden nur die Versuche ohne Filterpapier verwertet. Der Übergang zwischen Filterkuchen und Suspension verläuft fließend. Die Porenzahl, Dichte und Durchlässigkeit sowie die daraus abzuleitenden mechanischen Eigenschaften des Filterkuchens sind über die Dicke nicht konstant, sondern im Bereich des Bodens aufgrund von Konsolidierungsprozessen kleiner als in Richtung des offenen Schlitzes, Kapitel 7. Die Filterkuchendicke ist als solche nicht eindeutig definierbar. Wates & Knight [115] bezeichnen z.B. den Filterkuchen als die Schicht, die ohne weitere Stützung vertikal stehen bleibt. Um vergleichbare Filterkuchendicken messen zu können wird nach Versuchende der mit Boden gefüllte Zylinder so gedreht, dass die Filterkuchenschicht auf der Bodenoberfläche aufliegt. Mit einem Verfahren, welches die weiche Masse des Übergangsbereiches Filterkuchen-Suspension verdrängt und beseitigt und wird so die definierte Dickenmessung des Filterkuchens ermöglicht. Gleichfalls wird in-situ die weiche Masse des Filterkuchens durch den aufsteigenden Frischbeton im Kontraktorverfahren verdrängt, Kapitel 8. Vor dem Versuchbeginn wird die Suspension mit einem Farbstoff (Bayferrox 130 B) eingefärbt, bei dem die Farbpartikel am Bentonit adsorbieren. So ist der Übergang Filterkuchen - anstehender Boden visuell erkennbar. Tabelle 5.7 zeigt die gemessenen Filterkuchendicken d_{FK} nach Versuchende. Exemplarisch sind die Messungen der Filterkuchendicke der Versuche V-SP2 und VSP3-1 im Bild 5.8 dargestellt.

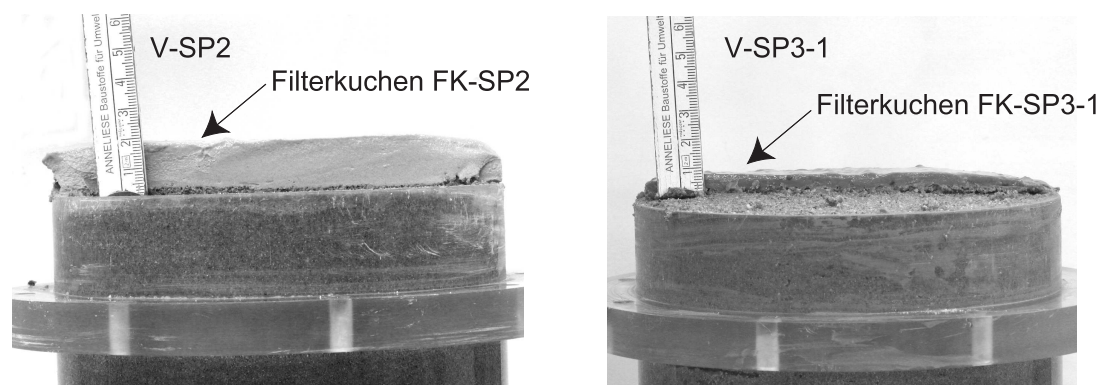


Bild 5.8: Filterkuchen des Versuches V-SP2 und VSP3-1

Tabelle 5.8: Parameter zur Bestimmung der Filterkuchendicke h_K nach [118], Gleichung 2.9

	VSP1	V-SP2	V-SP3-1	V-SP4	V-SP5
Feststoffkonzentration c_G [g/cm ³]	0,206	0,377	0,206	0,206	0,206
Grundfläche A [cm ²]	152,62	152,62	152,62	152,62	152,62
Porenanteil ε bzw. n [-]	0,623	0,588	0,611	0,628	0,658
Feststoffdichte ρ_s [g/cm ³]	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Flüssigkeitsdichte $\rho_L = \rho_{Wasser}$ [g/cm ³]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Anfangsfiltratvolumen $V_{L,t \rightarrow 0}$ [cm ³]	102,5	40,88	54,19	22,62	284,28
Filtratvolumen $V_L = V_{L,gemessen} - V_{L,t \rightarrow 0}$					

Die Entstehung des Filterkuchens wird mit dem analytischen Ansatz von Weiß [118] bzw. Schweiger [93] nach Gleichung 2.9 simuliert. Der Ansatz idealisiert den Filterkuchen vereinfacht als homogenes inkompressibles Material. Das Durchströmen des Filterkuchens während seiner Entstehung mit der daraus resultierenden Konsolidierung werden nicht berücksichtigt. Die inhomogene Struktur des Filterkuchens wird in Gleichung 2.9 vereinfacht durch einen Mittelwert des Porenanteils ε abgebildet. Diese Porosität ε wird aus den experimentell bestimmten Parametern nach Versuchende, der Feuchtdichte ρ und dem Wassergehalt w aus Tabelle 5.7 berechnet. Eingangsparemeter in den analytischen Ansatz ist des Weiteren das Filtratwasservolumen. Die nach Gleichung 2.9 berechneten Dicken h_K werden den nach Versuchende gemessenen Filterkuchendicken d_{FK} gegenübergestellt.

Tabelle 5.8 zeigt die Eingangsparemeter in den analytischen Ansatz von Weiß [118]. Die analytisch ermittelte Entstehung der Filterkuchen in Abhängigkeit der Zeit ist in Bild 5.9 dargestellt. Auf Grund der im analytischen Ansatz abgebildeten Proportionalität der Filterkuchendicke zum Filtratwasservolumen wird auch hier der Zuwachs der Filterkuchendicke mit der Zeit geringer. Die Filterkuchendicke wächst kongruent zu der Filtration der Suspension in den Boden an. Die experimentell ermittelte mittlere Durchlässigkeit der Filterkuchen bezieht sich auf den Zustand am Versuchende und ist mit $2 \cdot 10^{-10}$ bis $4 \cdot 10^{-10}$ m/s äußerst gering, siehe Tabelle 5.7. Mit dieser geringen Durchlässigkeit lässt sich der geringe Filtratwasservolumenzuwachs und der daraus abgeleitete Filterkuchendickenzuwachs nach rd. 4 Stunden Suspensionsstandzeit erklären.

Die gemessenen und berechneten Filterkuchendicken liegen in der gleichen Größenordnung, Bild 5.9. Die Abweichungen betragen bei vier Versuchen max 2 mm. Größere Diskrepanzen treten nur bei Versuch V-SP4 auf. Die Dicke des Filterkuchens FK-SP4 wird

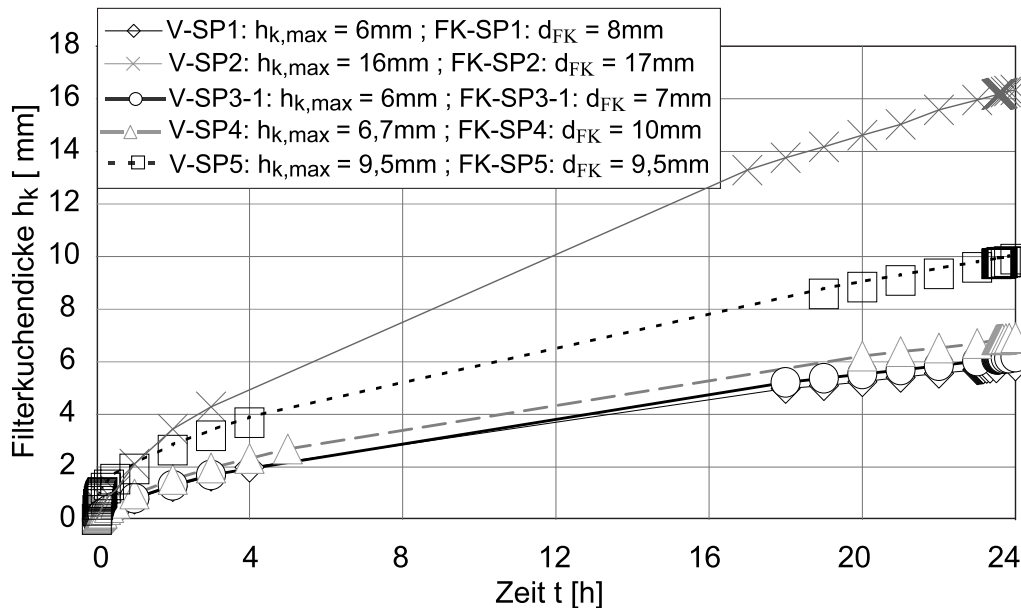


Bild 5.9: Zeitliche Entwicklung der Filterkuchendicke h_K nach [118]; Vergleich mit gemessener Filterkuchendicke d_{FK}

dort rechnerisch zu 6,7 mm bestimmt, jedoch werden 10 mm gemessen.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Filterkuchendicken zeigt generell, dass für eine generelle Abbildung der Filterkuchenbildung der Ansatz nach [118], Gleichung 2.9, trotz der Annahme eines homogenen inkompressiblen Materials, ausreichend ist.

5.5 Einfluss des Druckniveaus

5.5.1 Versuchsaufbau 2 und Versuchprogramm

Nachfolgend wird der Einfluss des Druckniveaus auf die Filtration der Suspension in den Boden und die daraus resultierende Entstehung des Filterkuchens untersucht. Zum Einsatz kommt ein Versuchsgerät nach DIN 4126, welches auf die Arbeiten von Müller-Kirchenbauer [59, 60] zurück geht, (Gerät zur direkten Messung der Druckgefälles f_{s0}), Bild 5.10. Es besteht aus zwei miteinander verbundenen Plexiglaszylindern mit gleichen Durchmessern ($\varnothing=11,24\text{cm}$), die über einen Schlauch mit einem Überlaufgefäß kommunizieren. In den unteren Zylinder wird der Versuchsboden mit einer Lagerungsdichte von $I_D \approx 0,8$ eingebracht und wassergesättigt. Der obere Zylinder wird mit Suspension gefüllt. Im Zylinderdeckel befindet sich ein Anschluss für Druckluft und ein Rührer der

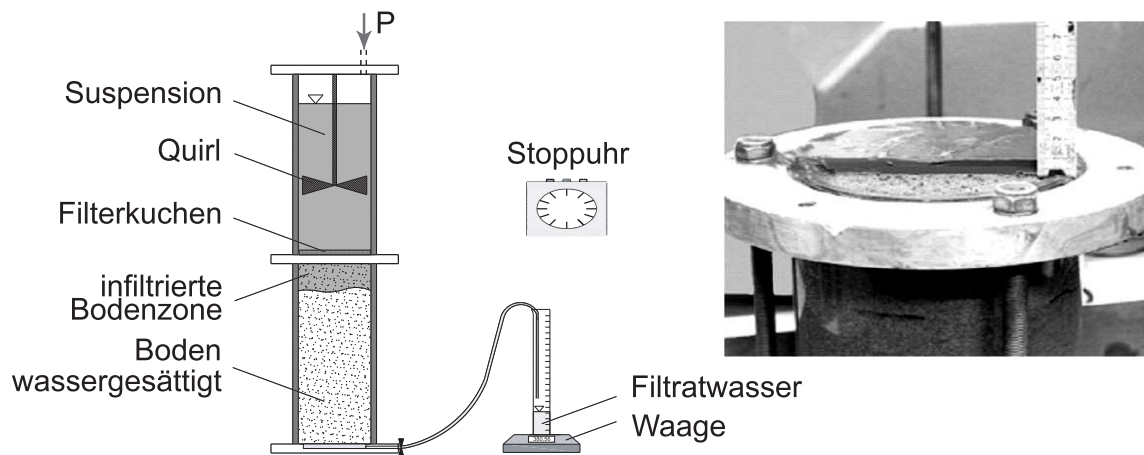


Bild 5.10: Gerät zur Bestimmung der Filtratwasserabgabe und Filterkuchendicke

die Bentonisuspension in Bewegung halten kann. Die Suspension wird mit einem Überdruck beansprucht und nach Öffnen des Auslaufventils die Filtration der Suspension in den Boden beobachtet. Gemessen wird das auslaufende Wasservolumen in Abhängigkeit der Zeit und nach Versucheende die Dicke des Filterkuchens. Die Eindringstrecke (infiltrierte Bodenzone) der Suspension in den Boden wird visuell gemessen, da auch hier die Suspension mit dem Farbstoff (Bayferrox 130 B) eingefärbt wird. Der Druckeinfluss wird mit zwei Versuchsreihen mit Überdrücken von 0,5 bar und 1,0 bar analysiert. Zum Einsatz kommt die reine Bentonitsuspension BSP, Tabelle 5.4, und der Versuchsboden V-MSa, Bild

Tabelle 5.9: Versuchsprogramm und Versuchsbezeichnungen

Versuchsbezeichnung	Überdruck [bar]	Versuchsdauer [h]	Bezeichnung des entstandenen Filterkuchens
V-FK1-1	0,5	2	FK1-1
V-FK1-2	0,5	4	FK1-2
V-FK1-3	0,5	12	FK1-3
V-FK1-4	0,5	18	FK1-4
V-FK1-5	0,5	45	FK1-5
V-FK2-1	1,0	4	FK2-1
V-FK2-2	1,0	8	FK2-2
V-FK2-3	1,0	16	FK2-3
V-FK2-4	1,0	24	FK2-4
V-FK2-5	1,0	48	FK2-5

5.2. Je Druckniveau werden fünf Versuche mit unterschiedlichen Suspensionsstandzeiten ($t_{min}=2h$ und $t_{max}=48h$) durchgeführt. Das experimentell ermittelte Anwachsen der Filterkuchendicke über die Zeit wird mit dem analytischen Ansatz von Weiß [118] verglichen. Tabelle 5.9 zeigt das Versuchsprogramm mit den Versuchsbezeichnungen.

5.5.2 Versuchsergebnisse

Nach Öffnen des Auslaufventils dringt auch hier bei allen Versuchen schlagartig Suspension in den Boden ein und stagniert innerhalb der ersten Minuten. Die Eindringstrecke s der Suspension BSP in den Boden wird durch die rote Färbung visuell bis max 90 mm gemessen. Nachfolgend erhöht sich die Eindringstrecke nicht weiter, hingegen setzt die Filtration der Suspension in den Boden mit einem sich gleichzeitig bildenden "äußeren" Filterkuchen ein.

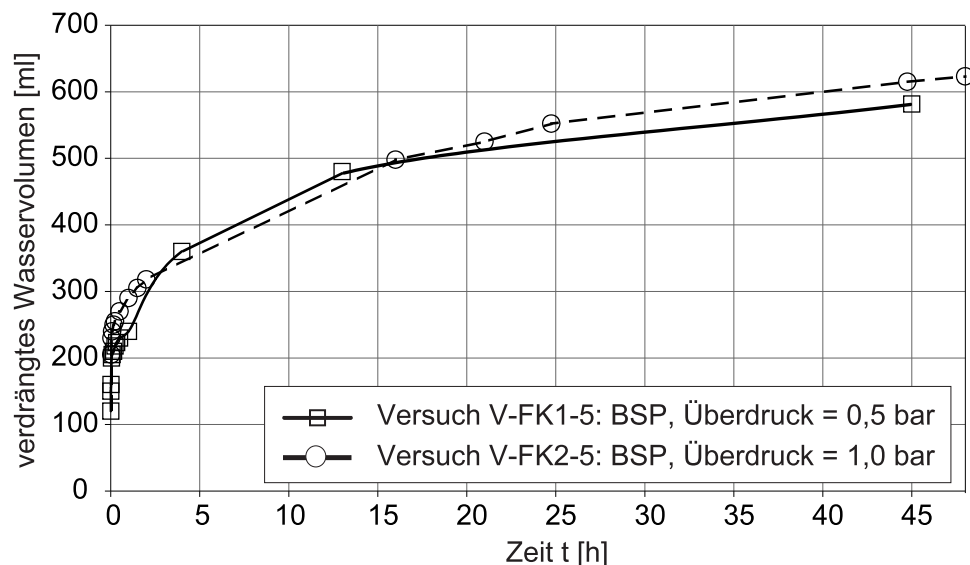


Bild 5.11: Zeitliche Entwicklung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens

Die Verläufe des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens über die Zeit der beiden Versuchsreihen V-FK1- i und V-FK2- i fallen trotz unterschiedlicher Druckniveaus annähernd zusammen. Es wird kein Einfluss der Größe des Überdrucks auf das Eindringverhalten der Suspension und dem darauf folgenden Filtrationsprozess beobachtet. Bild 5.11 stellt exemplarisch den zeitlichen Verlauf des verdrängten Wasservolumens der Versuche V-FK1-5 und V-FK2-5 gegenüber.

Die verdrängte Wassermenge kann analog zu Kapitel 5.4 in ein Anfangsfiltratvolumen vor Stagnation der Suspension im Boden und nach der Stagnation in ein Filtratwasservolumen unterteilt werden, Verläufe siehe Anlage II.2.

Das Anfangsfiltratvolumen der Versuche V-FK1-*i* sowie V-FK2-*i* variiert und liegt zwischen 100 und 300 ml, siehe Bilder II.8 und II.9. Diese streuenden Werte, besonders der Versuche V-FK2-*i*, werden auf versuchstechnische Ursachen zurückgeführt. Der Filterstein im Bereich des Auslaufventils war bereichsweise verstopft.

Der Filtrationsprozess scheint jedoch trotz dieser versuchstechnischen Einflüsse unbeeinträchtigt geblieben zu sein. Die affin verlaufenden Kurven des verdrängten Wasservolumens der Versuche V-FK1-*i* und V-FK2-*i* nach Stagnation zeigen ein identisches Filtrationsverhalten auf. Das aus der Filtration resultierende Wasservolumen ist auf Grund der kleinen Filterkuchendurchlässigkeit gering, so dass die verbleibende Kapazität des Filtersteins ausreichend gewesen sein muss.

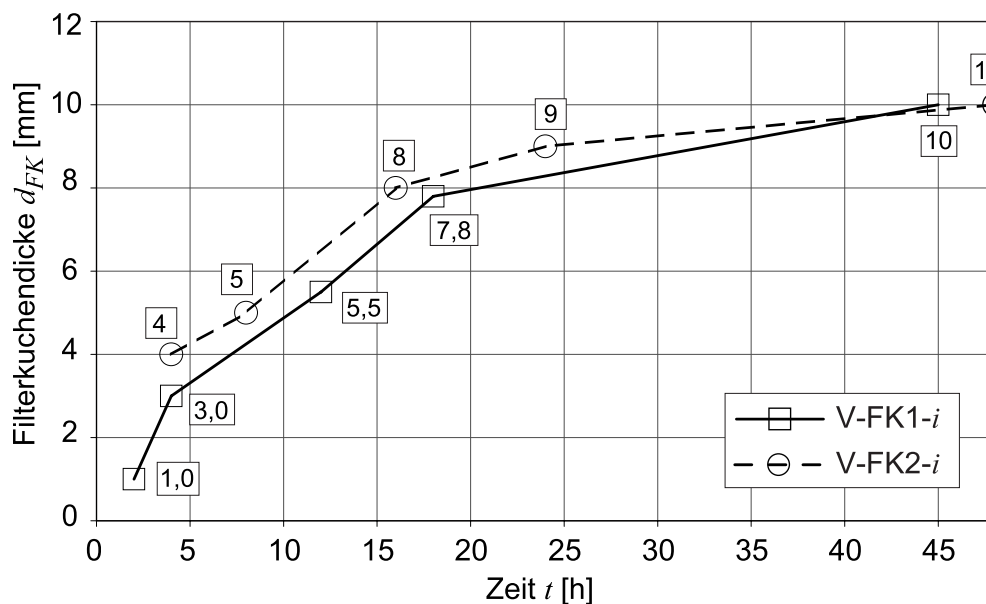


Bild 5.12: Zeitliche Entwicklung der gemessenen Filterkuchendicke d_{FK}

Die gemessenen Filterkuchendicken in Abhängigkeit der Zeit der Versuche V-FK1-*i* und V-FK2-*i* zeigt Bild 5.12. Analog zum Verlauf der Filtratwassermenge ist auch hier kein Einfluss des Druckniveaus zu erkennen. Der höhere Druck verursacht eine stärkere Konsolidierung des Filterkuchens und damit eine sinkende Durchlässigkeit. Diese geringe

Tabelle 5.10: Bestimmung der Filterkuchendicke h_K nach [118], Gleichung 2.9

		V-FK1-5	V-FK2-5
Feststoffkonzentration c_G	[g/cm ³]	0,052	0,052
Grundfläche A	[cm ²]	99,23	99,23
Porenanteil ε bzw. n	[-]	0,87	0,91
Feststoffdichte ρ_s	[g/cm ³]	2,65	2,65
Flüssigkeitsdichte $\rho_L = \rho_{Wasser}$	[g/cm ³]	1,0	1,0
Anfangsfiltratvolumen $V_{L,t \rightarrow 0}$	[cm ³]	120	240
Filtratvolumen $V_L = V_{L,gemessen} - V_{L,t \rightarrow 0}$			

Durchlässigkeit wirkt einer schnelleren Durchströmung des Filterkuchens trotz höherem hydraulischen Gradienten entgegen. Im Mittel bleibt daher die Durchflussgeschwindigkeit bzw. die ausfiltrierte Wassermenge der beiden Druckniveaus annähernd konstant (siehe hierzu auch [115]).

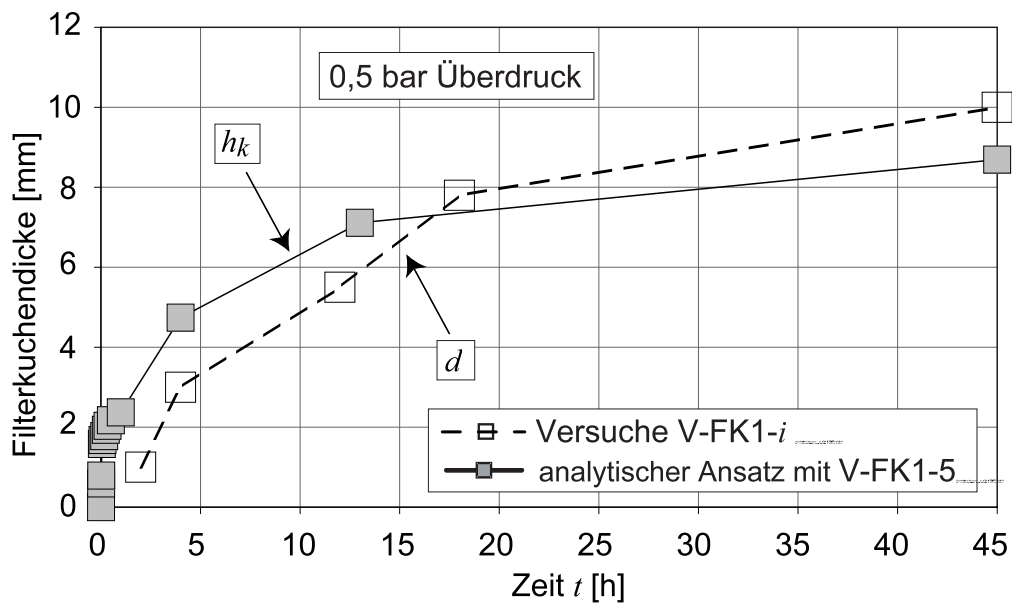
Bild 5.13: Zeitliche Entwicklung der gemessenen und analytisch ermittelten Filterkuchendicke, Versuche V-FK1- i

Bild 5.13 und 5.14 zeigen die nach [118] berechneten und gemessenen Filterkuchendicken. Die Eingangsparameter in den analytischen Ansatz werden in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

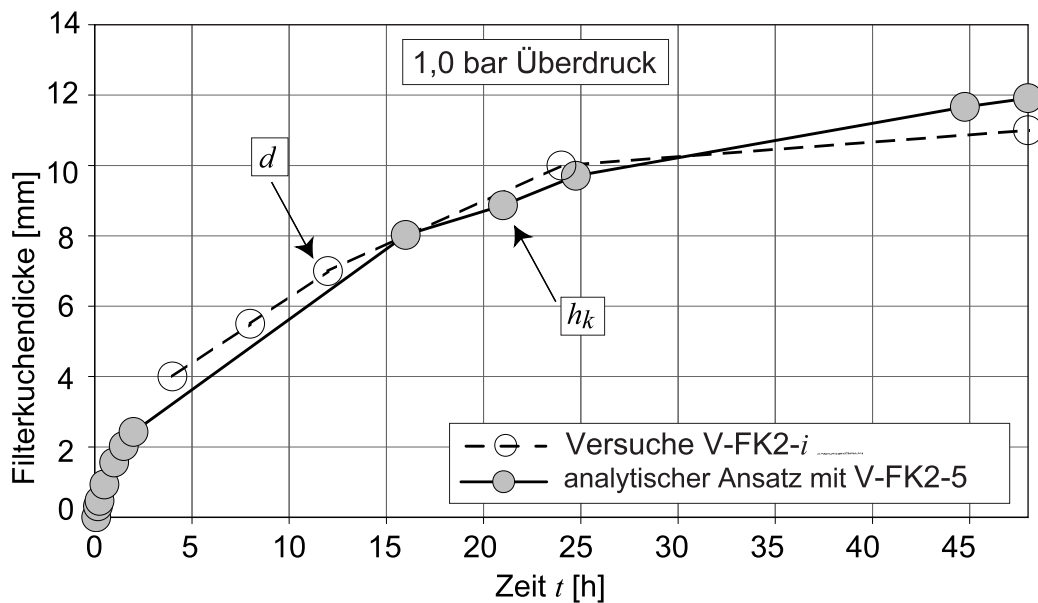


Bild 5.14: Zeitliche Entwicklung der gemessenen und analytisch ermittelten Filterkuchendicke, Versuche V-FK2- i

Die Verläufe der analytisch berechneten Filterkuchendicke h_k über die Zeit und die der gemessenen Dicke d_{FK} zeigen für beide Druckniveaus eine ausreichend gute Übereinstimmung. Der analytische Ansatz von Weiß [118] eignet sich basierend auf den hier durchgeführten Versuchen für eine Abschätzung der Filterkuchenbildung, obwohl die inhomogene Filterkuchenstruktur nur durch den Porenanteil ε , ermittelt am Versuchende, berücksichtigt wird, der einen Mittelwert über die Dicke darstellt.

Kapitel 6

Kontaktzone Boden-Schlitzwand

Der Kontaktbereich einer suspensionsgestützten Ortbetonwand und dem anstehenden Baugrund wird als Schichtensystem idealisiert. Bild 1.1 zeigt die theoretisch möglichen Scherflächen. Gesucht wird die Scherfuge mit der kleinsten Scherfestigkeit, die innerhalb dieses ideellen Schichtensystems für das Wandreibungsverhalten maßgebend ist. Zur Simulation der Kontaktzone Baugrund-Schlitzwand wird ein Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglicht, direkt in einem Scherkasten den Kontaktbereich Schlitzwand-Boden ähnlich zu den in-situ Verhältnissen herzustellen. Dieser Versuchsaufbau wird als "Schlitzwandelementversuch" bezeichnet.

6.1 Versuchsaufbau "Schlitzwandelementversuch"

Bild 6.1 zeigt den Versuchsablauf des "Schlitzwandelementversuchs" mit seinen unterschiedlichen Schritten. Es wird ein Scherkasten aus Plexiglas mit den Maßen $H \times B \times L = 10 \times 30 \times 30$ cm konstruiert. Der Scherkasten wird hochkant aufgestellt und in die eine Hälfte der Versuchsboden eingebracht während sich in der anderen Hälfte ein Dummy (Körper aus Styropor) befindet. Damit nach dem Versuch ein eventueller Verlauf der Scherfuge im Versuchsboden festgestellt werden kann, werden alle 5 cm ein schmaler schwarz eingefärbter Sandstreifen eingerieselt. Nach Einbringen des Versuchsbodens wird der Dummy durch eine Bentonitsuspension verdrängt. Innerhalb einer Suspensionsstandzeit von etwa 24 h und einem Druck von 0,5 bar bildet sich der Filterkuchen aus. Die Suspension wird durch Einpressen von Zementmörtel verdrängt. Der Verdrängungsvorgang erfolgt dabei entsprechend dem in-situ angewendeten Kontraktorverfahren von unten

nach oben. Nach Aushärten des Zementmörtels werden am entsprechenden Schlitzwand-

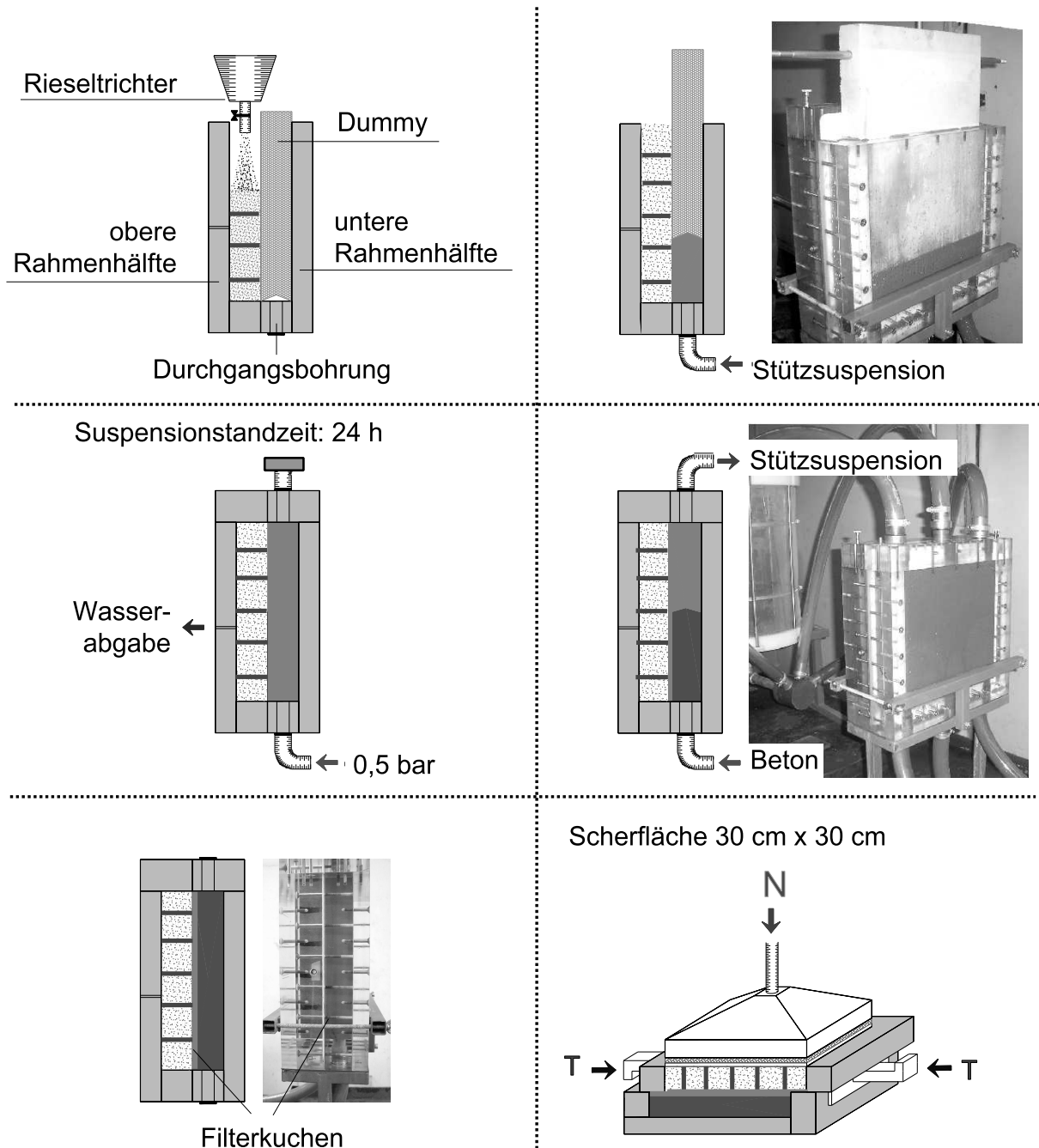


Bild 6.1: Versuchsablauf des "Schlitzwandelementversuchs"

element (SW-Probekörper) normalkonsolidierte Großrahmenscherversuche durchgeführt. Da der Filterkuchen ein bindiges Material ist, wird eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,006 mm/min gewählt. Bild 6.2 zeigt das eingesetzte Großrahmenschergerät mit senk-

rechter Parallelführung des oberen Rahmens und des Normalbelastungsstempels nach DIN 18137-3 [16].

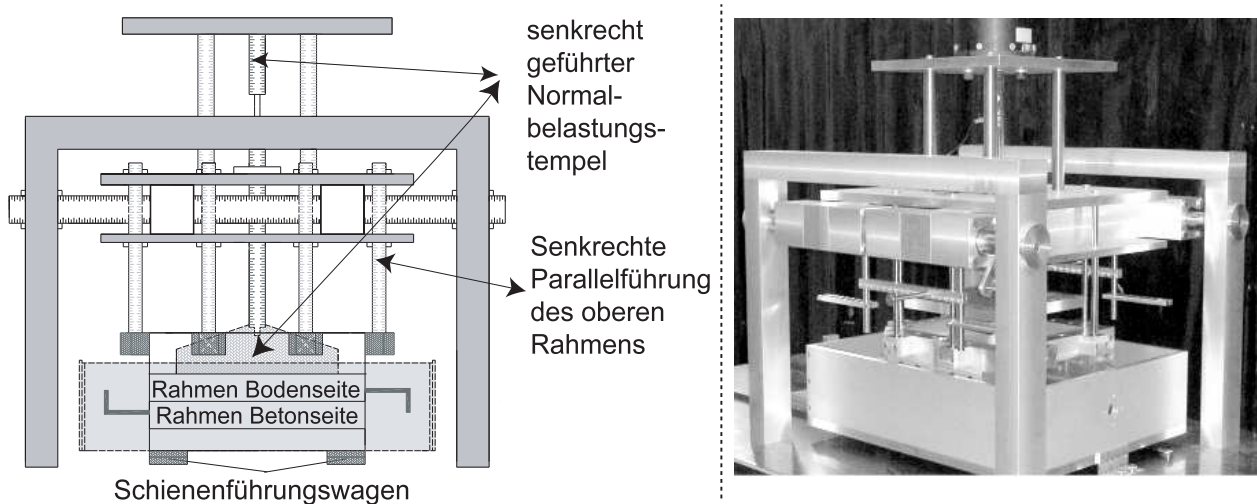


Bild 6.2: Großrahmenschergerät nach DIN 18137-3 [16] Bild 1b

6.2 Versuchsmaterialien

6.2.1 Boden

Es kommt der in Kapitel 5.2.1 beschriebene schwach feinsandige, stark grobsandige Mittelsand (fsacsamSa nach DIN EN ISO 14688-1 [20]) V-MSa zum Einsatz. Der Boden wird mit einer bezogenen Lagerungsdichte von $I_D \sim 0,9$ eingebaut. Der der Lagerungsdichte entsprechende Peakreibungswinkel des Bodens liegt bei $\varphi' \approx 42,5^\circ$.

6.2.2 Suspension

Überwiegend werden die Versuche mit der reinen Bentonitsuspension BSP durchgeführt, siehe Kapitel 5.2.2. Die Dichte der Suspension liegt bei $1,03 \text{ g/cm}^3$ (55 g Bentonit / l Wasser). Das verwendete Bentonit ist ein Natrium-Aktiv-Bentonit mit der Bezeichnung IBECO B1. Die wichtigsten Kenngrößen der Suspension BSP zeigt Tabelle 5.4.

Ferner wird bei vier Versuchen die aufgeladene Suspension SP2 (Kenngrößen siehe Tabelle

5.5 im Kapitel 5.2.2) eingesetzt. Die Kornverteilung dieser Suspensionsaufladung und die des Filterkuchens FK-Ro-Labor (Kapitel) der Baustelle in Rotterdam sind kongruent.

6.2.3 Filterkuchen

Die aus den Versuchen ermittelte Systemscherfestigkeit wird mit den Scherfestigkeiten der einzelnen Schichten verglichen. Die Scherfuge bildet sich demgemäß in der Schicht aus, die eine der Systemscherfestigkeit entsprechende Scherfestigkeit besitzt. Bekannt sein müssen die Scherfestigkeiten der einzelnen Schichten (Versuchsboden siehe Kapitel 6.2.1).

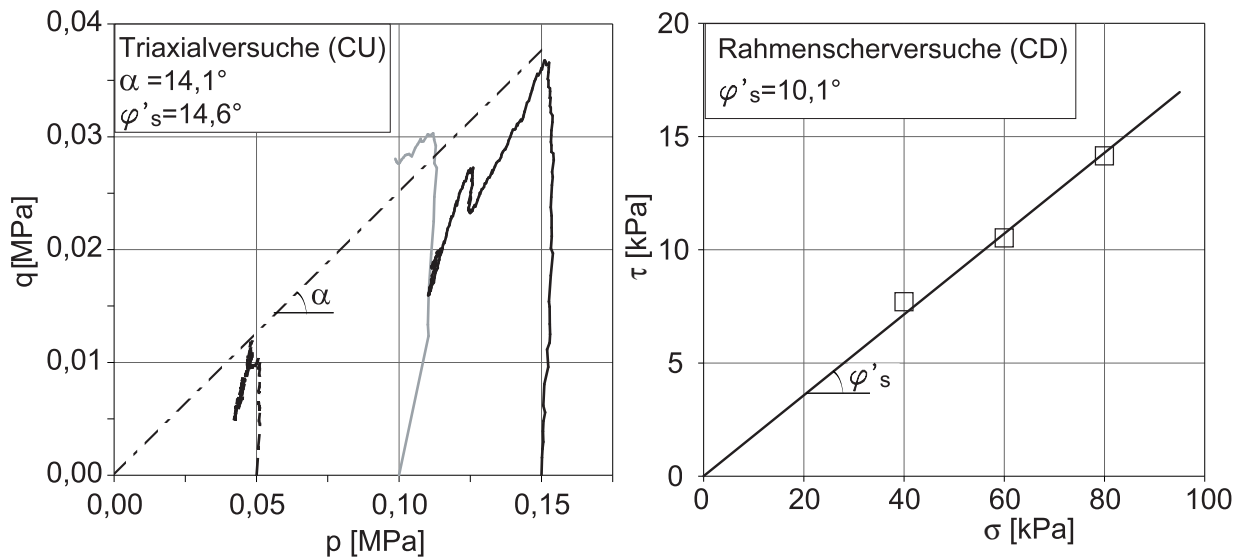


Bild 6.3: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , Bentonitmaterial FK-BSP

Die Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ro-Labor wird im Kapitel 3.1.3 bestimmt. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit liegt bei $\varphi'_s \approx 29^\circ$.

Tabelle 6.1: Triaxialversuche (CU-Versuche) am Bentonitmaterial FK-BSP

Probe-Nr.	Zelldruck σ_3 [kPa]	Feuchtdichte ρ [kN/m^3]	Wassergehalt w_{Einbau} [%]	Vorschub [mm/min]
TX-BSP1	50	1,292	154,33	0,01
TX-BSP2	100	1,311	136,52	0,02
TX-BSP3	150	1,294	151,44	0,01
⇒ Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\varphi'_s \approx 14,6^\circ$				

Tabelle 6.2: Rahmenscherversuche (CD-Versuche) am Bentonitmaterial FK-BSP

Probe-Nr.	Spannung σ [kPa]	Feuchtdichte ρ_{Einbau} [kN/m ³]	Trockendichte $\rho_{d, Einbau}$ [kN/m ³]	Wassergehalt w_{Einbau} [%]	Wassergehalt w_{Ausbau} [%]	Vorschub [mm/min]
SV-BSP1	40	1,229	0,416	195,37	223,19	0,008
SV-BSP2	60	1,318	0,498	164,60	167,14	0,008
SV-BSP3	80	155,17	1,333	0,522	158,39	0,008
⇒ Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\varphi'_s \approx 10,1^\circ$						

Am reinen Bentonitmaterial FK-BSP werden von Schreiner [86] Rahmenscherver- (CD-Versuche: B x L x H = 100 x 100 x 20 mm, frei beweglicher oberer Rahmen und Normalbelastungsstempel) und Triaxialversuche (CU-Versuche: $\varnothing = 35$ mm und H= 8 mm) durchgeführt. Die Probenherstellung erfolgt durch Anmischen des Bentonitmaterials bei einem Wassergehalt von ca. $w = 250\%$ und einer Vorkonsolidierung unter der jeweiligen Normalspannung. Tabelle 6.1 zeigt die Versuchskenngrößen der Triaxialversuche und Tabelle 6.2 die der Rahmenscherversuche.

Der Reibungswinkel des Bentonits BSP liegt zwischen $\varphi_s = 10 - 14^\circ$, Bild 6.3. Ein Vergleich mit Literaturwerten für Bentonit [68, 57, 55] zeigt eine zufrieden stellende Übereinstimmung. Auch Gudehus gibt in [36] für Bentonit ein $\varphi_s = 10^\circ$ an.

6.2.4 Zementmörtel

Tabelle 6.3 zeigt die Rezeptur des verarbeiteten Zementmörtels. Grundlage für die Wahl des Zuschlages ist das Ziel, einen pumpfähigen Mörtel zu erhalten, der während des Verdrängungsprozesses der Suspension noch nicht abzubinden beginnt. Die konkrete Rezep-

Tabelle 6.3: Zusammensetzung Zementmörtel

Material	Prozentualer Anteil [Gew.-%]
Wasser	12,29
Zement	30,72
Sand 0,5 - 0,71 mm	13,70
Sand 0,71 - 1 mm	13,70
Sand 1 - 2 mm	29,54
Fließmittel (Muraplast FK 67-17)	0,05

tur des Zuschlages ist von untergeordnetem Interesse, da auf Grund der großen mikroskopischen Rauigkeit der Mörteloberfläche ein Scherversagen der Kontaktfläche Wand-Filterkuchen S_1 (1.1) schon im Kapitel 6.2.2 ausgeschlossen wird.

6.3 Versuchsprogramm "Schlitzwandelementversuch"

Tabelle 6.4 zeigt das Versuchsprogramm der "Schlitzwandelementversuche" mit den Versuchsrandbedingungen und Bezeichnungen.

6.4 Versuchsergebnisse "Schlitzwandelementversuch"

6.4.1 Versuchsergebnisse SW-BSP_i

Das Scherspannungs-Verformungsverhalten des Kontaktbereiches Boden-Schlitzwand zeigt Bild 6.4. Für die Aktivierung der Wandreibung sind kleine Verformungen ausreichend. Nach einem Scherweg von ungefähr 2 bis 3 mm kommt es zur Ausbildung eines Peaks

Tabelle 6.4: Versuchsprogramm der "Schlitzwandelementversuche"

Versuchsbezeichnung	Bezeichnung der Suspension	bezogene Lagerungsdichte des Sandes V-MSa I_D [-]	Ausbreitmaß [cm]	Normalspannung σ [kPa]
SW-BSP1	BSP	0,88	68 - 61	40
SW-BSP2	BSP	0,91	58 - 60	60
SW-BSP3	BSP	0,92	66 - 70	60
SW-BSP4	BSP	0,89	56 - 61	80
SW-BSP5	BSP	0,89	63 - 65	100
SW-BSP6	BSP	0,88	58 - 63	100
SW-BSP7	BSP	0,88	54 - 62	160
SW-BSP8	BSP	0,89	56 - 63	160
SW-BSP9	BSP	0,89	61 - 70	160
SW-BSP10	BSP	0,91	63 - 68	160
SW-SP2-1	SP2	0,91	59 - 63	80
SW-SP2-2	SP2	0,90	66 - 73	80
SW-SP2-3	SP2	0,88	63-66	100
SW-SP2-4	SP2	0,9	65 - 67	160

der aktivierten Schubspannungen und danach fällt die Schubspannung ab. Die Ausbildung eines Peaks ist untypisch für bindige Böden. Bei hohen Normalspannungen und großen Verformungen ist bedingt durch versuchsspezifische Zwängungen an den Enden des Gerätes ein Wideranstieg der Schubspannungen zu erkennen. Dieser Verformungsbe-
reich ist allerdings nicht relevant.

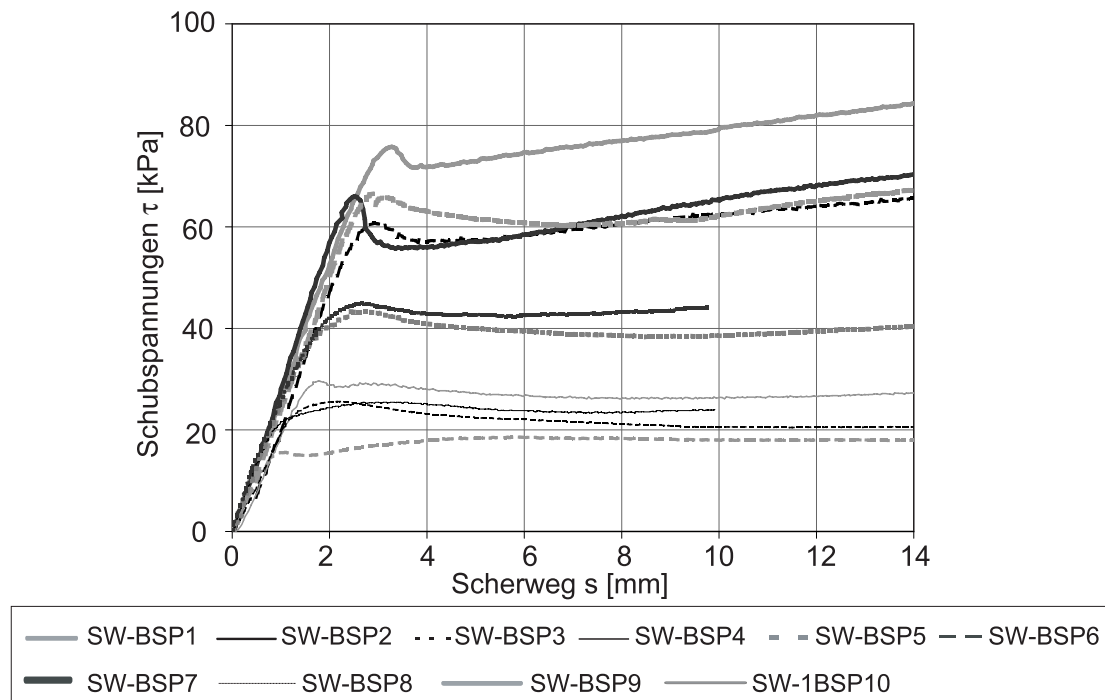


Bild 6.4: Scherspannungs-Verformungsverhalten, Versuche SW-BSP_i

Der SW-Probekörper wird nach Versuche systematisch untersucht. Die Dicke des Filterkuchens variiert entlang der Zementoberfläche, da durch das Einpressen des Zementmörtels über Schläuche der Filterkuchen im Einströmbereich des Plexiglastens stärker verdrängt wird. Im Einströmbereich ist der Filterkuchen vereinzelt deutlich dünner (minimal 2 mm) hingegen im Ausströmbereich die Dicke bis zu 8 mm beträgt. Der Verlauf der Scherfuge und damit die Scherfestigkeit des Kontaktbereichs wird ermittelt. Angesichts der nach Versuche weiterhin senkrecht verlaufenden schwarz eingefärbten Sandstreifen, wird ein Scherversagen im Sand ausgeschlossen, Bild 6.5. Im Filterkuchen zeigen sich hingegen Stellen, die auf einen Schervorgang hinweisen. Einige Regionen besitzen eine Oberflächenstruktur, die als durch im Schervorgang hervorgerufene "Schleifspuren" zu deuten sind. Beim Anheben von Teilen des Sandkörpers bleibt eine deutliche Schicht des

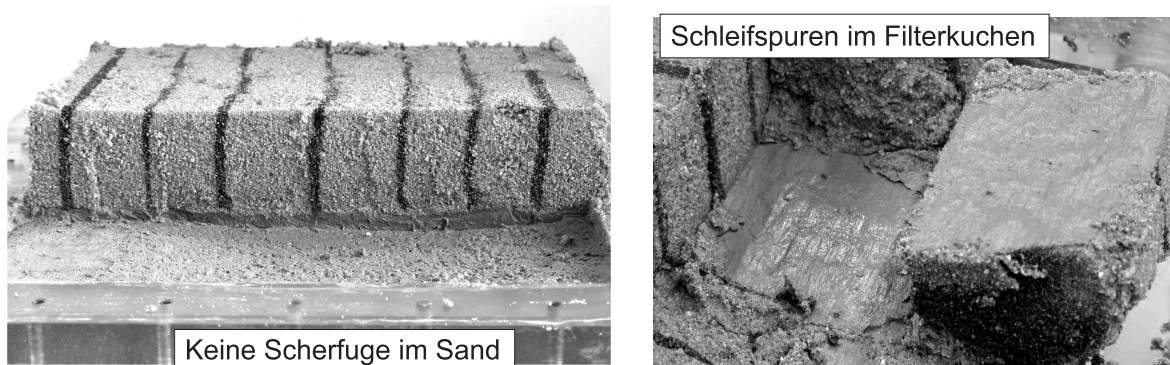


Bild 6.5: Scherfläche im Bodenschlitzwandensystem (Scherweg 1cm, Versuch SW-BSP6)

Filterkuchens auf der Betonplatte zurück und ein Teil bleibt am Sandkörper haften, Bild 6.5.

Die Scherfestigkeit wird an dem nach 2 bis 3 mm Scherweg aktivierten Peak ermittelt. Bild 6.6 zeigt den Winkel der Gesamtscherfestigkeit der Kontaktzone Boden-Schlitzwand mit $\varphi'_s = 22,9^\circ$. Die ermittelte Scherfestigkeit ist deutlich kleiner als die des Sandes ($\varphi' \approx 42,5^\circ$). Die Scherfestigkeit des reinen Bentonitmaterials FK-BSP weicht jedoch

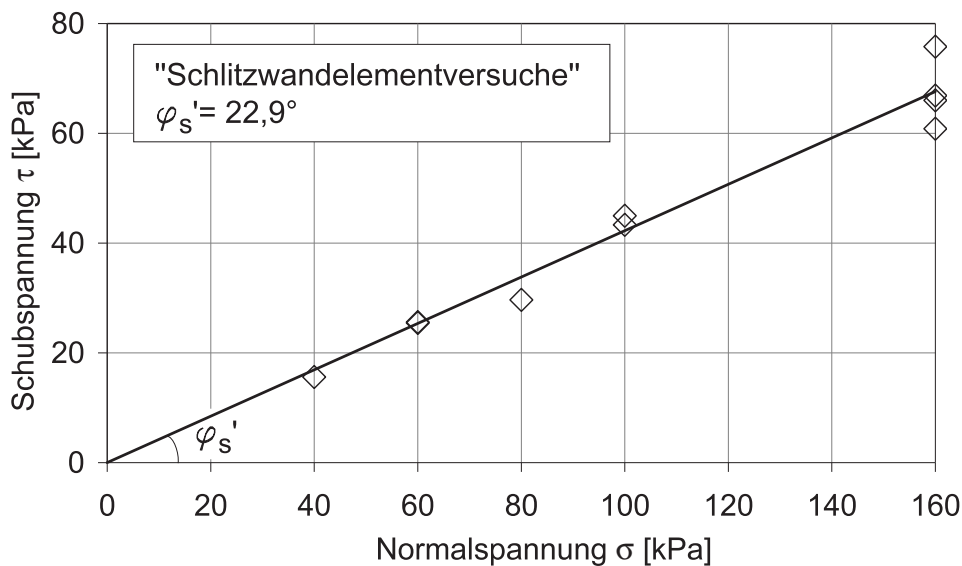


Bild 6.6: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , Versuche SW-BSP_i

auch von der des "Schlitzwandelementversuchs" ab. Zumal die Untersuchung des SW-Probekörpers eindeutig auf ein Scherversagen im Filterkuchen hinweist, werden andere Einflüsse vermutet. Entweder führen Versuchsrandbedingungen oder eine Zementverfe-

stigung durch den Eintrag von Zementschlämmen aus dem Beton zu dieser erhöhten Scherfestigkeit des Filterkuchens.

Im Kapitel 6.6 wird eine Beeinflussung der Scherparameter auf Grund der Versuchsrandbedingungen überprüft und im Kapitel 6.5 eine mögliche Zementverfestigung des Filterkuchens untersucht.

Bekannt ist, dass die Scherparameter bei Rahmenscherversuchen von der Gerätekonstruktion, vor allem der vorhandenen Freiheitsgrade der Lastplatte und der Rahmenhälften abhängig sind, siehe z.B. Goldscheider [32]. Für die Versuche zur Bestimmung der Filterkuchenscherfestigkeit und für die "Schlitzwandelementversuche" werden unterschiedliche Geräte eingesetzt. Die Probenherstellung und Versuchsdurchführung des Bentonitmaterials im Großrahmenschergerät würde bis zu einem Monat dauern und übersteigt daher den möglichen Zeitrahmen für eine Versuchsdurchführung.

6.4.2 Versuchsergebnisse SW-SP2-i

Das Scherspannungs-Verformungsverhalten des Kontaktbereiches Boden-Schlitzwand zeigt Bild 6.7. Der Verlauf des Scherspannungs-Verformungsverhalten ist typisch für bindige Böden, da die Kurve ohne Peak kontinuierlich ansteigt. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit liegt mit $\varphi'_s = 27,5^\circ$ in der selben Größenordnung wie der Winkel der Gesamtscherfestigkeit des reinen Filterkuchenmaterials FK-Ro-Labor ($\varphi'_s \approx 29^\circ$). Die ermittelte Scherfestigkeit deutet auf ein Scherversagen in der Filterkuchenschicht hin.

Ferner wird ein Anschauungsversuch durchgeführt, bei dem die Filterkuchenschicht FK-Ro-Labor manuell auf den fertigen Zementkörper aufgebracht wird. Damit nach dem Versuch der Verlauf der Scherfuge in der Filterkuchenschicht sichtbar ist, wird der Filterkuchen mit vier schmalen schwarz eingefärbten Streifen eingebaut. Im Anschluss wird der Boden eingerieselt und das Schlitzwandelement im Großrahmenschergerät geschert. Der Versatz in den schwarzen Streifen zeigt die in der Filterkuchenschicht verlaufende Scherfuge, Bild 6.9.

6.5 Zementverfestigung

In der Literatur wird von einer Verfestigung des Filterkuchens durch den Eintrag von Zementschlämmen aus dem Beton berichtet. Es sprechen z.B. Wates & Knight [115] so-

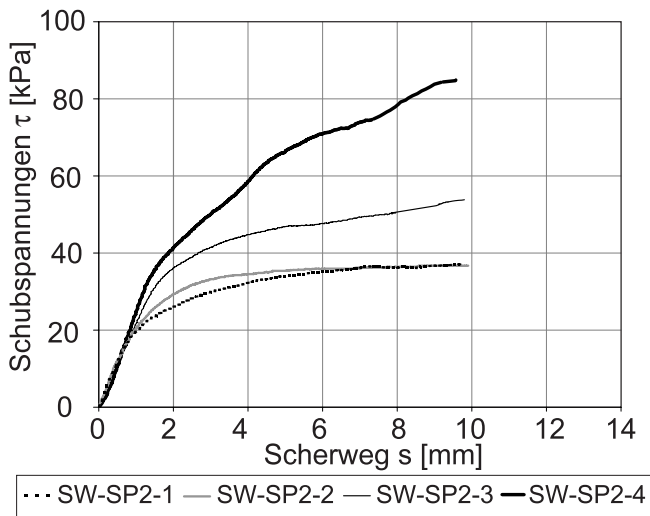


Bild 6.7: Scherspannungs-Verformungsverhalten, Versuche SW-SP2-i

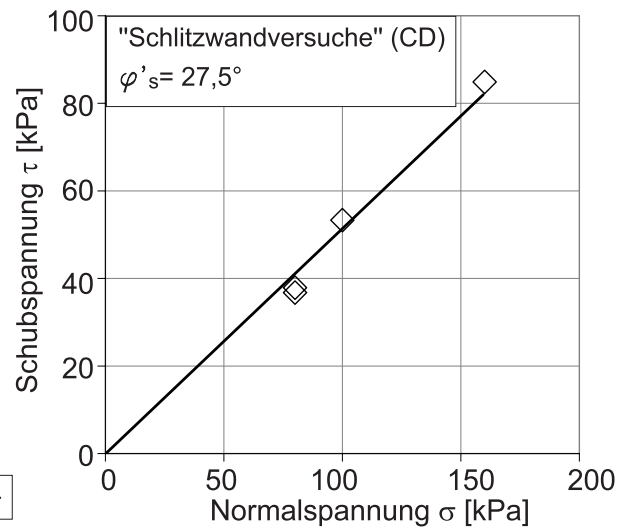


Bild 6.8: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , Versuche SW-SP2-i

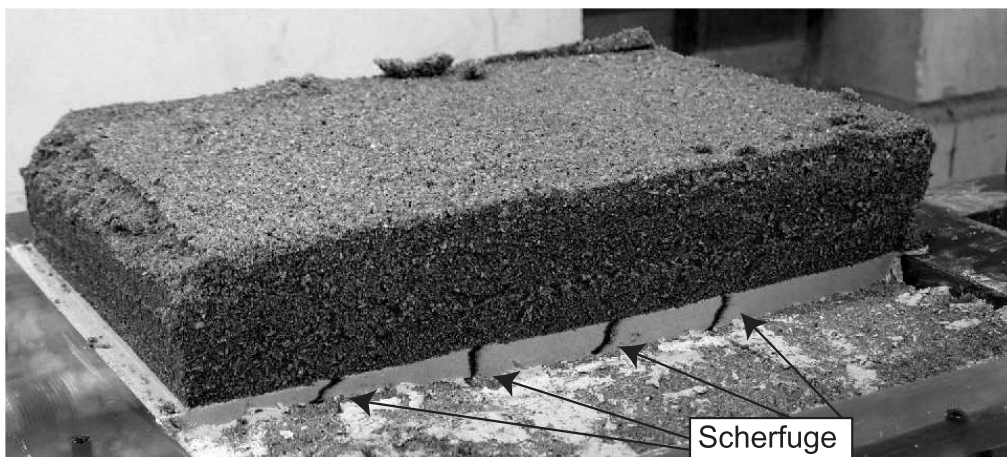


Bild 6.9: Verlauf der Scherfuge im Filterkuchen FK-Ro-Labor, Versuche SW-SP2-i

wie Pettry & Rich [70] ähnlich wie Weiß [116, 117] von einer Erhöhung der Festigkeit des Filterkuchens durch Eintrag von Natriumhydroxid aus dem Beton in den Filterkuchen (Röntgenbeugungsanalysen). Dagegen wird von Cernak eine Verfestigung des Filterkuchens durch das Eindringen von Zementpartikeln ausgeschlossen. Auf Grund der widersprüchlichen Literaturstellen wird hier eine mögliche Zementverfestigung des Filterkuchens erneut untersucht.

Es ist vorausgehend anzumerken, dass der Hydraulische Gradient in den Versuchen von Weiß [116, 117] nur aus dem Suspensionseigengewicht bei einer Standhöhe von rd. 10 cm resultierte, so dass sich kein Filterkuchen mit großer Dichte ausbilden konnte. Beim

Betoniervorgang konnte sich möglicherweise Zement mit der Suspension vermischt haben und zusammen in den Baugrund eindringen und so eine verfestigte Bodenzone unter der Betonplatte hervorrufen.

Da Zementpartikel in Anwesenheit von Wasser (erste Hydratationsphase, bis ca. vier Stunden) durch das auf der Oberfläche entstandene Trisulfat lange Nadeln bilden, die die Zementpartikel miteinander verbinden, ist es schwer vorstellbar, dass Zement in die Plättchenstruktur des konsolidierten Filterkuchens maßgebend eindringen kann.

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Plexiglaszylindern mit gleichen Durchmessern ($\varnothing = 20$ cm, $H = 10$ cm je Zylinder). In den unteren Zylinder wird der Versuchssand (m_s , \bar{g}_s , f_s) eingebracht und der obere Zylinder mit der Bentonitsuspension BSP ($55\text{g}/\text{cm}^3$ Aktiv-Natriumbentonit IBECO B1) gefüllt. Die Suspension wird unter einen Druck von 0,5 bar gesetzt und das Auslaufventil der Bodenplatte des Versuchsaufbau geöffnet. Innerhalb von 24 Stunden bildet sich der Filterkuchen aus. Danach wird die Suspension durch rot eingefärbten Zementmörtel verdrängt. Der rote Farbstoff adsorbiert sich an den Zementpartikeln, so dass eingedrungener Zement im Filterkuchen vom unverfestigten Bentonit visuell zu unterscheiden ist. Mittels eines Druckluftkissens wird der Zementmörtel unter einen Druck von 0,5 bar gesetzt. Nach dem Abbinden des Zementmörtels wird der Filterkuchen visuell auf Spuren eingedrungenen Zements untersucht. Das Versuchsgerät zeigt Bild 6.10.

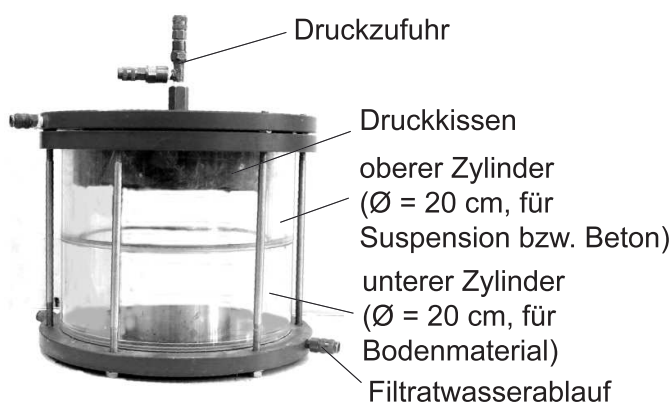


Bild 6.10: *Gerät zur visuellen Untersuchung einer Zementverfestigung*

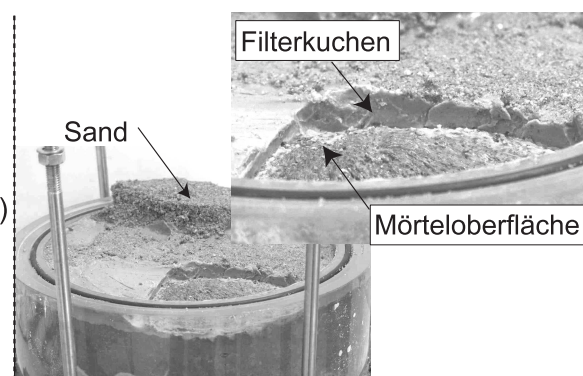


Bild 6.11: *Untersuchung auf Zementverfestigung des Filterkuchens*

Nach einer eingehenden Untersuchung wird keine Verfestigung des Filterkuchens in Folge eindringender Zementschlämme aus dem Beton festgestellt. Es ist keine rote Färbung

des Filterkuchens durch eingedrungene Zementteilchen zu beobachten, Bild 6.11. Der Bentonitfilterkuchen löst sich ohne Probleme von der klar definierten Mörteloberfläche. Es wird daher von keiner Zementverfestigung des Filterkuchens ausgegangen.

6.6 Kontrollversuche und Schlussfolgerung

Ogleich die Untersuchung der SW-Probekörper auf ein Scherversagen im Filterkuchen hinweisen, ergeben die Versuche SW-BSP_{*i*} eine Winkel der Gesamtscherfestigkeit, der mit $\varphi'_s = 22,9^\circ$ deutlich höher als der des reinen Bentonitmaterials FK-BSP ist. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit des reinen Bentonitmaterials liegt bei $\varphi'_s = 10,1^\circ$. Die Diskrepanzen sind hiermit zu groß um sie auf unterschiedliche Gerätekonstruktionen zurückzuführen ("Schlitzwandelementversuche": Großrahmenschergerät nach DIN 18137-3 [16] Bild 1 b; Bentonitmaterials FK-BSP: Rahmenschergerät nach DIN 18137-3 [16] Bild 1 a). Ferner wird im Kapitel 6.5 eine Zementverfestigung ausgeschlossen, so dass die Abweichungen anderweitig begründet werden müssen.

Ein Versuchsprogramm K-SW_{*i*} wird mit dem Rahmenschergerät nach DIN 18137-3 [16] Bild 1 a, Abmessungen: B x L x H = 100 x 100 x 20 mm, durchgeführt. Es kommt

Tabelle 6.5: Versuchsprogramm und Versuchsbezeichnungen der Versuche K-SW_{*i*}

Versuchsbezeichnung	Dicke des Filterkuchens FK-BSP <i>H</i> [mm]	Verhältnis <i>FK-H</i> / <i>FK-L</i> [-]	Zementkörperhöhe [mm]	Normalspannung σ [kPa]
K-SW1	4	0,04	8	40
K-SW2	4	0,04	8	80
K-SW3	4	0,04	8	160
K-SW4	6	0,06	6	80
K-SW5	14	0,14	6	80
Großrahmenschergerät B x L x H = 300 x 300 x 100:				
SW-BSP _{<i>I</i>}	8 bis 13	0,05	44	80
SW-BSP _{<i>II</i>}	25	0,083	44	100
Vergleich:				
SW-BSP _{1 bis 3}	2 bis 8 ⇒ Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\varphi'_s = 22,9^\circ$	0,007 - 0,027	46	
SV-BSP _{1 bis 10}	20 ⇒ Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\varphi'_s = 10,1^\circ$	0,2	0	

somit das selbe Gerät wie bei den Versuchen SV-BSP_i zum Einsatz. Untersucht wird das Verhältnis der Filterkuchenhöhe zu Filterkuchenlänge, welches in den "Schlitzwandelementversuchen" bei ca. $FK-H / FK-L = 2 \text{ bis } 8 \text{ mm} / 300 \text{ mm} = 0,007 \text{ bis } 0,027$ liegt.

In die untere Rahmenhälfte wird ein Zementkörper auf eine Sandfläche gegossen, der somit eine ausreichende Rauigkeit besitzt. Der Zementkörper besitzt anfangs eine Höhe von 8 mm und endet 2 mm unter der Rahmenoberkante. Darüber wird eine ca. $FK-H = 4 \text{ mm}$ dicke Filterkuchenschicht FK-BSP aufgebracht und in die verbleibende obere Rahmenhälfte der Sand eingerieselt. In den weiteren Versuchen wird dann die Filterkuchendicke und Zementkörperhöhe variiert, Tabelle 6.5.

Ferner werden zwei Versuche (SW-BSP_I und SW-BSP_{II}) im Großrahmenschergerät durchgeführt, bei denen analog zu Kapitel 6.4.2 die Filterkuchenschicht FK-BSP manuell auf den fertigen Zementkörper aufgebracht wird. Der Filterkuchen ist mit fünf schmalen schwarz eingefärbten Streifen versehen.

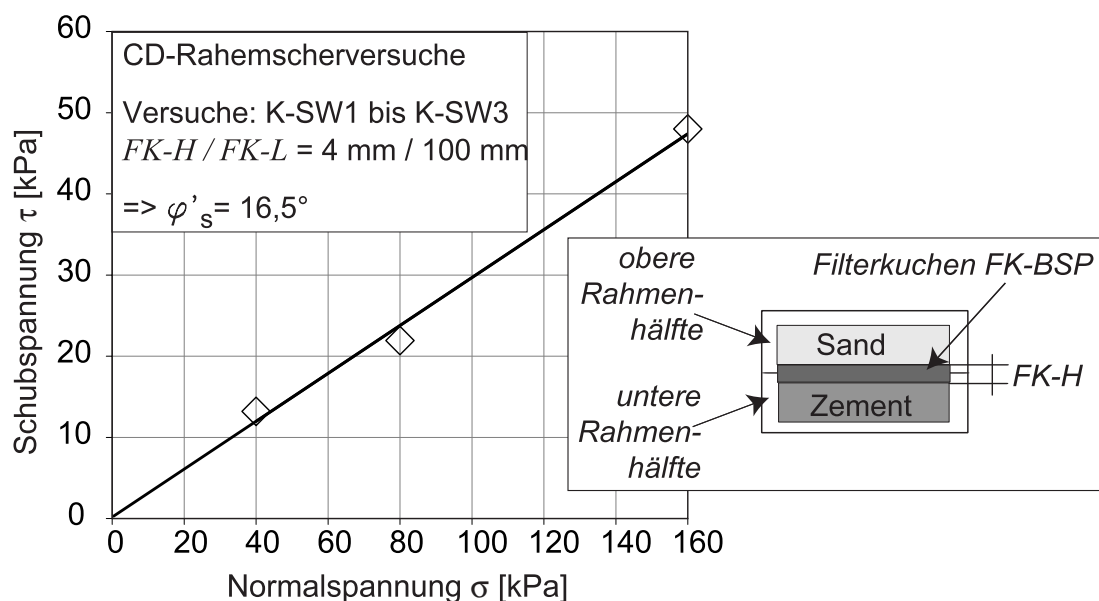


Bild 6.12: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s , Versuche K-SW1 bis K-SW3

Der in den Versuchen K-SW1 bis K-SW3 ermittelte Winkel der Gesamtscherfestigkeit liegt bei $\varphi'_s = 16,5^\circ$. Damit ist die Scherfestigkeit auch hier höher als die des Filterkuchenmaterials FK-BSP, Bild 6.12, jedoch kleiner als die der Versuche SW-BSP_i mit $\varphi'_s = 22,9^\circ$.

Das Verhältnis $FK-H / FK-L$ ist in den Versuchen K-SW1 bis K-SW3 allerdings geringer als in den Versuchen SW-BSP_i. Die Vermutung liegt nahe, dass die Dicke $FK-H$ der Filterkuchenschicht bzw. das Verhältnis $FK-H / FK-L$ die Scherfestigkeit beeinflusst. Die geringe Dicke $FK-H$ gegenüber der Probenlänge $FK-L$ wirkt sich auf die Ausbildung der Scherfuge während des Schervorganges aus. Die Scherfuge wird gewissermaßen gezwungen sich innerhalb der vorhandenen Schichtdicke auszubilden, wodurch Zwängungen entstehen, die den Winkel der Gesamtscherfestigkeit erhöhen. Die Versuche K-SW4 und K-SW5 bestätigen, dass umso größer das Verhältnis $FK-H / FK-L$ wird umso mehr nähert sich die Scherfestigkeit der Systemversuche K-SW_i der des Filterkuchenmaterials FK-BSP an, siehe Bild 6.13.

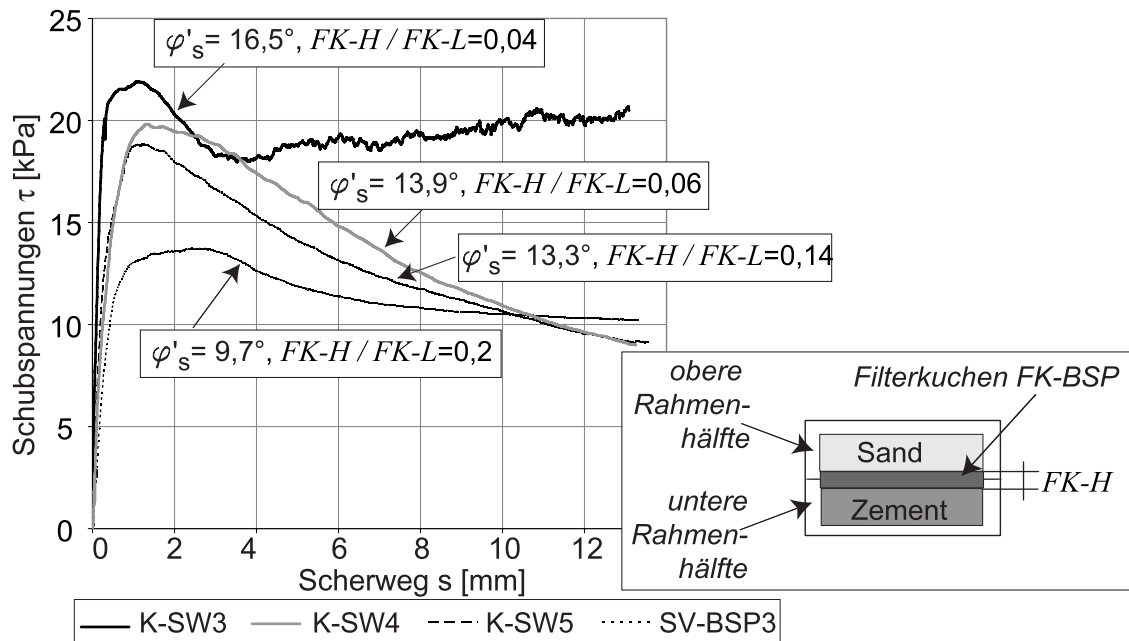


Bild 6.13: Scherspannungs-Verformungsverhalten, Versuche K-SW3 bis K-SW5 und FK-BSP5

Ferner werden die zwei Versuche SW-BSP_I und SW-BSP_{II} im Großrahmenschergerät ausgeführt. Zumal die Versuche normalkonsolidiert durchgeführt werden reicht theoretisch ein Versuch um den Winkel der Gesamtscherfestigkeit zu ermitteln (verbinden mit den Ursprung). Im Versuch SW-BSP_I beträgt die Filterkuchendicke $FK-H = 8$ bis 13 mm, woraus ein Winkel der Gesamtscherfestigkeit von $\varphi'_s = 12,7^\circ$ resultiert. Der Versuch SW-BSP_{II}, in dem der Filterkuchen mit $FK-H = 25$ mm deutlich dicker ist, ruft einen Winkel der Gesamtscherfestigkeit von $\varphi'_s = 10,5^\circ$ hervor.

Bild 6.14 zeigt den freigelegten Probekörper des Versuchs SW-BSP_I. Der Versatz in den schwarz eingefärbten Streifen weist auf den Verlauf der Scherfuge im Filterkuchen, geringfügig oberhalb der Mörteloberfläche, hin.

Bestätigt wird, dass die Dicke $FK-H$ der Filterkuchenschicht bzw. das Verhältnis $FK-H / FK-L$ die ermittelte Scherfestigkeit beeinflusst. Dieser Einfluss resultiert jedoch aus der Konstruktion der Rahmenschergeräte und deren Scherfugenausbildung und nicht aus dem Scherverhalten der Filterkuchenmaterialien.

Auf der Basis der hier durchgeführten Versuche ist der Filterkuchen das schwächste Glied der Kontaktzone Boden-Schlitzwand. Die Scherfestigkeit des Filterkuchens wird daher innerhalb dieses ideellen Schichtensystems unter analogen Randbedingungen für das Wandreibungsverhalten maßgebend.

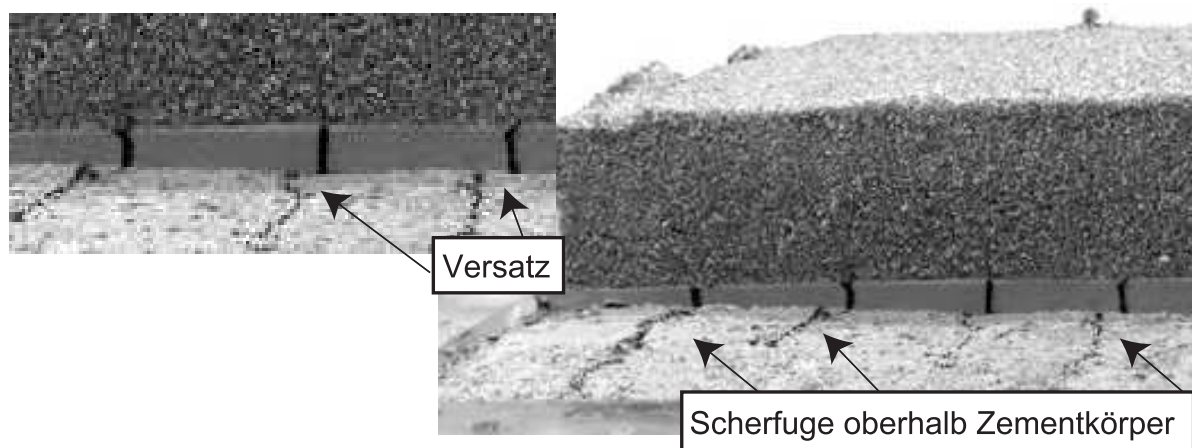


Bild 6.14: Scherfugenverlauf, Versuch SW-BSP_I

Kapitel 7

Der kompressible Filterkuchen

Der Filterkuchen an der Erdwandung beim Bau einer suspensionsgestützten Ortbetonwand entsteht aus den Feststoffen in der Stützsuspension. Die Suspension dringt unter dem Einfluss eines Druckgradienten anfangs in den anstehenden Boden ein und stagniert primär wegen ihrer Fließgrenze im Erdreich. An der Erdwandung setzt daraufhin der Filtrationsprozess ein, wobei das Wasser der Suspension in den Boden abfiltriert und die Feststoffe der Suspension zurückgehalten werden. Die abgelagerten Partikeln bilden den so genannten Filterkuchen, an dessen Oberfläche im weiteren Verlauf neue Feststoffe abgeschieden werden, so dass er stetig an Dicke gewinnt.

Filterkuchen werden häufig als starr und inkompressibel angesehen. Basierend darauf ist z.B. auch Gleichung 2.9 im Kapitel 2.3 für die Berechnung der kontinuierlichen Kuchenbildung infolge der Zeit hergeleitet worden, die im Kapitel 5 zur Anwendung kommt. Auch in der industriellen Prozesstechnik werden die Filterkuchen meist als inkompressible Haufwerke idealisiert, obwohl sie eher die Ausnahme als die Regel sind. Konkrete Leitlinien für Filtrationsprozesse mit kompressiblen Kuchen werden in der Praxis vermisst. So wird immer wieder auf einfache Auslegungsgleichungen zurückgegriffen, die streng genommen nur für den inkompressiblen Fall gelten. Die Besonderheiten kompressibler Filterkuchen können damit nicht erfasst werden. Demzufolge treten Unsicherheiten und Fehler z.B. bei der Prozessauslegung auf, Alles [1]. Die komplizierten theoretischen Modelle, wie sie beispielsweise Tiller et al. [103] und Shirato et al. [94] entwickelten, haben kaum Eingang in die Praxis gefunden.

Charakteristisch für kompressible Filterkuchen ist die Ausbildung einer stark konsolidierten Grundschicht am Filtermedium. Diese Schicht hat eine geringe Durchlässigkeit. Im

Vergleich dazu ist der restliche Filterkuchen porös und von geringer mechanischer Festigkeit, Tiller [102]. Der Filterkuchen ist demnach kein homogenes Material, sondern seine Eigenschaften ändern sich über die Dicke. Die Porenzahl, Wassergehalt und Durchlässigkeit sowie die damit verbundenen weiteren Materialparameter sind nicht konstant.

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit des Filterkuchens als schwächstes Glied des Bodenschlitzwandsystems anhand weiterer Überlegungen, sind Kenntnisse über seine Zusammensetzung und seinen Aufbau in der gegenständlichen Form erforderlich. Die im Schlitz verweilende Stützsuspension wird durch den Frischbeton von unten nach oben verdrängt. Es folgt eine kurzzeitige Konsolidierung des Filterkuchens durch den Frischbeton bis zu dessen Abbinden. Der Prozess der Konsolidierung beeinflusst die Größe der Scherfestigkeit auf Grund der vom Überkonsolidierungszustand abhängigen Kohäsion, Krey-Tiedemann, Gleichung 2.17. Die Ermittlung der Konsolidierungsverhältnisse unter dem Frischbetondruck setzt voraus, dass die Eigenschaften und der Aufbau des Filterkuchens vor dem Verdrängungsprozess der Suspension bekannt sind. Hierzu wird ein Modell entwickelt, welches die Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens simuliert.

7.1 Modell zur Entstehung des Filterkuchens

Die Beschaffenheit des Filterkuchens, seine Dicke über die Zeit sowie die Filtration der Suspension durch den Filterkuchen hindurch in das Erdreich wird in Kapitel 5 experimentell untersucht. Ferner wird über die Messung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens (Durchfluss Q) die zeitliche Veränderung der Filterkuchendicke h_K mit dem analytischen Ansatz von Weiß [118] bzw. Schweiger [93], siehe Gleichung 2.9, ermittelt und mit der gemessenen Dicke verglichen. Weiß [118] geht auch vereinfacht von einem inkompressiblen Filterkuchen aus. In Folge einer Massenbilanz lässt sich durch die Feststoffkonzentration der Suspension die auf dem Filtrationsprozess beruhende Filterkuchensubstanz bestimmen. Auf Grund einer vorgegebenen Porenzahl kann die Lagerung der Feststoffe und daraus die Dicke des Filterkuchens abgeleitet werden. Im Kapitel 5 wird zur Berechnung der Filterkuchendicke über die Zeit der gemessene Durchfluss mit der für den Versuchszustand bestimmten Porenzahl kombiniert. Diese gemessene Porenzahl stellt einen Mittelwert der Feststofflagerung über die Filterkuchendicke dar. Aussagen über den Verlauf der Porenzahl über die Dicke sind daher nicht möglich. Die Versuchsergebnisse aus Kapitel 5 zeigen jedoch, dass mit der vorgegebenen mittleren Porenzahl das Anwachsen der Filterkuchendicke in Abhängigkeit der Zeit, zufrieden stellend wiedergegeben wird.

Die Eingangsparameter in das Modell zur Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens werden aus den Versuchen von Kapitel 5 gewonnen. Zum einen wird das aus der Suspension durch den bestehenden Filterkuchen hindurch in den Boden abfiltrierte Wasservolumen über die Zeit berücksichtigt sowie zum anderen die mittlere Porenzahl des Filterkuchens im Versuchendzustand. Das Modell sieht wie bei z.B. bei Thiller [104] oder Alles [1] vor, den Filterkuchen in n Schichten zu diskretisieren, wobei jede Schicht mit einer Entstehungszeit t_i korrespondiert, $t_i > 0$, $i \in \mathbb{N}$ und $n \in \{1 \dots i\}$. Der Index A steht für den Anfangszeitpunkt und E für den Endzeitpunkt eines Schrittes. Die Zeitpunkte werden so gewählt, dass die Filterkuchendicke $d_{FK,ges}(t_i)$, die auf der Bodenoberfläche beginnend in Richtung des offenen Schlitzes anwächst, sich pro Zeitschritt in etwa verdoppelt. Die Druckhöhe Δh_{ges} , die über die Filterkuchendicke $d_{FK,ges}(t_i)$ abgebaut werden muss, bleibt über den gesamten Zeitraum konstant und berechnet sich mit dem Suspensionsüberdruck Δp und der Wichte des Wassers γ_w zu:

$$\Delta h_{ges} = \frac{\Delta p}{\gamma_w} = \textit{konstant} \quad (7.1)$$

Schritt 1: Filterkuchen aus einer Schicht zum Zeitpunkt t_1 :

Aus dem experimentell bestimmten mittleren Durchfluss Q_1 für den Zeitraum $t = 0$ bis t_1 wird mit Gleichung 2.9, für ein inkompressibles Material, die Filterkuchendicke $d_{FK,1,A}(t_1)$ für den Zeitpunkt t_1 berechnet. Die Filterkuchendicke $d_{FK,1,A}(t_1)$ entspricht für den ersten Schritt der Gesamtdicke des Filterkuchens $d_{FK,ges,A}(t_1)$. Des Weiteren

Schritt 1 zum Zeitpunkt t_1

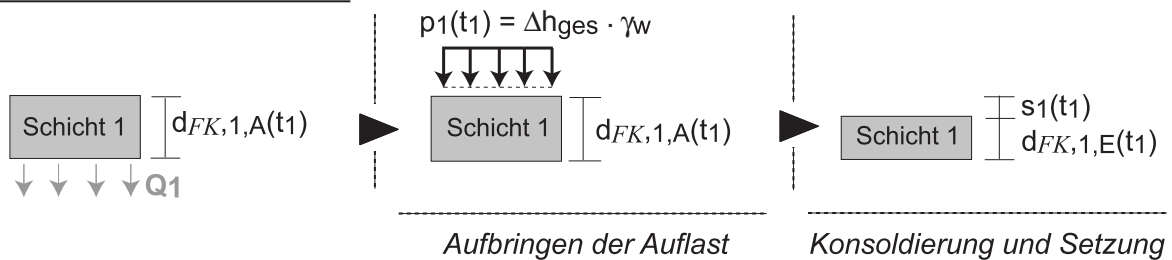


Bild 7.1: Modell zur Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens, Schritt 1

ist in diesem Schritt die Druckhöhe der ersten Schicht $\Delta h_1(t_1)$ adäquat der Druckhöhe Δh_{ges} , d.h. $\Delta h_1(t_1) = \Delta h_{ges}$. Der hydraulische Gradient der Schicht 1 zum Zeitpunkt t_1 berechnet sich demnach zu:

$$i_{1,A}(t_1) = \frac{\Delta h_1(t_1)}{d_{FK,1,A}(t_1)} = \frac{\Delta h_{ges}}{d_{FK,1,A}(t_1)} \quad (7.2)$$

Mit der Kontinuitätsgleichung kann die Durchlässigkeit $k_{1,A}$ der Schicht 1 zum Zeitpunkt t_1 bestimmt werden:

$$Q_1 = k_{1,A} \cdot i_{1,A}(t_1) \cdot A \quad (7.3)$$

Aus der Durchlässigkeit $k_{1,A}(t_1)$ kann wiederum die Porenzahl $e_{1,A}(t_1)$ der Schicht 1 abgeschätzt werden. Hierfür wird der Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Porenzahl von Taylor [100] gewählt der auf der Kozeny-Carmen Beziehung (Kozeny [45] und Carmen [7]) basiert:

$$k = C_1 \cdot \frac{e^3}{1 + e} \quad (7.4)$$

Der Parameter C_1 ist eine Konstante und wird aus den Oedometerversuchen im Anhang IV analog zu Das [9] mit $C_1 = 1,71 \cdot 10^{-10}$ ermittelt.

Die Schicht 1 wird dann an der Oberfläche mit der Auflast $p_1(t_1)$ belastet.

$$p_1(t_1) = \Delta h_1(t_1) \cdot \gamma_w = \Delta h_{ges} \cdot \gamma_w \quad (7.5)$$

Über den Konsolidierungsbeiwert c_v kann der Zeitpunkt t bestimmt werden, bei dem der Filterkuchen unter der Auflast $p_1(t_1)$ auskonsolidiert ist. Hierfür wird die bezogene Konsolidierungszeit $T_v = 1$ gesetzt.

$$c_v = \frac{k \cdot E_s(\sigma')}{\gamma_w} \quad (7.6)$$

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} = 1 \quad (7.7)$$

Der spannungsabhängige Steifemodul wird auch aus den Oedometerversuchen im Anhang IV ermittelt:

$$E_s(\sigma') = \frac{1}{C_c} \cdot (1 + e_0) \cdot \sigma' = \frac{1}{0,1697} \cdot (1 + 0,8446) \cdot \sigma' \quad (7.8)$$

Eine eindimensionale Konsolidierung von Mehr-Schicht-Systemen kann geschlossen analytisch nicht mehr erfasst werden, sodass für die Konsolidierungsrechnung der folgenden Schritte das Finite-Elemente Programm ABAQUS eingesetzt wird. Die numerische Berechnung der eindimensionalen Konsolidierung beruht auf der Terzaghi-Theorie [101], siehe [38, 37]. Es zeigt sich aus den FE-Berechnungen in Kapitel 7.2, dass die einzelnen

Filterkuchenschichten n für jeden Schritt i vollständig auskonsolidiert sind. Auch bei Veränderung der Schrittzeitdauer Δt erweisen sich die einzelnen Schichten als auskonsolidiert, da sich bei z.B. kleineren Schrittzeitspannen gleichzeitig auch die Anfangsschichtdicken $d_{FK,i,A}(t_i)$ reduzieren.

Die Setzungsberechnung jeder Schicht n im Schritt i erfolgt so mit $p_n(t_i)$ als effektive Spannung σ' . Die Setzungen $s_1(t_1)$ der Schicht 1 berechnen sich daher mit $p_1(t_1) = \sigma'$ zu:

$$s_1(t_1) = \frac{p_1(t_1) \cdot d_{FK,1,A}(t_1)}{E_s(\sigma' = p_1(t_1))} \quad (7.9)$$

Daraus wird die neue Filterkuchendicke $d_{FK,1,E}(t_1)$ bestimmt, mit:

$$d_{FK,1,E}(t_1) = d_{FK,1,A}(t_1) - s_1(t_1) \quad (7.10)$$

Analog zu den Gleichungen 7.2 und 7.3 lässt sich aus der neuen Filterkuchendicke der Schicht 1 der neue hydraulische Gradient $i_{1,E}(t_1)$ und aus der Kontinuitätsgleichung die neue Durchlässigkeit $k_{1,E}(t_1)$ ermitteln, aus der wiederum die neue Porenzahl $e_{1,E}(t_1)$ abgeleitet werden kann, Gleichung 7.4.

Schritt 2: Filterkuchen aus zwei Schichten zum Zeitpunkt t_2 :

Bekannt ist der experimentell ermittelte mittlere Durchfluss Q_2 über den Zeitraum Δt_{1-2} ($\Delta t_{1-2} = t_2 - t_1$) sowie die aus Gleichung 2.9 berechnete Filterkuchendicke $d_{FK,ges,A}(t_2)$ für den Zeitpunkt t_2 .

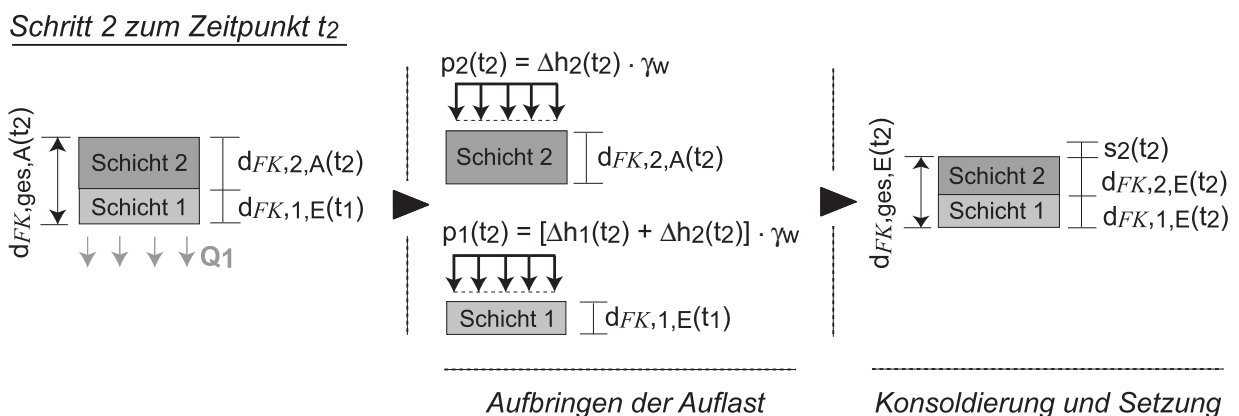


Bild 7.2: Modell zur Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens, Schritt 2

Die Dicke $d_{FK,2,A}(t_2)$ der Schicht 2 berechnet sich zu:

$$d_{FK,2,A}(t_2) = d_{FK,ges,A}(t_2) - d_{FK,1,E}(t_1) \quad (7.11)$$

Die Druckhöhe der Schicht 1 $\Delta h_1(t_2)$ für den Zeitpunkt t_2 wird mit der Kontinuitätsgleichung bestimmt:

$$\Delta h_1(t_2) = \frac{Q_2 \cdot d_{FK,1,E}(t_1)}{A \cdot k_{1,E}(t_1)} \quad (7.12)$$

und mit $\Delta h_{ges} = \text{konstant}$ kann dann die Durchlässigkeit $k_{2,A}(t_2)$ der Schicht 2 ermittelt werden:

$$k_{2,A}(t_2) = \frac{Q_2 \cdot d_{FK,2,A}(t_2)}{A \cdot (\Delta h_{ges} - \Delta h_1(t_2))} \quad (7.13)$$

Mit der Durchlässigkeit $k_{2,A}(t_2)$ der Schicht 2 wird die Druckhöhe $\Delta h_2(t_2)$

$$\Delta h_2(t_2) = \frac{Q_2}{A} \cdot \frac{d_{FK,2,A}(t_2)}{k_{2,A}(t_2)} \quad (7.14)$$

und daraus analog zu Schritt 1 der hydraulische Gradient $i_{2,A}(t_2)$ sowie die Porenzahl $e_{2,A}(t_2)$ errechnet. Die Schicht 2 wird dann an der Oberfläche mit der Auflast:

$$p_2(t_2) = \Delta h_2(t_2) \cdot \gamma_w \quad (7.15)$$

belastet und auf die Oberseite der Schicht 1 die Einwirkung $p_1(t_2)$ aufgebracht.

$$p_1(t_2) = \Delta h_1(t_2) \cdot \gamma_w + \Delta h_2(t_2) \cdot \gamma_w = \Delta h_{ges} \cdot \gamma_w \quad (7.16)$$

Schicht 1 ist schon im Schritt 1 für die maximale Auflast $\Delta h_{ges} \cdot \gamma_w$ auskonsolidiert, so dass keine weiteren Setzungen entstehen. Die Schicht 2 hingegen wird sich noch unter der Einwirkung $p_2(t_2)$ setzen. Die Setzung $s_2(t_2)$ wird analog zu $s_1(t_1)$ Gleichung 7.9 berechnet und daraus die neue Dicke $d_{FK,2,E}(t_2)$ der Schicht 2 bestimmt. Hierfür wird der Konsolidierungsprozess der Schichten, wie im Schritt 1 beschrieben, numerisch simuliert, siehe Kapitel 7.2.

Mit der Filterkuchendicke $d_{FK,2,E}(t_2)$ der Schicht 2 lässt sich der neue hydraulische Gradient $i_{2,E}(t_2)$ und aus der Kontinuitätsgleichung die neue Durchlässigkeit $k_{2,E}(t_2)$ ermitteln, mit der wiederum die Porenzahl $e_{2,E}(t_2)$ abgeschätzt wird.

Schritt 3: Filterkuchen aus drei Schichten zum Zeitpunkt t_3 :

Eingangsparameter ist der mittlere Durchfluss Q_3 über den Zeitraum Δt_{2-3} ($\Delta t_{2-3} = t_3 - t_2$), sowie die aus Gleichung 2.9 berechnete Filterkuchendicke $d_{FK,ges,A}(t_3)$ für den Zeitpunkt t_3 .

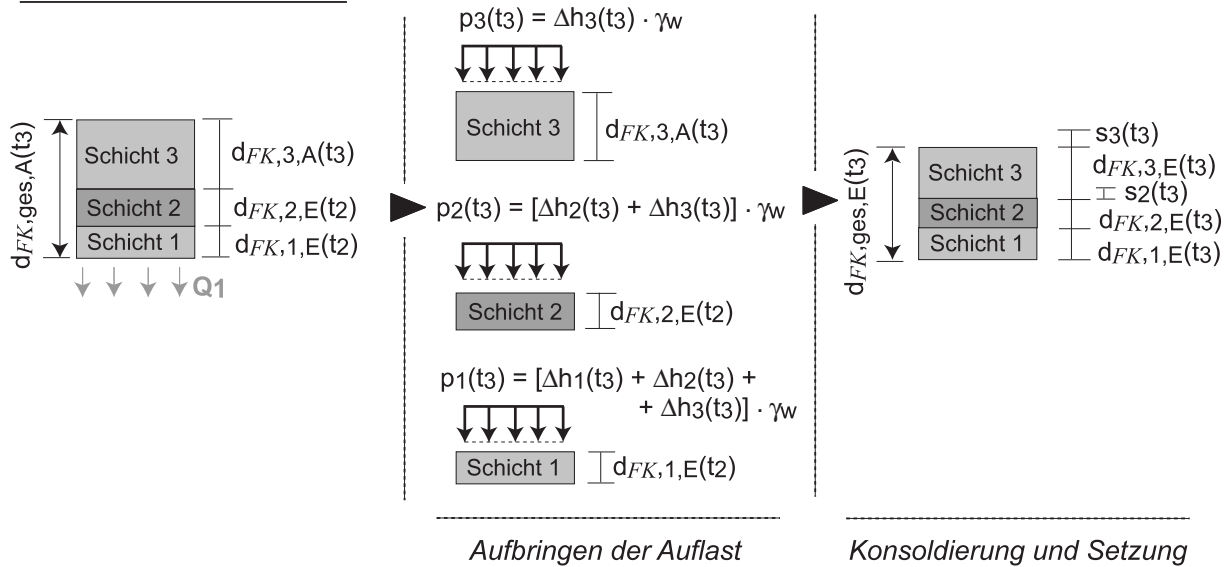
Schritt 3 zum Zeitpunkt t_3 

Bild 7.3: Modell zur Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens, Schritt 3

Die Dicke $d_{FK,3,A}(t_3)$ der Schicht 3 ergibt sich somit zu:

$$d_{FK,3,A}(t_3) = d_{FK,ges,A}(t_3) - d_{FK,1,E}(t_2) - d_{FK,2,E}(t_2) \quad (7.17)$$

Die Druckhöhe der Schicht 1 $\Delta h_1(t_3)$ für den Zeitpunkt t_3 berechnet sich über die Kontinuitätsgleichung:

$$\Delta h_1(t_3) = \frac{Q_3 \cdot d_{FK,1,E}(t_2)}{A \cdot k_{1,E}(t_2)} \quad (7.18)$$

Ebenso wird die Druckhöhe der Schicht 2 über die Kontinuitätsgleichung hergeleitet:

$$\Delta h_2(t_3) = \frac{Q_3 \cdot d_{FK,2,E}(t_2)}{A \cdot k_{2,E}(t_2)} \quad (7.19)$$

und mit $\Delta h_{ges} = \text{konstant}$ kann dann die Durchlässigkeit $k_{3,A}(t_3)$ der Schicht 3 ermittelt werden:

$$k_{3,A}(t_3) = \frac{Q_3 \cdot d_{FK,3,A}(t_3)}{A \cdot (\Delta h_{ges} - \Delta h_1(t_3) - \Delta h_2(t_3))} \quad (7.20)$$

Mit der Durchlässigkeit $k_{3,A}(t_3)$ der Schicht 3 wird die Druckhöhe $\Delta h_3(t_3)$ sowie die Porosität $e_{3,A}(t_3)$ analog zu Schritt 1 und Schritt 2 ermittelt. Die Schicht 3 wird dann an der Oberfläche mit der Auflast:

$$p_3(t_3) = \Delta h_3(t_3) \cdot \gamma_w \quad (7.21)$$

belastet, die Schicht 2 mit:

$$p_2(t_3) = \Delta h_2(t_3) \cdot \gamma_w + \Delta h_3(t_3) \cdot \gamma_w \quad (7.22)$$

und auf die Oberfläche der Schicht 1 wird die Einwirkung $p_1(t_3)$ aufgebracht.

$$p_1(t_3) = \Delta h_1(t_3) \cdot \gamma_w + \Delta h_2(t_3) \cdot \gamma_w + \Delta h_3(t_3) \cdot \gamma_w = \Delta h_{ges} \cdot \gamma_w \quad (7.23)$$

Da Schicht 1 schon im Schritt 1 mit der maximale Einwirkung $\Delta h_{ges} \cdot \gamma_w$ beansprucht und auskonsolidiert worden ist, entstehen auch in diesen Schritt keine weiteren Setzungen. Die Schicht 2 ist im Schritt 2 unter einer Auflast von $p_2(t_2)$ auskonsolidiert worden und hat sich daher unter dieser Einwirkung gesetzt, so dass im Schritt 3 nur noch die Setzungen aus $p_2(t_3) - p_2(t_2)$ hinzukommen. Die Schicht 3 setzt sich unter der vollen Auflast $p_3(t_3)$. Die Setzungen $s_2(t_3)$ und $s_3(t_3)$ werden mit den maßgebenden Einwirkungen analog zu Schritt 1 bzw. Schritt 2 berechnet und daraus die neuen Dicken $d_{FK,2,E}(t_3)$ und $d_{FK,3,E}(t_3)$ bestimmt. Aus den neuen Schichtdicken werden die neuen hydraulischen Gradienten $i_{2,E}(t_3)$ und $i_{3,E}(t_3)$ sowie aus der Kontinuitätsgleichung die neuen Durchlässigkeiten $k_{2,E}(t_3)$ und $k_{3,E}(t_3)$ ermittelt. Demzufolge können die neuen Porenzahlen $e_{2,E}(t_3)$ und $e_{3,E}(t_3)$ abgeschätzt werden.

Dieses Verfahren wird bis zum Versuche, dass dem Zeitpunkt des Betonierbeginns und damit dem der Suspensionsverdrängung durch den Frischbeton entspricht, solange weitergeführt, bis der Filterkuchen vollständig aufgebaut ist. Mittels der Modellierung der Filterkuchenbildung kann die Verteilung der Durchlässigkeit, Dichte und Porenzahl über die Dicke abgeschätzt werden. Im folgenden Kapitel kommt das Modell zur Anwendung.

7.2 Porenzahl und Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke

Das im Kapitel 7.1 hergeleitete Modell zur Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens kommt für die Ermittlung der Porenzahl- und Durchlässigkeitsverteilung über die Filterkuchendicke zum Einsatz. Angewandt wird das Modell auf die Versuche ohne Filterpapier mit einer Suspensionsdichte von $\rho_F = 1,15 \text{ g/cm}^3$ aus Kapitel 5, Versuche: V-SP1, V-SP3-1, V-SP4 und V-SP5. Anlage III zeigt die Berechnung mit den Zwischenergebnissen.

Die am Versuche gemessenen Porenzahlen und Durchlässigkeiten sind Mittelwerte über die Filterkuchendicke, Kapitel 5. Als grobe Überprüfung der Berechnungsergebnisse des

Modells werden die gemessenen Endporenzahlen e und Enddurchlässigkeiten k mit den Ergebnissen aus dem Modell verglichen. Dafür müssen die aus dem Modell berechneten Endporenzahlen und Enddurchlässigkeiten noch über die Schichtdicken gemittelt werden, siehe $e_{E,gem}(t_i)$ und $k_{E,gem}(t_i)$ in den Gleichungen 7.24 und 7.25 .

Die Abweichungen der Werte aus den Versuchen mit denen der Modellberechnung betragen max 12%, Tabelle 7.1, und liegen damit im Rahmen versuchsüblicher Abweichungen.

$$e_{E,gem}(t_i) = \frac{1}{d_{FK,ges,E}(t_i)} \cdot (e_{1,E}(t_i) \cdot d_{FK,1,E}(t_i) + \dots + e_{n,E}(t_i) \cdot d_{FK,n,E}(t_i)) \quad (7.24)$$

$$k_{E,gem}(t_i) = \frac{1}{d_{FK,ges,E}(t_i)} \cdot (k_{1,E}(t_i) \cdot d_{FK,1,E}(t_i) + \dots + k_{n,E}(t_i) \cdot d_{FK,n,E}(t_i)) \quad (7.25)$$

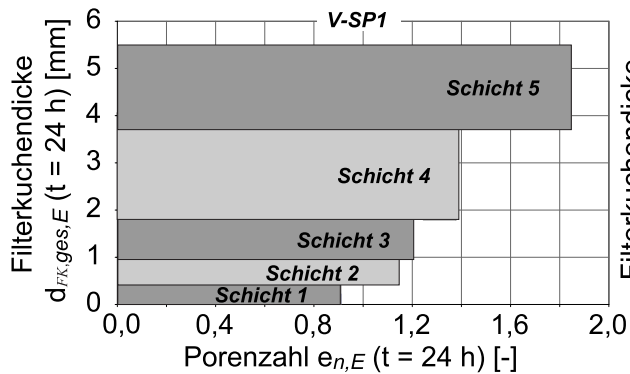


Bild 7.4: Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke, FK-SP1

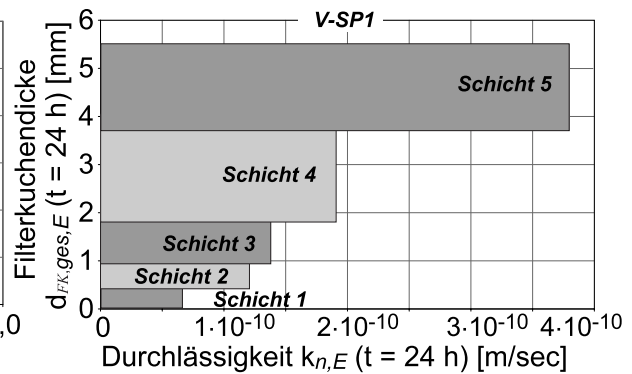


Bild 7.5: Verlauf der Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke, FK-SP1

Tabelle 7.1: Porenzahlen und Durchlässigkeiten der Filterkuchen FK-SP_i aus den Versuchen, Modell sowie der FE-Berechnung (Elastic: E_s=600 kPa)

	Versuch		Modell		ABAQUS Elastic	ABAQUS Cam Clay
	e [-]	k [m/sec]	$e_{E,gem}(t_i)$ [-]	$k_{E,gem}(t_i)$ [m/sec]	$e_{E,gem}(t_i)$ [-]	$e_{E,gem}(t_i)$ [-]
V-SP1	1,650	$2,4 \cdot 10^{-10}$	1,453	$2,3 \cdot 10^{-10}$	1,472	1,430
V-SP3-1	1,573	$2,9 \cdot 10^{-10}$	1,575	$2,8 \cdot 10^{-10}$	1,570	1,555
V-SP4	1,685	$3,0 \cdot 10^{-10}$	1,534	$2,5 \cdot 10^{-10}$	1,543	1,504
V-SP5	1,922	$4,0 \cdot 10^{-10}$	1,915	$4,2 \cdot 10^{-10}$	1,937	1,922

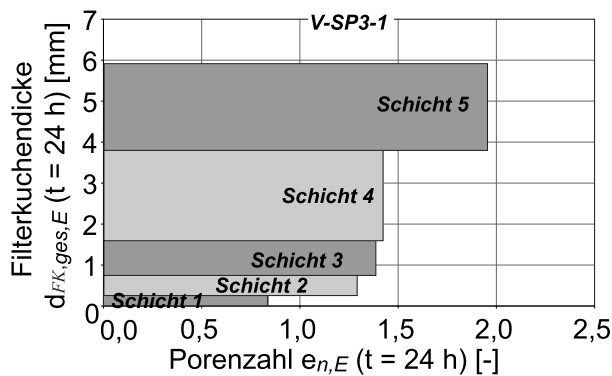


Bild 7.6: Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke, FK-SP3-1

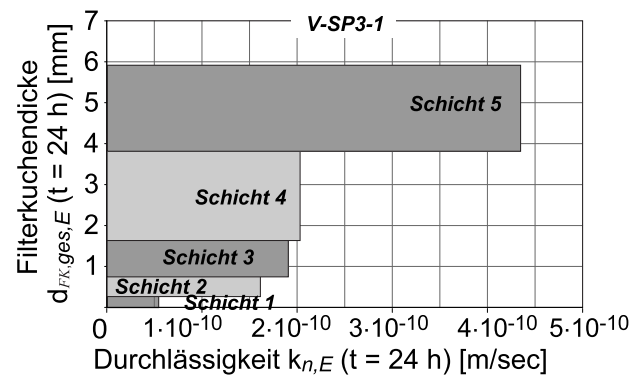


Bild 7.7: Verlauf der Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke, FK-SP3-1

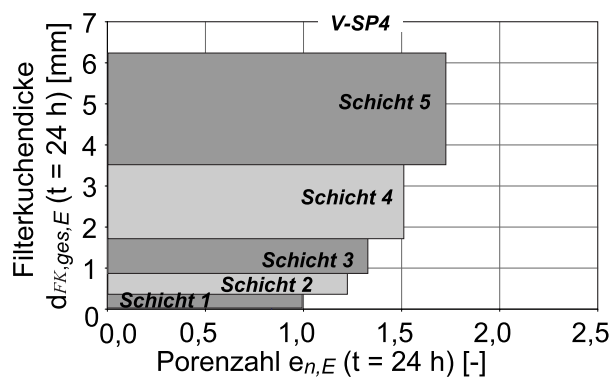


Bild 7.8: Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke, FK-SP4

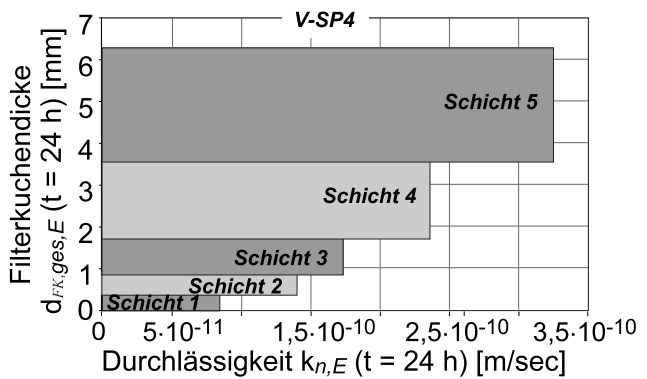


Bild 7.9: Verlauf der Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke, FK-SP4

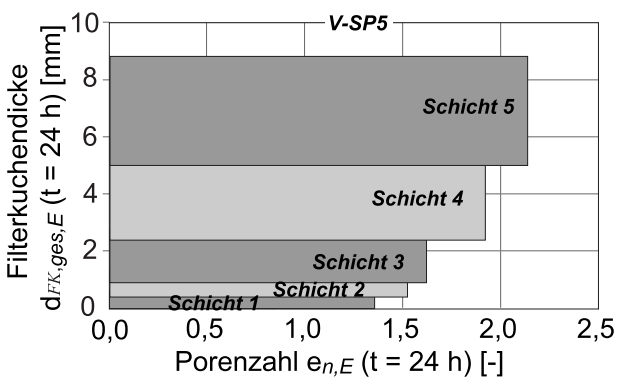


Bild 7.10: Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke, FK-SP5

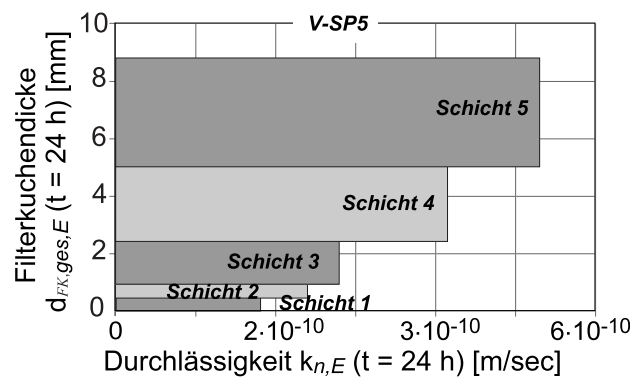


Bild 7.11: Verlauf der Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke, FK-SP5

Die Bilder 7.4 bis 7.11 zeigen die aus dem Modell ermittelten Porenzahl- und Durchlässigkeitsverläufe über die Filterkuchendicke. Die unterste Schicht besitzt jeweils auf Grund des größten hydraulischen Gradienten die kleinste Porenzahl und Durchlässigkeit und bestätigt die Beobachtung von Tiller [102].

Da eine eindimensionale Konsolidierung von Mehr-Schicht-Systemen nicht geschlossen analytisch erfasst werden kann, wird für die Versuche V-SP1, V-SP3-1, V-SP4 und V-SP5 die Modellberechnung mit dem Finite-Elemente Programm ABAQUS simuliert. Die FE-Berechnungen zeigen, dass jede Schicht in jeden Schritt unter der vorhandenen Einwirkung vollständig auskonsolidiert ist. Daher dienen die numerischen Berechnungen in erster Linie nur einer Kontrolle.

In der numerischen Simulation der Filterkuchenbildung werden die Schichten des Filterkuchens nacheinander in so genannten STEP's aufgebracht. Ein STEP korrespondiert mit einem Schritt im Berechnungsmodell. Daher entspricht auch die STEP-Dauer immer der jeweiligen Schrittdauer Δt_i . Die Geometrie, Porenzahl und Durchlässigkeit jeder neuen Schicht eines STEP's werden der Modellrechnung entnommen. Als Randbedingung wird angenommen, dass der Filterkuchen nur einseitig an der Erdseite, d.h. in Richtung der Strömung, entwässern kann und daher dort der Porenwasserüberdruck gleich Null ist, $u = 0 \text{ kPa}$ im Bild 7.12.

Beginnend bei der Schicht 1, die in ihrem Anfangszustand modelliert wird, wird im STEP 1 auf die obere Schichtgrenze innerhalb einer Sekunde die gesamte Einwirkungsgröße $p_1(t_1)$ als Flächenlast aufgebracht. Anschließend erfolgt die Konsolidierung über die STEP-Dauer t_1 . Im folgenden STEP wird dann die nächste Schicht 2 mit ihren entsprechenden Ausgangsmaterialparametern hinzugefügt. Das neue Belastungsniveau der beiden Schichten wird wiederum der Modellrechnung entnommen. Auf die Oberfläche von Schicht 2 wird die Einwirkung $p_2(t_2)$ aufgebracht und die Oberkante von Schicht 1 wird mit $p_1(t_2) - p_2(t_2)$ beansprucht, zumal $p_2(t_2)$ gleichzeitig auf Schicht 1 wirkt. Nach Aufbringen der Auflasten werden die beiden Schichten über den Zeitraum Δt_{1-2} ($\Delta t_{1-2} = t_2 - t_1$) konsolidiert. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt bis die letzte Schicht aufgebracht und über die SPEP-Dauer konsolidiert ist.

Für die Diskretisierung des Modells werden 2D-Kontinuumsselemente (CPE4P) verwendet, deren Ansatz eine Konsolidierungsberechnung ermöglicht. Die Vernetzung über das Modell verläuft gleichmäßig mit rechteckigen Elementen ($B \times H \approx 0,1 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$) und ist im Bild 7.12 dargestellt. Für den Kontakt der Schichten untereinander wird eine

Übergangsbedingung formuliert. Die Verbindung der einzelnen Schichten erfolgt über die TIE-Constraint und erlaubt das Zusammenführen von zwei oder mehreren Flächen bzw. Körpern mit einer gewissen Unabhängigkeit von der Vernetzung.

Schritt 5: Auflasten der Schichtoberkanten
im FE-Modell

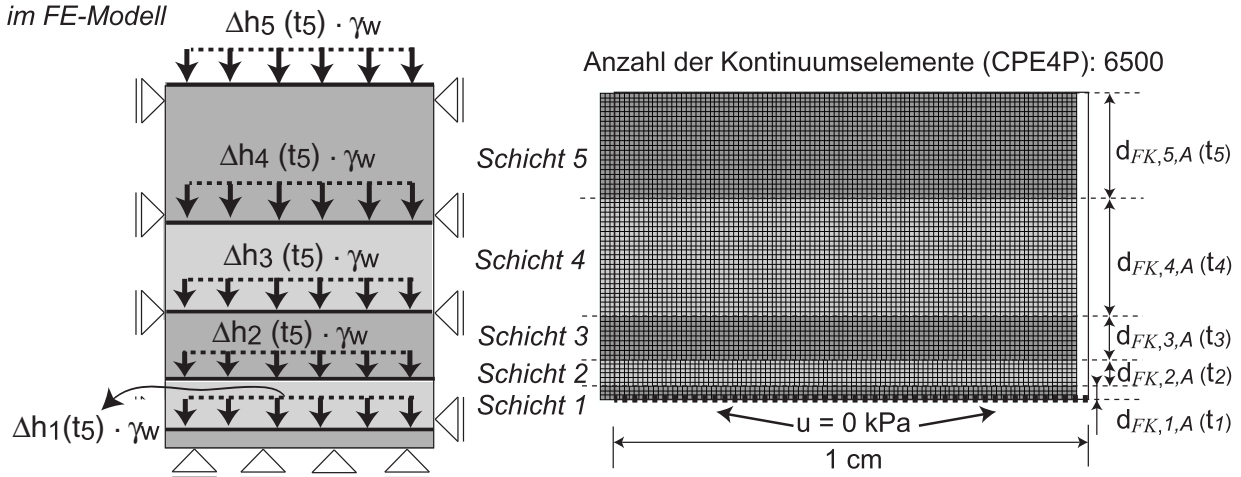


Bild 7.12: Auflasten der Schichtoberkanten für Schritt 5 und Diskretisierung des FE-Modells, V-SP3-1

Bei der Berechnung wird der Filterkuchen als Zwei-Phasen-Medium (Boden-Poren, mit Poren wassergesättigt) betrachtet. Es wird zusätzlich eine Zeitabhängigkeit des Ausgleichsverhaltens im System (instationäre Berechnung siehe [38]) berücksichtigt und simuliert so das typische Konsolidierungsverhalten ("consolidation") des Materials nach Terzaghi [101]. In dieser Form der Analyse werden die Eigenschaften des Feststoffanteils und des Poreninhalts getrennt berücksichtigt.

Dem Filterkuchen wird in einer ersten numerischen Berechnung vereinfacht linear-elastisches Materialverhalten zugeordnet. Darüber hinaus wird jeder Versuch ein zweites Mal numerisch simuliert, wobei der Filterkuchen nun mit einem elasto-plastisch Stoffgesetz ("Modified Cam-Clay Model" basierend auf Roscoe & Burland [76] und Schofield & Wroth [85] beschrieben im Kapitel 2.4) abgebildet wird. Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei der spannungsabhängige Steifemodul, da dieser auf das Konsolidierungs- und Setzungsverhalten einwirkt. Die Materialparameter werden in Anlage IV aus Oedometerversuchen bestimmt. Die Materialkennwerte zeigt Tabelle 7.2.

Bild 7.13 stellt den Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke aus der Modellberechnung dem numerisch ermittelten Verlauf für den Versuch V-SP3-1 gegenüber. Anlage

Tabelle 7.2: Elastische Materialparameter und Parameter des Cam-Clay Modells für Schicht 1, FK-SP3-1

Elastic		Porous Elastic	Clay Plasticity				
Steife- modul	Poisson- Zahl	Schwellbeiwert	Kompressi- onsbeiwert	Steigung der CSL	Ausgangsgröße Fließfläche	Form- faktor	Konusform- faktor
E_s	ν	κ	λ	M	a_0	β	K
[kN/m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[-]	[-]
600	0,375	0,0074	0,082	0,92	18,35	1	1

III.2.1 zeigt die Porenzahlverteilung der weiteren Versuche.

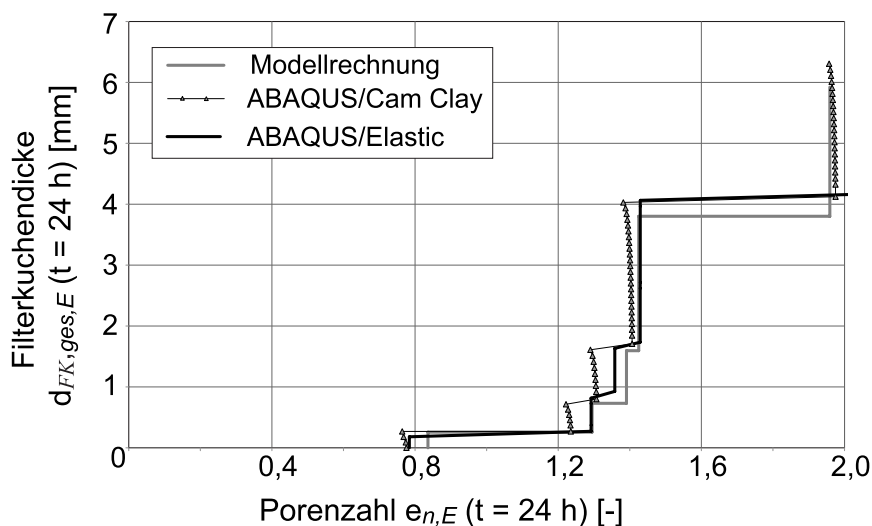


Bild 7.13: Gegenüberstellung der Verläufe Porenzahl über Filterkuchendicke, FK-SP3-1

Die aus dem Modell bestimmten Porenzahlverläufe gleichen den der numerischen Berechnungen sowohl für das elastische als auch für das elasto-plastische Materialverhalten genügend. Zur weiteren Kontrolle werden die Porenzahlverläufe über die Filterkuchendicke nach Gleichung 7.24 gemittelt, siehe Tabelle 7.1. Die Abweichungen zwischen der Modell- und numerischen Berechnung liegen bei 0,18 - 2,3 %.

Die numerischen Berechnungen sollen vorrangig das Konsolidierungsverhalten eines Mehrschichten-Systems ermitteln. Bild 7.14 zeigt exemplarisch den Verlauf der effektiven Spannungen σ' und der Porenwasserüberdrücke u über die Zeit für je ein Element in der Mitte der Schichten 1, 3 und 5 für die Schritte 1, 3 und 5 des Versuches V-SP3-1. In Anla-

ge III.2.2 finden sich die analogen Verläufe der weiteren vier Versuche. Es wird gezeigt, dass alle Schichten für jeden STEP bzw. Schritt voll auskonsolidiert sind, und daher der Porenwasserüberdruck voll abgebaut wird und in effektive Spannungen übergeht.

Im Berechnungsmodell kann daher für die Setzungsberechnung der Schichten die volle maßgebende Einwirkung $p_n(t_i)$ der jeweiligen Schicht als effektive Spannung σ' angesetzt werden.

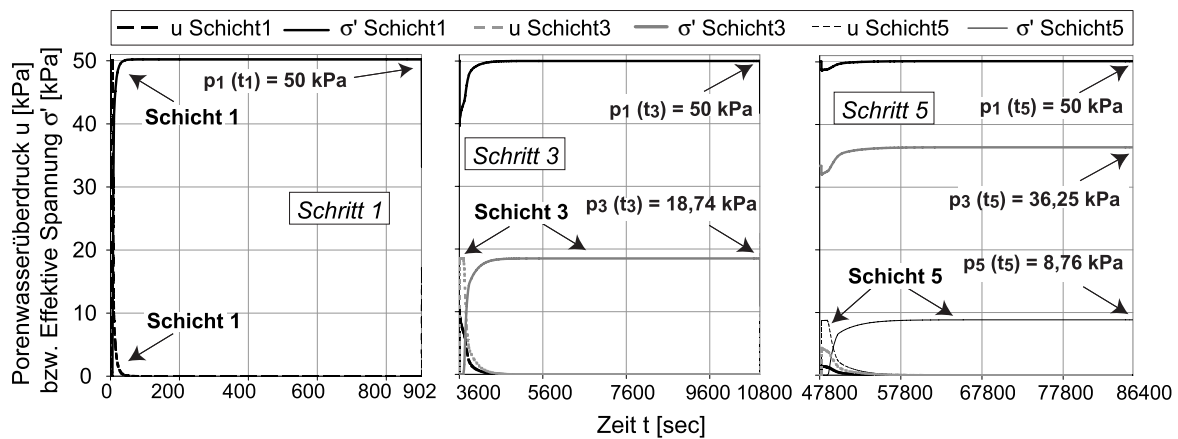


Bild 7.14: Porenwasserüberdruck u und effektive Spannung σ' über die Zeit t , FK-SP3-1

Die Beschaffenheit des Filterkuchens über seine Dicke vor dem Betonierbeginn wird hier durch die Dichte, Porenzahl und Durchlässigkeit beschrieben. Diese über die Filterkuchendicke veränderlichen Materialparameter resultieren aus dem Konsolidierungsprozess in Folge der Strömungskräfte während seines Anwachsens.

Im Kapitel 8 wird überprüft inwieweit der Kontraktorbeton während des Betonierens den Filterkuchen verdrängt.

Der Frischbeton übt bis zu seinem Erstarren einen Druck auf den Filterkuchen aus, wodurch dieser eine weitere Konsolidierung erfährt. Im Kapitel 9 wird dieser Konsolidierungsprozess simuliert, der die Größe der Scherfestigkeit auf Grund der vom Überkonsolidierungszustand abhängigen Kohäsion beeinflusst. Für diese Simulation muss die hier als Schichtensystem ermittelte Beschaffenheit des Filterkuchens vor dem Betonierbeginn bekannt sein.

Kapitel 8

An der Erdwandung haftender Filterkuchen

Im Kapitel 7 wird gezeigt, dass der Filterkuchen ein inhomogenes Material ist. Durchlässigkeit und Porenzahl sind im Bereich der Erdwandung am kleinsten und nehmen in Richtung des offenen Schlitzes zu. Der Übergang zwischen Suspension und Filterkuchen verläuft fließend, so dass keine eindeutige Grenzlinie definiert werden kann. Zu klären ist daher in wieweit der Filterkuchen während des Betoniervorganges durch den aufsteigenden Frischbeton verdrängt wird und in wieweit Teile des Filterkuchens an der Erdwandung haften bleiben.

Bei der Entstehung eines Filterkuchens innerhalb von 24 Stunden ist nach dem Modellsatz von Kapitel 7 die äußerste Filterkuchenschicht (in Richtung des offenen Schlitzes) unter einer Spannung von mindestens $\sigma'_{v,RS} = 7,54$ kPa auskonsolidiert (kleinste Spannung liefert Versuch V-SP1). Die entsprechenden Konsolidierungsspannungen des Außenrandes der anderen untersuchten Filterkuchen betragen $\sigma'_{v,RS} = 8,76, 14,71, 15,48$ und $15,46$ kPa und liegen demnach höher. Hierbei muss zur Kenntnis genommen werden, dass das Berechnungsmodell Mittelwerte über die Schichtdicken des Filterkuchens bezieht und den fließenden Übergang im Filterkuchen nicht abbildet. Tatsächlich wäre der Außenrand dieser äußersten Filterkuchenschicht unter einer geringeren Auflast und der innere Rand unter einer größeren Auflast konsolidiert. Die weiter innen in Richtung Erdreich liegenden Schichten sind unter deutlich größeren Spannung auskonsolidiert ($\sigma'_{v,RS} > 19,42$ kPa).

Aus den Untersuchungen der Filterkuchenproben im Kapitel 6.2.2 ist als kleinster Winkel der Kohäsion, ein $\varphi'_c = 8,1^\circ$ (FK-Ro-Labor), ermittelt worden. Des Weiteren zeigt Kapitel

6.2.2 auf, dass das Verhältnis der Vorbelastung zur Konsolidierungsspannung bei allen untersuchten Filterkuchenmaterialien um $\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v,RS}} = 0,3$ liegt. Übertragen kann daher davon ausgegangen werden, dass ein typischer Filterkuchen im nichtbindigen Baugrund bis zum Verdrängungsprozess der Suspension durch den Frischbeton selbst im äußeren Bereich eine Scherfestigkeit in der Größenordnung von $\tau = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c = (\sigma'_{v,RS} \cdot 0,3) \cdot \tan \varphi'_c = 2,26 \cdot \tan 8,1 = 0,36$ kPa besitzen muss.

In diesem Kapitel wird gezeigt, dass der im Kontraktorverfahren aufsteigende Frischbeton den Filterkuchen nicht maßgebend verdrängen kann, siehe hierzu auch [26].

8.1 Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons

Bei dem Einströmvorgang eines Fluids (hier der Frischbeton) in einen breiten rechteckigen Schlitz (laminare Strömung) wirkt sich unmittelbar bei der Einmündung die Reibung an den Wandungen noch nicht aus. So stellt sich erstmal ein konstanter Wert für die Geschwindigkeit v_0 über den ganzen Querschnitt ein, [5]. Im weiteren Verlauf entsteht jedoch aufgrund der Reibungswirkung an der Wandung eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung. Die Geschwindigkeit ist an den Wänden $v = 0$ und in der Mitte des Schlitzes $v = v_{max}$, [95, 5, 82, 72]. Es wird vorausgesetzt, dass seitliche Randeefekte vernachlässigt werden können, da die Länge L des Schlitzes \gg als die Breite B ist. Des Weiteren wird angenommen, dass das Fluid inkompressibel ist.

Die Kontinuitätsgleichung ergibt für den Querschnitt unmittelbar bei der Einmündung:

$$\dot{V} = A \cdot v_0 = L \cdot B \cdot v_0 \quad (8.1)$$

Hierbei steht \dot{V} für den Volumenstrom und A für den Querschnitt $A = L \cdot B$, siehe Bild 8.1. Ein gleich bleibender Volumenstrom ist auch bei einer parabolischen Geschwindigkeitsverteilung konstant. Da sich das Geschwindigkeitsprofil während des Strömungsvorganges verändert und über den Querschnitt nicht konstant bleibt, wird der Querschnitt in unendlich kleine Stromröhren mit rechteckigen Querschnitten dA unterteilt.

Eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung $v(b)$ über den Querschnitt mit den Randbedingungen $b = 0$ und $b = B$ kann folgendermaßen beschrieben werden:

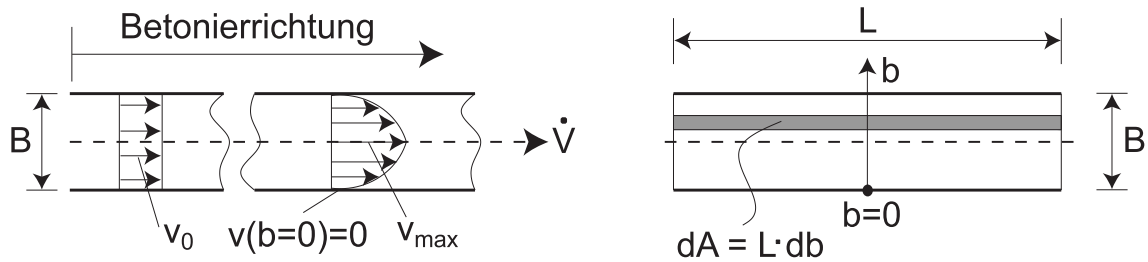


Bild 8.1: Parabolisches Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons

$$v(b) = K \cdot b \cdot (B - b) \quad (8.2)$$

Die Konstante K wird über folgende Randbedingung ermittelt:

$$v(b/2) = v_{max} \quad (8.3)$$

Daraus folgt:

$$v_{max} = K \cdot B^2/4 \implies K = 4 \cdot v_{max}/B^2 \quad (8.4)$$

Die Geschwindigkeitsverteilung $v(b)$ über den Querschnitt lautet:

$$v(b) = 4 \cdot v_{max} \left(\frac{b}{B} - \frac{b^2}{B^2} \right) \quad (8.5)$$

Der Volumenstrom berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \int_A v \cdot dA = \int_{b=0}^{b=B} v(b) \cdot db = 4 \cdot L \cdot v_{max} \int_0^B \left(\frac{b}{B} - \frac{b^2}{B^2} \right) db \\ &= 4 \cdot L \cdot v_{max} \cdot \left[\frac{b}{B} - \frac{b^2}{B^2} \right]_0^B = 4 \cdot L \cdot v_{max} \cdot \left(\frac{B}{2} - \frac{B}{3} \right) = \frac{2}{3} \cdot L \cdot B \cdot v_{max} \end{aligned} \quad (8.6)$$

Die Gleichsetzung der Gleichungen 8.1 mit 8.6 ergibt:

$$L \cdot B \cdot v_0 = 4 \cdot L \cdot v_{max} \cdot \frac{B}{6} \implies v_{max} = \frac{2}{3} \cdot v_0 \quad (8.7)$$

In einem parabolischen Geschwindigkeitsprofil ergibt sich die Maximalgeschwindigkeit als 1,5-facher Wert der mittleren Geschwindigkeit, [5].

Bild 8.2 zeigt die Geschwindigkeitsprofile des aufsteigenden Frischbetons für zwei gewählte Schlitzbreiten B von 0,8 m und 1,6 m und vier angenommene Strömungsgeschwindigkeiten von $v_{max} = 5, 10, 15$ und 20 m/h nach Gleichung 8.5.

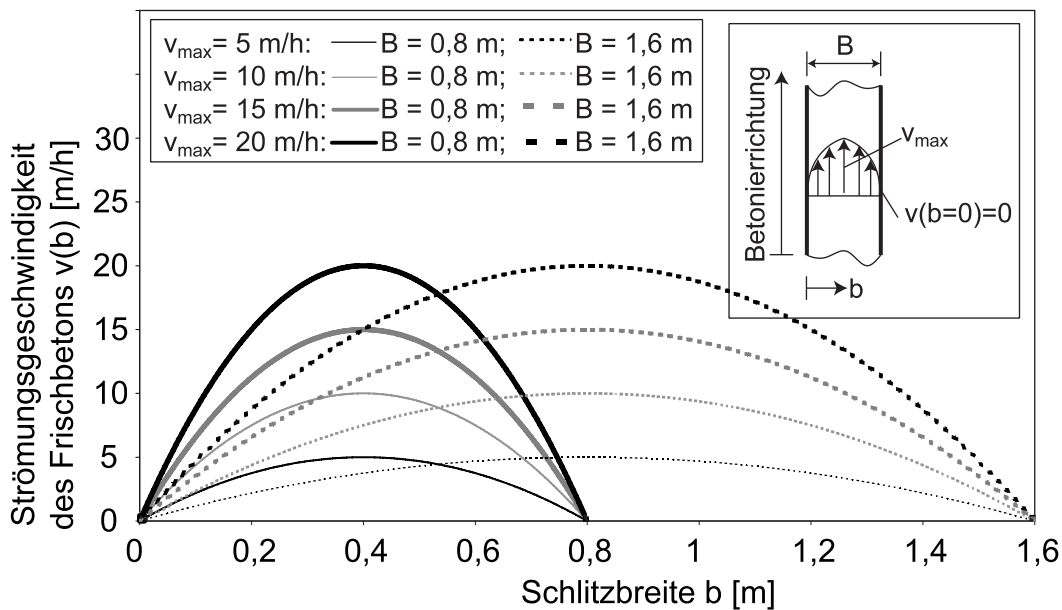


Bild 8.2: Geschwindigkeitsprofile für zwei Schlitzbreiten und vier Strömungsgeschwindigkeiten nach Gleichung 8.5

8.2 Scherfestigkeit des Frischbetons

Das Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons wird mit Gleichung 8.5 ermittelt. Der Frischbeton muss an der Oberfläche der Schlitzwandung, dem Filterkuchen, haften, damit die Geschwindigkeit dort zu Null wird. Das setzt voraus, dass der Filterkuchen nicht von dem aufsteigenden Frischbeton verdrängt werden kann. Die Resultierende aus den Schubspannungen des Frischbetons an der Schlitzwandung bzw. seine maximale Scherfestigkeit τ_{FB} muss kleiner sein als die Scherfestigkeit des Filterkuchens mit $\tau = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c$. Demzufolge gilt:

$$\text{Filterkuchen} : \tau = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c > \text{Frischbeton} : \tau_{FB} = \tau_F + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (8.8)$$

Tabelle 8.1: Fließgrenze τ_F und Viskosität η von Zement, Mörtel und Betonarten, [3]

	Zement- leim	Mörtel	Fließ- beton	Selbstverdichtender Beton	Beton
Fließgrenze τ_F [N/m ²]	10 - 100	80 - 400	400	50 - 200	500 - 2000
Viskosität η [Ns/m ²]	0,01 - 1	1 - 3	20	20 - 100	50 - 100

Die Scherfestigkeit des Frischbetons kann generell als Bingham'sche Flüssigkeit (siehe Gleichung 2.5) idealisiert werden [3, 27, 28, 47], solange die Fließgrenze nicht zu gering ist (z.B. wie bei selbstverdichtenden Betonen SCC, [27]). Banfill [3] gibt für Zement, Mörtel und unterschiedliche Betonarten die Fließgrenze τ_F und Viskosität η an, Tabelle 8.1.

In der Schlitzwandbauweise werden Fließbetone (so genannte Kontraktorbetone) eingesetzt. Nach [3] liegt für Fließbetone die Fließgrenze in einer Größenordnung von $\tau_F = 400$ Pa und die Viskosität bei $\eta = 20$ Ns/m². Damit fehlt zur Abschätzung der Scherfestigkeit τ_{FB} des Kontraktorfrischbetons nur noch das Schergefälle $\dot{\gamma}$. Meist wird das Schergefälle vereinfacht linear angenommen [105] und beschreibt die Veränderung (Abnahme bzw. Zunahme) der Geschwindigkeit über eine Strecke.

Zur Ermittlung des Schergefälles über die Schlitzbreite wird das Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons hier in Inkremente unterteilt und für jedes Inkrement die Steigung (Schergefälle) mit $\dot{\gamma} = dv/db$ vereinfacht linear ermittelt (siehe Bild 8.3). So erhält man ein Schergefälle in Abhängigkeit der Schlitzbreite b . Im Bereich der Schlitzwandung, wo auch die maximale Scherfestigkeit des Frischbetons (Reibung) aktiviert wird, ist das Schergefälle am größten und in der Mitte des Schlitzes am kleinsten.

Tabelle 8.2 zeigt unter anderem die maximalen an der Schlitzwandung entstehenden Schergefälle für die vorher gewählten zwei Schlitzbreiten und vier Strömungsgeschwindigkeiten. Hierbei werden Inkremente mit einer Breite von $db = 5$ mm gewählt.

Des Weiteren legt Tabelle 8.2 die unter den beschriebenen Annahmen resultierenden maximalen Scherfestigkeiten τ_{FB} des Frischbetons an der Schlitzwandung dar. Der Anteil aus der Viskosität und dem Schergefälle ist vernachlässigbar gering. Demgemäß wird die Scherfestigkeit des Frischbetons maßgebend von der Fließgrenze geprägt.

Angesichts der erarbeiteten Vorstellungen wird davon ausgegangen, dass der aufsteigende Frischbeton ($\tau_{FB} \approx 0,4$ kPa) den Filterkuchen nicht wesentlich verdrängen kann. Nur der ganz äußere Bereich des Filterkuchens kann Scherfestigkeiten von kleiner als 0,4 kPa

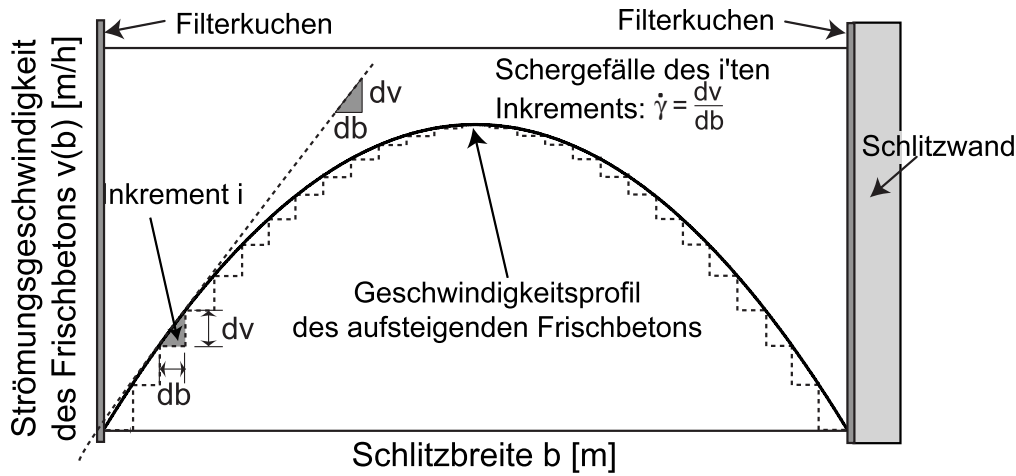


Bild 8.3: Unterteilung des Geschwindigkeitsprofils in Inkremente und Ermittlung des Schergefälles $\dot{\gamma}$ des i 'ten Inkrements

Tabelle 8.2: Maximale Scherfestigkeiten τ_{FB} des Frischbetons

		Schlitzbreite $B = 0,8 \text{ m}$				Schlitzbreite $B = 1,6 \text{ m}$			
v_{max}	[m/s]	5	10	15	20	5	10	15	20
$\dot{\gamma}$	[1/s]	0,007	0,014	0,021	0,028	0,004	0,007	0,010	0,014
mit $\eta = 20 \text{ Ns/m}^2$ nach [3]:									
$\eta \cdot \dot{\gamma}$	[N/m ²]	0,138	0,276	0,414	0,552	0,069	0,138	0,208	0,277
mit $\eta = 20 \text{ Ns/m}^2$ und $\tau_F = 400 \text{ N/m}^2$ nach [3]:									
$\tau_{FB} = \tau_F + \eta \cdot \dot{\gamma}$	[N/m ²]	400,1	400,3	400,4	400,6	400,1	400,1	400,2	400,3

besitzen. Eine vollständige Verdrängung des Filterkuchens wird ausgeschlossen, da im Wesentlichen gilt:

$$\text{Filterkuchen} : \tau = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c > \text{Frischbeton} : \tau_{FB} = \tau_F + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Zur Veranschaulichung wird auch die Stützsuspension betrachtet. Diese besitzt eine typische Bandbreite der Fließgrenze im Bereich von $\tau_F = 20$ bis 50 Pa . Der Größenordnungen nach zu schließen wird die Suspension unter normalen Bedingungen vom aufsteigenden Frischbeton verdrängt, $\tau_{FB} \gg \tau_{F,Suspension}$. Die Verdrängung der Suspension durch den Beton entspricht der Wirklichkeit, da auf diesem Prinzip das Kontraktorbetonierverfahren bei der Schlitzwandherstellung beruht. Es liegt daher nahe, dass der Filterkuchen, mit einer deutlich höheren Scherfestigkeit als die der Suspension, nicht ohne weiteres vom Frischbeton verdrängt werden kann.

Kapitel 9

Die Scherfestigkeit des Filterkuchens

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass während der Bauphase einer Zweiphasenschlitzwand an der Erdwandung des offenen Schlitzes ein Filterkuchen entsteht. Dieser Filterkuchen besitzt keine homogenen Eigenschaften über seine Dicke, sondern die Porenzahl und Durchlässigkeit und die daraus abzuleitenden Materialeigenschaften sind im Bereich des Filtermediums (anstehender Boden) kleiner als in Richtung des offenen Schlitzes. Diese inhomogene Materialbeschaffenheit entsteht auf Grund der stärkeren Konsolidierung des Filterkuchens am Filtermedium während seines stetigen Anwachsens in Richtung des offenen Schlitzes. Der im Kontraktorverfahren aufsteigende Frischbeton, kann diesen Filterkuchen nicht maßgebend verdrängen, da sich parallel zu seiner Ausbildung ebenfalls durch die Konsolidierung hervorgerufen, eine Kohäsion aufbaut. Ferner ist auch die Kohäsion über die Dicke nicht konstant, nimmt jedoch im Allgemeinen Größenordnungen ein, die einer wesentlichen Verdrängung durch den Frischbeton entgegenwirken, Kapitel 8. Man kann daher davon ausgehen, dass sich bei einem nichtbindigen Baugrund nach Fertigstellung einer Schlitzwand ein Schichtensystem analog zu Bild 1.1 ausgebildet hat. Der Filterkuchen ist das schwächste Glied mit der geringsten Scherfestigkeit. Basierend auf den Auswertungen der in-situ Filterkuchenproben wird für den Winkel der Gesamtscherfestigkeit bei drei Referenzbaustellen ein $\varphi'_s = 29,6$ bis $32,6^\circ$ erreicht und passt zu den Angaben von Gudehus in [36] für tonigen Schluff. Nur ein Filterkuchen hat mit $\varphi'_s = 21,5^\circ$ eine deutlich geringere Scherfestigkeit. Dies ist jedoch auf den niedrigen Schluff- und hohen Bentonitanteil auf Grund der sehr grobkörnigen Baugrundverhältnisse zurückzuführen, siehe Kapitel 6.2.2 und 4. Der Winkel der inneren Reibung der Filterkuchen liegt zwischen $\varphi' = 17^\circ$ und $24,0^\circ$. Die Kohäsion hingegen ist vom Konsolidierungszustand des Filterkuchens abhängig und die Bestimmung komplexer. Die Filterkuchenschicht

erfährt bis zum vollständigen Erstarren des Kontraktorbetons vom Frischbetondruck eine Belastung und wird dabei konsolidiert. Der Konsolidierungszustand des Filterkuchens beeinflusst die Dimension der Kohäsion. In den hier folgenden Kapitel wird die Größe der hervorgerufenen Kohäsion untersucht und so auf die aktivierte Scherfestigkeit des Filterkuchens geschlossen.

9.1 Der Frischbetondruck

Baustellenmessungen des Frischbetondruckverlaufs über die Schlitztiefe einer Zweiphasenschlitzwand für unterschiedliche Zeitpunkte zeigen z.B. Lächler et al. [48], de Wit [10] in [51] und Wit & Lengkeek [11]. Bei der Druckentwicklung erfolgt zunächst eine hydrostatische Druckzunahme mit der Frischbetonwichte, die sich zunehmend unterlinear entwickelt und schließlich, trotz weiter ansteigender Frischbetonsäule, beginnt abzufallen, Loreck [52]. Uriel & Oteo [109] berichten ähnlich wie Lächler et al. [48] und Delattre & Duca [12], dass der Frischbetondruck 24 Stunden nach Betonierende auf das Niveau des hydrostatisch wirkenden Suspensionsdruck [11, 48, 50] zurück geht.

Die Einhüllende der Maximaldrücke lässt sich, wie Lings et al. [50] und später z.B. auch [48] gezeigt haben, durch eine bilineare Druckfigur gut beschreiben, die seither als "Frischbetondruck nach Lings" bekannt ist und Eingang in viele FE-Berechnungen gefunden hat, wie z.B. von [33, 34, 65, 66, 80] sowie auch auf der Basis von Baustellenmessungen in modifizierter Form von [11, 49]. Das nach [50] ermittelte Druckprofil $p_b(z)$ geht bis zum oberen Drittel der Wandtiefe von einem sich hydrostatisch entwickelnden Frischbetondruck aus, welcher unterhalb des Drittels dann mit der Wichte der Suspension weiter ansteigt:

$$p_b(z) = \begin{cases} \gamma_{FB} \cdot z & : z \leq h_{krit} \\ (\gamma_{FB} \cdot h_{krit}) + \gamma_F \cdot (z - h_{krit}) & : z > h_{krit} \end{cases} \quad (9.1)$$

$$\begin{aligned} \text{mit : } h_{krit} &= T/3 \quad (T = \text{Schlitztiefe}) \\ \gamma_{FB} &= \text{Wichte des Frischbetons} \\ \gamma_F &= \text{Wichte der Bentonitsuspension} \end{aligned}$$

Jedoch wirkt dieses Druckprofil in ihrer Gesamtgröße zu keinem realen Zeitpunkt, [52]. Messungen von [48, 11] haben gezeigt, dass der Frischbeton in den unteren Wandtiefen noch vor Anschluss der Betonierarbeiten beginnt abzufallen und so als zeitlich und räumlich unetwige Druckverteilung, die sich als Wanderlast von unten nach oben im Schlitz

verschiebt, wirkt, [51].

Für eine realitätsnahe Prognose der Spannungszustände im Schlitz während des Betonierens, und der daraus folgenden Konsolidierung des Filterkuchens wird daher ein über den Betonierfortschritt tiefen- und zeitabhängiges Berechnungsmodell für den Frischbetondruckverlauf gewählt, was im folgenden Kapitel 9.2 beschrieben wird.

9.2 Entwicklung des Frischbetondrucks nach Loreck [51]

Zur Ermittlung des zeitlich und räumlich un stetigen Frischbetondruckverlaufs wird das Berechnungsmodell von Loreck [51] herangezogen, welches realitätsnahe Prognosen erlaubt. Das Berechnungsmodell ermöglicht die Bestimmung der Druckentwicklung in Abhängigkeit der vollständigen Schlitzgeometrie, der Tiefenlage im Schlitz, der Zeit seit Beginn des Betonierens und dem erreichten Betonierfortschritt.

Es wird zum einen berücksichtigt, dass das Betonalter über die Schlitztiefe zunimmt, da der Beton mit dem Baufortschritt sukzessiv hergestellt und angeliefert wird. Zum anderen kann auch der Betonierfortschritt über die Gesamtdauer der Betonage variieren. Die Seitendruckkoeffizienten $\lambda(t)$ sowie aktivierten Wandschubkräfte $\tau(t)$ über die Schlitztiefe können daher variieren. Aufgrund der aufwärts-gerichteten Bewegung des Schüttrohrs wird ein Strukturaufbau des Betons verhindert, so dass der Beton in diesem Bereich als Flüssigkeit hydrostatisch wirkt und somit einen Seitendruckkoeffizienten $\lambda(t) = K_0 = 1,0$ aufweist. Unterhalb des Kontraktorrohrs kann jedoch das natürliche Ansteifen des Betons beginnen, wobei angenommen wird, dass der Beton eine Zeitdauer benötigt, bis er die seinem Anmischalter entsprechende Steifigkeit eingeholt hat (Rekonstruktionsphase). Aus der überlagernden Frischbeton- und Suspensionssäule entsteht gegenüber dem anstehenden Baugrund ein Porenwasserüberdruck, der zu einer Abgabe von Überschuss-Anmachwasser führt. Die Abgabe des Porenwassers durch den Filterkuchen in das Erdreich wird von Loreck [51] in Elementversuchen nachgewiesen. Das Porenwasser im Frischbeton entzieht sich daher der wirkenden Auflast und es entsteht eine Lastumlagerung auf die sich entwickelnde Zementgelmatrix. Da somit im Frischbeton keine Porenwasserüberdrücke verbleiben wird der Seitendruckkoeffizient daher auf die wirkende Gesamtspannung angewendet. Aus dem Volumenverlust infolge Abgabe von Überschusswasser, der hohen Kompressibilität des jungen Betons und ggfs. dem mit der Beschleunigungspha-

se der Hydratation einsetzenden chemischen Schrumpfen resultiert ein Sackungspotential der Frischbetonsäule. Solange der bildsame Frischbeton eine geringere Festigkeit aufweist als der anstehende Boden, kommt es bei dieser inkrementellen Sackung der Frischbetonmatrix zu einer Schubverzerrung innerhalb des Frischbetons. So wird in Abhängigkeit des erreichten Betonalters die Schubfestigkeit innerhalb der Betonmatrix hervorgerufen und die Betonsäule hängt sich zunehmend im Schlitz auf und entlastet sich dabei selbst (Siloeffekt). Die Selbstentlastung der Frischbetonsäule aus dem Siloeffekt, sowie die Umlagerung des verbleibenden totalen Vertikaldrucks auf effektive Spannungen im jungen Zementstein bei abnehmendem Seitendruckkoeffizienten überlagern sich und bewirken den Rückgang des aktiv ausgeübten Seitendrucks. So entwickelt sich der Frischbetondruck während des Betoniervorgangs, siehe Bild 9.1, in Abhängigkeit der gegenläufigen Effekte aus der Auflasterhöhung mit dem Betonierfortschritt und den zuvor beschriebenen druckmindernden Mechanismen. Messergebnisse von Loreck [51] zeigen, dass sich der Druckabfall des Frischbetons solange fortsetzt, bis ein Druckniveau entsprechend des ursprünglichen Suspensionsdrucks erreicht wird (siehe auch [11, 48, 50]). Im Berechnungsalgorithmus wird dieser Endspannungszustand (Suspensionsdruck) dadurch berücksichtigt, dass der Suspensionsdruck als Mindestdruck bei der Berechnung implementiert wird.

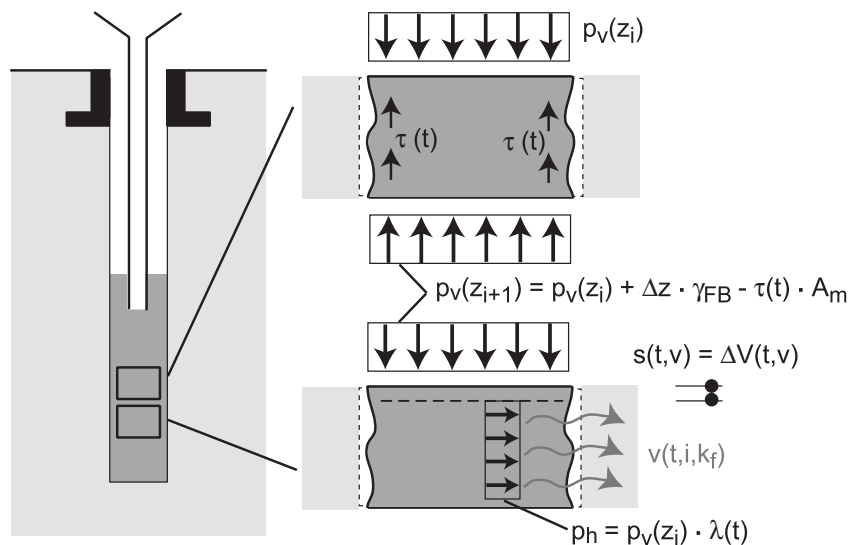


Bild 9.1: Modell der Druckentwicklung im Erdschlitz, [51]

Zusammengefasst soll nach Loreck [51] das Betonieren einer Schlitzwandlamelle somit mit folgenden kennzeichnenden Eigenschaften im Berechnungsmodell erfasst werden:

- Der Betonierfortschritt kann über die Betonierdauer beliebig wechseln.
- Der Beton wird sukzessive zum Baufortschritt angemischt und mit einem etwa gleichbleibenden Alter eingebaut.
- Über die Schlitztiefe befindet sich der eingebaute Beton damit in einer mit der Tiefe insgesamt zunehmenden Hydratationsphase.
- Die zeitliche Entwicklung des Siloeffekts und des Seitendruckkoeffizienten der einzelnen Betonchargen schließt mit seinem regelmäßigen Verlauf an die unregelmäßigen Einbauzeitpunkte (Betonfortschritte) an.
- Der Einfluss des Siloeffekts hängt von der zur Verfügung stehenden Mantelfläche des Schlitzes ab.

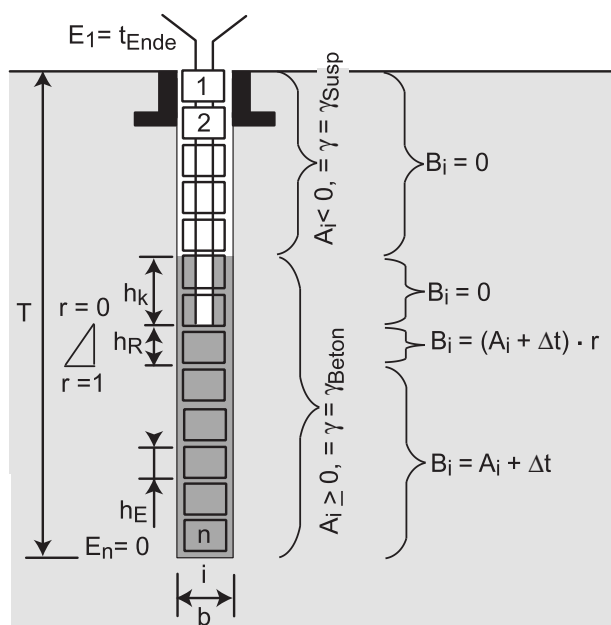


Bild 9.2: Variablen im Berechnungsmodell, [51]

Bild 9.2 zeigt die Variablen des Berechnungsmodells. Für die Berechnung des Frischbetondrucks wird die Schlitztiefe H in n Elemente diskretisiert. Diese einzubauenden Volumenelemente der Frischbetonsäule haben eine Höhe $h_E = T/n$. Der Betonierfortschritt wird berücksichtigt, indem für jedes Element ein Einbauzeitpunkt E_i mit $i \in 1 \dots n$ festgelegt wird, welcher auf den Beginn der Betonage bezogen wird. Für einen gewählten Auswertzeitpunkt t ergibt sich dann das erreichte Einbualter A_i für jedes Element aus $A_i = t - E_i$.

Elemente, die ein Einbualter von $A_i \geq 0$ aufweisen, sind zum betrachteten Auswertzeitpunkt t bereits als Beton im Schlitz vorhanden, wodurch für diese gilt: $\gamma_i = \gamma_{\text{Beton}}$.

Zur Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen des Kontraktorverfahrens wird aus dem Einbaualter für jedes Betonelement ein "wirksames Betonalter" B_i ermittelt, dass folgendes berücksichtigt:

- den zeitlichen Versatz zwischen dem Anmischen des Betons und dem Einbau in den Schlitz (Transport- und Entladezeit): es wird ein pauschaler Zuschlag Δt (in [51]: $\Delta t = 20$ bis 60 Minuten) zum Einbaualter addiert
- die Unterdrückung der Strukturbildung (Ansteifen) des Frischbetons im Bereich des Kontraktorrohrs: auf Grund der Annahme von $B_i = 0$ für die obersten Elemente mit $A_i \geq 0$ über die Länge des Kontraktorrohres h_k
- eine "Restrukturierungsdauer" für die Elemente über die Länge h_R unter dem Kontraktorrohr innerhalb des Zeitraums $A_i \leq t_R$: sie wird durch den linearen Faktor $r = A_i/t_R \leq 1,0$ berücksichtigt (in [51]: $t_R = 30$ Minuten)

Elemente mit $A_i < 0$ sind zum betrachteten Zeitpunkt als Suspension im Schlitz vorhanden und werden daher mit $\gamma_i = \gamma_{Susp}$ ("wirksames Betonalter" $B_i = 0$) berücksichtigt.

Aus den oben genannten Bedingungen berechnet sich die Vertikalspannung $p_{v,i}$ an der Unterkante des jeweiligen Elementes zu:

$$p_{v,i} = p_{v,i-1} + h_E \cdot \gamma_i - F \cdot h_E \cdot \tau(B_i) \geq 0 \quad (9.2)$$

mit: $\tau(B_i)$ = mobilisierbare Schubspannung im Element i
 F = $\frac{2 \cdot (L+b) \cdot 1m}{L \cdot b}$ spez. Mantelfläche je m^2 Grundfläche
 L, b = Länge L bzw. Breite b des Schlitzes im Grundriss

Die im Frischbeton mobilisierbare Schubspannung $\tau(B_i)$ wird als angepasste Formfunktion aus Versuchsergebnissen (Ankerausziehversuche in [51]) wie folgt ermittelt:

$$\tau(B_i) = -0,5 + e^{\left(\frac{t}{4}\right)^{2,5}} \quad (9.3)$$

mit: $\tau(B_i)$ [kN/m²]
 t [h] : $t \leq 5$ h

Aus dem vertikalen Druck $p_{v,i}$ wird der horizontal wirkende Frischbetondruck $p_{h,i}^B$ abgeleitet:

$$p_{h,i}^B = p_{v,i} \cdot \lambda(B_i) \quad (9.4)$$

Der zeitabhängige Seitendruckkoeffizient $\lambda(t)$ wird als Formfunktion aus Versuchsergebnissen (Versuche zur Seitendruckentwicklung im Kontraktorbeton in [51]) abgeleitet:

$$\lambda(t) = \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{15} \cdot \left(\frac{t}{11} \right)^{1,2} \right) \cdot \left(\cos \left(\frac{\pi \cdot t}{11} \right) + 2 \right) \quad \text{für } t(h) \leq 12 h \quad (9.5)$$

Für den aus dem Beton resultierenden Druck $p_{h,i}^B$ ist noch zu prüfen, ob er den oben beschriebenen Mindestdruck unterschreitet, da dann dieser maßgebend wird.

Loreck hat sein Berechnungsmodell durch Nachrechnung von Baustellenmessungen, von z.B. Rodatz et al. [75], de Wit & Lengkeek [11, 10], Lächler et al. [49] und Neher et al. [62], überprüft und in [51] gezeigt, dass die Entwicklung des Frischbetondrucks beim Betonieren gut wiedergegeben wird. Das Berechnungsmodell scheint, obwohl nicht nach den Parametern Zementsorte, Hydratationsverlauf, Temperaturbedingungen und Bewehrungseinfluss differenziert wird und einige Berechnungseingangswerte (Δt , t_K, t_R) "baupraktisch" abgeschätzt werden, die wesentlichen Einflussparameter auf die Frischbetondruckentwicklung in Erdschlitzten abzubilden und zeigt im Vergleich zu den internationalen Messerergebnissen aus 30 Jahren eine zufrieden stellende Robustheit.

9.3 Konsolidierung des Filterkuchens

Der Konsolidierungszustand des Filterkuchens nach Schlitzfertigstellung wird am Beispiel der Schlitzwandlamelle 34 der Baustelle in Rotterdam (NL) untersucht. Da der Suspensionsspiegel während des Schlitzens bei 1,5 m über der Geländeoberkante GOK und der Grundwasserspiegel bei ca. 3 bis 4 m unter GOK lag, resultiert daraus ein Suspensionsüberdruck von ca. $\Delta p = 50$ kPa, der zur Filterkuchenbildung geführt hat. Auch der in Kapitel 5 bzw. 7 zur Entstehung des Filterkuchens gewählte Überdruck liegt bei $\Delta p = 50$ kPa und bewegt sich daher in derselben Größenordnung wie der des Referenzschlitzes. Als Filterkuchen, der entlang der Schlitzwandung innerhalb von 24 Stunden Suspensionsstandzeit entsteht, wird der FK-SP5 gewählt, Kapitel 7. Dieser Filterkuchen besitzt nach seiner Formation eine Dicke von ca. 1 cm, ähnlich der Dicke des Filterkuchens der Baustelle "Conradstraat" in Rotterdam. Neben dem Filterkuchen FK-SP4 ist diese Dicke bei einer Suspensionsdichte von $\rho_F = 1,15$ g/cm³ am größten und stellt daher den ungünstigsten Fall dar.

Zur Ermittlung der Kohäsion wird der Filterkuchen mit dem Betondruckverlauf belastet.

Der in den Schlitz eingebrachte Frischbeton verhält sich erstmal wie eine Flüssigkeit und wirkt hydrostatisch. Auf Grund der sich überlagernden Frischbeton- und Suspensionssäule entsteht gegenüber dem anstehenden Baugrund ein Porenwasserüberdruck der zu einer Abgabe von Überschuss-Anmachwasser durch den Filterkuchen hindurch in den Baugrund führt. Der Filterkuchen wird somit durchströmt und aufgrund der Strömungskräfte gleich wie bei seiner Entstehung konsolidiert. Dieser anfänglich hydrostatisch wirkende Frischbeton beginnt anzusteißen und geht langsam von seiner flüssigen in eine feste Phase über und wirkt danach idealisiert als Festkörper. Der Druck auf den Filterkuchen kann dann als Auflast idealisiert werden. Der Phasenübergang zwischen flüssigen und festem Zustand ist ein fließender Prozess. Ein genauer Zeitpunkt, ab dem der Frischbeton als Festkörper wirkt kann daher nicht definiert werden. Das Ansteifen des Frischbetons beginnt ab dem Zeitpunkt, wenn im Betondruck-Zeit Diagramm der Verlauf nicht mehr linear ansteigt, sondern sich der Druckanstieg unterlinear verhält. Ab dem Zeitpunkt, wenn es zu einem Abfall des aktiv ausgeübten Seitendrucks (Betondruck) kommt, kann man davon ausgehen, dass der Lastabtrag bzw. der totale Vertikaldruck in effektive Spannungen im jungen Zementstein übergeht, [51], und somit der Frischbeton Eigenschaften eines Festkörpers übernimmt.

Für die Konsolidierung des Filterkuchens wird nur der abfallende Ast des Betondruckverlaufs d.h. der Druckrückgang angesetzt und als äußere Auflast berücksichtigt. Die Konsolidierung aufgrund der Strömungskräfte des Überschuss-Anmachwassers durch den Filterkuchen in den Baugrund wird auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt und so die Kohäsion unterschätzt.

Die Eingangsparameter in das Berechnungsmodell zeigt Tabelle 9.1. Der Betondruck-

Tabelle 9.1: Eingangsparameter in das Berechnungsmodell von [51] für Schlitzwandlamellen 34 der Baustelle in Rotterdam (NL)

Betoniergeschwindigkeit $v_b = 3, 5, 10$ und 15 m/h								
T/L/b	n	z_s ¹⁾	z_{GW} ²⁾	γ_F	γ_{FB}	Δt	h_K	t_R
[m]	[-]	[m]	[m]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[min]	[m]	[min]
40/8/1,2	40	-1,5	3	10,65	23,8	30	5 ³⁾	30

¹⁾ z_s : Lage des Suspensionsspiegels bezogen auf Lamellenoberkante

²⁾ z_{GW} : Lage des Grundwasserspiegels bezogen auf Lamellenoberkante

³⁾ bei Verwendung von 2 Schüttrohren, [51]

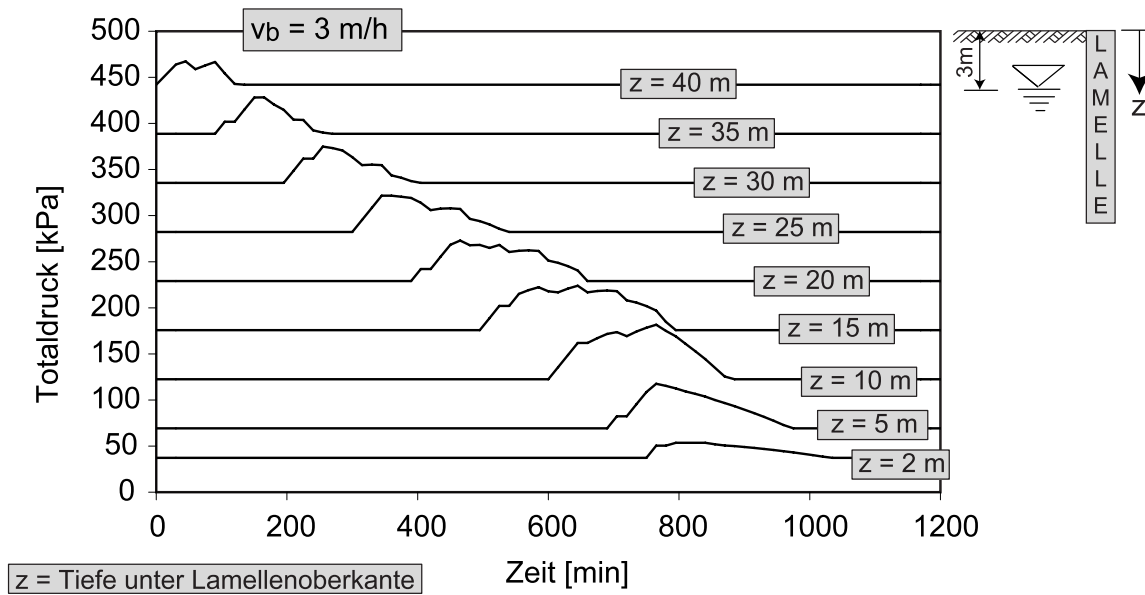


Bild 9.3: Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Baustelle in Rotterdam), Betoniergeschwindigkeit $v_b = 3$ m/h

verlauf über die Schlitzhöhe wird für vier Betoniergeschwindigkeiten ($v_b = 3, 5, 10$ und 15 m/h) berechnet. Als kleinste Geschwindigkeit wird $v_b = 3$ m/h gewählt, zumal die DIN EN 1538 [19] diese Geschwindigkeit als minimal zulässig vorgibt, mit der der Beton im Schlitz aufsteigen muss, um eine wirkungsvolle Verdrängung der Stützsuspension sicher zu stellen. Die Bilder 9.3, 9.4, 9.5 und 9.6 zeigen die Frischbetondruckentwicklung über die Zeit für die vier Betoniergeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Tiefenlage im Schlitz. Auffällig ist, dass umso größer die Betoniergeschwindigkeit ist umso größer auch der Frischbetondruck wird.

Für die Konsolidierung des Filterkuchens muss vom Totaldruck des Frischbetons der Wasserdruck abgezogen werden, da dieser entgegengesetzt zum Betondruck wirkt. Es wird somit nur der Frischbetonüberdruck Δp berücksichtigt. Der Grundwasserspiegel wird 3 m unterhalb der Lamellenoberkante angesetzt.

Die numerische Berechnung der Konsolidierung des Filterkuchens FK-SP5 unter dem Betondruckrückgang erfolgt anhand des in Kapitel 7 beschriebenen FE-Modells. Es wird die Entstehung des Filterkuchens FK-SP5 innerhalb von 24 Stunden, wie im Kapitel 7 beschrieben, numerisch simuliert und danach der Filterkuchen mit dem zeitabhängigen Betondruckverlauf, als Oberflächenlast (Surface Load), belastet. Das Betonieren wird im FE-Modell durch diskrete, aufeinander folgende Lastzustände, in so genannten STEP'S mit einer STEP-Dauer von 15 min, abgebildet, wobei die Lastgrößen der Lastzustände

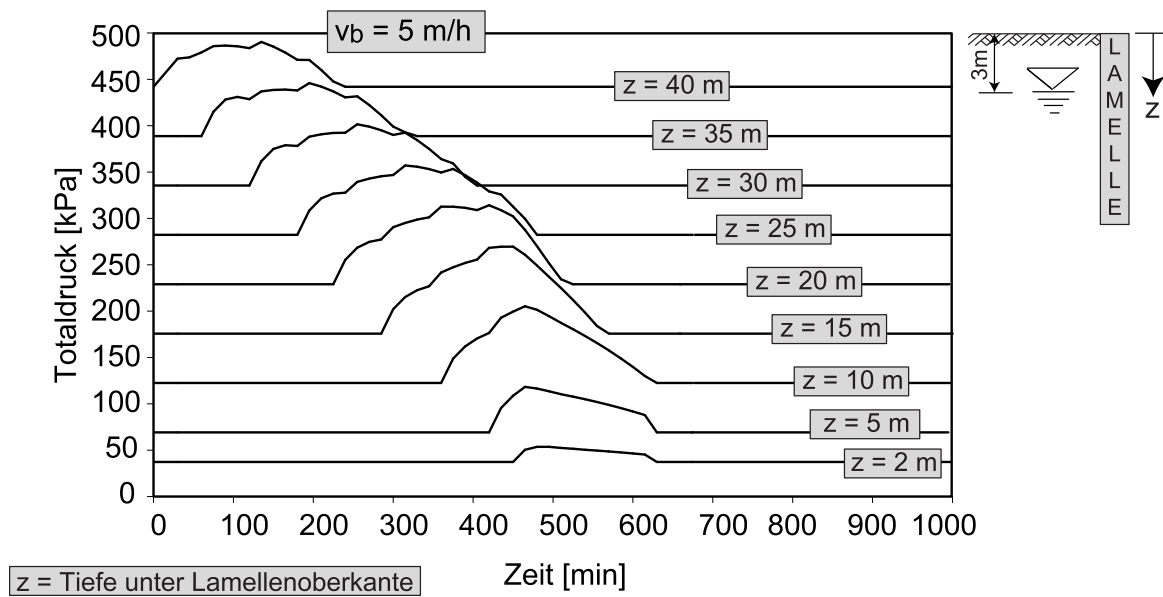


Bild 9.4: Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Baustelle in Rotterdam), Betoniergeschwindigkeit $v_b = 5 \text{ m/h}$

über die rechnerische STEP-Dauer in einander linear übergehen. So kann der in den Bildern 9.3, 9.4, 9.5 und 9.6 dargestellte Polygonzug der Betondruckentwicklung numerisch abgebildet werden. Dem Filterkuchen wird elasto-plastisches Materialverhalten zugeordnet ("Modified Cam-Clay Model" beschrieben im Kapitel 2.4 mit Materialparametern aus Tabelle 7.2), damit im Wesentlichen die spannungsabhängige Steifigkeit berücksichtigt wird. Auch hier wird als Randbedingung angenommen, dass der Filterkuchen nur einseitig (an der Erdseite) entwässern kann und daher dort der Porenwasserüberdruck gleich Null ist.

Bild 9.7 zeigt repräsentativ die Konsolidierung des Filterkuchens für ein Element an der Betonseite (längster Entwässerungsweg) des Filterkuchens für die kleinste Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3 \text{ m/h}$ in einer Tiefe von $z = 2 \text{ m}$. Zum Vergleich zeigt Bild 9.8 die Konsolidierung des Filterkuchens in der gleichen Tiefe und für das gleiche Element bei der größten Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 15 \text{ m/h}$. Der Konsolidierungsvorgang unter diesen hier dargestellten Randbedingungen ist komplex, da der Filterkuchen nur einseitig (Grenzfläche zum Boden) entwässern kann, während auf der anderen Seite eine sich reduzierende Auflast einwirkt, die zu einer gleichzeitigen Entlastung der nicht entwässerbaren Filterkuchengrenzfläche führt. Die Zeitdauer, die der Filterkuchen für ein Element an der Betonseite benötigt um den Porenwasserüberdruck Δu abzubauen, der durch die über die Zeit abfallenden Einwirkung Δp hervorgerufen wird, und in effektive Spannungen σ'

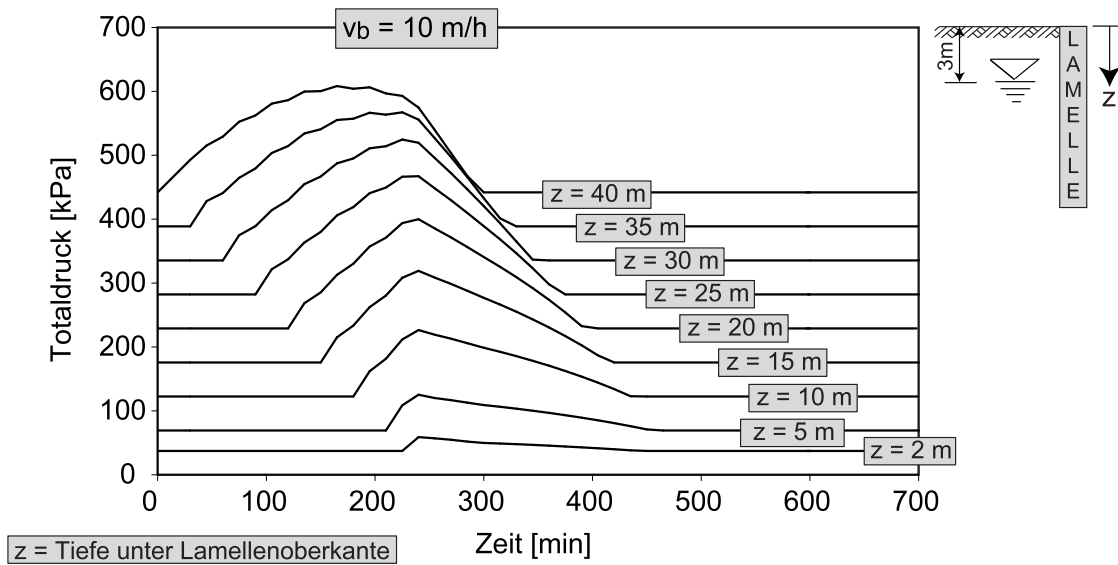


Bild 9.5: Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Baustelle in Rotterdam), Betoniergeschwindigkeit $v_b = 10$ m/h

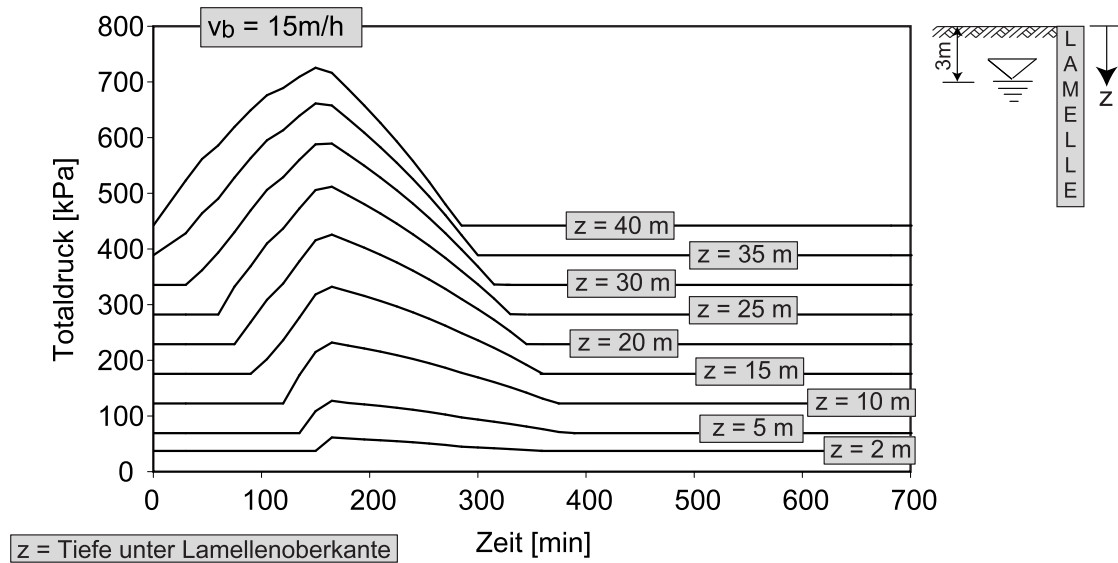


Bild 9.6: Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Baustelle in Rotterdam), Betoniergeschwindigkeit $v_b = 15$ m/h

überzugehen ($\Delta p = \text{const} = \Delta u + \sigma'$), liegt zwischen 40 und 80 Minuten. Diese relativ geringen Konsolidierungszeiten resultieren daraus, dass der Filterkuchen zum einen schon während seines Entstehungsprozesses vorkonsolidiert wird und zum anderen bei hohen effektiven Spannungen aufgrund des dadurch steigenden Steifemoduls die Konsolidierungszeit abnimmt (Terzaghi-Theorie [101]). Für die weiteren Elemente des Filterkuchens in

Richtung Erdreich sind die Konsolidierungszeiten geringer. Zu diesem Zeitpunkt ist der Filterkuchen zum ersten Mal unter dem Betonüberdruck auskonsolidiert und die effektive Spannung σ' im Filterkuchen ist gleich groß wie die Einwirkung bzw. der Totaldruck Δp ($\Delta p = \sigma'$). Als Konsequenz ist der Porenwasserüberdruck zu diesem Zeitpunkt $\Delta u = 0$.

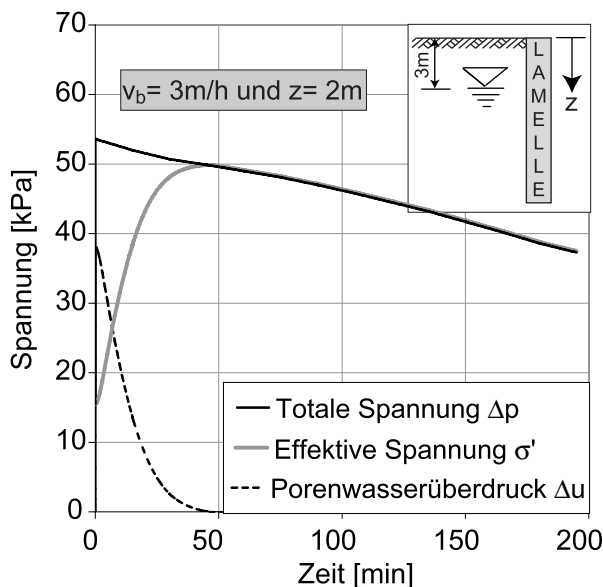


Bild 9.7: Spannungszustand im Filterkuchen FK-SP5 unter Betonüberdruck: $v_b=3\text{m/h}$ und $z=2\text{m}$

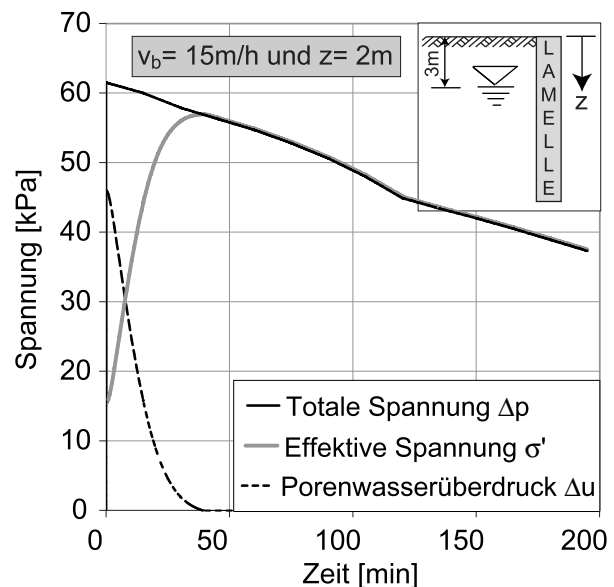


Bild 9.8: Spannungszustand im Filterkuchen FK-SP5 unter Betonüberdruck: $v_b=15\text{m/h}$ und $z=2\text{m}$

Da der Betondruck im weiteren Verlauf weiter abnimmt, werden die effektiven bzw. die totalen Spannungen kleiner und der Filterkuchen gelangt in einen überkonsolidierten Zustand. Zum Zeitpunkt, bei dem zum ersten Mal $\Delta p = \sigma'$ ist, werden die effektiven Spannungen maximal σ'_{max} , da wie schon erläutert auf der sicheren Seite liegend der Filterkuchen nur mit dem Betondruckrückgang belastet wird. Die maximale effektive Spannung σ'_{max} ist daher die für die Bestimmung der Kohäsion maßgebende und hier genannte "Konsolidierungsspannung" $\sigma_{max} = \sigma'_{v,RS,FK}$.

Umso größer die Betoniergeschwindigkeit ist, umso größer ist auch der Betondruck bzw. Betonüberdruck Δp und daher die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$. Da der Betondruck im mittleren bis unteren Schlitzbereich größer ist als im oberen, ist auch dort die "Konsolidierungsspannung" größer. Man kann daher festhalten, dass der Filterkuchen im mittleren bis unteren Bereich des Schlitzes und bei großen Betoniergeschwindigkeiten eine höhere Kohäsion c' besitzen muss als im oberen Schlitzbereich sowie bei kleinen Betonier-

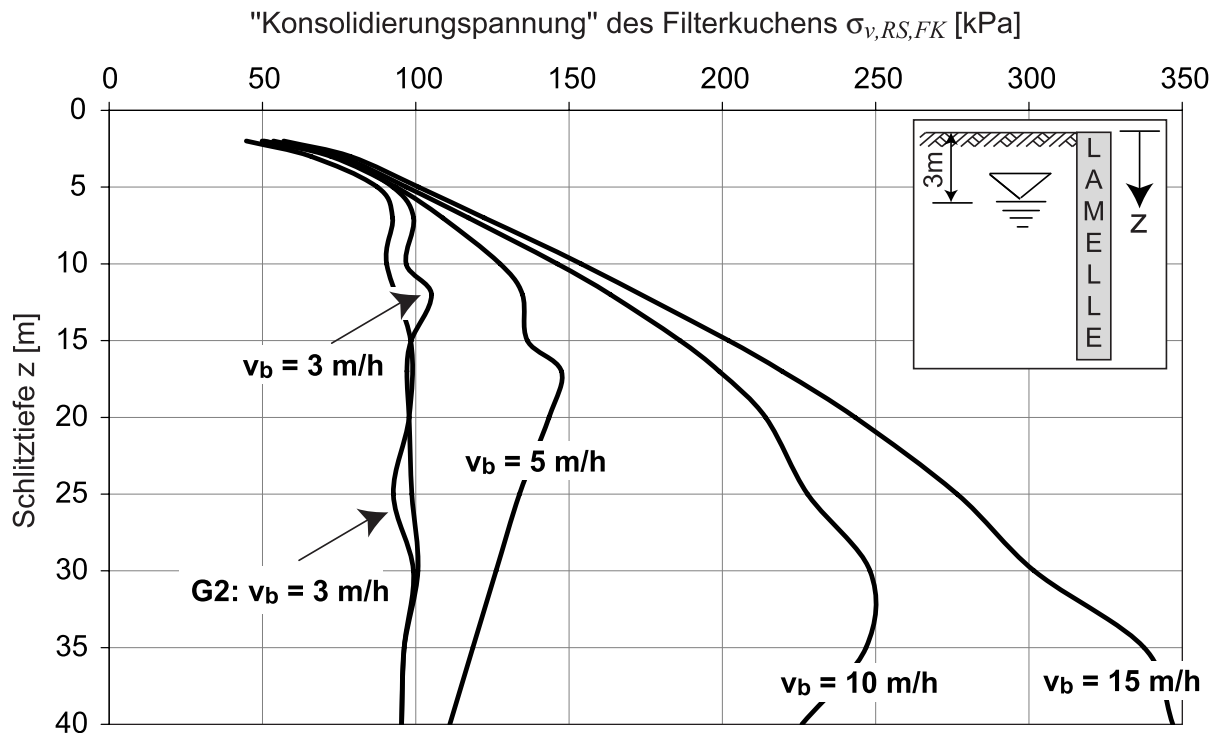


Bild 9.9: "Konsolidierungsspannung" $\sigma_{v,RS,FK}$ des Filterkuchens über die Schlitztiefe infolge Frischbetondruck

geschwindigkeiten, da gilt: $c' = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c = (\sigma'_{v,RS,FK} \cdot 0,3) \cdot \tan \varphi'_c$. Der Wert 0,3 steht für das Verhältnis der Vorbelastung zur Konsolidierungsspannung, dass bei allen untersuchten in-situ Filterkuchenmaterialien im Kapitel 6.2.2 in der Größenordnung von $\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v,RS}} \approx 0,3$ liegt. Bild 9.9 zeigt die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ des Filterkuchens in Abhängigkeit der Schlitztiefe für die vier Betoniergeschwindigkeiten $v_b = 3, 5, 10$ und 15 m/h.

9.3.1 Einfluss der Schlitzgeometrie

Im vorhergehenden Kapitel 9.3 wird gezeigt, dass bei niedrigen Betoniergeschwindigkeiten der Betondruck und damit die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$, die die Kohäsion des Filterkuchens beeinflusst, am geringsten ist.

Zur Ermittlung des Einflusses der Schlitzgeometrie auf den Betondruckverlauf wird daher die minimale Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h gewählt und die Geometrie systematisch variiert. Die Schlitzgeometrie beeinflusst aufgrund der verfügbaren spezifischen Mantelreibung der Frischbetonsäule, in Quadratmeter Mantelfläche pro Kubikmeter

Frischbeton, den Siloeffekt im Schlitz. Mit zunehmender Breite und Länge muss laut [51] der Einfluss der Silowirkung auf die Betondruckentwicklung abnehmen. [51] zeigt, dass bei Vernachlässigung der Mantelreibung der maximale Betondruck sowie die Zeit bis zum Einsetzen des Druckrückganges vergrößert wird. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass bei geringer spezifischer Mantelreibung der Betondruck groß wird.

Tabelle 8.2 zeigt die untersuchten Schlitzabmessungen. Die Schlitzgeometrien G4, G5 und G6 sind Schlitzabmessungen folgender Baustellen: Hamburg [75], Lamelle 3 in Amsterdam [11] und Lamelle 4 in Amsterdam [11]. Bei den Schlitzgeometrien G1, G2 und G3 wurden systematisch die Schlitzseitenlängen auf übliche Maximal- bzw. Minimalwerte verändert.

Es zeigt sich, dass die größten Abweichungen zum Betondruckverlauf der Schlitzwandlamelle 34 durch Variation der Schlitzbreite b entstehen. Die größte Spannungsdifferenz zwischen den Maximalwerten der Betondruckverläufe, die bei der Schlitzgeometrie G2 auftritt, beträgt knapp 3 kPa und liegt im Rahmen von mess- bzw. versuchsüblichen Abweichungen.

Bild 9.10 zeigt die Betondruckverläufe über die Schlitztiefe der Schlitzwandlamelle 34 im Vergleich zu den Verläufen der Schlitzgeometrie G2. In Anlage V sind die Betondruckverläufe der weiteren in Tabelle 8.2 aufgeführten Schlitzgeometrien den Druckverläufen der Schlitzwandlamelle 34 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass der Geometrieinfluss erst bei Beginn des Druckrückgangs, aufgrund der Silowirkung, zum tragen kommt. Im oberen Schlitzbereich sind größere Abweichungen der Betondruckverläufe aufgrund der veränderten Schlitzabmessungen zu erkennen als im unteren Schlitzbereich. Da die spezifische

Tabelle 9.2: Überblick über die sechs neu untersuchten Schlitzabmessungen G1 bis G6

L / b					
G1	G2	G3	G4	G5	G6
8 / 1,6 m	8 / 0,6 m	2,5 / 1,2 m	Hamburg 4,3 / 1,2 m	A'dam Lamelle 3 2,7 / 0,8 m	A'dam Lamelle 4 6,2 / 0,8 m
spezifische Mantelfläche in m^2/m^3					
1,50	3,58	2,47	2,13	3,20	2,82
Vergleich mit Schlitzwandlamellen 34 Rotterdam: $L / b = 8 / 1,2$ m und spezifische Mantelfläche = $1,91 \text{ m}^2/\text{m}^3$					

Dick gedruckt sind die von Schlitzwandlamellen 34 (Baustelle Rotterdam) abweichenden Abmessungen

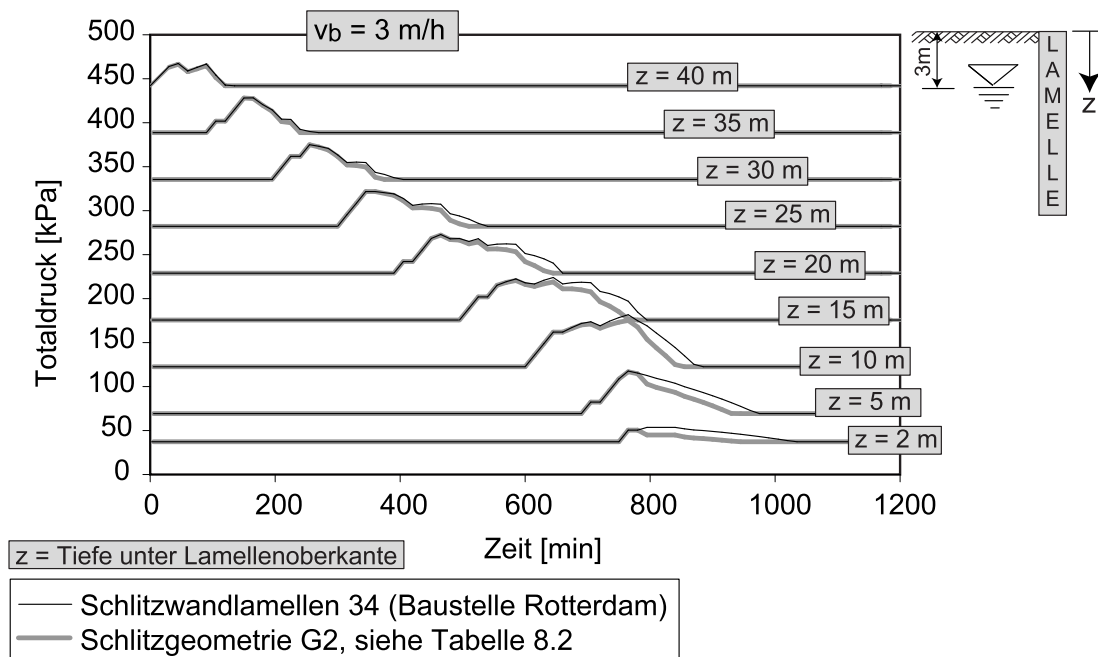


Bild 9.10: Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Baustelle in Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G2 (Tabelle 8.2), Betoniergeschwindigkeit $v_b = 3 \text{ m/h}$

Mantelfläche der Schlitzgeometrie G2 am größten ist, ist bei diesem Schlitz der Siloeffekt am stärksten und damit der Betondruck am kleinsten. Die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ des Filterkuchens muss daher auch kleiner sein. Obwohl die Maximalwerte der Betondruckverläufe nur gering von einander abweichen, wird demonstrativ die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ des Filterkuchens unter dem Betondruckverlauf der Schlitzgeometrie G2 bei einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3 \text{ m/h}$ über eine Schlitztiefe von 40 m ermittelt. Die Abweichungen der Spannungsverläufe zeigt Bild 9.9.

9.3.2 Filterkuchen bei langer Suspensionsstandzeit

Problematisch sind in der Praxis Bauunterbrechungen bedingt z.B. durch das Wochenende, Feiertage sowie andere Unwegsamkeiten. Liegen zwischen Beginn des Aushubs und Beginn des Betonierens mehr als 30 h, muss nach E DIN 4126 [22] der Wandreibungswinkel zu $|\delta| = 0$ gesetzt werden. Unwirtschaftliche Konsequenzen für die Wandbemessung aufgrund eines erhöhten Erddrucks können daraus resultieren.

In Triantafyllidis [105] finden sich Spitzenwerte für die Aushubleistung von $25 \text{ m}^2/\text{h}$ eines Greifers im weichen bzw. lockeren Boden. Bei steifen bindigen Böden kann die Leistung von 16 bis $20 \text{ m}^2/\text{h}$ ausfallen, hingegen beträgt sie bei dichten bis sehr dichten rolligen Böden

im Mittel nur noch 10 bis 12 m²/h. Mit der Annahme, dass zwischen Beginn des Aushubs bis zum Arbeitsstillstand 16 h liegen und bis zur Aufnahme der Betonierarbeiten weitere 57 Stunden vergehen, würde sich ein Filterkuchen innerhalb von 73 Stunden ausbilden.

Entstehung des Filterkuchens

Für diese Randbedingung wird der Versuch V-SP5 aus Kapitel 5 mit einer neuen Suspensionsstandzeit von 73h wiederholt, V-SP5_{73h}. Zur Simulation der Greiferarbeiten werden über die ersten 16 Stunden die Lochplatten im Versuchskasten vertikal auf und ab gefahren.

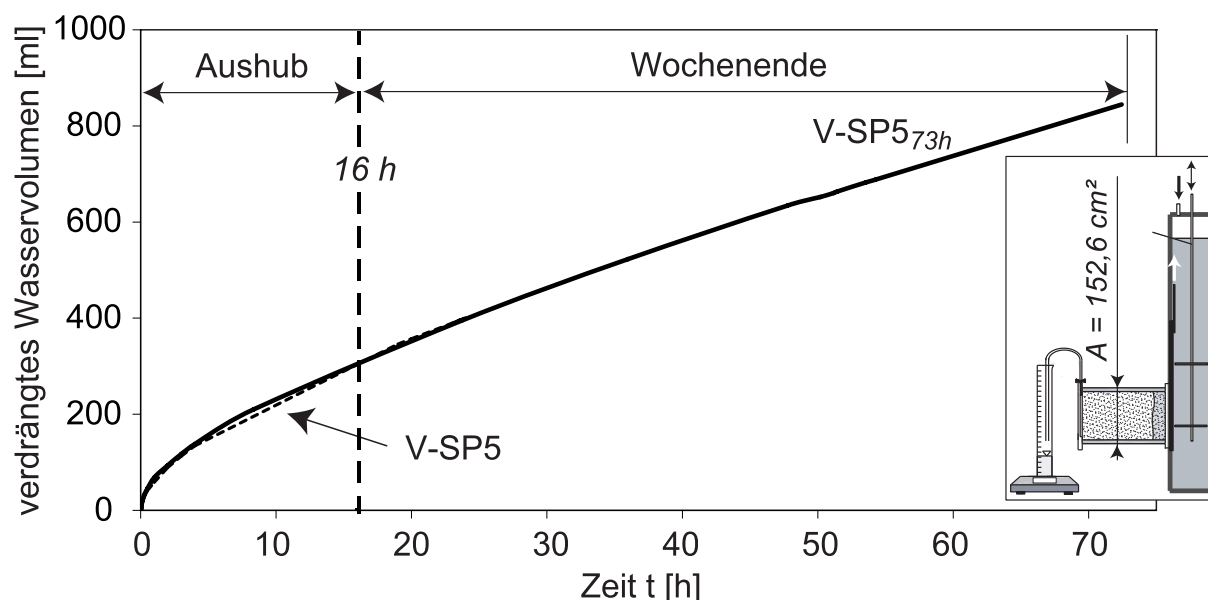


Bild 9.11: Aus dem Boden verdrängtes Wasservolumen über die Zeit, V-SP5_{73h}

Bild 9.11 zeigt die zeitliche Entwicklung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens. Nach Versuchende wird der Filterkuchen FK-SP5_{73h} freigelegt. Die weiche Suspensionsmasse wird mit dem gleichen Verfahren wie die Filterkuchen aus Kapitel 5 von der Filterkuchenoberfläche entfernt. Der verbleibende in sich standfeste Filterkuchen hat eine gemessene Dicke zwischen 16 bis 18 mm und ist damit um ca. 7 bis 9 mm dicker als der Filterkuchen FK-SP5 nach 24 Stunden Suspensionsstandzeit, Bild 9.12.

Im Weiteren wird die Filterkuchenbildung FK-SP5_{73h} mit dem Modell aus Kapitel 7.1 unter Berücksichtigung des gemessenen aus dem Boden verdrängten Wasservolumens simuliert. Die Berechnung zeigt Anlage III. Auf Grund der geringfügig abweichenden Messzeitpunkte zwischen Versuch V-SP5 und V-SP5_{73h} weichen auch die Auswertzeitpunkte im

Filterkuchen FK-SP574h

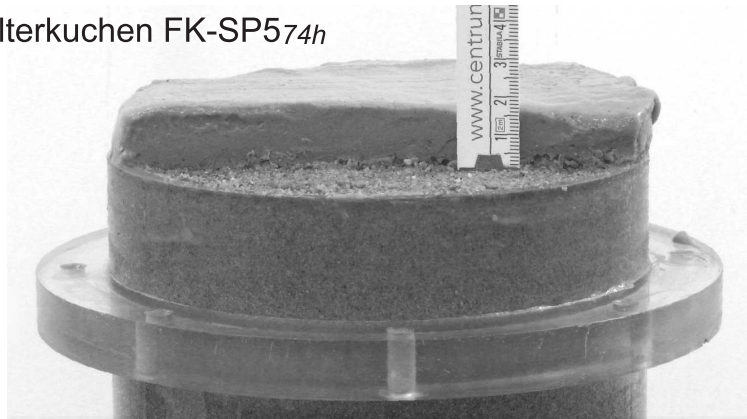


Bild 9.12: Filterkuchen nach 73 Stunden Suspensionsstandzeit, Versuch V-SP573h

Modell und damit die fünf ersten Schichtdicken der Filterkuchen FK-SP5 und FK-SP573h etwas voneinander ab. Bei der Modellrechnung wird das fortschreitende Anwachsen des Filterkuchens FK-SP573h ab der 24. bis zur 73. Stunde mit drei weiteren Schichten modelliert, so dass der Filterkuchen insgesamt aus 8 Schichten besteht. Die Porenzahl sowie die Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke zeigen die Bilder 9.13 und 9.14.

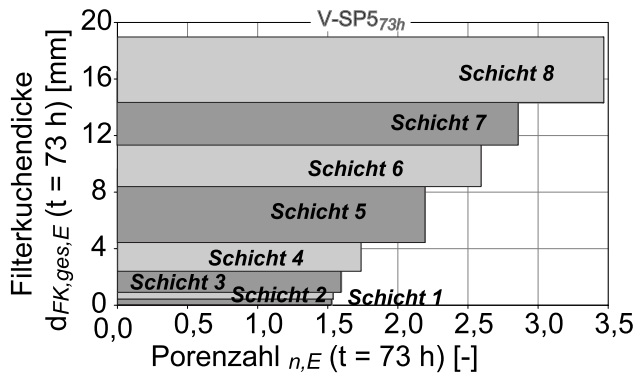


Bild 9.13: Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke, FK-SP573h

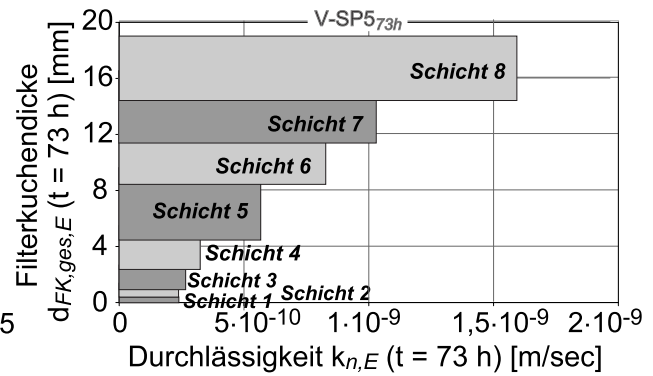


Bild 9.14: Verlauf der Durchlässigkeit über die Filterkuchendicke, FK-SP573h

Sedimentationsprozesse werden analog zu Kapitel 5 nach dem Versuche durch die Entnahme von Suspensionsproben aus dem unteren und oberen Bereich des Versuchskastens nachgewiesen. Der prozentuale Anteil der Körner $< 0,063$ mm liegt im oberen Bereich des Versuchskastens bei 86,3% und im unteren Bereich bei 80,1%. Diese prozentuale Abweichung ist mit 6,2% gering. Von Möbius et al. [54] werden Sandgehalte von 6 Suspensionen nach 5 Tagen Sedimentation untersucht, Kapitel 5. Bei einem Bentonitgehalt von 45 g

/ l Wasser reduziert sich der Sandgehalt bei 4 Versuchen um ca. 25% bei den restlichen 14 Versuchen um durchschnittlich 10%. Bei einem Bentonitgehalt von 60 g / l Wasser ist der sedimentierte Sandgehalt nach 5 Tagen nur bei einem Versuch mit 23% erhöht. Die anderen 17 Versuche weisen deutlich kleinere Sedimentationen von überwiegend < 10 % auf, Tabelle 2.1.

Sedimentationsprozesse der Suspensionsfeststoffe können nicht vollständig ausgeschlossen werden, sind jedoch selbst nach 5 Tagen Suspensionsstandzeit nicht erheblich. Sofern die Suspension vor dem Baustopp nicht homogenisiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kornverteilung des Filterkuchens während der Bauunterbrechung nicht maßgebend ändert.

Die Modellberechnung des Versuchs V-SP5_{73h} wird numerisch simuliert. Es zeigt sich, dass die drei neuen Schichten 6, 7 und 8, gleich wie die fünf weiteren Schichten, für jeden Schritt vollständig auskonsolidiert sind. In Bild 9.15 wird der zeitliche Verlauf der effektiven Spannungen σ' und Porenwasserüberdrücke u für die drei Schichten 6, 7 und 8 für die Schritte 6, 7 und 8 dargestellt. Betrachtet wird jeweils ein Element an der Oberkante der Schichtgrenze. Schicht 8 besitzt nach 73 Stunden Suspensionsstandzeit eine "Kon-

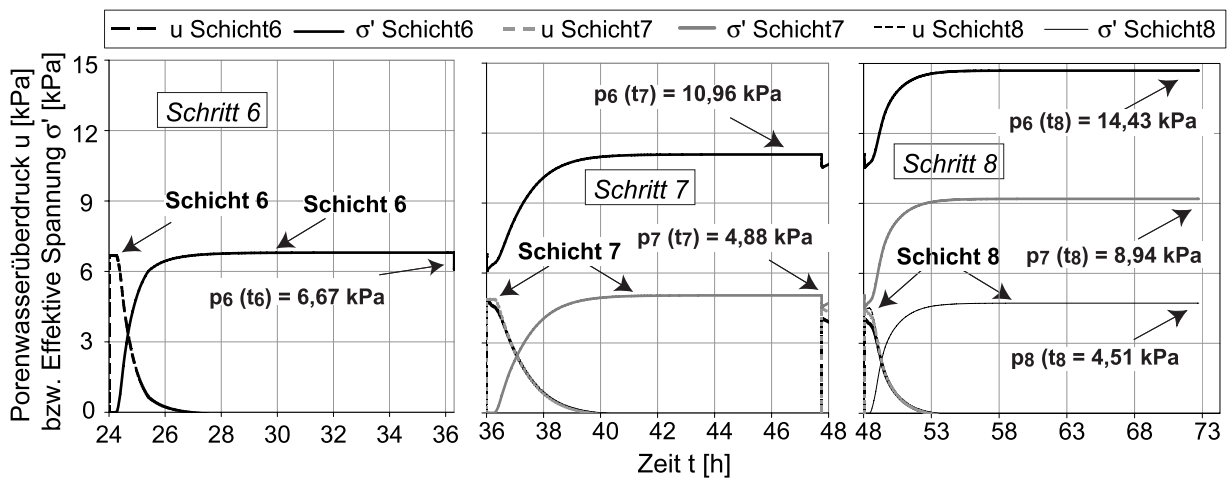


Bild 9.15: Porenwasserüberdruck u und effektiven Spannung σ' über die Zeit t , FK-SP5_{73h}

solidierungsspannung" von $\sigma_{v,RS,FK} = 4,51 \text{ kN/m}^2$. Mit dem maximalen bzw. minimalen Winkel der Kohäsion der in-situ Filterkuchen von $\varphi'_c = 8,1^\circ$ und $14,9^\circ$ hat die äußerste Filterkuchenschicht nach dem Wochenende eine Kohäsion zwischen $c' = 0,21$ und $0,4 \text{ kPa}$. Nach [3], Kapitel 8, besitzen Fließbetone eine Fließgrenze in einer Größenordnung von $\tau_F = 400 \text{ Pa}$. Der Vergleich der beiden Scherfestigkeiten lässt vermuten, dass unter

den hier angenommenen Randbedingungen, die sich nach dem Wochenende gebildete Filterkuchenschicht nicht vollständig stehen bleibt. Da das Berechnungsmodell Mittelwerte über die Schichtdicke liefern, liegt nahe, dass ein Teil der Schicht 8 vom aufsteigenden Frischbeton verdrängt wird.

Ermittlung der "Konsolidierungsspannung"

Der Einfluss der erhöhten Filterkuchendicke auf die "Konsolidierungsspannung" $\sigma_{v,RS,FK}$ unter dem Betondruck wird durch Belastung des Filterkuchens FK-SP5_{73h} mit dem abfallenden Ast des Betonüberdruckverlaufs der Lamellen 34 bei der Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h und einer Tiefe von 2 m untersucht. Eine Tiefe von 2 m wird gewählt, da in dieser Tiefe der ermittelte Betondruck am geringsten ist und daher auch die kleinste "Konsolidierungsspannung" hervorrufen wird. Bild 9.16 stellt die effektive Spannung σ' der Filterkuchen FK-SP5 und FK-SP5_{73h} gegenüber. Obwohl sich die Zeitdauer bis zum

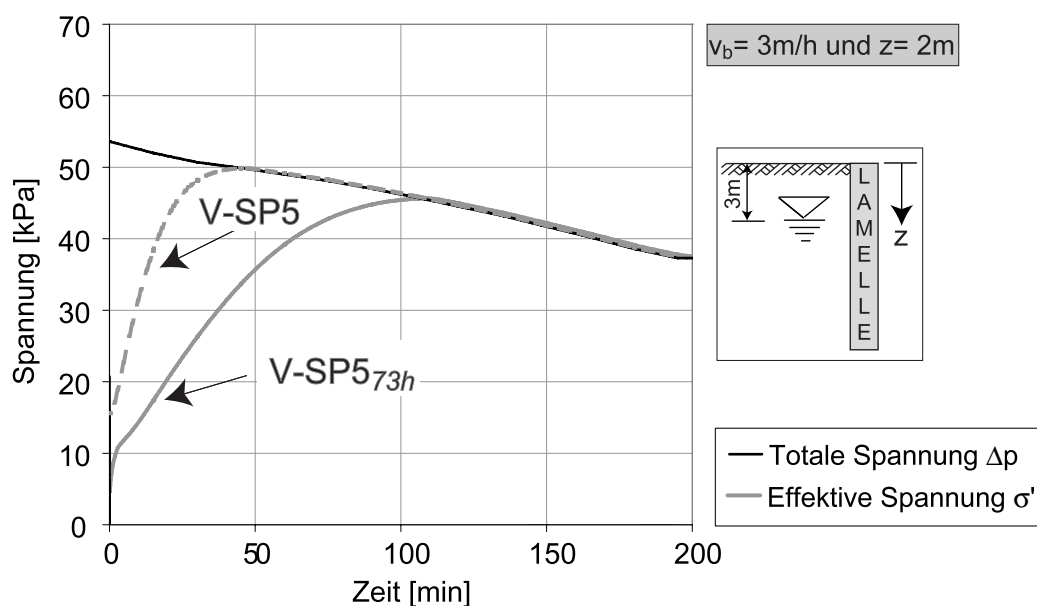


Bild 9.16: Vergleich der effektiven Spannung σ' der Filterkuchen FK-SP5 und FK-SP5_{73h} unter Betonüberdruck: $v_b = 3$ m/h und $z = 2$ m

Erreichen der "Konsolidierungsspannung", der Zeitpunkt bei dem zum ersten Mal die effektive Spannung σ' gleich groß der Einwirkung bzw. dem Totaldruck Δp ($\Delta p = \sigma'$) ist, verdoppelt, ist der Filterkuchen unter einer Last von 45 kPa auskonsolidiert. Die Reduzierung der "Konsolidierungsspannung" auf Grund der erhöhten Suspensionsstandzeit beträgt damit 10%.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass sich auf Grund einer erhöhten Suspensionstandzeit wegen z.B. Bauunterbrechungen eine größere Filterkuchenschicht an der Erdwandung ausbildet. Auf Grund der größeren Filterkuchenmächtigkeit resultiert eine längere Konsolidierungszeit und somit eine durch den Frischbetondruck hervorgerufene niedrigere "Konsolidierungsspannung". Der Filterkuchen ist ein gemischtkörniges Material und besitzt eine nicht zu vernachlässigende Scherfestigkeit, Kapitel 6.2.2. Diese Scherfestigkeit setzt sich im überkonsolidierten Zustand aus einem Reibungs- und einem Kohäsionsanteil zusammen. Angesichts der erhöhten Suspensionstandzeit und der daraus resultierenden niedrigeren "Konsolidierungsspannung" wird die Kohäsion geringfügig reduziert. Die hier angeführten Überlegungen lassen jedoch den Ansatz der E DIN 4126 [22], bei Suspensionsstandzeiten > 30 h den Wandreibungswinkel $|\delta| = 0$ zu setzen, in der Gegenüberstellung zu konservativ erscheinen.

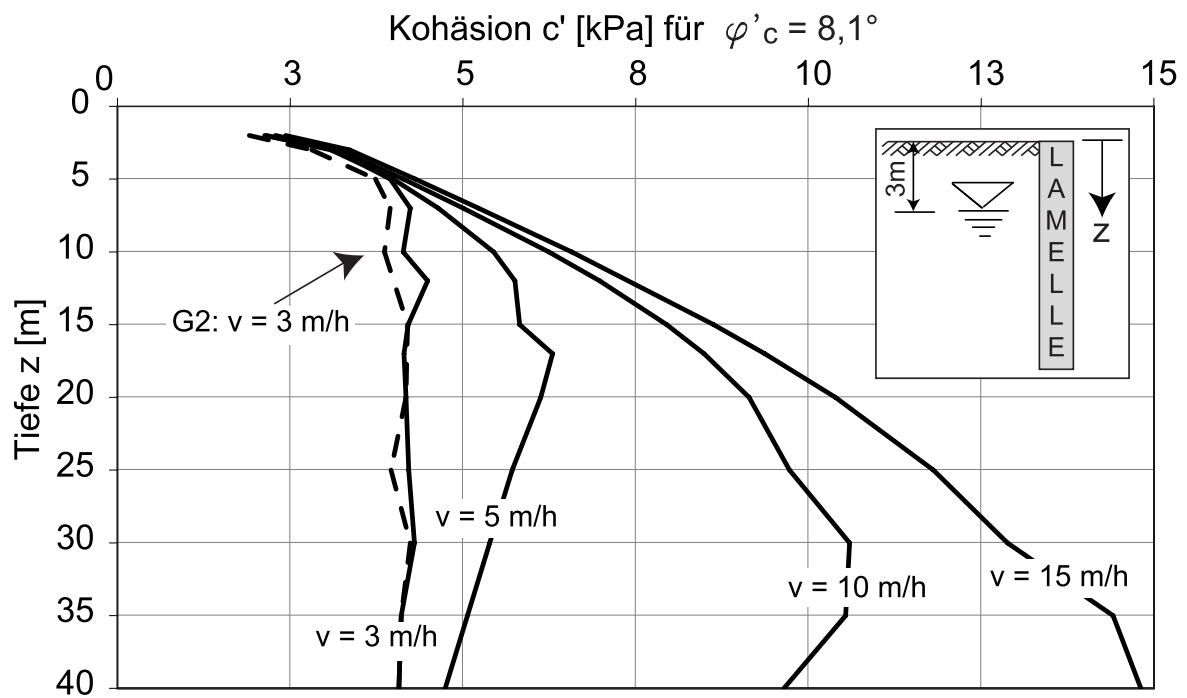
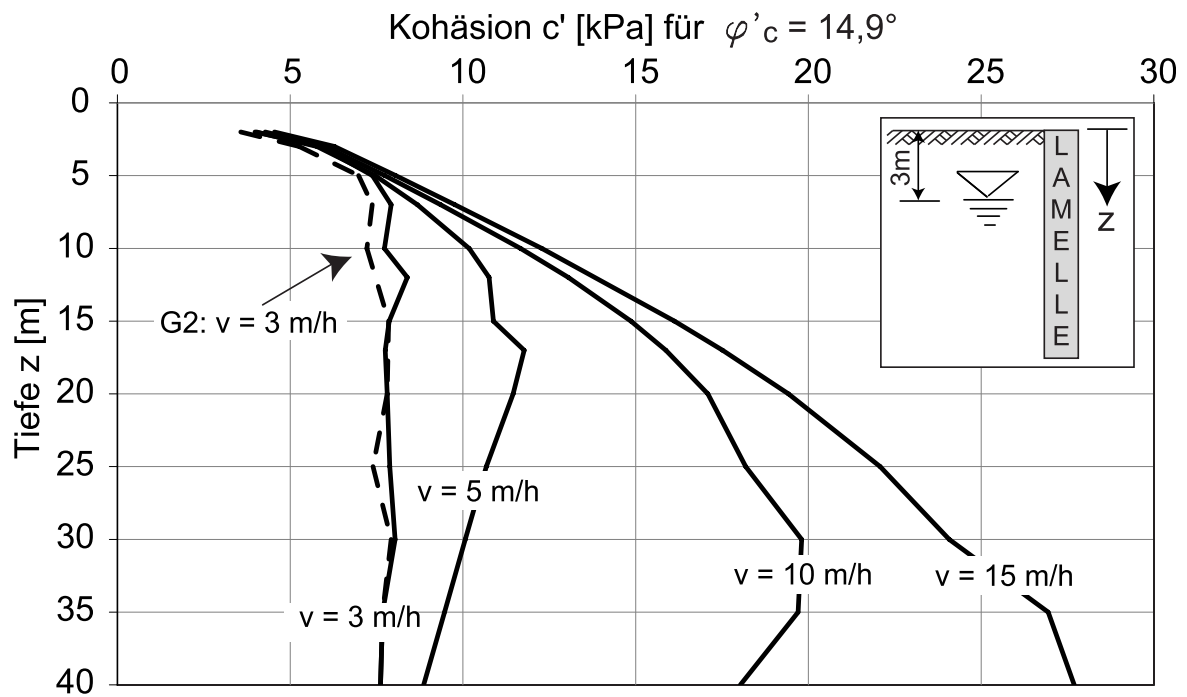
Auch wenn auf Grund der erhöhten Suspensionstandzeit die Kohäsion reduziert wird, besitzt der Filterkuchen mindestens noch seine Gesamtscherfestigkeit des normalkonsolidierten Zustandes, die für erdstatische Berechnungen auf jeden Fall angesetzt werden kann.

9.4 Die Scherfestigkeit des Filterkuchens aus Kohäsion und Reibung

Für die zur Untersuchung der Filterkuchenscherfestigkeit gewählte Schlitzwandlamelle 34 der Baustelle in Rotterdam wird die Kohäsion des Filterkuchens mit $c' = \sigma'_v \cdot \tan \varphi'_c = (\sigma'_{v,RS,FK} \cdot 0,3) \cdot \tan \varphi'_c$ berechnet. Ermittelt wird die Kohäsion in Abhängigkeit der Betoniergeschwindigkeit v_b über die Schlitztiefe infolge der "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ aus dem Frischbetonüberdruck und dem Winkel der Kohäsion φ'_c der vier Referenzbaustellen.

Der Winkel der Kohäsion φ'_c besitzt eine Bandbreite von $\varphi'_c = 8,1^\circ$ bis $14,9^\circ$, Kapitel 6.2.2. Die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ wird Bild 9.9 entnommen. Man erhält somit für den größten Wert von φ'_c die maximale und mit dem kleinsten Wert von φ'_c die minimale Kohäsion, Bilder 9.17 und 9.18. Bild 9.19 zeigt die Bandbreite der Kohäsion in Abhängigkeit der Schlitztiefe und Betoniergeschwindigkeit.

Die Scherfestigkeit setzt sich im überkonsolidierten Zustand aus einem Reibungs- und einem Kohäsionsanteil zusammen und im normalkonsolidierten Zustand wird der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s maßgebend.

Bild 9.17: Kohäsion c' des Filterkuchens über die Schlitztiefe, $\varphi'_c = 8,1^\circ$ Bild 9.18: Kohäsion c' des Filterkuchens über die Schlitztiefe, $\varphi'_c = 14,9^\circ$

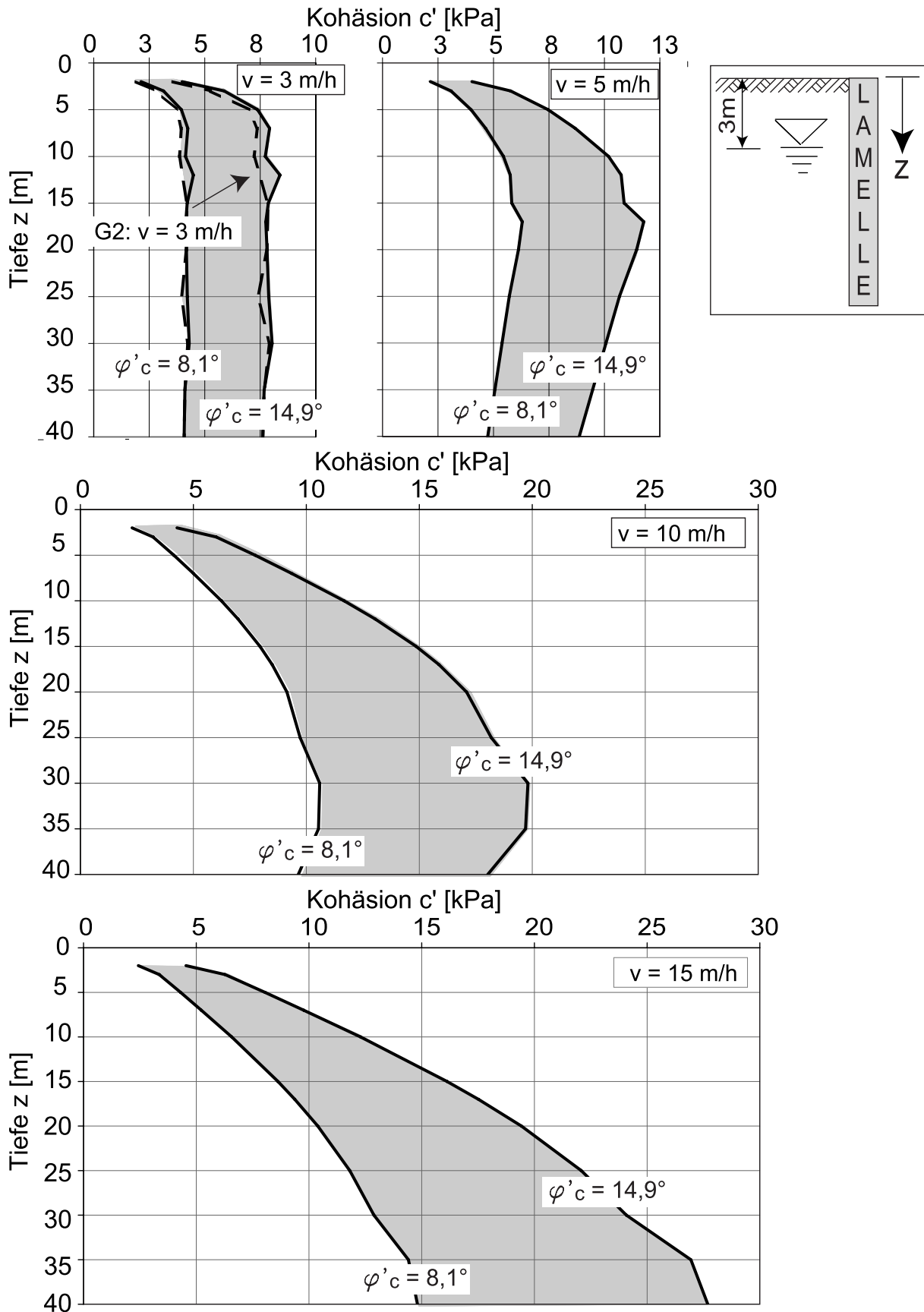


Bild 9.19: Bandbreite der Kohäsion c' über die Schlitztiefe

Für die Scherfestigkeit τ des Filterkuchens nach Fertigstellung des Schlitzes gilt unter den hier genannten Voraussetzungen folgende Bedingung:

$$\tau = \begin{cases} c' + \sigma'_{Boden} \cdot \tan \varphi' & : \sigma'_{Boden} < \sigma'_v \text{ überkonsolidierter Zustand} \\ \sigma'_{Boden} \cdot \tan \varphi'_s & : \sigma'_{Boden} > \sigma'_v \text{ normalkonsolidierter Zustand} \end{cases} \quad (9.6)$$

Die effektive Spannung σ'_{Boden} steht für den Erddruck des anstehenden Bodens. Je nachdem ob der Erddruck kleiner oder größer als die Vorbelastung σ'_v ist, wird für die Scherfestigkeit des Filterkuchens die Reibung und Kohäsion und damit der überkonsolidierte Zustand oder der Winkel der Gesamtscherfestigkeit und damit der normalkonsolidierte Zustand maßgebend.

Exemplarisch wird nun die Scherfestigkeit τ der Filterkuchenmaterialien FK-Ro-Labor, FK-LM-Labor, FK-LH-Labor und FK-Ko-Labor ermittelt, Bilder 9.20, 9.21, 9.22 und ??.

Hierfür wird als anstehender Boden ein homogener Sand mit einer Wichte von $\gamma/\gamma' = 20/10 \text{ kN/m}^3$ und einem Erddruckbeiwert von $K_{ah} = 0,3$ gewählt. Der Grundwasserspiegel liegt 3 m unter der GOK. Die "Konsolidierungsspannung" $\sigma'_{v,RS,FK}$ wird Bild 9.9 entnommen.

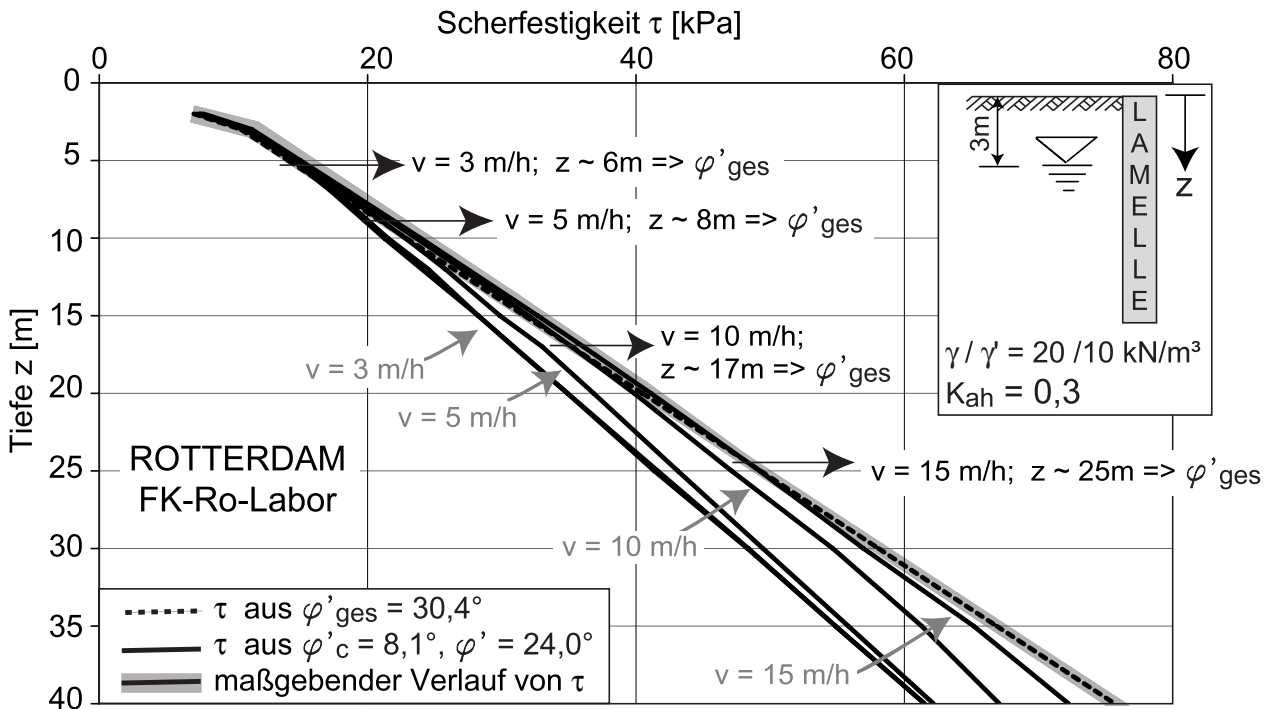


Bild 9.20: Scherfestigkeit τ des Filterkuchenmaterials FK-Ro-Labor

Die Scherfestigkeitsverläufe der Filterkuchen FK-Ro-Labor, FK-LM-Labor und FK-LH-Labor gleichen sich, da auch ihre Scherparameter ähnlich sind. Im oberen Wandbereich ist der überkonsolidierte Zustand für die Scherfestigkeit des Filterkuchens maßgebend und im unteren Wandbereich der normalkonsolidierte Zustand, da dort der Erddruck σ'_{Boden} größer als Vorbelastung σ'_v ist, Gleichung 9.6. Konkret lassen sich für die Betoniergeschwindigkeiten v_b folgende Tiefen z ermitteln, ab diesen die Gesamtscherfestigkeit und damit φ'_s maßgebend wird:

- $v_b = 3 \text{ m/h} \Rightarrow z \approx 6 \text{ m}$
- $v_b = 5 \text{ m/h} \Rightarrow z \approx 7 \text{ m}$
- $v_b = 10 \text{ m/h} \Rightarrow z \approx 16 \text{ m}$
- $v_b = 15 \text{ m/h} \Rightarrow z \approx 24 \text{ m}$

Vergleicht man die Scherfestigkeitsverläufe der Filterkuchenmaterialien untereinander, nehmen die Abweichungen mit der Schlittiefe z zu und betragen bei den drei ähnlichen Materialien maximal nur 9,1 kPa (Vergleich τ_{max} des FK-LM-Labor im Bild 9.21 mit FK-LH-Labor im Bild 9.22).

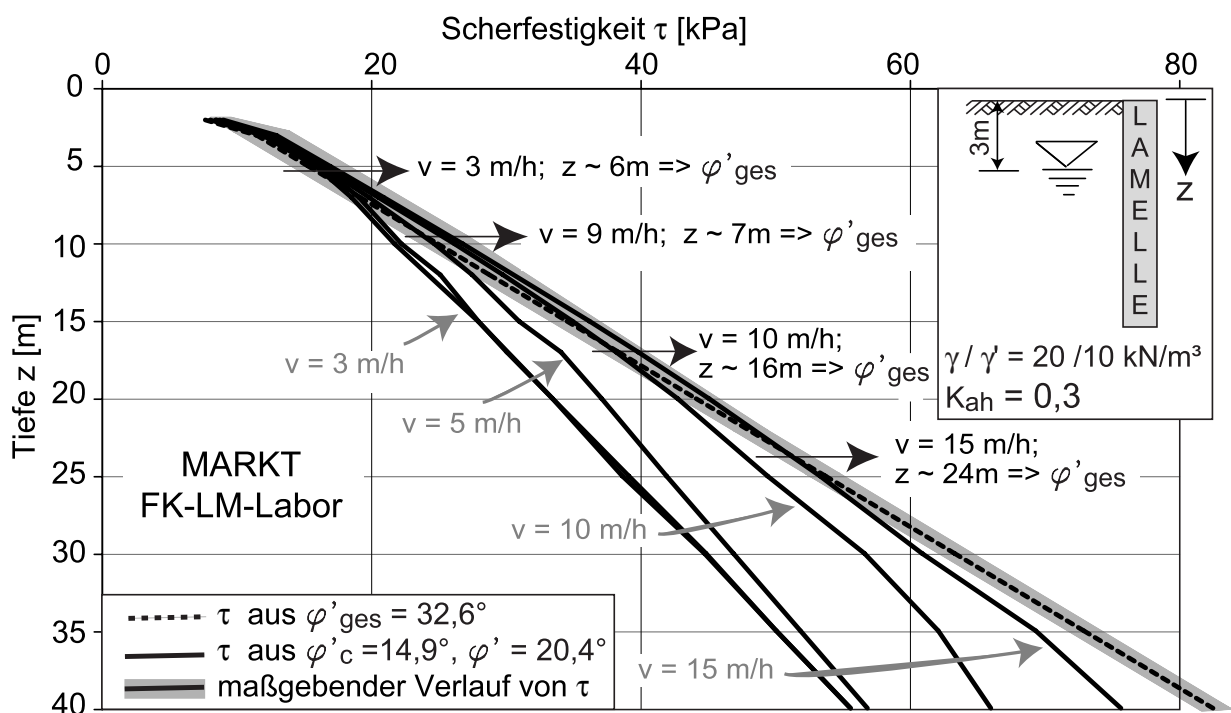
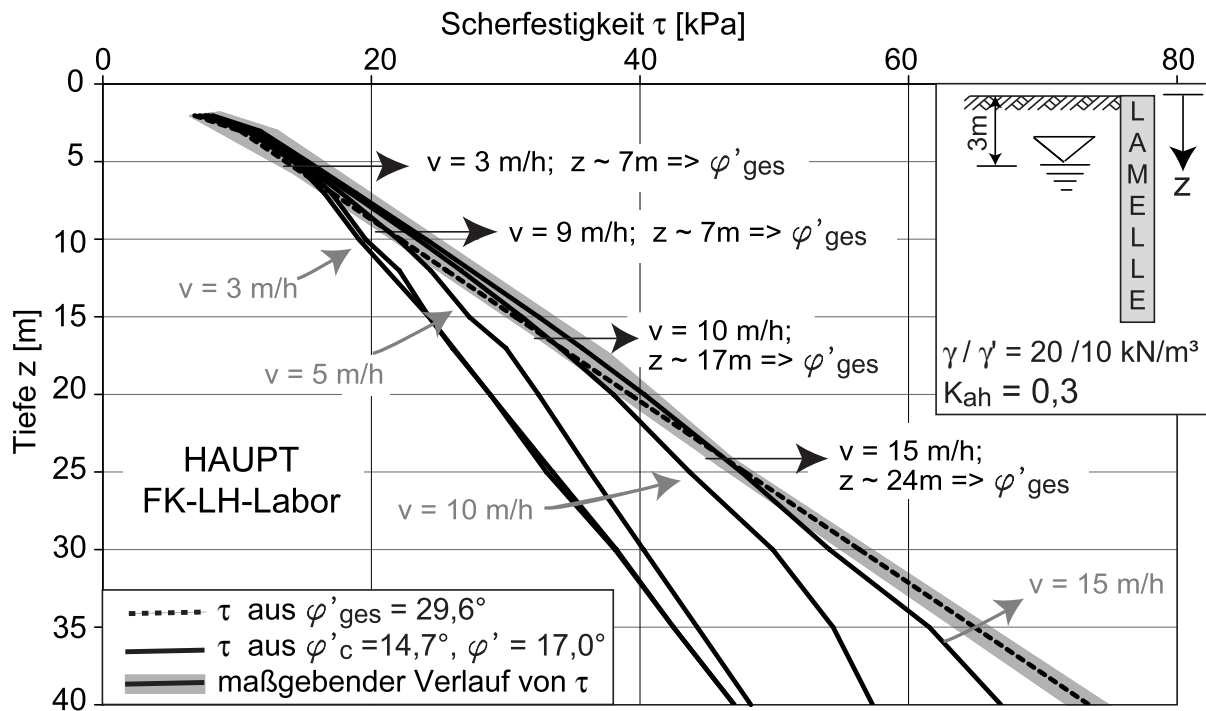


Bild 9.21: Scherfestigkeit τ des Filterkuchenmaterials FK-LM-Labor

Im Ansatz der EAB für den Wandreibungswinkel von Schlitzwänden mit $|\delta| \leq \varphi/2$, bezieht sich die Größe der Wandreibung auf den Reibungswinkel des anstehenden Bodens.

Bild 9.22: Scherfestigkeit τ des Filterkuchenmaterials FK-LH-Labor

Dieser Ansatz basiert auf wenigen Großversuchen, siehe Kapitel 2.1, und war Anlass das Thema neu aufzugreifen.

Im Kapitel 6.2.2 werden in-situ Filterkuchenproben untersucht. Aus der Zusammensetzung, dem Aufbau und der Scherfestigkeit der entnommenen Proben wird deutlich, dass auf Grund der ähnlichen Kornzusammensetzungen auch die Scherfestigkeiten in derselben Größenordnung liegen, Kapitel 6.2.2. Die größten Abweichungen zeigt der Filterkuchen FK-Ko-Labor, jedoch weicht auch die Kornverteilungskurve von den der anderen Filterkuchen bedingt durch den geringen Schluffanteil ab, der aus dem kiesigen Baugrund mit wenig Schluffkorn resultiert.

Nach dem Ansatz der EAB müsste die Scherfestigkeit des Filterkuchens FK-Ko-Labor im Vergleich zu den anderen am größten sein, zumal der anstehende Kies der grobkörnigste Baugrund mit dem größten Reibungswinkel φ ist. Der Filterkuchen FK-LM bildete sich im feinkörnigsten Baugrund aus und müsste die kleinste Scherfestigkeit aufweisen. Tatsächlich zeigen die Versuchsergebnisse genau gegenläufige Tendenzen, da die Aufladung der Suspension mit Feinpartikeln aus dem Baugrund die Filterkuchenzusammensetzung und damit die Scherfestigkeit prägt. Bodenkörner mit einem Durchmesser $> 2 \text{ mm}$ gelangen nicht maßgebend in die Filterkuchenschicht. Bei wenig Feinanteilen im Baugrund

ist so der Bentonitanteil im Filterkuchen verstärkt vertreten und die Scherfestigkeit wird reduziert. Ein Ansatz für den Wandreibungswinkel $|\delta|$ in Abhängigkeit der Baugrundscherfestigkeit erscheint als ungeeignet.

Da die Oberflächenstruktur einer Schlitzwand meist uneben bzw. im Verhältnis die Filterkuchenschicht relativ dünn ist, wird bei einem Scherversagen vermutlich der Verlauf der Scherfläche im anstehenden Bodens dominieren. Da jedoch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden kann, dass zumindest ein Teilbereich der Scherflächen die Filterkuchenschicht schneidet, sollte die Scherfestigkeit des Filterkuchens nicht vollständig unberücksichtigt bleiben. Den Wandreibungswinkel auf die Scherfestigkeit des Filterkuchens zu beziehen, macht jedoch nur Sinn, solange die Scherfestigkeit des Filterkuchens kleiner als die des anstehenden Bodens ist.

Die weitläufig existierende Betrachtung, der Filterkuchen sei eine Schmierschicht aus Bentonit zwischen dem anstehenden Boden und der Wandoberfläche, kann auf der Basis der hier durchgeführten Untersuchungen widerlegt werden.

Auf Grund der nachweislich nur gering reduzierten Scherfestigkeit des Filterkuchenmaterials nach langen Suspensionsstandzeiten, erscheint der Ansatz der E DIN 4126 [22] mit $|\delta| = 0$ für Suspensionsstandzeiten im Schlitz, die über 30 h betragen, zu konservativ. Vorausgesetzt wird hierbei, dass die Suspension über die gesamte Standzeit nicht maßgebend regeneriert und damit von den Feinpartikel aus den anstehenden Boden gesäubert wird. Eine geringfügige Reduzierung der Scherfestigkeit mit einem konstanten Abminderungsbeiwert erscheint ausreichend.

Nahe liegend wäre für Bemessungsansätze, die Größe der Scherfestigkeit des Filterkuchens, bei der Schlitzherstellung im überwiegend schluffigen bis sandigen Baugrund, zu pauschalisieren. Denkbar wäre, auf der sicheren Seite liegend, den Winkel der Gesamtscherfestigkeit anzusetzen, da die Werte der drei Filterkuchen FK-Ro-Labor, FK-LM-Labor und FK-LH-Labor nur geringfügig voneinander abweichen und somit bei diesen Bodenverhältnissen die Gesamtscherfestigkeit zuverlässig nachgewiesen werden kann, $\varphi'_s = 29,6^\circ$ bis $32,6^\circ$.

Ist der Baugrund sehr grobkörnig und sind Schwebstoffe die sich in der Suspension anreichern können nur bedingt vorhanden, ist für die Gesamtscherfestigkeit ein geringerer Wert anzusetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird für den Filterkuchen FK-Ko-Labor, der sich im kiesigen Baugrund ausgebildet hat, ein $\varphi'_s = 21,5^\circ$ ermittelt.

Kapitel 10

Zusammenfassung

In den national gültigen Normen und Empfehlungen hat sich für die Berechnungen von Schlitzwänden im GZ 1 ein Wandreibungswinkel von $|\delta| \leq \varphi/2$ etabliert. Der Winkel der inneren Reibung φ steht hierbei für den des anstehenden Bodens. Bei genauerer Betrachtung finden sich jedoch Widersprüche auf der Erdwiderstandsseite. Die EAB 2005 [24] differenziert zwischen Schlitz- und Pfahlwänden. Die Schlitzwandoberfläche wird als "weniger rau" charakterisiert und ein kleinerer Wandreibungswinkel als der bei Pfahlwänden für die statische Berechnung zugelassen. Die DIN 1054-2005 [13] erlaubt dagegen für verrohrt oder unverrohrt bei Verwendung einer Stützflüssigkeit hergestellte Pfählen sowie für Schlitzwände die gleichen Mantelreibungswiderstände anzusetzen und wertet so eine Suspensionsstützung nicht als reibungsreduzierend gegenüber einer möglichen Auflockerung bei der verrohrten Bohrung. Zahlreiche in-situ Versuche, z.B. wie die von [73, 97, 111] belegen, dass bei suspensionsgestützten Ortbetonbauwerken im bindigen sowie im nichtbindigen Böden kein maßgebender tragfähigkeitsmindernder Einfluss der Stützflüssigkeit zu erkennen ist. Trotzdem wird in der Praxis oft die Filterkuchenschicht zwischen dem anstehenden Boden und der Wand als Schmierschicht ohne wesentliche Eigenfestigkeit betrachtet. DIN 4126 [18] gibt z.B. einen Wandreibungswinkel von $|\delta| = 0$ vor, wenn zwischen Beginn des Aushubs und Beginn des Betonierens mehr als 30 h liegen und unterstellt damit der Filterkuchenschicht eine vernachlässigbar geringe Scherfestigkeit.

Der Kontaktbereich Boden-Filterkuchen-Wand wird idealisiert als Schichtensystem, mit folgenden Komponenten, definiert: der Schlitzwand, der "äußeren" Filterkuchenschicht, dem Eindringbereich der Suspension in den Baugrund bzw. bei sehr grobkörnigen Böden der "inneren" Filterkuchenschicht und dem unbeeinflussten Bodenbereich. Die Schichten

sind in Abhängigkeit der Bodenart unterschiedlich stark ausgeprägt. Da die Oberflächenstruktur einer Schlitzwand meist uneben bzw. im Verhältnis die Filterkuchenschicht relativ dünn ist, wird bei einem Scherversagen vermutlich der Verlauf der Scherfläche im anstehenden Boden dominieren. Da jedoch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden kann, dass zumindest ein Teilbereich der Scherflächen auch im Filterkuchen verläuft, wird angenommen, dass die Schicht mit der kleinsten Scherfestigkeit diejenige ist, die das Wandreibungsverhalten bestimmt.

Auf Grund der Oberflächenrauigkeit der Schlitzwand sowie der Verzahnung des Filterkuchens mit dem anstehenden Boden, wird ein Scherbruchversagen in diesen Kontaktstellen ausgeschlossen zumal von keinem Korn- bzw. Strukturbruch ausgegangen wird. Die mikroskopische Rauigkeit von Schlitzwänden wird durch Abscannen von Gipsabdrücken der Wandoberflächen dreier Referenzbaustellen ermittelt, demzufolge die Schubkraftübertragung unabhängig von der Rauigkeit der Wand ist.

In-situ Filterkuchenproben von vier Referenzbaustellen im nichtbindigen Baugrund zeigen, dass der Filterkuchen aus einem gemischtkörnigen Material besteht. Während des Aushubprozesses vermischt sich die Stützsuspension mit dem anstehenden Boden, wobei Feinpartikel aus dem Boden in dieser in Schwebe gehalten werden und sich als "äußerer" Filterkuchen an der Erdwandung anlagern. Aus den in-situ Proben geht hervor, dass wenn der Boden aus einem sehr grobkörnigen Material mit wenig Feinanteilen besteht, sich demzufolge die Stützsuspension nur im geringen Maße aufladen kann. Daher sind auch im Filterkuchen diese Feinpartikel wenig vertreten und er besitzt im Vergleich zu den feinkörnigen Baugrundverhältnissen einen höheren Tonanteil. Bodenpartikel mit einem Korndurchmesser größer 2 mm werden in den Filterkuchenmaterialien nicht gefunden. Das sich Stützsuspensionen mit Schwebstoffen aus dem Baugrund aufladen erscheint trivial, jedoch wurde dieser Aspekt für erdstatische Ansätze von Schlitzwandberechnungen nie konsequent verfolgt, obgleich Studien wie von Martak [53] oder Möbius et al. [54] diesen Effekt aufgreifen.

Scherversuche an künstlich nachgebauten Filterkuchenmaterialien der vier Referenzbaustellen zeigen, dass im feinkörnigen, nichtbindigen Baugrund der Filterkuchen eine Gesamtscherfestigkeit von $\varphi'_s \approx 30^\circ$ besitzt, die den Angaben von Gudehus in [36] für tonigen Schluff entsprechen. Im grobkörnigen, nichtbindigen Baugrund ist die Scherfestigkeit deutlich geringer und liegt bei $\varphi'_s \approx 21^\circ$. Während der Schlitzherstellung überkonsolidiert der Frischbeton den Filterkuchen kurzzeitig. Die überkonsolidierte Scherfestigkeit wird nach Krey-Tiedemann [36, 67, 44, 84] mit dem Winkel der inneren Reibung φ' , dem Winkel der

Kohäsion φ'_c und der Vorbelastung σ'_v beschrieben. Der Winkel der inneren Reibung liegt im feinkörnigen, nichtbindigen Baugrund im Bereich von $\varphi' = 17$ bis 24° . Im grobkörnigen, nichtbindigen Baugrund fällt der Winkel der inneren Reibung deutlich geringer aus, $\varphi' = ?^\circ$. Der Winkel der Kohäsion beläuft sich bei den vier untersuchten Filterkuchenmaterialien auf $\varphi'_c = 8,1$ bis $14,9^\circ$.

Die Dicke der Filterkuchenschicht zwischen Schlitzwand und anstehendem Boden liegt im feinsandigen Baugrund bei ~ 10 mm. Bei Bodenverhältnissen mit stark bindigen Bestandteilen und Durchlässigkeiten $< 1 \cdot 10^{-8}$ m/s werden Filterkuchendicken von nur wenigen Millimetern gemessen. Ist der anstehende Boden sehr grobkörnig, schwankt die Filterkuchendicke enorm. Von nur einigen Millimetern reichen die Dicken bis zu 30 mm. Kieskörner sowie einzelne Steine gelangen durch die Filterkuchenschicht hindurch bis zur Wandoberfläche. Eine klare Trennung zwischen "äußeren" und "inneren" Filterkuchen ist hier nicht möglich.

Mit dem Verfahren von Schwanda [89, 90, 91] wird für die vier Filterkuchenmaterialien die so genannte maßgebende "Grundkornfraktion" ermittelt, die das mechanische Verhalten eines Korngemisches steuert. Das "Grundkorn" der vier Filterkuchen liegt im Bereich der Schlufffraktionen. Passend zu den ermittelten Scherfestigkeiten ist das "Grundkorn" des Filterkuchens mit dem größten Reibungswinkel am grobkörnigsten und das "Grundkorn" des Filterkuchens mit dem kleinsten Reibungswinkel am feinkörnigsten. Die Berechnungen zeigen, dass mit dem Verfahren von Schwanda die in einem Korngemisch für das mechanische Verhalten dominierende Fraktion abgeschätzt werden kann.

Filtrationsversuche mit unterschiedlich aufgeladenen Suspensionen an einer Sandoberfläche zeigen zum Einem die Kornverteilung der Ausgangssuspension im Vergleich zu der des entstandenen Filterkuchens und zum Anderen die Entstehung des Filterkuchens über die Zeit durch die Abfiltration von Suspensionsfeststoffen an der Erdwandung. Darüber hinaus wird der Einfluss des Druckniveaus auf das Anwachsen der Filterkuchenschicht ermittelt.

Aus den Versuchen wird ein im Filterkuchen elementar vertretenes Größtkorn von 2 mm bestimmt, welches demnach zu dem gemessenen Größtkorn der in-situ Filterkuchen passt. Körner > 2 mm sind nur vereinzelt im Filterkuchen eingelagert und so für das mechanische Verhalten sekundär. Bei aufgeladenen Suspensionen mit Fraktionen kleiner 2 mm weicht die Kornverteilung des entstandenen Filterkuchens nur unwesentlich von der der Ausgangssuspension ab. Die Abweichungen zwischen der Kornverteilung der Ausgangssuspension und der des entstandenen Filterkuchens, bei Aufladungen mit Fraktionen größer

2 mm, werden weitestgehend durch den Tonanteil ausgeglichen und erklären somit den erhöhten Tonanteil des Filterkuchens der Referenzbaustelle im nichtbindigen, grobkörnigen Baugrund.

Bei Suspensionsdichten von rd. $1,15 \text{ g/cm}^3$ werden in den Versuchen nach 24 h Suspensionsstandzeit Filterkuchendicken von $d = 7$ bis 10 mm gemessen. Höhere Suspensionsdichten führen zu größeren Filterkuchendicken. Die Entstehung des Filterkuchens wird mit dem analytischen Ansatz von Weiß [118] bzw. Schweiger [93] simuliert. Dieser Ansatz idealisiert den Filterkuchen vereinfacht als homogenes, inkompressibles Material. Neben dem über die Dicke gemittelten Filterkuchenporenanteil nach Versuchende ist das gemessene Filtratwasservolumen Eingangsparemeter in den analytischen Ansatz. Die gemessenen und berechneten Filterkuchendicken liegen in der gleichen Größenordnung. Es zeigt sich, dass für eine grundsätzliche Abbildung der Filterkuchenbildung über die Zeit, der Ansatz nach [118], trotz vereinfachenden Annahmen, ausreichend ist.

Die Filtrationsversuche zeigen des Weiteren keinen Einfluss des Druckniveaus auf die über die Zeit gemessene Filtratwassermenge und Filterkuchendicke.

Die Kontaktzone Boden-Schlitzwand wird in einem Scherkasten ähnlich zu den in-situ Verhältnissen, mit den einzelnen Konstruktionsschritten, hergestellt. Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche des Schichtensystems zeigen, dass das Scherversagen im Filterkuchen auftritt. Neben der ermittelten Scherfestigkeit weisen "Schleifspuren" auf ein Scherversagen im Filterkuchen hin.

In der Literatur finden sich Widersprüche hinsichtlich einer Verfestigung des Filterkuchens durch Zementschlämme aus dem Beton. Eine Untersuchung der Kontaktzone, insbesondere der Filterkuchenschicht deuten keine Verfestigung des Filterkuchens an. Mit einem weiteren Versuchsaufbau wird die Entstehung der Kontaktzone erneut in ihren einzelnen Schritten simuliert, wobei hier zusätzlich der Frischbeton unter Druck gesetzt wird. Nach Versuchende wird der Filterkuchen untersucht und eine Verfestigung des Filterkuchens durch Zementschlämme ausgeschlossen.

Filterkuchen von Schlitzwandssystemen sind naturgetreu inhomogen sowie kompressibel und zeichnen sich durch eine stark konsolidierte Grundsicht am Filtermedium aus. Für die Ermittlung der Scherfestigkeit des Filterkuchens als schwächstes Glied des Boden-Schlitzwandsystems, sind Kenntnisse über seine Zusammensetzung und seinen Aufbau in der gegenständlichen Form erforderlich. Die im Schlitz verweilende Stützsuspension wird nach Erreichen der Schlitzendtiefe durch den Frischbeton von unten nach oben verdrängt. Es folgt eine kurzzeitige Konsolidierung des Filterkuchens durch den Frischbeton bis zu

dessen Abbinden. Der Prozess der Konsolidierung beeinflusst die Größe der Scherfestigkeit auf Grund der vom Überkonsolidierungszustand abhängigen Kohäsion, Krey-Tiedemann. Die Ermittlung der Konsolidierungsverhältnisse unter dem Frischbetondruck setzt voraus, dass die Eigenschaften und der Aufbau des Filterkuchens vor dem Verdrängungsprozess der Suspension bekannt sind. Hierzu wird ein Modell entwickelt, welches die Entstehung eines kompressiblen Filterkuchens in Schritten simuliert. Eingangsparameter in das Modell sind das ermittelte Filtratwasservolumen aus den Filtrationsversuchen und die über die Filterkuchendicke gemittelte Porenzahl für den Versuchsendzustand. Der Filterkuchen wird vereinfacht als Schichtensystem modelliert. Nacheinander, in Zeitschritten, werden die einzelnen Schichten aufgebracht. In jeden Schritt werden die jeweiligen Schichten an der oberen Schichtgrenze mit der Spannung in der Größe der dort auftretenden Strömungskraft konsolidiert, wodurch Setzungen der Schichten hervorgerufen werden. Der hydraulische Gradient im Filterkuchen ist im Bereich der Erdwandung am größten und nimmt in Richtung des offenen Schlitzes ab. Demzufolge ist in der ersten Schicht auch die Strömungskraft maximal und die Durchlässigkeit und Porenzahl minimal. Da eine eindimensionale Konsolidierung von Mehr-Schicht-Systemen analytisch nicht mehr geschlossen erfasst werden kann, wird für die Konsolidierungsrechnung das Finite-Elemente Programm ABAQUS eingesetzt. Es zeigt sich aus den FE-Berechnungen, dass die einzelnen Filterkuchenschichten für jeden Schritt vollständig auskonsolidiert sind.

Das analytische Modell wird auf die Filtrationsversuche angewandt, die Filterkuchen in fünf Schichten unterteilt und die Porenzahl- und Durchlässigkeitsverteilung über die Dicke als Stufenfunktion ermittelt.

Der Übergang zwischen Suspension und Filterkuchen verläuft fließend, so dass keine eindeutige Grenzlinie definiert werden kann. Der aufsteigende Frischbeton verdrängt die Stützsuspension. Untersucht wird, in wieweit der Frischbeton auch Teile des Filterkuchens fortbewegen kann.

Es wird die Scherfestigkeit als Kohäsion des Filterkuchens in der äußeren Schicht abgeschätzt. Hierfür wird, auf der sicheren Seite liegend, der kleinste Winkel der Kohäsion der Referenzbaustellen mit der kleinsten aus dem analytischen Modell ermittelten Konsolidierungsspannung der äußeren Filterkuchenschicht kombiniert. Es muss zur Kenntnis genommen werden, dass das Berechnungsmodell Mittelwerte über die Schichtdicken des Filterkuchens bezieht und den fließenden Übergang im Filterkuchen nicht abbildet. Tatsächlich wäre die Kohäsion des Außenrandes der äußersten Filterkuchenschicht kleiner und die des inneren Randes größer. Die Kohäsion wird zu $c' = 0,36$ kPa bestimmt.

Der Frischbeton muss an der Oberfläche der Schlitzwandung, dem Filterkuchen, haften, damit die Geschwindigkeit dort zu Null wird. Das setzt voraus, dass der Frischbeton den Filterkuchen nicht maßgebend verdrängen kann und damit seine maximale Scherfestigkeit kleiner als die des Filterkuchens ist. Der Frischbeton wird als Bingham'sche Flüssigkeit idealisiert. Nach [3] liegt für Fließbetone die Fließgrenze in einer Größenordnung von $\tau_F = 400 \text{ Pa}$ und die Viskosität bei $\eta = 20 \text{ Ns/m}^2$. Das Schergefälle $\dot{\gamma}$ wird mit dem Geschwindigkeitsprofil des aufsteigenden Frischbetons ermittelt, das für zwei Schlitzbreiten und vier Betoniergeschwindigkeiten mittels Grundlagen der Strömungsmechanik abgeschätzt wird. Für die Ermittlung der maximalen Scherfestigkeit des Frischbetons erweist sich das berechnete Schergefälle als vernachlässigbar gering. Der aufsteigende Frischbeton kann einen Filterkuchen, der sich analog zu den Filtrationsversuchen innerhalb von 24 h ausbildet, nicht wesentlich verdrängen.

Die Filterkuchenschicht erfährt bis zum vollständigen Erstarren des Kontraktorbetons vom Frischbetondruck eine Belastung und wird dabei konsolidiert. Die Scherfestigkeit des Filterkuchens berechnet sich im normalkonsolidierten Zustand aus dem Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s und im überkonsolidierten Zustand setzt sie sich aus einem Reibungs- und Kohäsionsanteil zusammen. Zur Ermittlung der Kohäsionsgröße muss der Konsolidierungszustand bekannt sein. Der Konsolidierungszustand des Filterkuchens nach Schlitzfertigstellung wird am Beispiel eines Referenzschlitzes untersucht. Aus den Filtrationsversuchen wird ein Filterkuchen ausgewählt, der sich repräsentativ an der Erdwandung ausbilden soll. Die Ermittlung des Frischbetondruckverlaufes während des Betonierens wird mit dem Berechnungsmodell von Loreck [51] ermittelt. Für die Konsolidierung des Filterkuchens unter dem Betondruck wird der Druckrückgang auf Grund seines Ansteifens und Übergangs in die feste Phase angesetzt und als äußere Auflast berücksichtigt. Numerisch wird erstmalig die in der Modellrechnung ermittelte Entstehung des Filterkuchens als Schichtensystem simuliert. Dann wird der Filterkuchen mit dem zeitabhängigen Betonüberdruckverlauf belastet. Die maximal ermittelte effektive Spannung des Filterkuchens während des Konsolidierungsprozesses, ist die für die Bestimmung der Kohäsion maßgebende "Konsolidierungsspannung", da sich der Filterkuchen auf Grund des äußeren Betondruckrückganges in einem überkonsolidierten Zustand befindet. Die "Konsolidierungsspannung" wird über die Schlitztiefe in Abhängigkeit der vier Betoniergeschwindigkeiten ermittelt.

Um den Einfluss der Schlitzgeometrie auf den Betondruckverlauf und damit auf die "Konsolidierungsspannung" zu ermitteln, werden die Schlitzabmessungen systematisch variiert.

Die Schlitzgeometrie beeinflusst auf Grund der verfügbaren spezifischen Mantelreibung der Frischbetonsäule den Siloeffekt im Schlitz. Die Abweichungen zum Betondruckverlauf der Referenzlamelle erweisen sich als gering.

Problematisch sind in der Praxis Bauunterbrechungen bedingt durch Unwegsamkeiten. Liegen zwischen Beginn des Aushubs und Beginn des Betonierens mehr als 30 h, muss nach E DIN 4126 [22] der Wandreibungswinkel zu $|\delta| = 0$ gesetzt werden, was unwirtschaftliche Konsequenzen, auf Grund eines erhöhten Erddrucks, für die Wandbemessung hervorruft. Mit einer neuen Suspensionsstandzeit von 73 h wird der, für den Filterkuchen an der Erdwandung, gewählte Filtrationsversuch wiederholt. Mit der Modellrechnung wird das fortschreitende Anwachsen des Filterkuchens ab der 24. bis zur 73. Stunde mit drei weiteren Schichten modelliert. Bestimmt wird die Porenzahl- Durchlässigkeitsverteilung über die Dicke als Stufenfunktion. Ein Vergleich der Scherfestigkeit des Frischbetons an der Schlitzwandung mit der des Filterkuchens lässt vermuten, dass unter den hier angenommenen Randbedingungen die äußerste Schicht vom aufsteigenden Frischbeton teilweise verdrängt wird. Es zeigt sich des Weiteren, dass auf Grund der größeren Filterkuchenschichtmächtigkeit eine längere Konsolidierungszeit und somit eine durch den Frischbetondruck hervorgerufene niedrigere "Konsolidierungsspannung" resultiert, jedoch liegen die Abweichungen bei nur 10%. Angesichts niedrigeren "Konsolidierungsspannung" wird die Kohäsion geringfügig reduziert, jedoch in der Gegenüberstellung erscheint der Ansatz der E DIN 4126 zu konservativ, da die Gesamtscherfestigkeit des normalkonsolidierten Zustandes, unabhängig von der "Konsolidierungsspannung", für erdstatische Berechnungen angesetzt werden kann.

Exemplarisch wird für die Filterkuchenmaterialien der Referenzbaustellen die Scherfestigkeit über die Schlitztiefe ermittelt. Hierbei werden vereinfachte Baugrundverhältnisse vorausgesetzt. Die Scherfestigkeitsverläufe der Filterkuchen im feinkörnigen, nichtbindigen Boden gleichen sich, da auch ihre Scherparameter ähnlich sind. Im oberen Wandbereich ist der überkonsolidierte Zustand für die Scherfestigkeit des Filterkuchens maßgebend und im unteren Wandbereich der normalkonsolidierte Zustand, da dort der Erddruck größer als Vorbelastung ist. Es werden für die unterschiedlichen Betoniergeschwindigkeiten Grenztiefen ermittelt, ab diesen die Gesamtscherfestigkeit maßgebend wird. Vergleicht man die Scherfestigkeitsverläufe der Filterkuchenmaterialien untereinander, nehmen die Abweichungen mit der Schlitztiefe zu, betragen bei den feinkörnigen, nichtbindigen Baugrundverhältnissen jedoch maximal nur 9,1 kPa.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die weitläufig existierende Betrachtung des

Filterkuchens als Schmierschicht aus Bentonit zwischen dem anstehenden Boden und der Wandoberfläche ohne maßgebende Scherfestigkeit, sich auf der Basis der hier durchgeführten Untersuchungen als falsch erweist.

Nach dem Ansatz der EAB, für den Wandreibungswinkel von Schlitzwänden mit $|\delta| \leq \varphi/2$, müsste die Scherfestigkeit des Filterkuchens im grobkörnigen, nichtbindigen Baugrund groß sein und im feinkörnigen, nichtbindigen Boden kleiner. Tatsächlich zeigen die Versuchsergebnisse genau gegenläufige Tendenzen, da die Aufladung der Suspension mit Feinpartikeln aus dem Baugrund die Filterkuchenzusammensetzung und damit die Scherfestigkeit prägt. Bei wenig Feinanteilen im Baugrund ist so der Bentonitanteil im Filterkuchen verstärkt vertreten und die Scherfestigkeit wird reduziert, was dem Ansatz der EAB widerspricht.

Nahe liegend für Bemessungsansätze wäre, die Größe der Scherfestigkeit des Filterkuchens, bei der Schlitzherstellung im überwiegend schluffigen bis sandigen Baugrund, zu pauschalisieren. Denkbar wäre, auf der sicheren Seite liegend, den Winkel der Gesamtscherfestigkeit anzusetzen, da die Werte der untersuchten Filterkuchen im feinkörnigen, nichtbindigen Baugrund nur geringfügig voneinander abweichen, $\varphi'_s = 29,6^\circ$ bis $32,6^\circ$.

Ist der Baugrund sehr grobkörnig und sind Schwebstoffe die sich in der Suspension anreichern können nur bedingt vorhanden, ist für die Gesamtscherfestigkeit ein geringerer Wert anzusetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird für solche Baugrundverhältnisse ein $\varphi'_s = 21,5^\circ$ ermittelt. Diese Diskrepanzen in der Scherfestigkeit von Filterkuchenmaterialien in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse bedarf weiterer Untersuchungen um einen fließenden Übergang der Gesamtscherfestigkeit vom feinen in den groben Baugrund zu definieren.

Literaturverzeichnis

- [1] C. M. Alles. Prozeßstrategien für die Filtration mit kompressiblen Kuchen. Dissertation, Schriftenreihe der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe, 2000.
- [2] H. Anlauf. Entfeuchtung von Fiterkuchen bei der Vakuum-, Druck- und Druck/Vakuumfiltration. In *Fortschrittberichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik, VDI Verlag GmbH, Vol. 114*. Düsseldorf, 1986.
- [3] P.F.G. Banfill. The Rheology of Fresh Cement and Concrete. In *Proceedings of the 11th International Cement Chemistry Congress*. Durban, May 2003.
- [4] R. A. Beine and M. Geil. Suspensionen für flüssigkeitsgestützte Bauweisen mit und ohne Quellzeit des Bentonits. In *Viertes Christian Verder Kolloquium: Flüssigkeitsgestützte Bauverfahren in der Geotechnik*, pages 1–19. Graz, April 1989.
- [5] L. Böswirth. *Technische Strömungslehre, 3. Auflage*. Viewegs Fachbücher der Technik, 1999.
- [6] P. C. Carman. Flow of gases through porous media. In *Butterworths Scientific Publications* . London, 1956.
- [7] P.C. Carman. Permeability of saturated sands, soils and clays. *Journal of Agricultural Science*, 29:263273, 1939.
- [8] B. Cernak. New approaches to problems of bearing capacity and settelment of piles. In *8th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2*, pages 67–74. Moskau, 1973.
- [9] B.M. Das. *Principles of Geotechnical Engineering*. PWS Publishing Company, 1998.

- [10] J. C. W. M. de Wit. Baustellenmessungen des Frischbetondrucks in den Lamellen 3 und 4, Metro Amsterdam. In *Die Entwicklung des Frischbetondrucks bei der Herstellung von Schlitzwänden*. Ch. Loreck, 2007.
- [11] J. C. W. M. de Wit and H. J. Lengkeek. Full scale test on enviromental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam. In *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, pages 433–440. Tolouse, 2002.
- [12] L. Delattre and V. Duca. Measured pressure experted by a fine soil on a diaphragm wall under construction. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, volume 1, pages 547–552. Toulouse, 2002.
- [13] DIN 1054. Baugrund-Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Januar 2005.
- [14] DIN 18126. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. November 1996.
- [15] DIN 18130-1. Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche. Mai 1998.
- [16] DIN 18137-3. Bestimmung der Scherfestigkeit. September 2002.
- [17] DIN 18196. Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Juni 2006.
- [18] DIN 4126. Ortbeton-Schlitzwände, Konstruktion und Ausführung. August 1986.
- [19] DIN EN 1538. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau): Schlitzwände. Juli 2000.
- [20] DIN EN ISO 14688-1. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung. Januar 2003.
- [21] E DIN 18135. Eindimensionaler Kompressionsversuch. Juni 1999.
- [22] E DIN 4126. Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden. August 2004.
- [23] EAB. Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben". 1994. 3. Auflage.
- [24] EAB. Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben". 2005. 4. Auflage.

- [25] Erdbaulaboratorium Essen. Baugrunduntersuchung und Baugrundbeschreibung: Stadtbahn Köln, Nord-Süd-Strecke, 19.12.1994.
- [26] I.W. Farmer, P.J. Buckley, and Z. Sliwinski. The effect of bentonite on the skin friction of cast-in-place piles. In *Behaviour of piles: Proceedings of the Conference org. by the Institution of Civil Engineers*, pages 115–120. London, 1971.
- [27] C. Ferraris, F. de Larrard, and N. Martys. Fresh Concrete Rheology. In Sidney Mindess and Jan P. Skalny, editors, *Material Science of Concrete VI*, pages 215–241, 2001.
- [28] F. Ferraris and F. de Larrard. Modified Slump and Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete. In *Cement, Concrete, and Aggregates*, volume 20, pages 241–247, 1998.
- [29] W. Friedrich, H. Müller-Kirchenbauer, C. Schlötzer, and J. Rogner. *Sicherung von Altlasten mit Schlitz- oder Schmalwänden, Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1995.
- [30] J. Garnier and D. König. Scale effects in piles and nails loading tests in sand. In *Centrifuge 98, Tokyo, Kimura et al. (Ed.): Balkema*, pages 205–210, 1998.
- [31] M. Geil. Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand. Dissertation, Mitteilungen des Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft-Nr.28, August 1989.
- [32] M. Goldscheider. Vergleichende Versuche mit einem konventionellen und einem parallel geführten Rahmenschergerät als Grundlage der DIN 18137-3. In *Schlussbericht, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau, Universität Karlsruhe, AZ.P 32-5-11.54-938/00*, 2003.
- [33] S. Gourvenec, W. Powrie, and E.K. de Moor. Three-dimensional effects in the construction of a long retaining wall. In *Proceedings of of Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, pages 163–173. Toulouse, 2002.
- [34] Gourvenec, S.M. and Powrie, W. Three dimensional finite element analysis of diaphragm wall installation. *Géotechnique*, 6:801–823, 1999.

- [35] P. Grübl, H. Weigler, and S. Karl. *Beton; Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage*. Ernst & Sohn, 2001.
- [36] G. Gudehus. *Bodenmechanik*. Enke Verlag, Stuttgart, 1981.
- [37] Sam Helwany. *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*. John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [38] Hibbit, Karlsson, and Sorensen. *ABAQUS/Standard Users Manual; Version 6.1*. 2000.
- [39] D. J. Jeffrey and A. Acrivos. The rheological properties of suspensions of rigid particles. *AIChE Journal*, 22(3):417–432, 1976.
- [40] H. L. Jessberger. Die Flüssigkeitsaufnahme von Tonen und die Bildsamkeit und Sedimentationsstabilität von Ton-Wasser-Gemischen. *Bautechnik*, 9:299–305, 1961.
- [41] H. L. Jessberger. Die viskosen und thixotropen Eigenschaften von Ton-Wasser-Gemischen. In *Sonderdruck aus VDI-Zeitschrift, Band. 105*, 1963.
- [42] G. K. Jones. Chemistry and flow properties of bentonite grouts. In *Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice, Symposium organized by the British National Society of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering at the Institution of Civil Engineers, London*, pages 22–28, May 1963.
- [43] Kishida, H. and Uesugi, M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. *Géotechnique*, pages 45–52, 1987.
- [44] D. Kolymbas. *Geotechnik-Tunnelbau und Tunnelmechanik*. Springer, Berlin Heidelberg, 1998.
- [45] J. Kozeny. Über kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsberichte, Akademie der Wissenschaften, Wien*, 136:271–306, 1927.
- [46] J. Krell. Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel, und Beton und ihre zeitliche Veränderung. *Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 46*, 1985.
- [47] M. Krüger. Prüfmethode zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen. In *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt*, pages 177–191, 1999.

- [48] A. Lächler, H. Neher, and G. Gebeyehu. A comparison between monitoring data and numerical calculation of diaphragm wall construction in Rotterdam. In Th. Triantafyllidis, editor, *Conference Numerical Modelling of Construction Processes in geotechnical engineering for urban environment (NSC06)*, pages 83–96. Bochum, 2006.
- [49] A. Lächler, P.A. Vermeer, and M. Wehnert. Assessment of diaphragm wall stability and deformation. In *Proceedings of the 14th European Conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, volume 2, pages 1055–1060. Madrid, 2007.
- [50] M. L. Lings, C. W. W. Ng, and D. F. T. Nash. The lateral pressure of wet concrete in diaphragm wall panels cast under bentonite. In *Proceedings of Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*, volume 107, pages 163–172. Toulouse, 1994.
- [51] Ch. Loreck. Die Entwicklung des Frischbetondrucks bei der Herstellung von Schlitzwänden. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 39, 2008.
- [52] Ch. Loreck and Th. Triantafyllidis. Berücksichtigung des Frischbetondrucks bei der FE-Simulation der Schlitzwandherstellung. *Bautechnik*, 84(9):646–655, 2007.
- [53] L. Martak. Nachweis der inneren Standsicherheit des suspensionsgefüllten Schlitzes. In *Viertes Christian Verder Kolloquium: Flüssigkeitsgestützte Bauverfahren in der Geotechnik*. Graz, April 1989.
- [54] Ch. H. Möbius, Ch. Walther, and Th. H. Günther. Einfluss von Zusätzen auf die Eigenschaften von Bentonitsuspensionen unter besonderer Berücksichtigung der Probleme der Bautechnik. *Bautechnik*, 2:47–55, 1976.
- [55] D. Moore and D. Lockner. Interpreting the frictional behavior of the smectite clay montmorillonite. In *American Geophysical Union (poster)*, 2004.
- [56] E. Moreira. Thixotropie von Bentonitsuspensionen durch Singularitäten. In *Proceedings of the COMSOL Users Conference*, pages 79–86. Frankfurt, 2006.
- [57] Morrow, C.A. and Radney, B. and Byerlee, J. Frictional strength and the effective pressure law of montmorillonite and illite clays. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, Academic Press, Ltd.*, pages 69–88, 1992.

- [58] E. Müller. Grundzüge der Verfahrenstechnik . In *Mechanische Trennverfahren*. Salle+Sauerländer, 1983. 2. Auflage.
- [59] H. Müller-Kirchenbauer. Zur Theorie der Injektionen. In *Veröff. Inst. Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 32*, 1968.
- [60] H. Müller-Kirchenbauer. Einflüsse der Filtratbildung auf die Stabilität von Schlitzwänden. In *Vorträge der Baugrundtagung in Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V*, 1972.
- [61] H. Müller-Kirchenbauer, C. Schlötzer, and J. Rogner. Einfluß von Filtratwachstum und Feststoffverlagerung und die Qualität, die Herstellung und die Kosten von Dichtungsschlitzwänden. In *BMBF-Verbundvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen*, 1994.
- [62] H. P. Neher, P.-M. Mayer, and A. Lächler. Messung von Frischbetondruck und -temperatur während der Herstellung einer Schlitzwand in Rotterdam. In *FEM in der Geotechnik-Qualität, Prüfung, Fallbeispiele (Hrsg. v. Grabe)*, pages 147–168, 2005.
- [63] C.W.W Ng and R.W.M. Yan. Stress transfer and deformation mechanism around a diaphragm wall panel. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 7:638–648, 1998.
- [64] C.W.W Ng and R.W.M. Yan. Three dimensional modelling of a diaphragm wall construction sequence. *Geotechnique*, 6:825–834, 1999.
- [65] Ng, C.W.W and Yan, R.W.M. Stress transfer and deformation mechanism around a diaphragm wall panel. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 7:638–648, 1998.
- [66] Ng, C.W.W. and Yan, R.W.M. Three dimensional modelling of a diaphragm wall construction sequence. *Géotechnique*, 6:825–834, 1999.
- [67] A Niemunis. Über die Anwendung der Kontinuumstheorie auf bodenmechanische Probleme, 2006.
- [68] Olson, R. Shearing strengths of kaolinite, illite and montmorillonite. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, pages 1215–1228, July 1994.

- [69] Paikowsky, S. G. and Player, Ch. M. and Connors, P. J. A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surface. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2:168–193, 1995.
- [70] D.E. Pettry and C.I. Rich. Modification of certain soils by calcium hydroxide stabilization. In *Proceedings of the Soil Science Society of America*, Vol. 35, pages 834–838. Madison, 1971.
- [71] T. C. Powers. *The properties of fresh concrete*. John Wiley & Sons, 1968.
- [72] L. Prandtl, K. Oswatitsch, and K. Wieghardt. *Führer durch die Strömungslehre*, 9. Auflage. Vieweg, 1990.
- [73] L.C. Reese, M.W. O'Neill, and F.T. Touma. Bored piles installed by slurry displacement. In *8th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pages 203–209. Moskau, 1973.
- [74] T. Reschke. Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62, 2000.
- [75] W. Rodatz, M. Hartung, and G. Maybaum. Back analysis of geotechnical measurements at the port of Hamburg based on FEM. In *Proceedings of the 8th International Conference of the Association for Computer Methods and Advances in Geotechnics*, pages 2005–2010. Rotterdam, 1994.
- [76] K.H. Roscoe and J.B. Burland. On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. pages 535–609, 1968.
- [77] Gemeinde Rotterdam. Städtisches Bauamt: Randstad-Rail, Basisbericht Geotechnik & Geohydrologie, 21.05.2005 (unveröffentlicht).
- [78] F.R. Ruppert. Bentonitsuspensionen für die Schlitzwandherstellung. *Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau*, 8:684–686, 1980.
- [79] B. F. Ruth, G. H. Montillon, and R. E. Montonna. Studies in filtration; II. Fundamental axiom of constant-pressure filtration. *Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society*, 25:153–161, 1933.
- [80] R. Schäfer. Einfluss der Herstellungsmethode auf das Verformungsverhalten von Schlitzwänden in weichen bindigen Böden. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 36, 2004.

- [81] H. Scheffler, M. von den Berg, K. Missling, and R. M. Spang. Geotechnische Verhältnisse im Zentrum von Leipzig und deren Bedeutung für Planung und Ausführung des Bauvorhabens City-Tunnel Leipzig. In *Baugrundgutachten Leipzig*, 2004.
- [82] H. Schlichting and K. Gersten. *Grenzschicht-Theorie, 10. Auflage*. Springer, 2005.
- [83] C. Schlötzer. Filtrationsverhalten von Dichtsuspensionen an flüssigkeitsgestützten Erdwänden. In *Mitteilungen, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover*, 1995.
- [84] H. Schmidt. Grundlagen der Geotechnik, 3 Auflage . Teuber, Stuttgart, Oktober 2006.
- [85] A. Schofield and C.P Wroth. *Critical State Soil Mechanics*. McGraw, London, 1968.
- [86] V. Schreiner. Zur Ausbildung der Scherfläche in der Kontaktzone Bodenschlitzwand bei der Herstellung im Zweiphasenverfahren. Diplomarbeit am Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlicht, 2007.
- [87] F. Schultz-Grunow. Zur Rheologie der Suspensionen. *Chemie Ingenieur Technik*, 34(3):223–230, 1962.
- [88] E. Schultze and H. Muhs. *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, 2. Auflage*. Springer-Verlag, 1967.
- [89] F. Schwanda. Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. *Beton*, 9(1):12–19, 1959.
- [90] F. Schwanda. Der Hohlraumgehalt von Korngemischen-Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten. *Beton*, 9(12):427–431, 1959.
- [91] F. Schwanda. Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbeton. *Zement und Beton*, 37:8–17, 1966.
- [92] H.F. Schweiger and M. Freiseder. Three dimensional finite element analysis of diaphragm wall construction. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, pages 2493–2498, 1994.

- [93] N. Schweiger. Kuchenbildung und Entfeuchtung auf dem Scheibenfilter unter Berücksichtigung konstruktiver Aspekte. In *Fortschrittberichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik, VDI Verlag GmbH, Vol. 252*. Düsseldorf, 1991.
- [94] M. Shirato, T. Murase, and M. Iwata. Deliquoring by Expression - Theory and Practice. *Wakeman R J, Progress in Filtration and Separation*, 4:181–288, 1986.
- [95] Th. Siekmann. *Strömungslehre, 2. Auflage*. Springer, 2007.
- [96] Bassem Soumaya. Setzungsverhalten von Flachgründungen in normal-konsolidierten bindigen Böden. Dissertation, Schriftenreihe Geotechnik der Universität Kassel, Heft-Nr. 16, August 2005.
- [97] M. Stocker. Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlich hergestellter Pfähle. In *Vorträge der Baugrundtagung*, pages 565–590. Mainz, 1980.
- [98] M. Stocker and B. Walz. Pfahlwände, Schlitzwände, Dichtwände. *Grundbautaschenbuch, Teil 3, 6. Auflage, Ernst & Sohn Verlag*, 2001.
- [99] C. Stoewahse. Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau IGBE, Heft 56, 2001.
- [100] D. W Taylor. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York, 1948.
- [101] K. Terzaghi. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke, 1925.
- [102] F.M. Tiller. The Role of Porosity in Filtration: IX. Skin Effect with Highly Compressible Materials. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 19(6):1266–1269, 1973.
- [103] F.M. Tiller, C.S. Yeh, and W.F. Leu. Compressibility of Particulate Structures in Relation to Thickening, Filtration, and Expression - A Review. *Separation Science and Technology*, 22:1037–1063, 1987.
- [104] F.M. Tiller, C.S. Yeh, C. Tsai, and W. Chen. Generalized Approach to Thickening, Filtration and Centrifugation. *Filtration und Separation*, 23:121–126, 1987.

- [105] Th. Triantafyllidis. *Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Teil 1: Schlitzwand- und Dichtwandtechnik*. Erst & Sohn, 2004.
- [106] Th. Triantafyllidis, D. König, R. Schäfer, Ch. Loreck, and A. Arwanitaki. Optimierung der Herstellung von Verbauwänden im Hinblick auf Verformungen vorhandener Bauwerke. In *Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben*, 2007.
- [107] H. Türke. *Statik im Erdbau*. 3. Auflage, Erst & Sohn, 1998.
- [108] Jessberger und Partner & Dr. Spang. Hauptuntersuchung City-Tunnel Leipzig. In *Geotechnischer Bericht nach DIN 4020*, 2001.
- [109] S. Uriel and C. S. Oteo. Stress and strain besides a circular trench wall. In *Proceedings of the 9th conference of soil mechanics and foundation engineering*, volume 1, pages 781–788. Tokyo, 1977.
- [110] C. Veder. Excavation of trenches in the presence of bentonite suspensions for the construction of impermeable and load-bearing diaphragms. In *Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice, Symposium organized by the British National Society of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering at the Institution of Civil Engineers, London*, pages 181–188, May 1963.
- [111] Th. Voigt and St. Hohler. Vergleichende Probelastungen an verrohrt und an suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen im Frankfurter Ton. *Geolex*, 1:10–14, 2003.
- [112] P. Von Soos. Anchors for carrying heavy tensile loads into soil. In *5th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pages 555–563. Madrid, 1972.
- [113] B. Walz. Grundlagen der Flüssigkeitsstützung von Erdwänden. In *Viertes Christian Verder Kolloquium: Flüssigkeitsgestützte Bauverfahren in der Geotechnik*, pages 1–19. Graz, April 1989.
- [114] B. Walz and J. Steinhoff. Stützung von Erdwänden mit viskosen Flüssigkeiten. In *Schriftenreihe des Fachgebietes Baugrund - Grundbau der Universität Dortmund, Festschrift zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Dr.-Ing. Weißenbach, Heft 21*, pages 313–328, 1994.

- [115] J.A. Wates and K. Knight. The effect of bentonite on the skin friction of cast-in-place piles and diaphragm walls. In *6th Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1*, pages 183–188. Durban, South Africa, September 1975.
- [116] F. Weiß. Die Wandreibung an im Kontraktorverfahren unter Bentonitsuspension geschütteten Betonwänden. *Bautechnik*, 8:257–263, 1965.
- [117] F. Weiß. Die Wandreibung an im Kontraktorverfahren unter Bentonitsuspension geschütteten Betonwänden. *Bautechnik*, 9:313–319, 1965.
- [118] F. Weiß. Die Standfestigkeit flüssigkeitsgestützter Erdwände. In *Bauingenieur-Praxis*. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin-München, 1967.
- [119] E. Wernick. Bestimmung der Bodenkennwerte mit einem parallel geführten direkten Schergerät. *Bautechnik*, 9:307–313, 1979.
- [120] L. Wittmann. Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien. Veröffentlichung des Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86, 1980.
- [121] Yoshimi, Y. T. and Kishida, H. A ring torsion apparatus for evaluationg friction between soil and metal surface. *Geotechnical Testing Journal, ASCE*, 4:145–152, 1981.

Anhang I

Kornverteilungsbänder der Referenzbaustellen

I.1 Baustelle "Haltepunkt Markt"

Flussschotter:

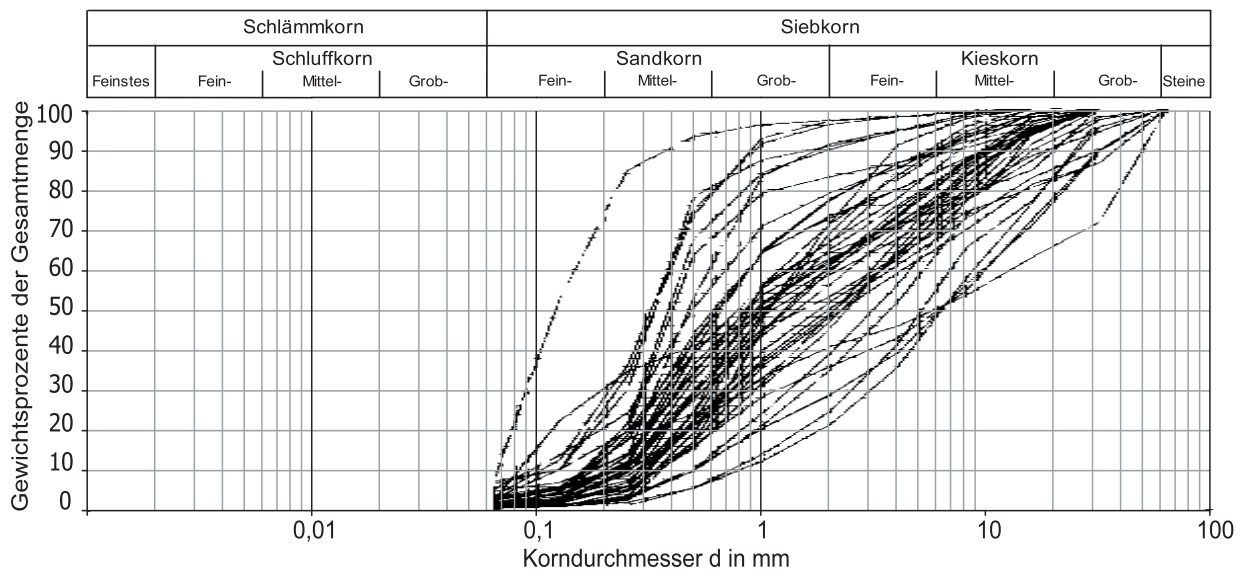


Bild I.1: Kornverteilungsbänder des Flussschotters, aus Geotechnischem Bericht [108]

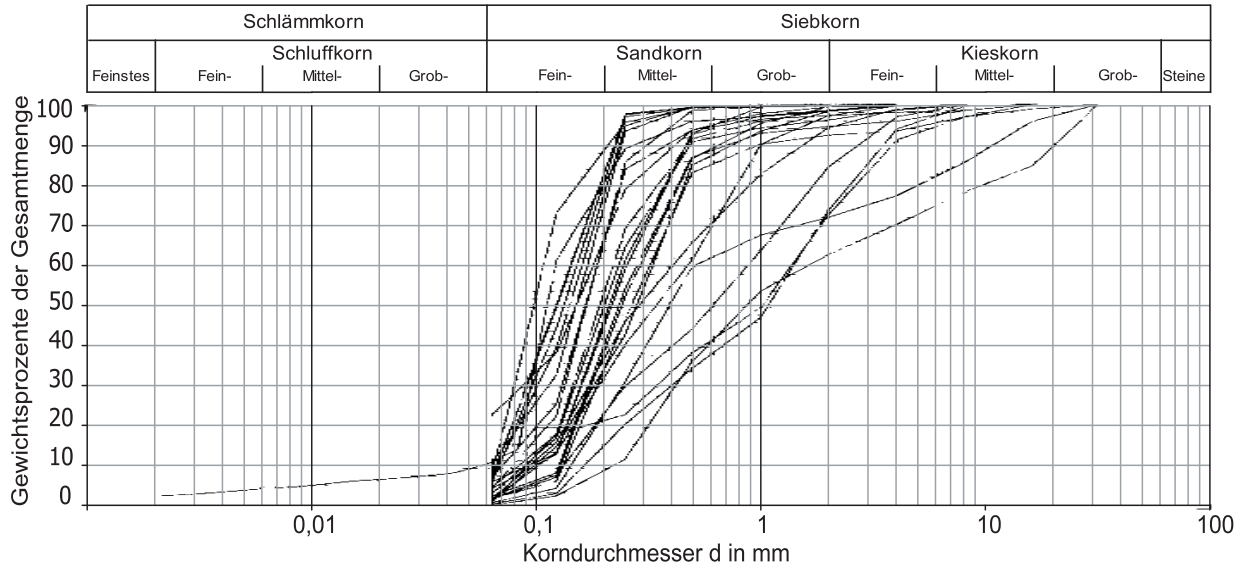
Bitterfelder Sande:

Bild I.2: Kornverteilungsbänder der Bitterfelder Sande, aus Geotechnischem Bericht [108]

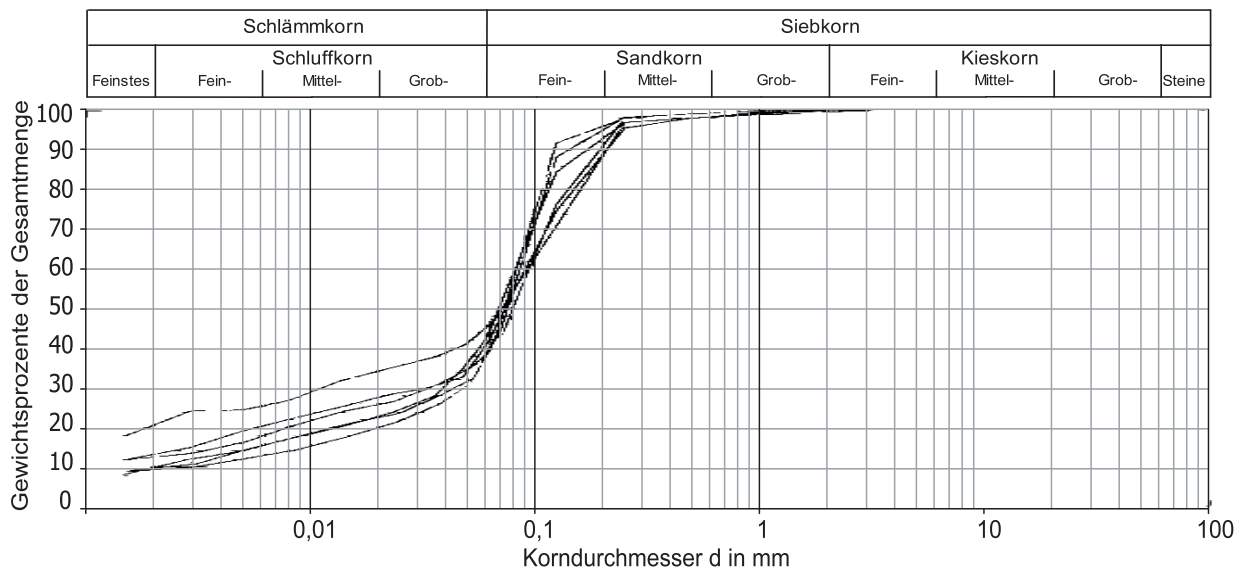
Grüngrauer Schluff:

Bild I.3: Kornverteilungsbänder des Grüngrauen Schluffs, aus Geotechnischem Bericht [108]

I.2 Baustelle "Haltepunkt Hauptbahnhof"

Auelehm:

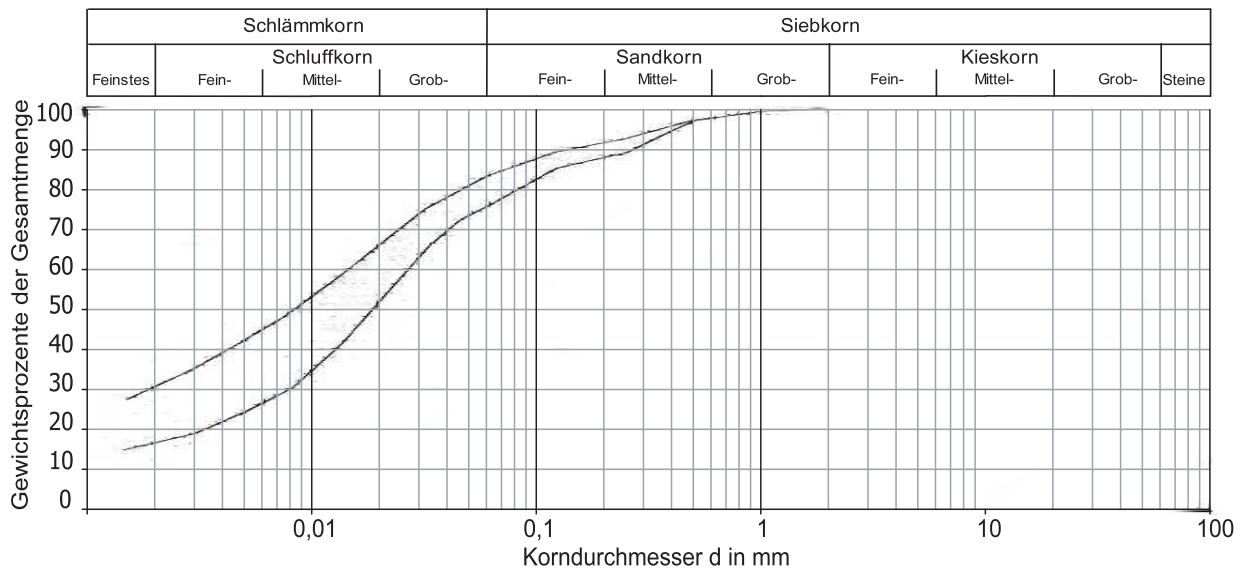


Bild I.4: Kornverteilungskurve des Auelehms, aus Geotechnischem Bericht [108]

Flussschotter:

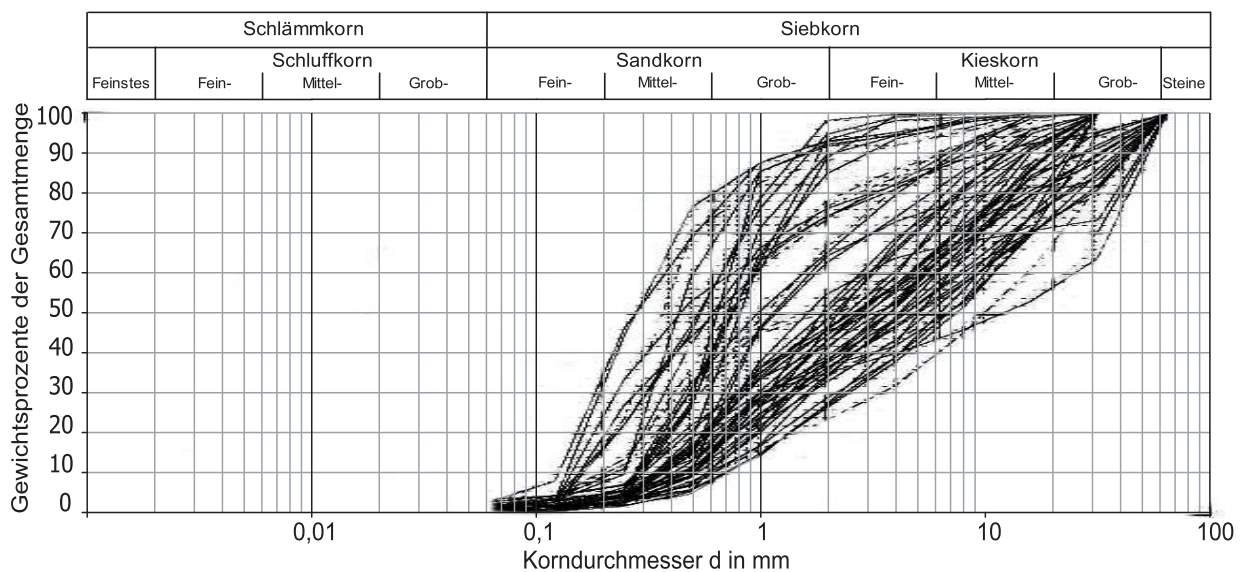


Bild I.5: Kornverteilungskurve des Flussschotters, aus Geotechnischem Bericht [108]

Bitterfelder Sande:

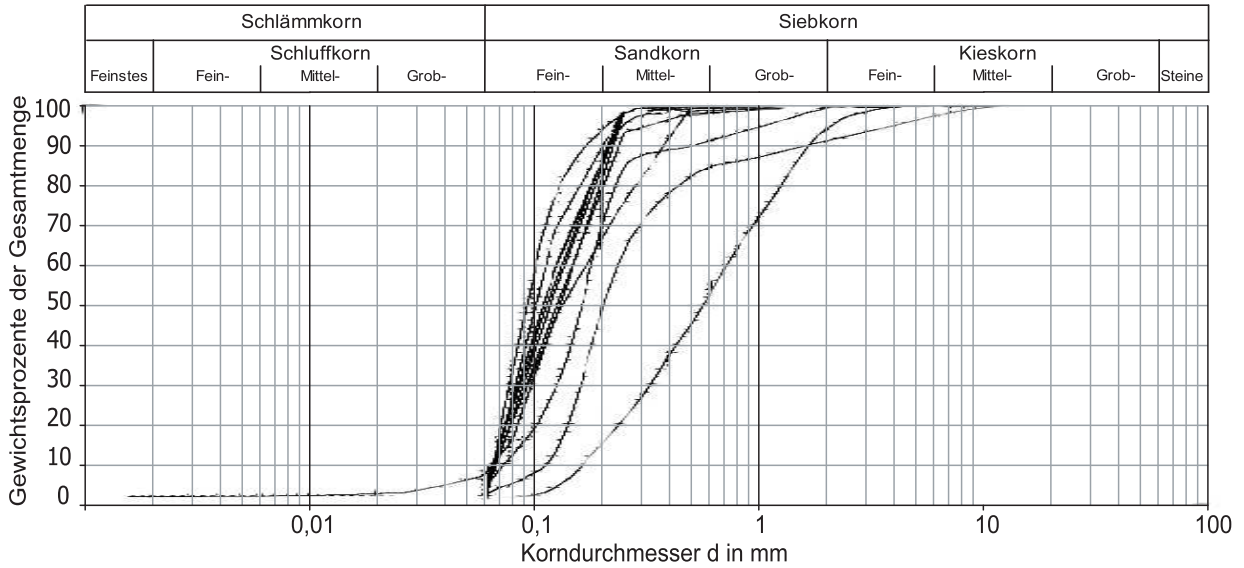


Bild I.6: Kornverteilungsbänder der Bitterfelder Sande, aus Geotechnischem Bericht [108]

Grüngrauer Schluff:

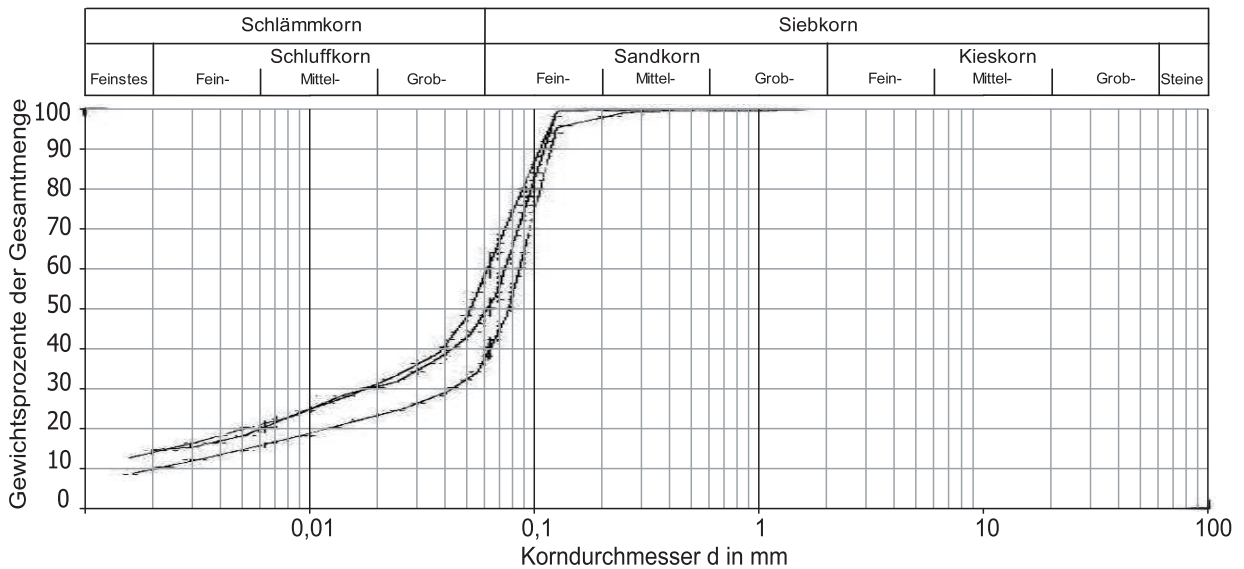


Bild I.7: Kornverteilungsbänder des Grüngrauen Schluffs, aus Geotechnischem Bericht [108]

I.3 Baustelle "Severinstraße"

Hochflutsedimente (Auelehm) der bindigen Deckschichten:

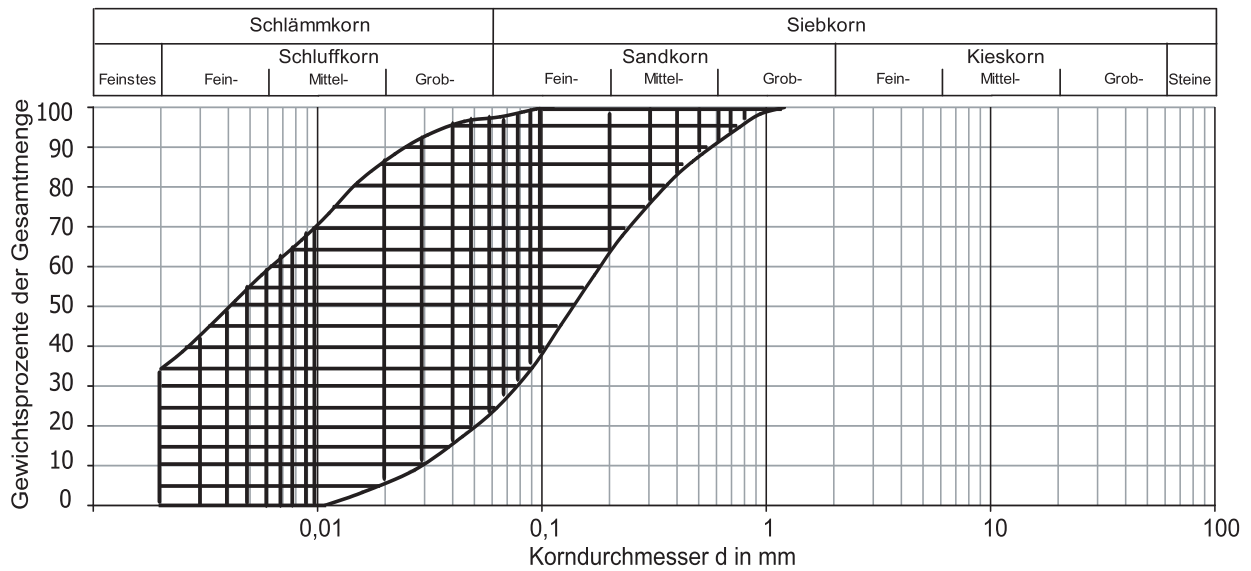


Bild I.8: Kornverteilungskurve der bindigen Deckschichten, aus Bodengutachten [25]

Quartären Rheinablagerungen in Form von Sand, Kiessand und Kies:

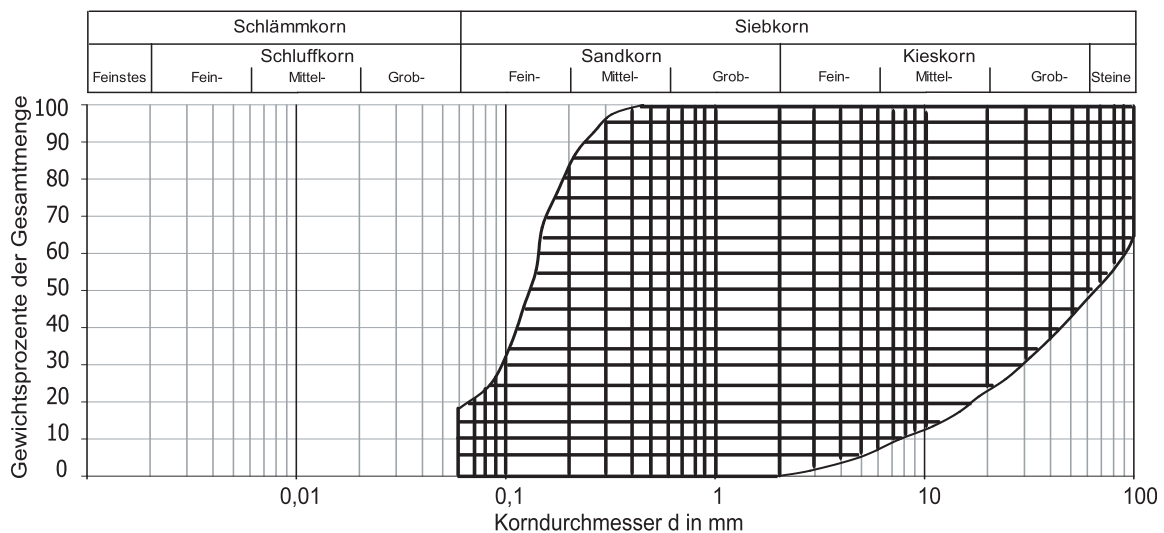


Bild I.9: Kornverteilungskurve der quartären Rheinablagerungen, aus Bodengutachten [25]

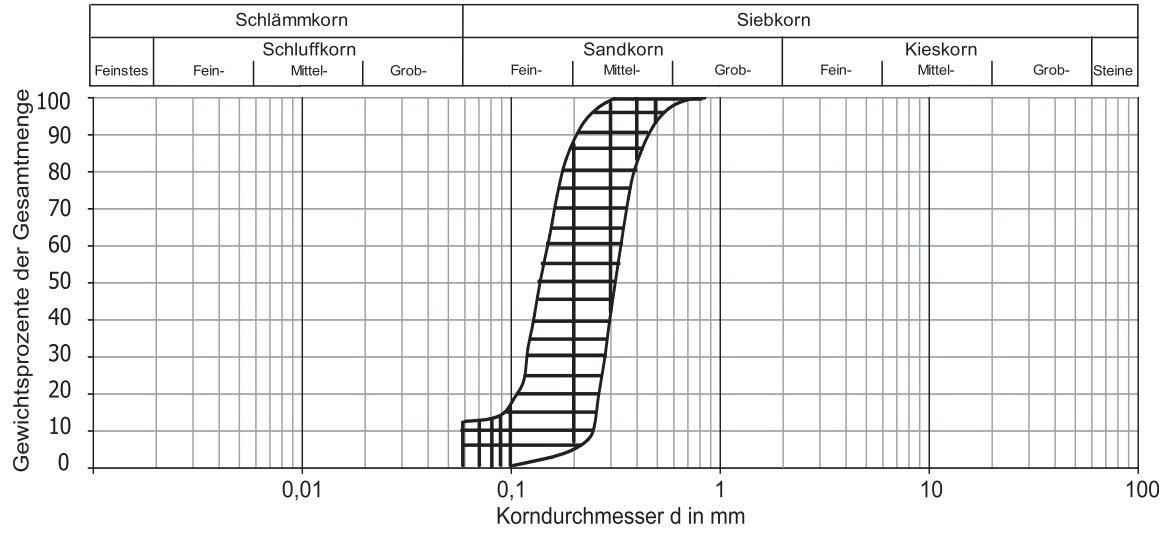
Tertiär aus Lockersedimenten:

Bild I.10: Kornverteilungsband des Tertiärs, aus Bodengutachten [108]

Anhang II

Zur Ausbildung des Filterkuchens, Kapitel 5

II.1 Kornverteilung der Suspension und des Filterkuchens

Versuch V-SP2:

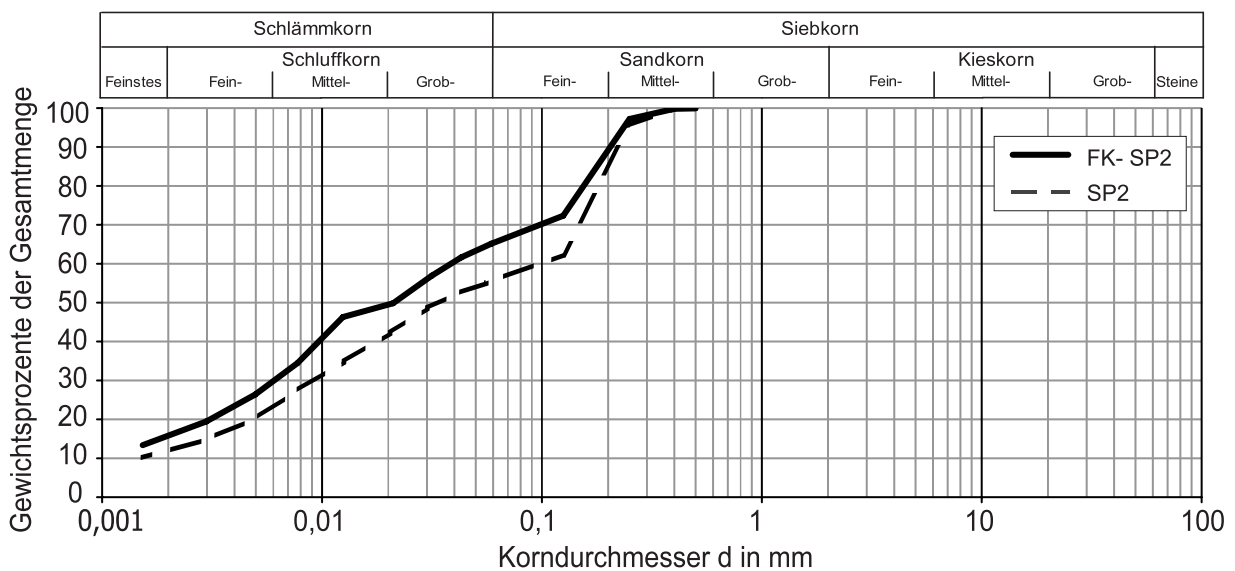


Bild II.1: Kornverteilung der Suspension SP2 und des Filterkuchens FK-SP2

Versuch V-SP3-1:

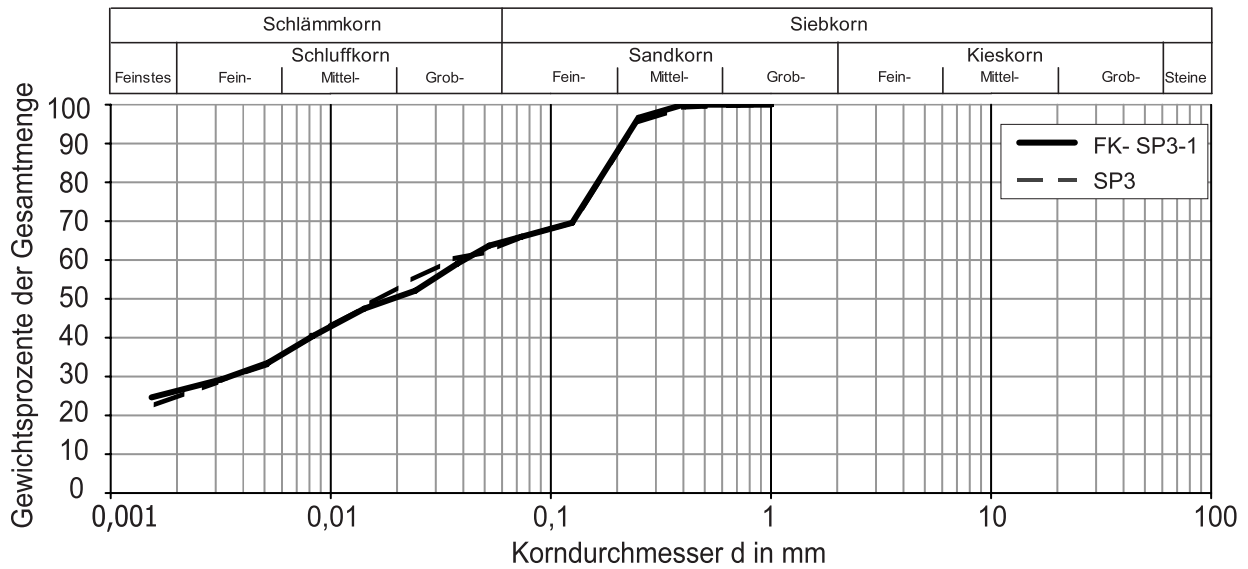


Bild II.2: Kornverteilung der Suspension SP3 und des Filterkuchens FK-SP3-1

Versuch V-SP3-2:

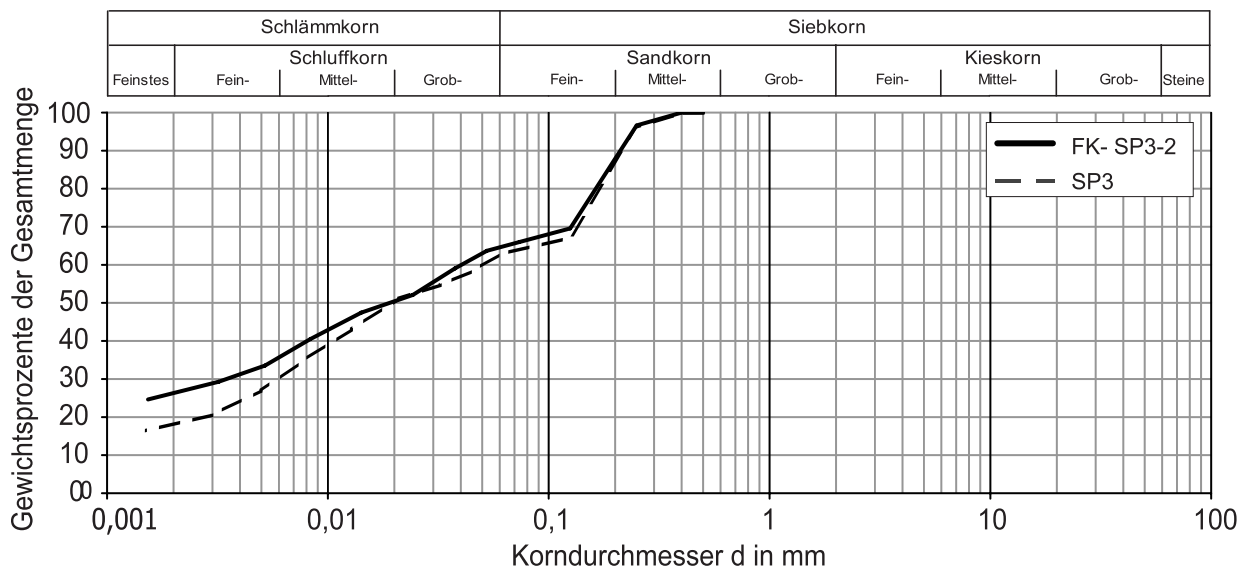


Bild II.3: Kornverteilung der Suspension SP3 und des Filterkuchens FK-SP3-2

Versuch V-SP4:

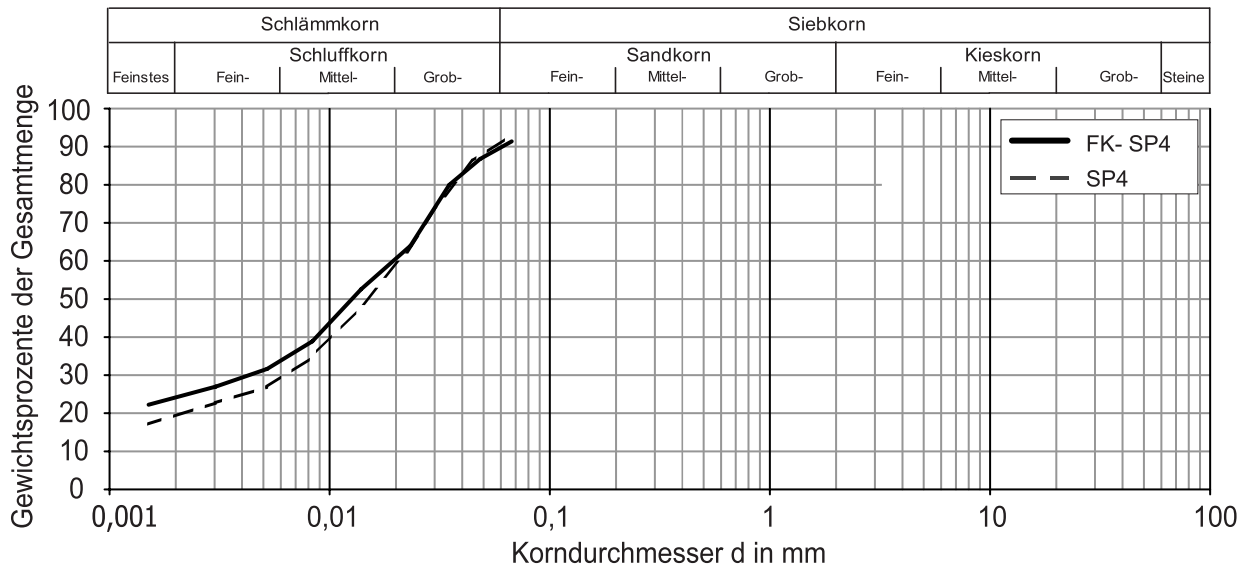


Bild II.4: Kornverteilung der Suspension SP4 und des Filterkuchens FK-SP4

Versuch V-SP5:

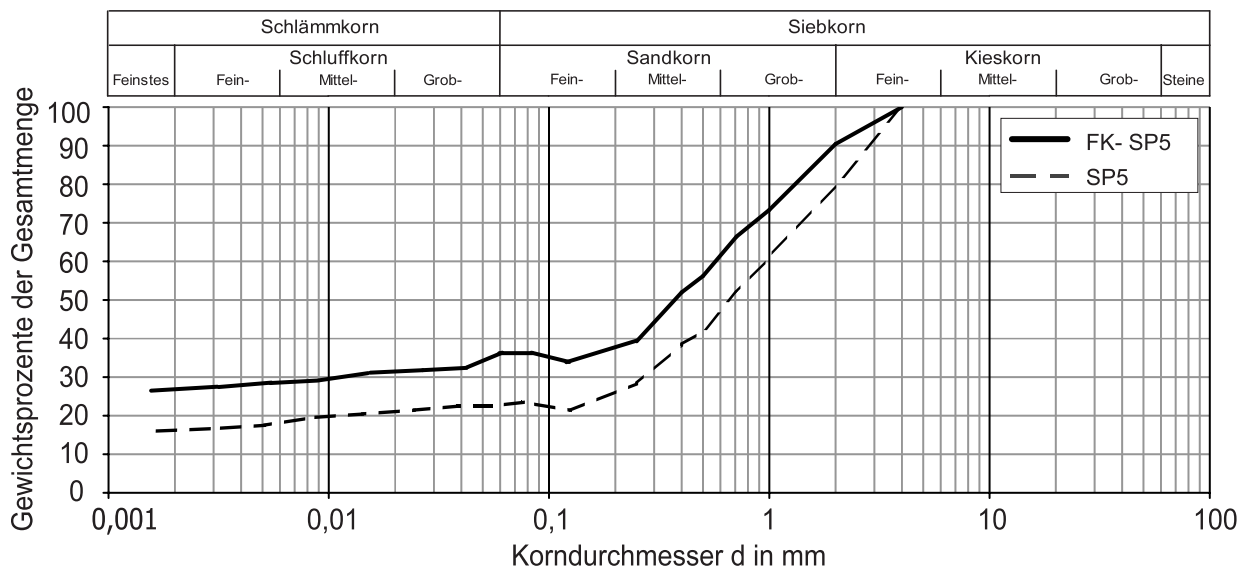


Bild II.5: Kornverteilung der Suspension SP5 und des Filterkuchens FK-SP5

Versuch V-SP7:

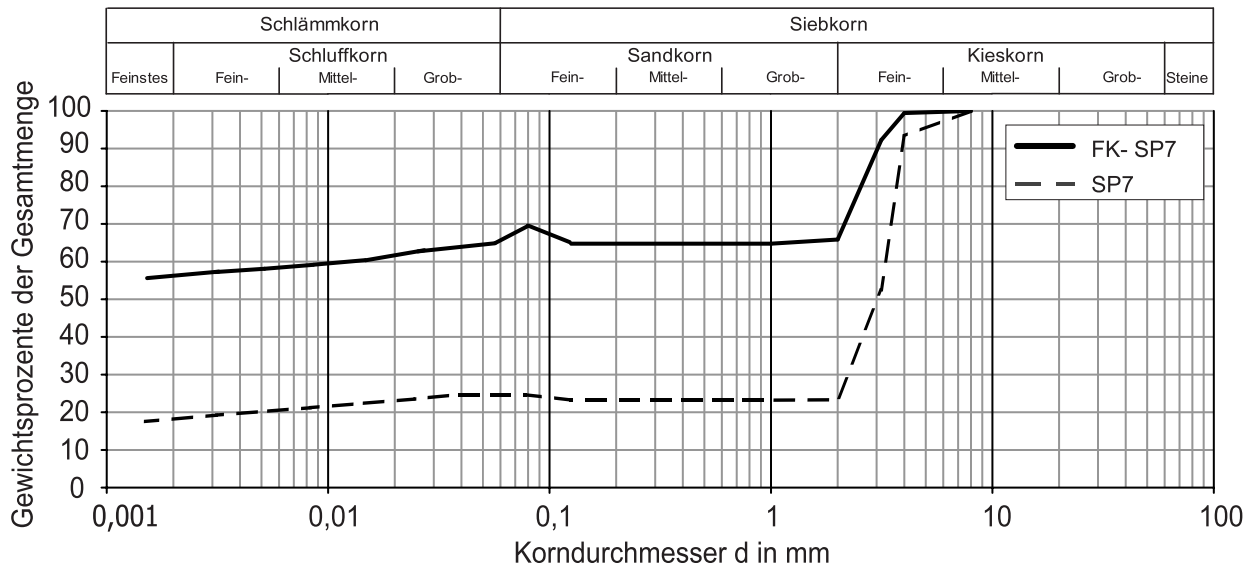


Bild II.6: Kornverteilung der Suspension SP7 und des Filterkuchens FK-SP7

Versuch V-SP8:

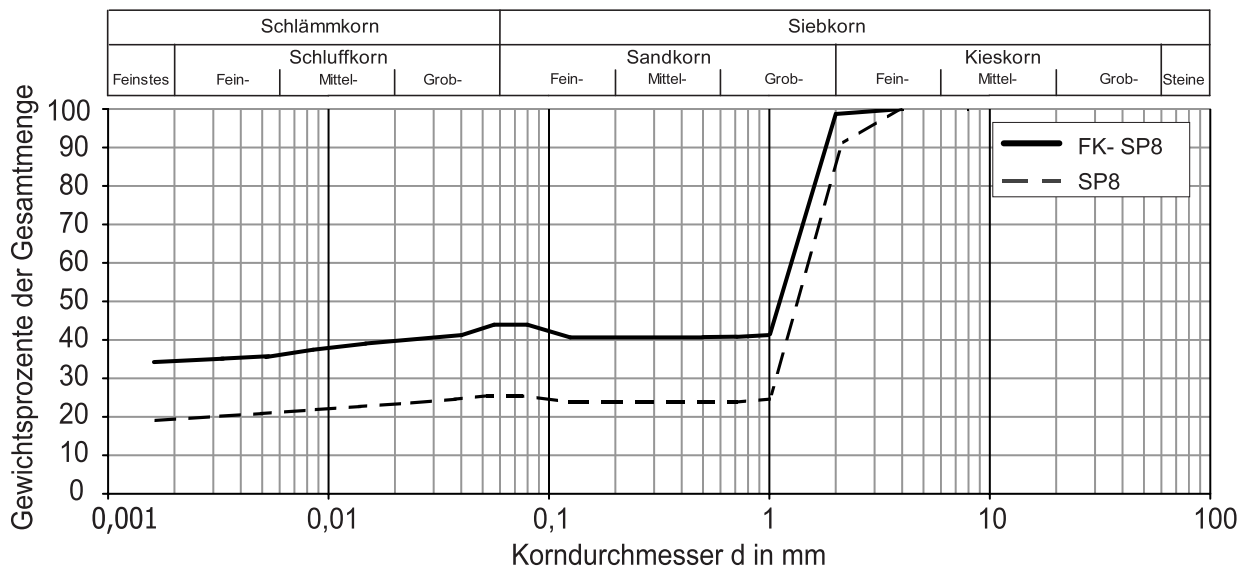


Bild II.7: Kornverteilung der Suspension SP8 und des Filterkuchens FK-SP8

II.2 Verdrängtes Filtratwasservolumen, Versuche V-FK

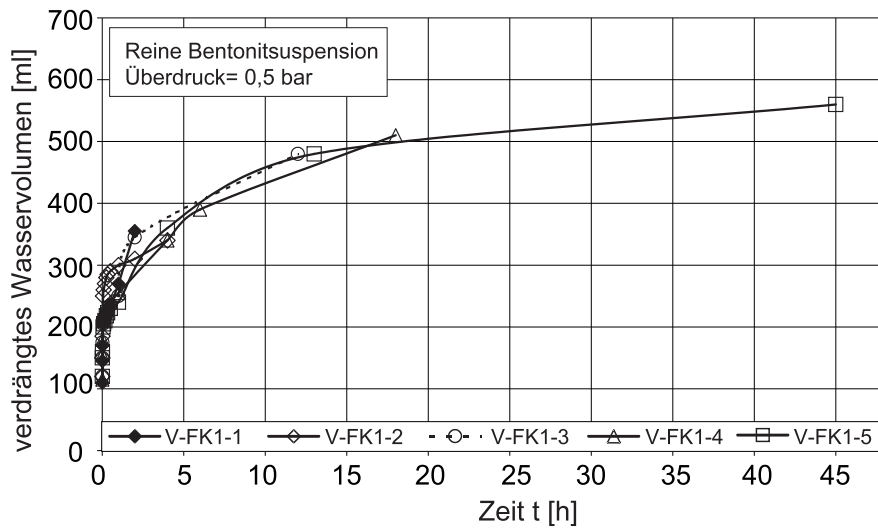


Bild II.8: Zeitliche Entwicklung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens, Versuche V-FK1-*i*

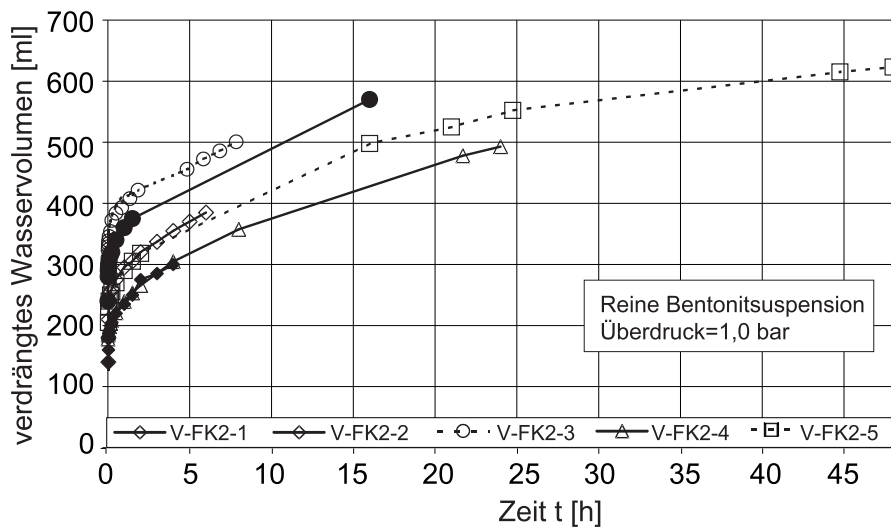


Bild II.9: Zeitliche Entwicklung des aus dem Boden verdrängten Wasservolumens, Versuche V-FK2-*i*

Anhang III

Berechnung der Filterkuchenbildung

III.1 Filterkuchenbildung, Modellrechnung

Tabelle III.1: Berechnung Filterkuchenbildung

Schritt 1						
	V-SP1	V-SP3-1	V-SP4	V-SP5	V-SP5 _{73h}	
t_1 [sec]	1800	900	900	600	540	
Q_1 [m ³ /sec]	1,24E-08	1,61E-08	1,96E-08	3,31E-08	4,04E-08	
$d_{FK,ges,A}(t_1)$ [mm]	0,45	0,284	0,365	0,460	0,505	
$d_{FK,1,A}(t_1)$ [mm]	0,45	0,284	0,365	0,460	0,505	
$k_{1,A}(t_1)$ [m/sec]	7,36E-11	6,0E-11	9,39E-11	2,00E-10	2,67E-10	
$e_{1,A}(t_1)$ [-]	0,941	0,868	1,037	1,406	1,593	
$p_1(t_1)$ [kN/m ²]	50	50	50	50	50	
$E_{s,1}(t_1)$ [kN/m ²]	543,62	543,62	543,62	543,62	543,62	
$s_1(t_1)$ [mm]	0,04169	0,02612	0,03358	0,04232	0,04641	
$d_{FK,1,E}(t_1)$ [mm]	0,4116	0,2579	0,3315	0,4178	0,4582	
$k_{1,E}(t_1)$ [m/sec]	6,68E-11	5,45E-11	8,53E-11	1,81E-10	2,42E-10	
$e_{1,E}(t_1)$ [-]	0,906	0,836	0,998	1,355	1,529	

Tabelle III.2: Berechnung Filterkuchenbildung

Schritt 2						
	V-SP1	V-SP3-1	V-SP4	V-SP5	V-SP5 _{73h}	
t_2 [sec]	5580	3600	3600	1800	1800	
Q_2 [m ³ /sec]	7,30E-09	9,98E-09	1,01E-08	1,80E-08	1,90E-08	
$d_{FK,ges,A}(t_2)$ [mm]	1,014	0,811	0,930	0,959	1,058	
$d_{FK,2,A}(t_2)$ [mm]	0,603	0,553	0,599	0,541	0,600	
$k_{2,A}(t_2)$ [m/sec]	1,4E-10	1,90E-10	1,64E-10	2,78E-10	2,82E-10	
$e_{2,A}(t_2)$ [-]	1,221	1,381	1,301	1,620	1,630	
$p_1(t_2)$ [kN/m ²]	50	50	50	50	50	
$E_{s,1}(t_2)$ [kN/m ²]	543,62	543,62	543,62	543,62	543,62	
$p_2(t_2)$ [kN/m ²]	20,53	19,08	24,21	22,89	26,49	
$E_{s,2}(t_2)$ [kN/m ²]	223,23	207,42	263,19	248,84	287,98	
$s_1(t_2)$ [mm]	0	0	0	0	0	
$s_2(t_2)$ [mm]	0,05540	0,0509	0,0551	0,0498	0,0552	
$d_{FK,1,E}(t_2)$ [mm]	0,4116	0,2579	0,3315	0,4178	0,4582	
$d_{FK,2,E}(t_2)$ [mm]	0,5473	0,5022	0,5436	0,4916	0,5449	
$k_{1,E}(t_2)$ [m/sec]	6,68E-11	5,45E-11	8,53E-11	1,81E-10	2,42E-10	
$k_{2,E}(t_2)$ [m/sec]	1,28E-10	1,72E-10	1,49E-10	2,53E-10	2,56E-10	
$e_{1,E}(t_2)$ [-]	0,906	0,836	0,998	1,355	1,529	
$e_{2,E}(t_2)$ [-]	1,174	1,327	1,251	1,557	1,565	
Schritt 3						
t_3 [sec]	15000	10800	10800	10800	10800	
Q_2 [m ³ /sec]	4,56E-09	6,29E-09	6,17E-09	7,94E-09	7,94E-09	
$d_{FK,ges,A}(t_3)$ [mm]	1,888	1,697	1,848	2,612	2,711	
$d_{FK,3,A}(t_3)$ [mm]	0,929	0,937	0,973	1,703	1,708	
$k_{3,A}(t_3)$ [m/sec]	1,48E-10	2,09E-10	2,01E-10	3,17E-10	3,05E-10	
$e_{3,A}(t_3)$ [-]	1,249	1,438	1,415	1,712	1,684	
$p_1(t_3)$ [kN/m ²]	50	50	50	50	50	
$E_{s,1}(t_3)$ [kN/m ²]	543,62	543,62	543,62	543,62	543,62	
$p_2(t_3)$ [kN/m ²]	31,58	30,51	34,29	38,02	40,17	
$E_{s,2}(t_3)$ [kN/m ²]	343,32	331,67	372,82	413,42	436,76	
$p_3(t_3)$ [kN/m ²]	18,74	18,47	18,48	27,92	29,10	
$E_{s,3}(t_3)$ [kN/m ²]	203,76	200,91	212,51	303,51	316,38	
$s_1(t_3)$ [mm]	0	0	0	0	0	
$s_2(t_3)$ [mm]	0,0176	0,0173	0,0147	0,0180	0,0171	
$s_3(t_3)$ [mm]	0,0290	0,0288	0,0895	0,1566	0,1571	
$d_{FK,1,E}(t_3)$ [mm]	0,4116	0,2579	0,3315	0,4178	0,4582	
$d_{FK,2,E}(t_3)$ [mm]	0,5297	0,4849	0,5289	0,4736	0,5278	
$d_{FK,3,E}(t_3)$ [mm]	0,9004	0,9079	0,8834	1,5463	1,5512	
$k_{1,E}(t_3)$ [m/sec]	6,68E-11	5,45E-11	8,53E-11	1,81E-10	2,42E-10	
$k_{2,E}(t_3)$ [m/sec]	1,23E-10	1,66E-10	1,45E-10	2,44E-10	2,48E-10	
$k_{3,E}(t_3)$ [m/sec]	1,44E-10	2,03E-10	1,83E-10	2,88E-10	2,77E-10	
$e_{1,E}(t_3)$ [-]	0,906	0,836	0,998	1,355	1,529	
$e_{2,E}(t_3)$ [-]	1,159	1,308	1,237	1,534	1,544	
$e_{3,E}(t_3)$ [-]	1,233	1,419	1,361	1,642	1,618	

Tabelle III.3: Berechnung Filterkuchenbildung

Schritt 4						
	V-SP1	V-SP3-1	V-SP4	V-SP5	V-SP5 _{73h}	
t_4 [sec]	51000	48000	36000	36000	30000	
Q_4 [m ³ /sec]	2,86E-09	3,33E-09	3,79E-09	4,80E-09	4,84E-09	
$d_{FK,ges,A}(t_4)$ [mm]	3,982	4,119	3,823	5,410	4,861	
$d_{FK,4,A}(t_4)$ [mm]	2,140	2,468	2,079	2,972	2,324	
$k_{4,A}(t_4)$ [m/sec]	2,15E-10	2,29E-10	2,68E-10	4,72E-10	3,77E-10	
$e_{4,A}(t_4)$ [-]	1,455	1,493	1,595	2,028	1,843	
$p_1(t_4)$ [kN/m ²]	50	50	50	50	50	
$E_{s,1}(t_4)$ [kN/m ²]	543,62	543,62	543,62	543,62	543,62	
$p_2(t_4)$ [kN/m ²]	38,45	39,69	40,34	42,76	44,01	
$E_{s,2}(t_4)$ [kN/m ²]	418,08	431,48	438,63	464,93	478,50	
$p_3(t_4)$ [kN/m ²]	30,41	33,32	31,28	36,65	37,26	
$E_{s,3}(t_4)$ [kN/m ²]	330,61	362,29	340,09	398,51	405,13	
$p_4(t_4)$ [kN/m ²]	18,66	23,54	19,27	19,78	19,53	
$E_{s,4}(t_4)$ [kN/m ²]	202,89	255,99	209,47	215,07	212,30	
$s_1(t_4)$ [mm]	0	0	0	0	0	
$s_2(t_4)$ [mm]	0,0087	0,0103	0,0073	0,0048	0,0042	
$s_3(t_4)$ [mm]	0,0318	0,0372	0,0305	0,0339	0,0313	
$s_4(t_4)$ [mm]	0,1968	0,2270	0,1912	0,2734	0,2137	
$d_{FK,1,E}(t_4)$ [mm]	0,4116	0,2579	0,3315	0,4178	0,4582	
$d_{FK,2,E}(t_4)$ [mm]	0,5209	0,4746	0,5216	0,4687	0,5236	
$d_{FK,3,E}(t_4)$ [mm]	0,8687	0,8707	0,8529	1,5124	1,5199	
$d_{FK,4,E}(t_4)$ [mm]	1,9434	2,2409	1,531	2,6987	2,1098	
$k_{1,E}(t_4)$ [m/sec]	6,68E-11	5,45E-11	8,53E-11	1,81E-10	2,42E-10	
$k_{2,E}(t_4)$ [m/sec]	1,21E-10	1,63E-10	1,43E-10	2,41E-10	2,46E-10	
$k_{3,E}(t_4)$ [m/sec]	1,39E-10	1,94E-10	1,46E-10	2,82E-10	2,72E-10	
$k_{4,E}(t_4)$ [m/sec]	1,98E-10	2,08E-10	2,43E-10	4,29E-10	3,42E-10	
$e_{1,E}(t_4)$ [-]	0,906	0,836	0,998	1,355	1,529	
$e_{2,E}(t_4)$ [-]	1,151	1,297	1,230	1,526	1,539	
$e_{3,E}(t_4)$ [-]	1,215	1,395	1,339	1,630	1,605	
$e_{4,E}(t_4)$ [-]	1,398	1,434	1,531	1,947	1,768	

Tabelle III.4: Berechnung Filterkuchenbildung

Schritt 5						
	V-SP1	V-SP3-1	V-SP4	V-SP5	V-SP5 _{73h}	
t_5 [sec]	86400	86400	86400	86400	85380	
Q_5 [m ³ /sec]	2,43E-09	2,75E-09	2,68E-09	3,31E-09	3,34E-09	
$d_{FK,ges,A}(t_5)$ [mm]	5,730	6,180	6,610	9,273	9,143	
$d_{FK,5,A}(t_5)$ [mm]	1,985	2,336	3,016	4,175	4,531	
$k_{5,A}(t_5)$ [m/sec]	4,19E-10	4,79E-10	3,59E-10	5,85E-10	6,41E-10	
$e_{5,A}(t_5)$ [-]	1,927	2,042	1,805	2,225	2,315	
$p_1(t_5)$ [kN/m ²]	50	50	50	50	50	
$E_{s,1}(t_5)$ [kN/m ²]	543,62	543,62	543,62	543,62	543,62	
$p_2(t_5)$ [kN/m ²]	40,20	41,49	43,18	45,00	45,86	
$E_{s,2}(t_5)$ [kN/m ²]	437,02	451,14	469,51	489,29	498,64	
$p_3(t_5)$ [kN/m ²]	33,36	36,25	36,79	40,78	41,20	
$E_{s,3}(t_5)$ [kN/m ²]	362,75	394,08	399,96	443,43	447,96	
$p_4(t_5)$ [kN/m ²]	23,39	19,42	28,31	29,13	28,95	
$E_{s,4}(t_5)$ [kN/m ²]	254,30	306,41	307,75	316,77	314,78	
$p_5(t_5)$ [kN/m ²]	7,54	8,76	14,71	15,48	15,46	
$E_{s,5}(t_5)$ [kN/m ²]	82,03	95,30	159,90	168,27	168,14	
$s_1(t_5)$ [mm]	0	0	0	0	0	
$s_2(t_5)$ [mm]	0,0021	0,0019	0,0032	0,0021	0,0019	
$s_3(t_5)$ [mm]	0,0071	0,0065	0,0117	0,0141	0,0134	
$s_4(t_5)$ [mm]	0,0361	0,0339	0,0554	0,0797	0,0632	
$s_5(t_5)$ [mm]	0,1826	0,2149	0,2774	0,3840	0,4168	
$d_{FK,1,E}(t_5)$ [mm]	0,4116	0,2579	0,3315	0,4178	0,4582	
$d_{FK,2,E}(t_5)$ [mm]	0,5189	0,4727	0,5453	0,4666	0,5216	
$d_{FK,3,E}(t_5)$ [mm]	0,8616	0,8642	0,8412	1,4983	1,5065	
$d_{FK,4,E}(t_5)$ [mm]	1,9209	2,2070	1,8321	2,6190	2,0466	
$d_{FK,5,E}(t_5)$ [mm]	1,8028	2,1213	2,7390	3,7911	4,1144	
$d_{FK,ges,E}(t_5)$ [mm]	5,5020	5,923	6,2622	8,7928	-	
$k_{1,E}(t_5)$ [m/sec]	6,68E-11	5,45E-11	8,53E-11	1,81E-10	2,42E-10	
$k_{2,E}(t_5)$ [m/sec]	1,21E-10	1,62E-10	1,42E-10	2,40E-10	2,45E-10	
$k_{3,E}(t_5)$ [m/sec]	1,38E-10	1,93E-10	1,74E-10	2,79E-10	2,69E-10	
$k_{4,E}(t_5)$ [m/sec]	1,92E-10	2,04E-10	2,36E-10	4,16E-10	3,32E-10	
$k_{5,E}(t_5)$ [m/sec]	3,80E-10	4,35E-10	3,26E-10	5,32E-10	5,82E-10	
$e_{1,E}(t_5)$ [-]	0,906	0,836	0,998	1,355	1,529	
$e_{2,E}(t_5)$ [-]	1,149	1,295	1,227	1,523	1,536	
$e_{3,E}(t_5)$ [-]	1,211	1,391	1,333	1,622	1,598	
$e_{4,E}(t_5)$ [-]	1,387	1,425	1,513	1,921	1,746	
$e_{5,E}(t_5)$ [-]	1,849	1,959	1,732	2,135	2,220	

Tabelle III.5: Berechnung Filterkuchenbildung, V-SP5_{73h}

Schritt 6 V-SP5_{73h}					
t_6 [sec]	129600	$E_{s,5}(t_6)$ [kN/m ²]	218,26	$k_{1,E}(t_6)$ [m/sec]	2,42E-10
Q_6 [m ³ /sec]	2,89E-09	$p_6(t_6)$ [kN/m ²]	6,67	$k_{2,E}(t_6)$ [m/sec]	2,45E-10
$d_{FK,ges,A}(t_6)$ [mm]	12,105	$E_{s,6}(t_6)$ [kN/m ²]	72,57	$k_{3,E}(t_6)$ [m/sec]	2,69E-10
$d_{FK,6,A}(t_6)$ [mm]	3,458	$s_1(t_6)$ [mm]	0	$k_{4,E}(t_6)$ [m/sec]	3,29E-10
$k_{6,A}(t_6)$ [m/sec]	9,83E-10	$s_2(t_6)$ [mm]	0,0006	$k_{5,E}(t_6)$ [m/sec]	5,70E-10
$e_{6,A}(t_6)$ [-]	2,792	$s_3(t_6)$ [mm]	0,0038	$k_{6,E}(t_6)$ [m/sec]	8,9220E-10
$p_1(t_6)$ [kN/m ²]	50	$s_4(t_6)$ [mm]	0,0167	$e_{1,E}(t_6)$ [-]	1,529
$E_{s,1}(t_6)$ [kN/m ²]	543,62	$s_5(t_6)$ [mm]	0,0869	$e_{2,E}(t_6)$ [-]	1,536
$p_2(t_6)$ [kN/m ²]	46,41	$s_6(t_6)$ [mm]	0,3180	$e_{3,E}(t_6)$ [-]	1,598
$E_{s,2}(t_6)$ [kN/m ²]	504,64	$d_{FK,1,E}(t_6)$ [mm]	0,4582	$e_{4,E}(t_6)$ [-]	1,739
$p_3(t_6)$ [kN/m ²]	42,38	$d_{FK,2,E}(t_6)$ [mm]	0,5210	$e_{5,E}(t_6)$ [-]	2,200
$E_{s,3}(t_6)$ [kN/m ²]	460,73	$d_{FK,3,E}(t_6)$ [mm]	1,5027	$e_{6,E}(t_6)$ [-]	2,675
$p_4(t_6)$ [kN/m ²]	31,76	$d_{FK,4,E}(t_6)$ [mm]	2,0300		
$E_{s,4}(t_6)$ [kN/m ²]	345,33	$d_{FK,5,E}(t_6)$ [mm]	4,0275		
$p_5(t_6)$ [kN/m ²]	20,08	$d_{FK,6,E}(t_6)$ [mm]	3,1399		
Schritt 7 V-SP5_{73h}					
t_7 [sec]	171900	$E_{s,6}(t_7)$ [kN/m ²]	118,51	$d_{FK,7,E}(t_7)$ [mm]	2,9501
Q_7 [m ³ /sec]	2,61E-09	$p_7(t_7)$ [kN/m ²]	4,88	$k_{1,E}(t_7)$ [m/sec]	2,42E-10
$d_{FK,ges,A}(t_7)$ [mm]	14,663	$E_{s,7}(t_7)$ [kN/m ²]	53,02	$k_{2,E}(t_7)$ [m/sec]	2,45E-10
$d_{FK,7,A}(t_7)$ [mm]	2,984	$s_1(t_7)$ [mm]	0	$k_{3,E}(t_7)$ [m/sec]	2,68E-10
$k_{7,A}(t_7)$ [m/sec]	1,05E-09	$s_2(t_7)$ [mm]	0	$k_{4,E}(t_7)$ [m/sec]	3,26E-10
$e_{7,A}(t_7)$ [-]	2,8742	$s_3(t_7)$ [mm]	0,0032	$k_{5,E}(t_7)$ [m/sec]	5,65E-10
$p_1(t_7)$ [kN/m ²]	50	$s_4(t_7)$ [mm]	0,0196	$k_{6,E}(t_7)$ [m/sec]	8,62E-10
$E_{s,1}(t_7)$ [kN/m ²]	543,62	$s_5(t_7)$ [mm]	0,0367	$k_{7,E}(t_7)$ [m/sec]	1,04E-09
$p_2(t_7)$ [kN/m ²]	46,76	$s_6(t_7)$ [mm]	0,1064	$e_{1,E}(t_7)$ [-]	1,529
$E_{s,2}(t_7)$ [kN/m ²]	508,45	$s_7(t_7)$ [mm]	0,0335	$e_{2,E}(t_7)$ [-]	1,536
$p_3(t_7)$ [kN/m ²]	43,12	$d_{FK,1,E}(t_7)$ [mm]	0,4582	$e_{3,E}(t_7)$ [-]	1,595
$E_{s,3}(t_7)$ [kN/m ²]	468,82	$d_{FK,2,E}(t_7)$ [mm]	0,5210	$e_{4,E}(t_7)$ [-]	1,732
$p_4(t_7)$ [kN/m ²]	33,54	$d_{FK,3,E}(t_7)$ [mm]	1,4995	$e_{5,E}(t_7)$ [-]	2,192
$E_{s,4}(t_7)$ [kN/m ²]	364,67	$d_{FK,4,E}(t_7)$ [mm]	2,0103	$e_{6,E}(t_7)$ [-]	2,635
$p_5(t_7)$ [kN/m ²]	22,99	$d_{FK,5,E}(t_7)$ [mm]	3,9909	$e_{7,E}(t_7)$ [-]	2,856
$E_{s,5}(t_7)$ [kN/m ²]	250,00	$d_{FK,6,E}(t_7)$ [mm]	3,0335		
$p_6(t_7)$ [kN/m ²]	10,90				

Tabelle III.6: Berechnung Filterkuchenbildung, V-SP5_{73h}

Schritt 8 V-SP5_{73h}					
t_8 [sec]	260760	$E_{s,7}(t_8)$ [kN/m ²]	97,25	$d_{FK,ges,E}(t_8)$ [mm]	18,9552
Q_8 [m ³ /sec]	2,38E-09	$p_8(t_8)$ [kN/m ²]	4,51	$k_{1,E}(t_8)$ [m/sec]	2,42E-10
$d_{FK,ges,A}(t_8)$ [mm]	19,551	$E_{s,8}(t_8)$ [kN/m ²]	49,01	$k_{2,E}(t_8)$ [m/sec]	2,45E-10
$d_{FK,8,A}(t_8)$ [mm]	5,088	$s_1(t_8)$ [mm]	0	$k_{3,E}(t_8)$ [m/sec]	2,68E-10
$k_{8,A}(t_8)$ [m/sec]	1,76E-09	$s_2(t_8)$ [mm]	0	$k_{4,E}(t_8)$ [m/sec]	3,26E-10
$e_{8,A}(t_8)$ [-]	3,6208	$s_3(t_8)$ [mm]	0	$k_{5,E}(t_8)$ [m/sec]	5,65E-10
$p_1(t_8)$ [kN/m ²]	50	$s_4(t_8)$ [mm]	0	$k_{6,E}(t_8)$ [m/sec]	8,29E-10
$E_{s,1}(t_8)$ [kN/m ²]	543,62	$s_5(t_8)$ [mm]	0	$k_{7,E}(t_8)$ [m/sec]	1,03E-09
$p_2(t_8)$ [kN/m ²]	47,06	$s_6(t_8)$ [mm]	0,1144	$k_{8,E}(t_8)$ [m/sec]	1,60E-09
$E_{s,2}(t_8)$ [kN/m ²]	511,62	$s_7(t_8)$ [mm]	0,0139	$e_{1,E}(t_8)$ [-]	1,529
$p_3(t_8)$ [kN/m ²]	43,74	$s_8(t_8)$ [mm]	0,4680	$e_{2,E}(t_8)$ [-]	1,536
$E_{s,3}(t_8)$ [kN/m ²]	475,56	$d_{FK,1,E}(t_8)$ [mm]	0,4582	$e_{3,E}(t_8)$ [-]	1,595
$p_4(t_8)$ [kN/m ²]	35,02	$d_{FK,2,E}(t_8)$ [mm]	0,5210	$e_{4,E}(t_8)$ [-]	1,732
$E_{s,4}(t_8)$ [kN/m ²]	380,80	$d_{FK,3,E}(t_8)$ [mm]	1,4995	$e_{5,E}(t_8)$ [-]	2,192
$p_5(t_8)$ [kN/m ²]	25,43	$d_{FK,4,E}(t_8)$ [mm]	2,0103	$e_{6,E}(t_8)$ [-]	2,590
$E_{s,5}(t_8)$ [kN/m ²]	276,47	$d_{FK,5,E}(t_8)$ [mm]	3,9909	$e_{7,E}(t_8)$ [-]	2,851
$p_6(t_8)$ [kN/m ²]	14,43	$d_{FK,6,E}(t_8)$ [mm]	2,9191	$e_{8,E}(t_8)$ [-]	3,465
$E_{s,6}(t_8)$ [kN/m ²]	156,84	$d_{FK,7,E}(t_8)$ [mm]	2,9363		
$p_7(t_8)$ [kN/m ²]	8,94	$d_{FK,8,E}(t_8)$ [mm]	4,6199		

III.2 Filterkuchenbildung, FE-Berechnung

III.2.1 Verlauf der Porenzahl über die Filterkuchendicke

Versuch V-SP1:

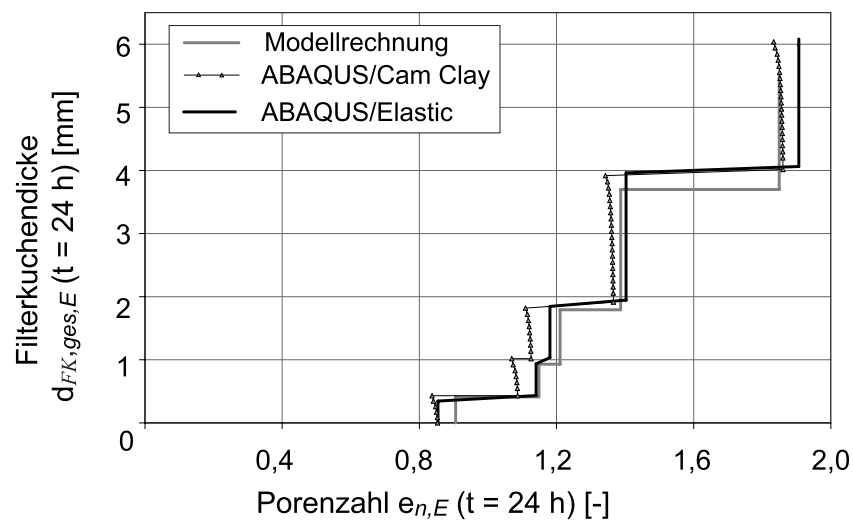


Bild III.1: Gegenüberstellung der Verläufe Porenzahl über Filterkuchendicke, FK-SP1

Versuch V-SP4:

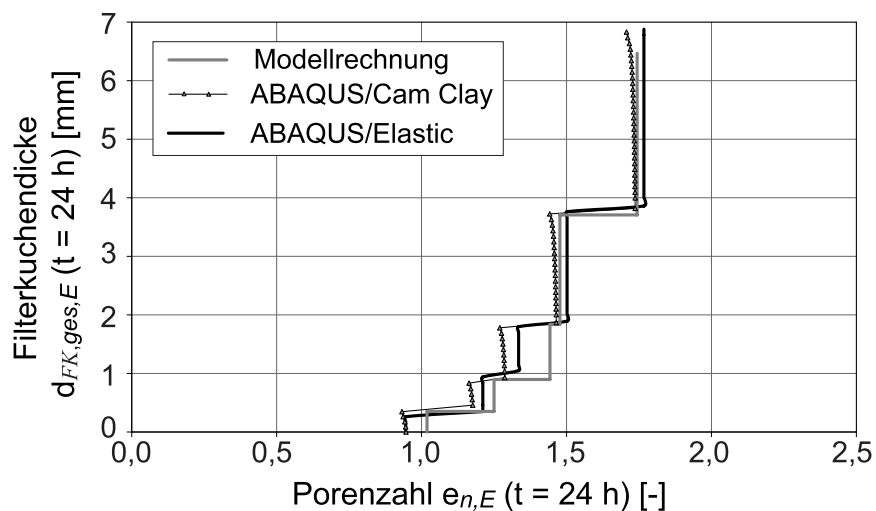


Bild III.2: Gegenüberstellung der Verläufe Porenzahl über Filterkuchendicke, FK-SP4

Versuch V-SP5:

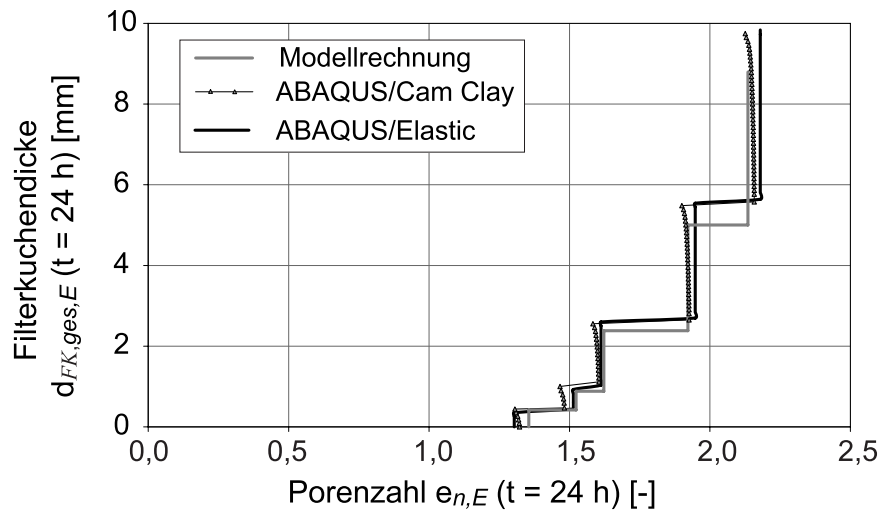


Bild III.3: Gegenüberstellung der Verläufe Porenzahl über Filterkuchendicke, FK-SP5

III.2.2 Porenwasserüberdruck und effektive Spannung über die Zeit

Der Verlauf der effektiven Spannungen σ' und der Porenwasserüberdrücke u über die Zeit aus den FE-Berechnungen für ein Element an der Oberkante der Schichten 1, 3 und 5 für die Schritte 1, 3 und 5.

Versuch V-SP1:

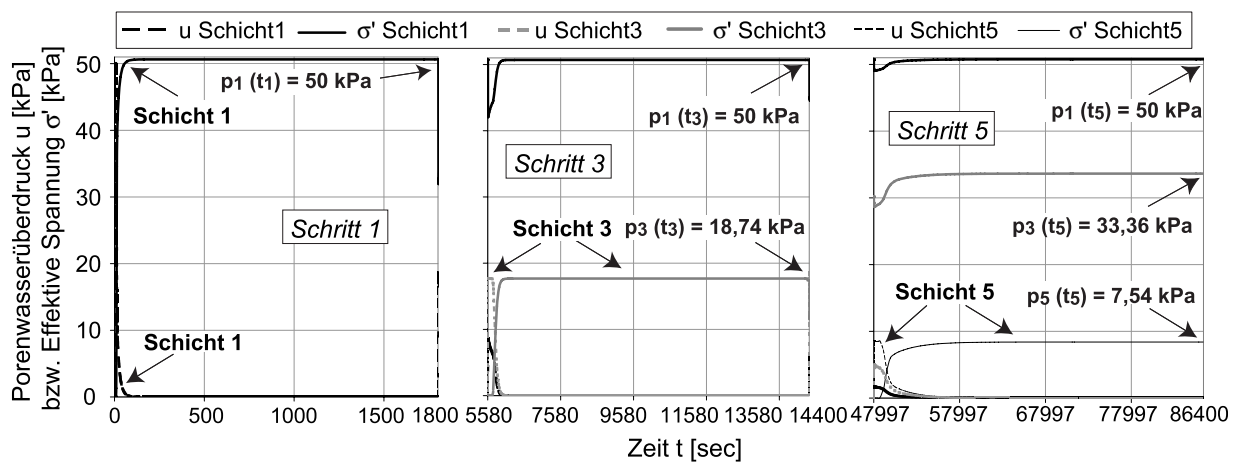


Bild III.4: Porenwasserüberdruck u und effektive Spannung σ' über die Zeit t , FK-SP1

Versuch V-SP4:

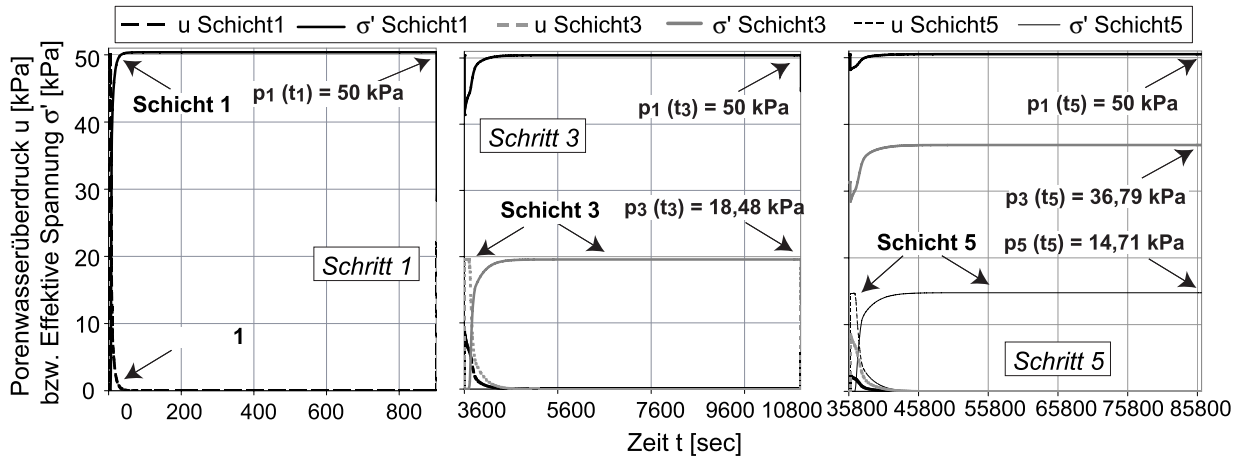


Bild III.5: Porenwasserüberdruck u und effektive Spannung σ' über die Zeit t , FK-SP4

Versuch V-SP5:

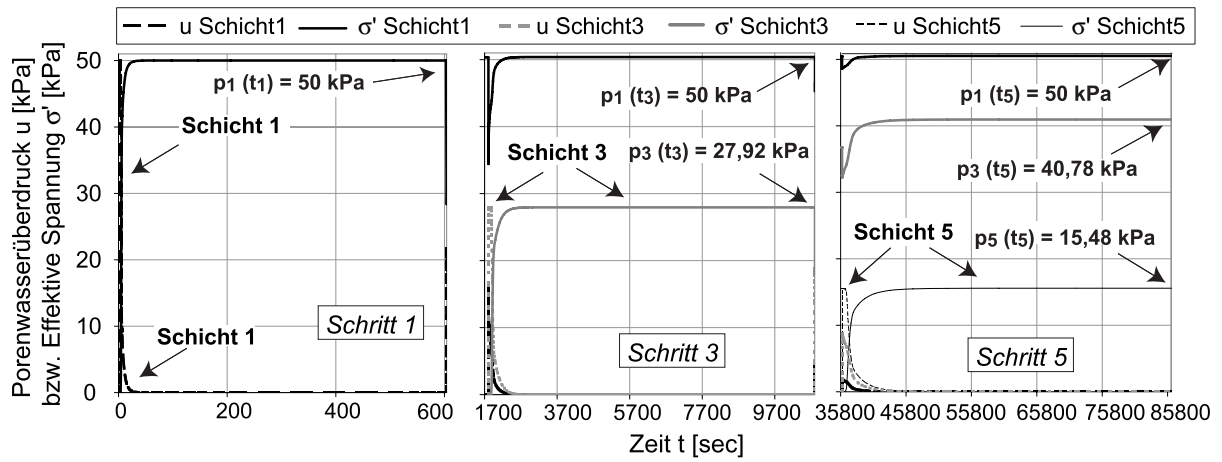


Bild III.6: Porenwasserüberdruck u und effektive Spannung σ' über die Zeit t , FK-SP5

Anhang IV

Oedometerversuche

Es werden je zwei Oedometerversuche [21] (Probenmaße: $H \approx 20$ mm; $\varnothing \approx 70$ mm) am Filterkuchenmaterial FK-Ro-Labor und FK-LM-Labor (siehe Bild 3.6 und 3.17) durchgeführt. Die Ergebnisse sollen repräsentativ für typische Filterkuchenmaterialien stehen, da diese wie im Kapitel 6.2.2 gezeigt ähnlich Kornverteilungen aufweisen.

Tabelle VII.1 zeigt die Laststufen, Anfangsporenzahlen e_0 und Ausgangstrockendichte $\rho_{d,0}$ der Oedometerversuche.

In Tabelle sind die Kompressionsbeiwerte C_c der Versuche dargestellt:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')} \quad (\text{IV.1})$$

Tabelle IV.1: Oedometerversuche am Filterkuchen FK-Ro-Labor und FK-LM-Labor

	vertikale Spannung σ_z [kPa]			
	O-FK-Ro1	O-FK-Ro2	O-FK-LM1	O-FK-LM2
LST 1	48,84	48,84	48,84	48,84
LST 2	94,09	94,09	94,09	94,09
LST 3	184,60	184,60	184,60	184,60
LST 4	365,50	365,50	365,50	365,50
LST 5	184,60	184,60	184,60	184,60
LST 6	94,09	94,09	94,09	94,09
LST 7	184,60	184,60	184,60	184,60
LST 8	365,50	365,50	365,50	365,50
LST 9	722,93	722,93	722,93	722,93
LST 9	722,93	722,93	722,93	722,93
Einbauporenzahl e_0 [-]	0,90	0,85	0,84	0,80
Einbautrockendichte $\rho_{d,0}$ [g/cm ³]	1,398	1,436	1,440	1,475

Spannungsabhängiger Steifemodul

Der spannungsabhängige Steifemodul für Filterkuchenmaterialien wird aus den Mittelwerten der Kompressionsbeiwerte C_c und den Mittelwerten der Einbauporenzahlen e_0 für die Modellrechnung in Kapitel 7.1 wie folgt ermittelt:

$$E_s(\sigma') = \frac{1}{C_c} \cdot (1 + e_0) \cdot \sigma' = \frac{1}{0,1697} \cdot (1 + 0,85) \cdot \sigma'$$

Zusammenhang zwischen Porenzahl und Durchlässigkeit

Für den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Porenzahl wird der Ansatz von Taylor [100] gewählt der auf der Kozeny-Carmen Beziehung (Kozeny [45] und Carmen [7]) basiert:

$$k = C_1 \cdot \frac{e^3}{1 + e}$$

Der Parameter C_1 ist hierbei eine Konstante und wird analog zu Das [9] ermittelt. Es wird für jede Erstbelastungs-Laststufe (Laststufen LST1 bis LST4 und LST9) der Endzeitpunkt t_e der primären Verdichtung ermittelt. Zu diesem Zeitpunkt geht die primäre in die sekundäre Verdichtung über und Kriechverformungen setzen ein. Daraus kann laststufenabhängig der Konsolidierungsbeiwert c_v ($c_v = H^2/t_e$) und daraus die Durchlässigkeit k ($k = (c_v \cdot \gamma_w)/E_s$) ermittelt werden. Jede Erstbelastungs-Laststufe wird mit der darauf folgenden so kombiniert, dass für jedes Paar aufgrund seiner aktuellen Porenzahlen und Durchlässigkeiten der Parameter C_1 bestimmt wird. Aus den Parametern C_1 der Erstbelastungs-Laststufenpaare wird der Mittelwert gebildet, mit einem Wert von $C_1 = 1,71 \cdot 10^{-10}$ mit dem in der Modellrechnung (Kapitel 7.1) gearbeitet wird.

Materialparameter des Cam-Clay Modells

Es werden aus den vier Oedometerversuchen jeweils die Materialparameter für das Cam-Clay Modells (Beschreibung des Modells in Kapitel 2.4) bestimmt und daraus für die Modellrechnung (Kapitel 7.1) Mittelwerte gebildet. Tabelle VII. 3 zeigt repräsentativ für die Mittelwertbildung die Kompressionsbeiwerte λ und Schwellbeiwerte κ aus den Oedometerversuchen. Die Weiteren Materialparameter sind für die numerische Vergleichsrechnung der Versuche konstant und können der Tabelle 7.2 entnommen werden.

Tabelle IV.2: Kompressionsbeiwerte C_c der Filterkuchenmaterialien FK-Ro-Labor und FK-LM-Labor

Kompressionsbeiwerte C_c			
O-FK-Ro1	O-FK-Ro2	O-FK-LM1	O-FK-LM2
0,224	0,212	0,124	0,118
Mittelwert $C_c = 0,1697$			

Schwellbeiwert (Wiederbelastungsast) κ :

$$\kappa = -\frac{\Delta e}{\Delta(\ln p)} \quad (\text{IV.2})$$

p steht für die mittlere Spannung ($p = \sigma_z + 2 \cdot K_0 \cdot \sigma_z$, mit $K_0 = 1 - \sin \varphi$). φ wird basierend Kapitel 6.2.2 für typische Filterkuchenmaterialien zu $23,5^\circ$ gesetzt.

Poisson'sche Zahl ν :

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (\text{IV.3})$$

Kompressionsbeiwert (Erstbelastungsast) λ :

$$\lambda = -\frac{\Delta e}{\Delta(\ln p)} \quad (\text{IV.4})$$

Steigung der Fließfläche M :

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (\text{IV.5})$$

Ausgangsgröße der Fließfläche a_0 :

$$a_0 = 0,5 \cdot (OCR \cdot 1/3 \cdot \gamma' \cdot (1 + 2 \cdot K_0)) \quad (\text{IV.6})$$

γ' wird für jede Schicht n mit der aus der Modellrechnung ermittelten jeweiligen Auflast $p_n(t_{i=n})$ ersetzt.

Formfaktor β und Konusfaktor K

Der Formfaktor β und der Konusfaktor K werden beide zu 1 gesetzt.

Tabelle IV.3: Kompressionsbeiwerte λ und Schwellbeiwerte κ der Filterkuchenmaterialien
FK-Ro-Labor und FK-LM-Labor

	O-FK-Ro1	O-FK-Ro2	O-FK-LM1	O-FK-LM2
Kompressionsbeiwerte λ				
Versuch	0,1073	0,1016	0,0623	0,0580
Schwellbeiwerte κ				
Versuch	0,0082	0,0077	0,0070	0,0065

$$K = \frac{q_T}{q_c} \quad (\text{IV.7})$$

Der Konusfaktor kann aus den Bruchgeraden für Kompression und Extension im Triaxialversuch ermittelt werden und muss im Bereich von $0,778 \leq K \leq 1,0$ liegen. q_T steht für die Bruchgerade der Extension und q_c für die Bruchgerade der Kompression.

Der Formfaktor β beschreibt die Form der Fließfläche rechts der CSL, siehe hierzu Kapitel 2.4.

Zur Verifikation werden die Oedometerversuche numerisch nachgerechnet. Bild IV.1 zeigt eine Skizze des axialsymmetrischen FEM-Modells inklusive Randbedingungen. Ein Ver-

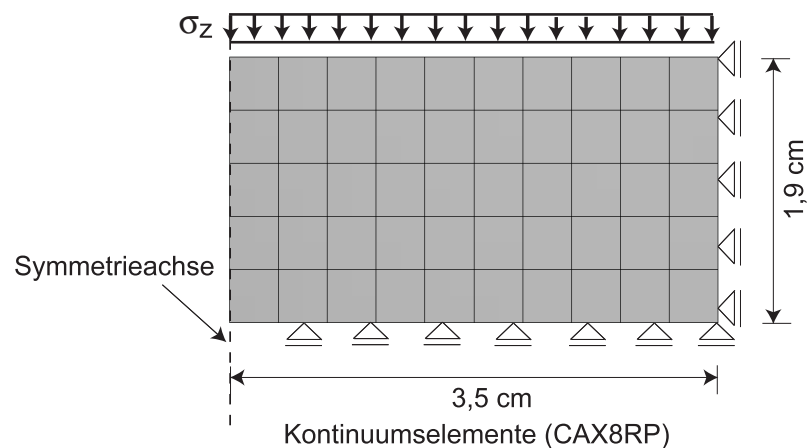


Bild IV.1: Axialsymmetrisches FEM-Modell der Oedometerversuche

gleich der gemessenen sowie numerisch bestimmten Ergebnisse der Versuche zeigen eine befriedigende Übereinstimmung. Die Bilder IV.2, IV.3, IV.4 und IV.5 zeigen repräsentativ einen Vergleich der gemessenen sowie numerisch bestimmten Kompressions- und Schwellbeiwerte. Nur im Bereich der ersten Laststufe finden sich geringfügige Abweichungen die mit den nicht genau zu definierenden Einbauverhältnissen begründet werden können.

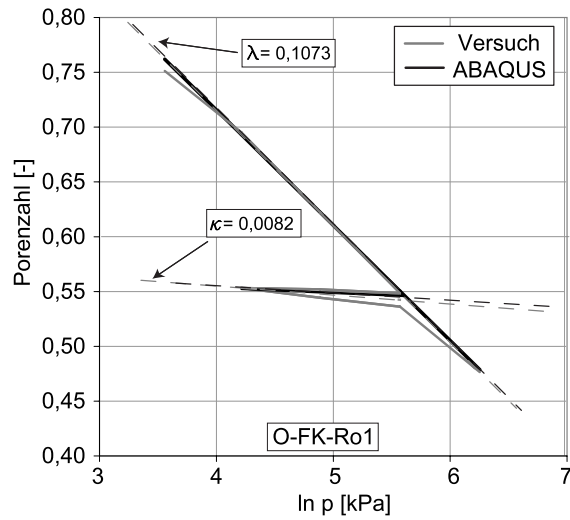


Bild IV.2: Kompressions- und Schwellbeiwert, Versuch O-FK-Ro1

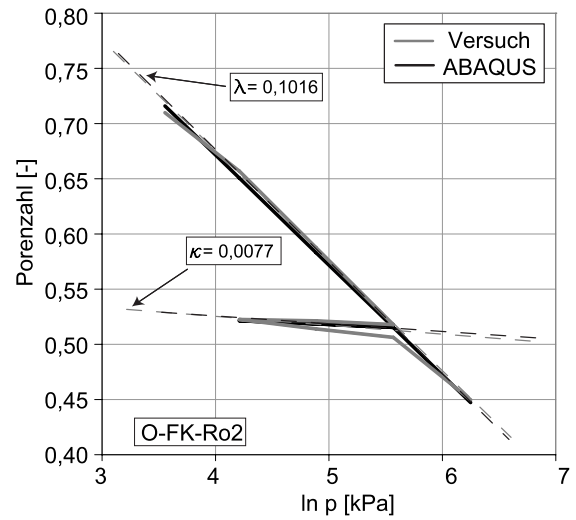


Bild IV.3: Kompressions- und Schwellbeiwert, Versuch O-FK-Ro2

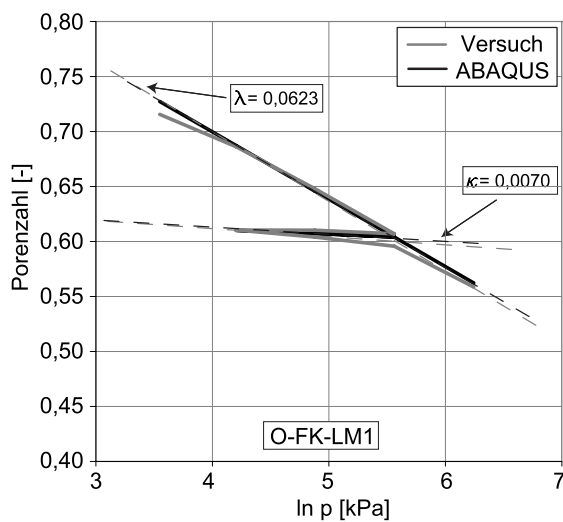


Bild IV.4: Kompressions- und Schwellbeiwert, Versuch O-FK-LM1

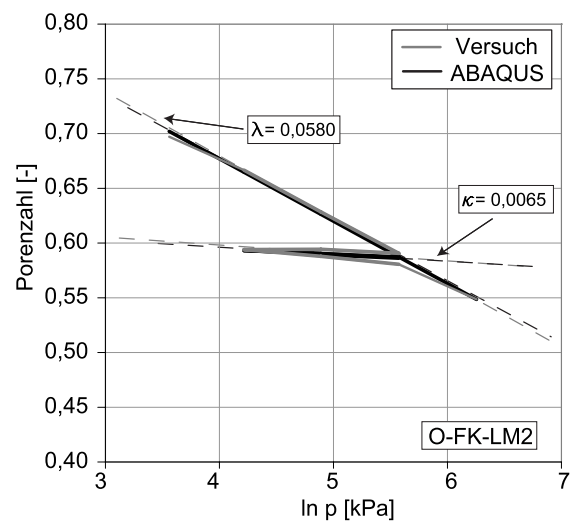


Bild IV.5: Kompressions- und Schwellbeiwert, Versuch O-FK-LM2

Anhang V

Betondruckverläufe

Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G1 (Tabelle 8.2) bei einer Betonierschwindigkeit von $v_b = 3 \text{ m/h}$

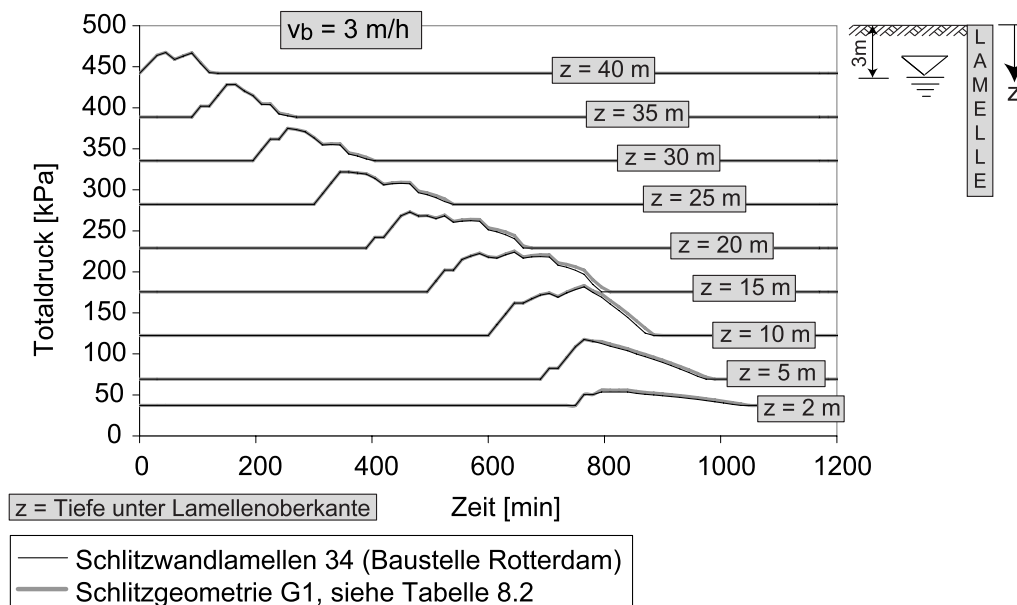


Bild V.1: Frischbetondruckentwicklung: Schlitzgeometrie G1

Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G3 (Tabelle 8.2) bei einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h

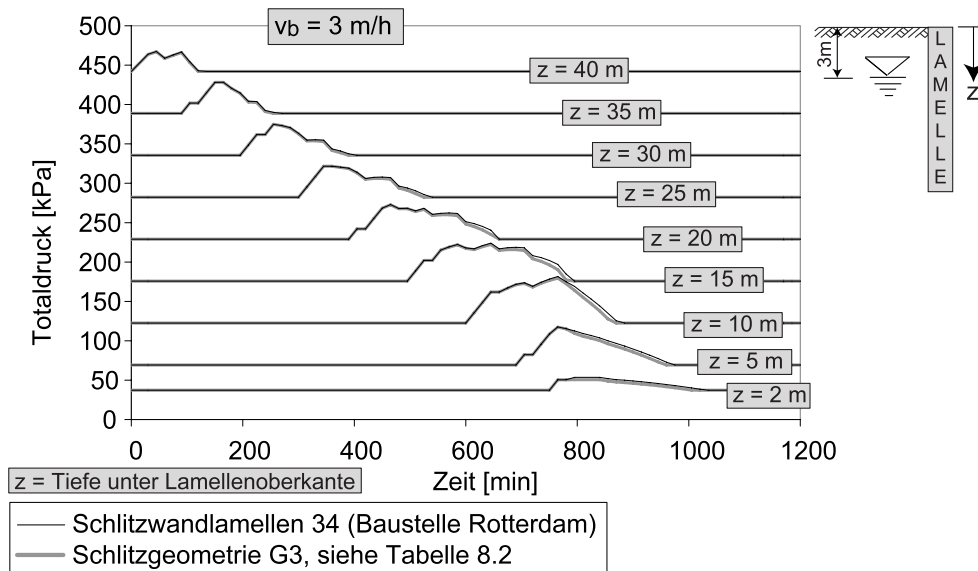


Bild V.2: Frischbetondruckentwicklung: Schlitzgeometrie G3

Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G4 (Tabelle 8.2) bei einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h

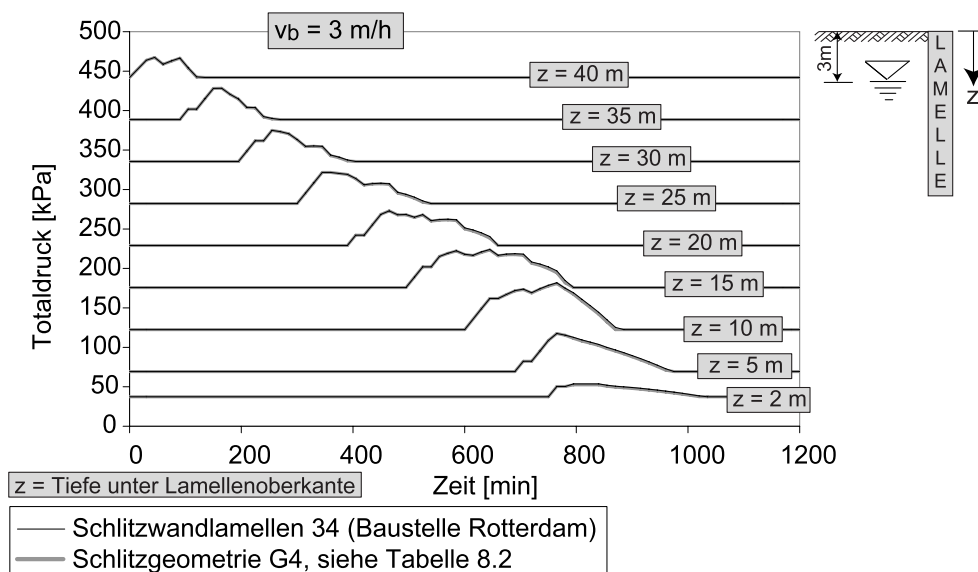


Bild V.3: Frischbetondruckentwicklung: Schlitzgeometrie G4

Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G5 (Tabelle 8.2) bei einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h

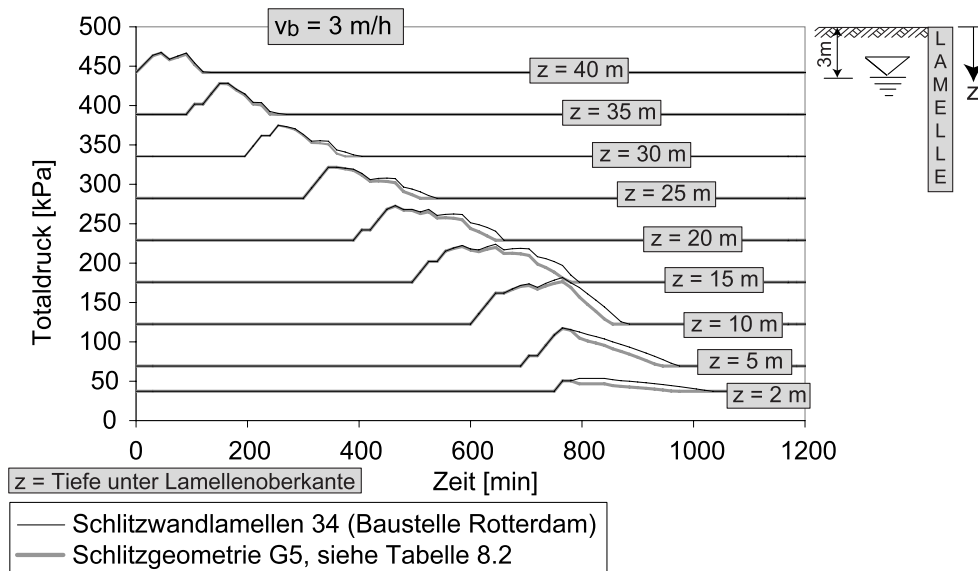


Bild V.4: Frischbetondruckentwicklung: Schlitzgeometrie G5

Frischbetondruckentwicklung der Lamelle 34 (Rotterdam) und der Schlitzgeometrie G6 (Tabelle 8.2) bei einer Betoniergeschwindigkeit von $v_b = 3$ m/h

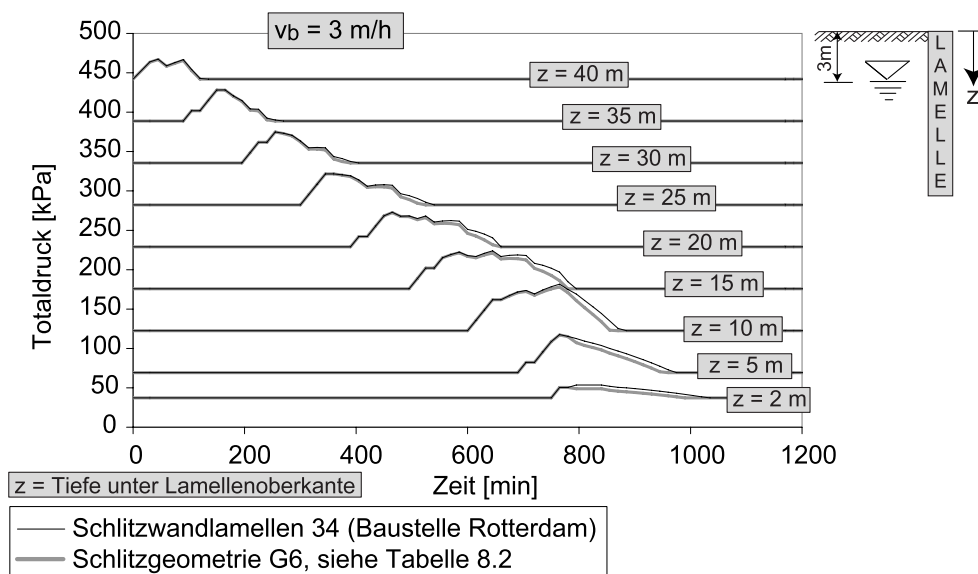


Bild V.5: Frischbetondruckentwicklung: Schlitzgeometrie 6