

# Montanuniversität Leoben

## Entwässerungsversuche an Suspensionen aus dem Düsenstrahlverfahren

Dewatering-experiments on suspensions from the high-pressure jetting method



Die vorliegende Arbeit wurde am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben/Österreich in Kooperation mit der ÖBB Infrastruktur AG durchgeführt.

**Betreuer:**

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Andreas Böhm  
Dipl.-Ing. Tobias Schachinger (ÖBB)

**Leoben, März 2012**

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, März 2012

---

Andreas Franz Moser  
Matrikelnummer: 0535212

## Kurzfassung

Für die Errichtung zweier Tunnelbauwerke der Tunnelkette St. Kanzian im westlichen Bereich der Koralmbahn sind umfangreiche Bodenvergütungsmaßnahmen in feinkörnigen glazialen Stillwassersedimenten (Seetone) mittels Düsenstrahlverfahren erforderlich.

Dabei fallen große Mengen systembedingter Rücklaufsuspensionen (Gemisch aus Wasser, Boden und Bindemittel) an, bei denen der Wassergehalt reduziert werden muss, um sie deponieren zu können. Um dafür ein geeignetes Aufbereitungssystem zu entwickeln, müssen die Entwässerungseigenschaften der Trübe in Abhängigkeit von Feststoffparametern (Mineralzusammensetzung, Korngrößenverteilung), elektrochemischen Eigenschaften und Trübeeigenschaften (Feststoffgehalt, Zementanteil) erarbeitet werden. Für eine Matrix von Einflussparametern, bestehend aus Kornverteilung, Feststoff – Zementverhältnis, und Feststoffgehalt, sind systematisch Klärversuche im Schwer- und Fliehkraftfeld durchgeführt und die Eigenschaften des Sedimentkörpers hinsichtlich Festigkeit und Wassergehalt ermittelt worden. Druckfiltrationsversuche mit anschließenden Rahmenscherversuchen des Filterkuchens geben Aufschluss über den Filtrationswiderstand, die Kohäsion und die innere Reibung.

Auf Basis der Versuchsergebnisse werden die Notwendigkeit und der mögliche Aufbau eines Entwässerungssystems aus geeigneten Entwässerungseinrichtungen unter besonderer Berücksichtigung der Zementanteile diskutiert.

## Abstract

For the construction of two tunnels in the western area of the Koralm rail track the stability of soil mainly constituted by lacustrine clay sediments has to be artificially improved. In the high pressure jetting method the compressive strength of soil is increased by injection of cement suspension. In response large amounts of suspension emanate from the boreholes, which have to be prepared for further use or disposed. To develop an appropriate processing system for the cement containing slimes, the dewatering properties had to be elaborated with regard to the solids particle size distribution and mineral composition, electrochemical properties and varying volume concentration of solids and cement. Laboratory settling tests using 1 l cylinders under variation of size distribution, solids and cement concentration revealed a property matrix to describe the sedimentation behaviour and the consolidation of the sediment. Pressure filter tests with successive shear box tests of the filter cake gave insight into the filtration resistance, cohesion and inner friction of the dewatered soil.

On the base of these data the need and the design of a dewatering system composed of appropriate apparatus for handling cement containing slimes is discussed.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Eidesstattliche Erklärung .....	I
Kurzfassung (Deutsch und Englisch).....	II
Tabellenverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole .....	VIII
1 Aufgabenstellung.....	1
2 A. Zusammenfassung .....	2
2 B. Schlussfolgerungen .....	3
3 Probenbeschreibung .....	6
3.1 Boden .....	6
3.1.1 Begründung der Auswahl der Proben für die Versuche .....	6
3.1.2 ÖBB1.....	11
3.1.3 ÖBB2.....	16
3.1.4 ÖBB3.....	20
3.1.5 ÖBB4.....	21
3.1.6 Gesamtdarstellung der Korngrößenverteilung .....	25
3.2 Bindemittel .....	26
3.2.1 Beschreibung des eingesetzten Bindemittels .....	26
3.2.2 Theoretische Betrachtung der Wirkung von Zement in den Trüben <sup>[20,22]</sup> ...	28
3.2.3 Einfluss des W/Z-Wertes.....	31
3.3 Wasser.....	32
4 Versuche .....	35
4.1 Grundlagen der Bindungskräfte zwischen Feststoff und Flüssigkeit <sup>[1]</sup> ..	35
4.2 Sedimentationsversuche .....	36
4.2.1 Zusammensetzung der Suspension für die Versuche .....	36
4.2.2 Durchführung der Versuche .....	39
4.3 Filtrationsversuche.....	43
4.4 Rahmenscherversuche .....	47
4.5 Flockungsversuche.....	48
4.5.1 Anionisches polymeres Flockungsmittel .....	49
4.5.2 Ionisches Flockungsmittel .....	50
4.6 Hydrozyklonversuche .....	51
4.7 Pumpenauswahl .....	52
5 Versuchsauswertung .....	54
5.1 Auswertung der Sedimentationsversuche .....	54
5.2 Auswertung der Filtrationsversuche .....	56
5.3 Auswertung der Rahmenscherversuche.....	58
5.4 Auswertung der Flockungsmittelversuche .....	59
5.4.1 Versuchsauswertung des anionischen polymeren Flockungsmittels .....	59
5.4.2 Versuchsauswertung des ionischen Flockungsmittels .....	59
5.5 Auswertung der Hydrozyklonversuche .....	59
5.6 Auswertung der möglichen Pumpen.....	61
6 Ergebnisse der Versuche .....	62

---

6.1	Ergebnisse der Sedimentationsversuche .....	62
6.1.1	Ergebnisse der Probe ÖBB1 .....	65
6.1.2	Ergebnisse der Probe ÖBB2 .....	67
6.1.3	Ergebnisse der Probe ÖBB4 .....	69
6.2	Ergebnisse der Filtrationsversuche .....	72
6.3	Ergebnisse der Rahmenscherversuche.....	79
6.4	Ergebnisse der Flockungsmittelversuche .....	85
6.4.1	Ergebnisse des anionischen polymeren Flockungsmittels.....	85
6.4.2	Ergebnisse des ionischen Flockungsmittels.....	90
6.5	Ergebnisse des Hydrozyklonversuches .....	91
6.6	Ergebnisse der möglichen Pumpen.....	95
	Literaturverzeichnis .....	97
	Anhang A, Protokolle .....	99
	Anhang B, Bindemitteldatenblatt.....	121
	Anhang C, Grundlagen zu den Sedimentationsversuchen <sup>[2]</sup> .....	123
	Anhang D, Filtrations-Scherversuchsprotokolle .....	125
	Anhang E, Informationen von folgenden Personen erhalten .....	139

# Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Bodenphysikalische Ergebnisse der zu beprobenden Bohrkerne .....	9
Tab. 3-2: Bodenphysikalisches Ergebnis <sup>[6]</sup> des Bohrkernes der sich in unmittelbarer Nähe des Bohrpfahles befunden hatte .....	12
Tab. 3-3: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB1 .....	14
Tab. 3-4: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB2 .....	18
Tab. 3-5: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB4 .....	23
Tab. 3-6: Tabellarische Darstellung der Siebanalyseergebnisse des Bindemittels .....	27
Tab. 3-7: Ergebnisse der beiden Messungen und Probenahmen des Ortswassernetzes St Kanzian am Klopeinersee .....	34
Tab. 3-8: Ergebnisse der amtlichen Wassergütemessung des Brunnens, aus dem das Ortswassernetzes St. Kanzian am Klopeinersee gespeist wird <sup>[12]</sup> .....	34
Tab. 4-1: Matrix der Variationen der Zusammensetzung für die Durchführung der Sedimentationsversuche .....	38
Tab. 6-1: pH Wertmessungsergebnisse des abgießbaren Klarwassers der Sedimentationsversuche sowie der Probenahmen des Anmachwassers .....	62
Tab. 6-2: Stöchiometrische Umrechnung zur Neutralisation von ungepufferter Natronlauge mit unterschiedlichen Säuren auf pH 8,5 (HCL 30%ig; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 96 %ig; HNO <sub>3</sub> 65 %ig). Tabelle zur Verfügung gestellt von Fa. Linde Gas GmbH .....	63
Tab. 6-3: Berechnungsbeispiel der nötigen Klärfläche .....	64
Tab. 6-4: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB1 .....	66
Tab. 6-5: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB2 .....	68
Tab. 6-6: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB4 .....	71
Tab. 6-7: Berechnung der nötigen Kammernanzahl einer Kammerfilterpresse .....	75
Tab. 6-8: Ergebnisse der Luftvolumenberechnung der einzelnen Filterkuchen .....	76
Tab. 6-9: Ergebnisse der Berechnung der Filterleistung sowie des spez. Durchflusswiderstandes .....	77
Tab. 6-10: Ergebnisse der Rahmenscherversuche mit Eigenschaftsangaben der Versuchskörper .....	79
Tab. 6-11: Mithilfe der Formel (15) und den Geradengleichungen der Abb. 6-12 bis Abb. 6-15 errechnete unkonsolidierte Scherparamter .....	82
Tab. 6-12: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB1 .....	87
Tab. 6-13: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB2 .....	88
Tab. 6-14: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB4 .....	89
Tab. 6-15: Auswertetabelle der gemessenen (gelb hinterlegt) und der gerechneten Werte des 1.Zyklonversuches .....	92
Tab. 6-16: Bilanztafel des 1.Zyklonversuches .....	93
Tab. 6-17: Auswertetabelle der gemessenen (gelb hinterlegt) und der gerechneten Werte des 2.Zyklonversuches .....	93
Tab. 6-18: Bilanztafel des 2.Zyklonversuches .....	94

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Probenahmestelle Bohrlochmund <sup>[11]</sup> .....	1
Abb. 3-1: Einsatz von Saug- und Druckentwässerungseinrichtungen in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung <sup>[2]</sup> .....	8
Abb. 3-2: Ausschnitte aus dem Längenschnitt Tunnel Untersammelsdorf <sup>[10]</sup> .....	9
Abb. 3-3: Legende zu den Längenschnitten des Tunnels Untersammelsdorf <sup>[10]</sup> und des Tunnels Srejach .....	10
Abb. 3-4: Ausschnitt aus dem Längenschnitt Tunnel Srejach <sup>[9]</sup> .....	10
Abb. 3-5: Bohrfahlaustragsmaterial. Im vorderen Bereich schluffiger im hinteren Bereich sandiger Boden .....	11
Abb. 3-6: Probenahmestelle des Sand dominierten Bodens, ÖBB1 .....	12
Abb. 3-7: Ende der Sedimentationsanalyse in der Andreasen-Pipette der Bodenprobe ÖBB1..	13
Abb. 3-8: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Bodenprobe ÖBB1 im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	15
Abb. 3-9: Bohrkernkiste der Probe ÖBB2 .....	16
Abb. 3-10: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB2 im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	19
Abb. 3-11: Bohrkernkiste der Probe ÖBB3 .....	20
Abb. 3-12: Bohrkernkiste der Probe ÖBB4 .....	21
Abb. 3-13: Ende der Sedimentationsanalyse in der Andreasen-Pipette der Bodenprobe ÖBB4	22
Abb. 3-14: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB4 im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	24
Abb. 3-15: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung aller untersuchten Proben im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	25
Abb. 3-16: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung des Bindemittels im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	27
Abb. 3-17: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Boden- sowie der Bindemittelprobe im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	28
Abb. 3-18: ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope )- Aufnahme von prismatisch nadelförmigen Ettringitkristallen <sup>[19]</sup> .....	29
Abb. 3-19: Schematische Darstellung der Hydratation eines Zementkorns <sup>[5]</sup> .....	30
Abb. 3-20: Schematische Darstellung der Hydratation des Zementes bei unterschiedlichem Wasser-Zement-Wert <sup>[4]</sup> .....	31
Abb. 3-21: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert <sup>[5]</sup> .....	32
Abb. 3-22: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement bei einer Prüfung der Erstarrungszeiten nach DIN EN 196 <sup>[4]</sup> .....	32
Abb. 3-23: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für einen Beton in einem Bauteil mit 0,6 m Dicke in Stahlschalung <sup>[21, Bild II.5.3-7]</sup> .....	33
Abb. 3-24: Bestimmung der Parameter vor Ort des Ortswassernetzes St. Kanzian am Klopeinersee.....	34
Abb. 4-1: Schematische Darstellung des Restwassergehalters in einem körnigen Haufwerk <sup>[1, Bild 261]</sup> .....	35
Abb. 4-2: Konstruktionszeichnung des Bodens und des Acrylglasstandzylinders .....	40
Abb. 4-3: Explosionsdarstellung der einzelnen Komponenten des Labordruckfiltrationsapparates .....	45
Abb. 4-4: Druckfiltrationszelle zusammengebaut.....	45
Abb. 4-5: Versuchsaufbau des Rahmenscherversuches .....	48
Abb. 4-6: Schematische Darstellung des Scherversuches <sup>[18]</sup> .....	48
Abb. 4-7: Mittels Magnetrührer und Wärmeplatte in Suspension gebrachtes Flockungsmittel „Sedipur AF 403“ der Fa. BASF .....	49
Abb. 4-8: Aufbau des Hydrozyklons im Labor .....	52
Abb. 4-9: Fließbild des in Kreislaufschaltung betriebenen Hydrozyklons .....	52
Abb. 6-1: Neutralisationskurven von Natronlauge mit Kohlendioxid und einer Mineralsäure. Diagramm zur Verfügung gestellt von Fa. Linde Gas GmbH .....	63
Abb. 6-2: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB1 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l).....	65

Abb. 6-3: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB1 und 50% Zement (RoInjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.....	65
Abb. 6-4: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breiig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des W'/Z-Wertes und des Feststoffgehaltes .....	67
Abb. 6-5: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB2 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l) 100 % .....	67
Abb. 6-6: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB2 und 50% Zement (RoInjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.....	67
Abb. 6-7: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breiig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des W'/Z-Wertes und des Feststoffgehaltes .....	69
Abb. 6-8: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB4 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l).....	69
Abb. 6-9: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB4 und 50% Zement (RoInjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.....	70
Abb. 6-10: Beschreibung siehe Abb. 6-8. Mit Messer schwer schneidbar.....	70
Abb. 6-11: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breiig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des W'/Z-Wertes und des Feststoffgehaltes .....	72
Abb. 6-12: Abgescherte Bodenprobe (ÖBB2) des 1.Versuches mit einem Wassergehalt von 21,3 % .....	72
Abb. 6-13: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 2.Versuches mit einer 100% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz.....	73
Abb. 6-14: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 8.Versuches mit einer 75% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz.....	73
Abb. 6-15: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 6.Versuches mit einer 50% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz.....	74
Abb. 6-16: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 13.Versuches mit einer 25% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz.....	74
Abb. 6-17: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 100% Boden und 0% Bindemittel.....	80
Abb. 6-18: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 75% Boden und 25% Bindemittel.....	80
Abb. 6-19: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 50% Boden und 50% Bindemittel.....	81
Abb. 6-20: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 25% Boden und 75% Bindemittel.....	81
Abb. 6-21: Darstellung der gemittelten Ergebnisse der Scherversuche mit ungestörten Filterkuchen und der zugehörigen Standardabweichung, sowie die Ergebnisse der mit gestörten Proben durchgeführten Versuche.....	84
Abb. 6-22: In der linken Bildhälfte sind die geflockten und belasteten Bodenproben ÖBB1 (sandig). Sedipurkonzentration 600 ppm. Rechte Bildhälfte zeigt das Filtrat.....	85
Abb. 6-23: In der linken Bildhälfte sind die geflockten Bodenprobe ÖBB2 (schluffig) unbelastet und auf der rechten Seite belastet mit einem zweiten kleineren Laborsieb der Maschenweite 1,25 mm. Es wurde die Sedipurkonzentration variiert. ....	86
Abb. 6-24: In der linken Bildhälfte sind die geflockten und belasteten Bodenproben ÖBB4 (schluffig). Sedipurkonzentration 600 ppm. Rechte Bildhälfte zeigt das Filtrat. ....	86
Abb. 6-25: Boden{90 g} (ÖBB2) - Wasser{167,5 g} - Flockungsmittel{50 g} - Suspension .....	90
Abb. 6-26: Flockung der < 25 µm Proben des Zyklonversuchs in der Andreasen-Pipette .....	91
Abb. 6-27: Korngrößenverteilung der Zyklonprobenahmen dargestellt im doppellogarithmischen GGS-Netz .....	94
Abb. 6-28: Feingutbezogene Teilungszahl der Zyklonprobenahmen.....	94

## Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole

ÖBB	ÖBB Infrastruktur AG
DSV	Düsenstrahlverfahren
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
W/Z-Wert	Wasser zu Zement (Massenbezogen) – Wert [1]
ÖBB1	SU, frische Probe entnommen in 2 Probenahmekübel ~ 40 kg
ÖBB2	TM, Bohrkernnummer 76 – B32 – 08, Probenmenge > 40 kg
ÖBB3	GU, Bohrkernnummer 76 – B16 – 09, Probenmenge > 30 kg
ÖBB4	TL, Bohrkernnummer 76 – B21 – 09, Probenmenge > 40 kg
SU	<u>S</u> and-Schluff-Gemisch geringerer Schluffanteil
TM	mittel plastischer <u>T</u> on
GU	<u>K</u> ies-Schluff-Gemisch geringerer Schluffanteil
TL	leicht plastischer <u>T</u> on
Fa.	Firma
m.ü.A.	Meter über Adria
n.b.	nicht bestimmt
GGG	Gates, Gaudin und Schuhmann
%	Prozent
∅	Durchmesser
°	Einheit von Winkel (Grad)
°C	Einheit von Temperatur (Grad Celsius)
mm	Einheit von Länge (Millimeter)
cm	Einheit von Länge (Zentimeter)
m	Einheit von Länge (Meter)
cm <sup>2</sup>	Einheit von Fläche (Quadratcentimeter)
cm <sup>3</sup>	Einheit von Volumen (Kubikcentimeter)
kg	Einheit von Gewicht (Kilogramm)
min	Einheit von Zeit (Minuten)
pH-Wert	logarithmierter Wert der H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> -Ionen in einer wässrigen Lösung
σ <sub>n</sub>	Normalspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
τ	Scherspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
c <sub>u</sub>	unkonsolidierte Kohäsion [N/mm <sup>2</sup> ]
φ <sub>u</sub>	Winkel der unkonsolidierten inneren Reibung [°]
U/min	Umdrehungen pro Minute
ppm	parts per million; Teile von einer Million

# 1 Aufgabenstellung

Die Entwässerbarkeit von zementgebundenem Rücklauf aus dem DSV im Tunnelbauvorhaben „MA20 – Tunnel Untersammelsdorf und MA17 Tunnel Srejach, Baulos 60.3 – St. Kanzian, Koralmbahn“ der ÖBB-Infrastruktur AG mittels verschiedener Entwässerungssysteme zu prüfen. Es sind Schwerkraftentwässerungs- (Eindicker) und Druckfiltrationsversuche mit anschließender Bestimmung der Scherparameter zur Ermittlung der Deponietauglichkeit durchzuführen. Besonderes Augenmerk ist auf die Wirkung des Zementes auf das Erstarrungsverhalten der Suspension bei unterschiedlichen Zement-Gehalten zu legen.

Aufbauend auf den Feststoff- und Trübeeigenschaften sind Entwässerungsmöglichkeiten und die Eigenschaften des entwässerten Produktes zu diskutieren.



Abb. 1-1: Probenahmestelle Bohrlochmund<sup>[11]</sup>

Das Rücklaufvolumen beim DSV beträgt in etwa das 3,8-fache der DSV-Körper. Das Volumen dieser DSV-Körper ist mit etwa  $100.000 \text{ m}^3$  geplant. Somit ergibt sich ein DSV-Rücklauf von  $380.000 \text{ m}^3$ .<sup>[14]</sup> Der Mittelwert der Feststoffmassenkonzentration wurde mit  $350 \text{ g/l}$  angenommen.<sup>[11]</sup>

## 2 A. Zusammenfassung

Alle eingesetzten Stoffe (Boden, Bindemittel und Wasser) in den durchgeführten Versuchen entsprechen denen des Versuchsfeldes Untersammelsdorf.

Die Trübezusammensetzung der Rücklaufsuspension bezüglich Feststoffgehalt und Zementanteil im Baustellenverlauf ist variabel. Aus diesem Grund wurden die Versuche in Form einer Matrix möglicher Zusammensetzungen durchgeführt.

Als Feststoffproben wurden aus den zugänglichen Proben solche ausgewählt, die die vorhandenen feinkörnigen glazialen Stillwassersedimente, die kiesig, sandig, tonig und schluffig sein können, vertreten. Etwa 2/3 der DSV-Körper werden in den Bodenarten tonig und schluffig hergestellt. Die DSV-Körper in der östlichen Hälfte im Tunnel Srejach werden in sandigen Seetonen hergestellt. Im mittleren Bereich des Tunnels Untersammelsdorf befinden sich Kieslinsen in dem Bereich der DSV-Körper.

Entwässerungstechnisch bedeutsam sind die tonig/schluffigen Proben mit  $100 \% < 200 \mu\text{m}$ ;  $k_{80} = 20 \mu\text{m}$ ;  $25 \% < 2 \mu\text{m}$ .

Die Klärversuche im 1 Liter Standzylinder zeigten, dass eine Entwässerung im Schwerkraftfeld, wie dies in einem Klärbecken der Fall ist, aufgrund der geringen Klärgeschwindigkeit nicht angewendet werden kann. Eine als thixotrop beschreibbare Eigenschaft wurde an Sedimentationskörpern beobachtet. Die Konsistenz bei einem Großteil der bei erster Betrachtung als fest charakterisierten Probekörper veränderte sich durch drei bis achtmaliges Kneten in der Hand zu einer flüssigen Konsistenz.

Es bildet sich eine Matrix aus Schichtsilikate und Bindemittelkörner die Wasser einspeichert, somit kann die Suspension nicht sedimentieren. Die scheinbare Festigkeit des Systems nach der Bildung der CSH-Phasen wird bei Erschütterung aufgehoben und das System wird wieder flüssig. Schwerkraftentwässerung beziehungsweise Verfestigung im Schlammteich sind entsprechend den Versuchsergebnissen nicht möglich.

Die Druckfiltrationsversuche zeigten, dass das Bindemittel mit einem Filterhilfsmittel gleichgesetzt werden kann. Bei Erhöhung des Verhältnisses von Bindemittel zu Boden wurde eine höhere Filtrationsleistung bei gleichzeitigem Anstieg des Restwassergehaltes berechnet. Eine erste Untersuchung zu einer Deponieeignung des Filterkuchens wurde durch Rahmenscherversuche und anschließender Berechnung der unkonsolidierten Scherparameter durchgeführt. Der unkonsolidierte innere Reibungswinkel der Filterkuchen wird größer mit

zunehmenden Bindemittelgehalt. Diese Erhöhung wird auf ein rein mechanisches und kein chemisches Verhalten des Bindemittels zurückgeführt. Es sind des Weiteren konsolidierte Rahmenscherversuche mit Filterkuchen notwendig. Mit diesen konsolidierten Scherparametern kann die Eignung des Materials zur Deponierung ermittelt werden.

Als Entwässerungsapparate kommen Kammerfilterpresse, Siebbandpresse und Dekanter in Frage. Bei der Druckfiltration im Labor ist es zu einer Reduktion des Wassergehaltes von 71,5 % (entspricht 350 g Feststoff auf einen Liter Trübe) auf 30,0 % gekommen. Auf das prognostizierte DSV-Rücklaufvolumen umgerechnet bedeutet dies eine Reduktion des Deponievolumens um 2/3.

In jedem Fall sind die Frage des Einsatzes geeigneter Flockungsmittel und die Frage der Neutralisation der Trübe oder des Filtratwassers zu klären.

Die Eignung eines Apparates muss durch Pilotversuche eines Herstellers abgesichert sein, der aus den Daten die geeignete Bemessung für die geforderten Betriebszeiten garantiert.

## **2 B. Schlussfolgerungen**

Eine Reduktion der Temperatur der Boden-Bindemittel-Suspension von 20°C auf 10°C kann eine Verzögerung der Reaktion um mehrere Stunden bedeuten. Zudem wird die Erhärtung des DSV-Elements unter Umständen verzögert. Deshalb wird eine Temperaturmessung empfohlen.

Die durchgeführten 65 Sedimentationsversuche in Acrylglasstandzylindern haben gezeigt, dass eine Entwässerung in Becken, wie es für gewöhnlich mit DSV-Rücklauf Suspensionen durchgeführt wird, in diesem Fall nicht angewendet werden kann. Es kam zu keiner nennenswerten Reduktion des Restwassergehaltes, und die Klärgeschwindigkeit war für eine Voreindickung im Schwerkraftfeld ohne Flockungsmittel ebenfalls zu gering.

Ein fester oder halbfester Sedimentationskörper wurde nur in Varianten der Zusammensetzung erreicht, die nicht häufig vor Ort auftreten werden. Es müsste hierzu mindestens 75 % Bindemittel in der Suspension vorliegen oder die Feststoffmassenkonzentration 750 g/l betragen, und die Zusammensetzung der Probe muss aus mindestens 50 % Bindemittel bestehen. Nachdem die eben angeführten Faktoren nicht als realistisch erachtet werden, muss davon ausgegangen werden, dass nach der Sedimentation die Sedimentationskörper flüssig sind oder wenn diese augenscheinlich fest vorliegen durch Einwirken von Scherkraft auf die Probe flüssig werden.

Die Filtrations- und Scherversuche haben ergeben, dass die Filtrationszeit bei Zugabe von Bindemittel sich von 3 Stunden bei einer 100 % Bodenprobe (ÖBB2, tonig) auf 10 Minuten durch Zugabe von 50 % Bindemittel verkürzte. Der minimale Restwassergehalt der 100 % Bodenprobe lag bei 20,7 % und bei dem Versuch mit 50 % Bindemittel lag dieser nur bei 28,1 %. Der Zement kann als Filterhilfsmittel gesehen werden. Das Bindemittel zeigt ähnliche Eigenschaften wie sie vom Einsatz mit Flockungsmittel bekannt sind, wie kürzere Entwässerungszeiten und erhöhter Restwassergehalt.

Weiters ist der unkonsolidierte innere Reibungswinkel der zuletzt angeführten gestörten Probe mit zirka 30° etwa viermal so groß wie die Ergebnisse der gestörten 100 % Bodenversuchskörper. Die Werte der unkonsolidierten Kohäsion waren genau umgekehrt, denn hier betragen die Werte der gestörten 50 % Bindemittelproben mit 0,004 N/mm<sup>2</sup> etwa ein Viertel der gestörten 100 % Bodenversuchskörper.

Anzumerken ist, dass die Ergebnisse der Rahmenscherversuche mit gestörten Filterkuchen von sofort verarbeiteten Versuchskörpern im Bereich jenes Versuchskörpers lagen, der 6 Tage gelagert wurde.

Der Versuch mit unterschiedlichen Flockungsmitteln hat gezeigt, dass das anionische Flockungsmittel Sedipur AF 403 der Fa. BASF, welches modifizierte Polyacrylamide beinhaltet, bei einer Konzentration von 600 ppm einen scherfesten Kuchen ergab. Weiters zeigte die im Labor simulierte Seihzone, dass es zu einer Wassergehaltsreduktion von 20 bis 30 % bei der Probe ÖBB1 (sandig) und 6 bis 15 % bei den Bodenproben ÖBB2,4 (tonig) in diesem ersten Bereich der Siebbandpresse kommt.

Der Versuch mit dem ionischen Flockungsmittel Donau PAC Venezia der Fa. Donau Chemie erbrachte in keiner Konzentration den gewünschten schersteifen Kuchen. Von einem Einsatz dieses Hilfsmittels wird aufgrund der Versuchsergebnisse abgeraten.

Die Versuche mit dem im Labor zur Verfügung stehenden Keramik-Hydrozyklon bei einem Trennschnitt von etwa 10 µm, haben gezeigt, dass die Trübe mit einer Feststoffmassenkonzentration von 415,1 g/l sowie von 165,0 g/l und einem Verhältnis von Boden (ÖBB4, tonig) zu Bindemittel von 0,75 zu 0,25 mit einer Kreiselpumpe problemlos gepumpt werden konnte. Die Analyse der Über- und Unterlauffractionen hatte gezeigt, dass mit diesem System nur eine Probenteilung erfolgte und keine leicht zu entwässernde Unterlauffraction mit einer geringeren Restfeuchte.

Von Systemen mit größerem Trennschnitt (63 µm) ist aus derzeitiger Sicht abzuraten, weil

- grobe Körner > 10 mm günstiger mit einem Sieb abgetrennt werden können
- 2/3 der Proben als tonig/schluffig anzusehen sind mit einem Anteil < 63 µm von 80 – 100 %
- gröbere Bestandteile 60 – 200 µm in geringem Ausmaß die Filtration verbessern

Zu wählende Filterapparate und Systeme:

- Schwerkraftentwässerung (Klärbecken) nicht sinnvoll einsetzbar
- Fliehkraftentwässerung (Zyklon), auf Basis der Kornzusammensetzung nicht von Vorteil
- Druckfiltration aufgrund der Korngrößenverteilung für 2/3 der vorhandenen Bodentypen. Kiese werden abgeseibt. Sande stellen auch für die Druckfiltration kein Problem dar. Es wird hierdurch die Filtrationszeit verkürzt.

Um die Pumpbarkeit für den DSV-Rücklauf zu bestimmen, muss ein Versuch vor Ort oder bei einem Pumpenhersteller durchgeführt werden, da es dafür keine Simulationsmöglichkeit im Labor gibt.

Es wird darauf hingewiesen, dass ein Pumpen des in Bewegung gehaltenen DSV-Rücklaufs mit jedem üblichen Trübeumpentyp möglich ist.

### **3 Probenbeschreibung**

Bei den zu bearbeitenden Proben handelte es sich um verschiedene Bodentypen aus den Bereichen des Tunnelbauvorhabens „MA20 – Tunnel Untersammelsdorf und MA17 Tunnel Srejach, Baulos 60.3 – St. Kanzian, Koralmbahn“. Das (Anmach-) Wasser, das für die Versuche verwendet wurde, stammte aus dem Ortswassernetz St. Kanzian am Klopeinersee. Die Bindemittelprobe wurde vom Werk der Fa. Rohrdorfer in Gmunden zur Verfügung gestellt.

In den folgenden Untersuchungen wurden die Parameter Boden, Bindemittel und Wasser in unterschiedlichen Massenverhältnissen zueinander variiert. Jeder der hier angeführten Parameter wurde als homogen innerhalb der Versuche angesehen. Darunter ist zu verstehen, dass die Zusammensetzung des Bindemittels Zement sich nicht verändert hatte. Weiters war während der Versuche sichergestellt, dass die Temperatur und die Eigenschaften des Anmachwassers gleich geblieben waren. Die Gesamtbodenprobe wurde durch Umschäufeln homogenisiert und mittels der Viertelungsmethode sind Einzelproben entnommen worden.

#### **3.1 Boden**

##### **3.1.1 Begründung der Auswahl der Proben für die Versuche**

###### ***3.1.1.1 Grundlagen zur Auswahl der Bodenproben***

Den größten Einfluss auf die Entwässerbarkeit haben die Korngrößen- und die Kornformverteilung. Weitere beteiligte Faktoren sind noch die Viskosität und die Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie das Druckgefälle und die Zeit. Besonders hohe Filterwiderstände ergeben sich bei plättchenförmigen Körnern, welche sich zumeist im rechten Winkel zur druckbeanspruchten Richtung orientieren. Dies ist zwar bei der Abdichtung von Deponien etc. mit Tonen (z.B. Bentonit) gewünscht, für die Filtration bedeutet es aber, dass ein höheres Druckgefälle notwendig ist, um das gleiche Entwässerungsergebnis (Restwassergehalt) zu erzielen.

Die Korngrößenverteilung und zum Teil auch die Kornformverteilung sind ausschlaggebend für die Porengrößen- und die Porenformverteilung. Je feiner die Partikel sind, desto kleiner werden die Porenzwischenräume. Somit kommt es zu einer Erhöhung des Durchflusswiderstandes. Es ist hier vor allem der Feinstkornanteil ( $< 1 \mu\text{m}$ ) zu beachten. Schwankungen in dieser Fraktion

können große Auswirkungen auf die Durchlässigkeit und damit wieder auf den Restwassergehalt haben.<sup>[2]</sup>

Um entsprechend ein geeignetes Entwässerungssystem auswählen zu können, müssen zuerst Trübe sowie Feststoffeigenschaften ermittelt werden.

Varianzen in der Korngrößenverteilung können den Betrieb eines Filterapparates stark einschränken bzw. verhindern wie in Abb.3-1 dargestellt.

Die Auswahl der Proben erfolgte anhand Extrema der Korngrößenverteilung. Als solche wurden aus entwässerungstechnischer Hinsicht die Proben ÖBB1, 2, 3 und 4 identifiziert.

Die Korngrößenverteilung der Bodenprobe ÖBB1, welche repräsentativ für den sandigen Seeton ist, der in der östlichen Hälfte des DSV-Bereiches des Tunnels Srejach dominierend ist, wird mit der roten Linie dargestellt. Die Korngrößenverteilung der Bodenprobe ÖBB3, ist eine Probe der Kieslinsen die im mittleren Bereich des Tunnels Untersammelsdorf prognostiziert sind. Dieser Bodentyp bildet den geringsten Anteil am DSV-Rücklauf und wird mit der grünen Linie dargestellt. Die Korngrößenverteilungen der schluffig/sandigen Stillwassersedimentproben mit den Bezeichnungen ÖBB2 und ÖBB4 werden mit der blauen Linie dargestellt. Diese sind mengenmäßig in 2/3 des DSV-Bereiches prognostiziert worden.

Die Probe ÖBB3 wird bedingt durch den vorgegebenen Ringraumquerschnitt des DSV-Bohrgestänges nicht mit der anhand des Bohrkernes ermittelten Korngrößenverteilung im DSV-Rücklauf vorliegen. Die Bodenprobe ist im kiesigen Bereich, wie die grüne Linie in Abb. 3-1 schematisch zeigt, somit ist dieser Boden wenig kritisch für die Entwässerung, denn größere Partikel sedimentieren schneller und verkürzen die Filtrationszeit, wenn eine Absiebung zum Schutz vor weiteren Aggregaten eingesetzt wird.

Somit sind die schluffig/sandigen Stillwassersedimentproben ÖBB2,4 maßgeblich für die Auslegung und Konzipierung eines Entwässerungssystems.

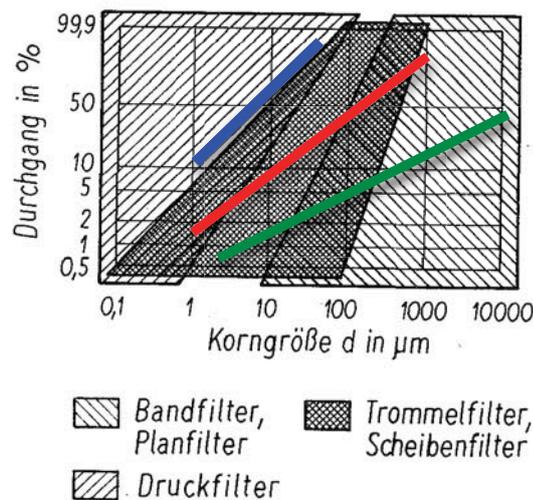


Abb. 3-1: Einsatz von Saug- und Druckentwässerungseinrichtungen in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung<sup>[2]</sup>

### 3.1.1.2 Ausgewählte Bohrkern

Anhand der Längenschnitte<sup>[9,10]</sup> sowie der Untergundaufschlüsse<sup>[8]</sup> im unmittelbaren DSV-Bereich wurde die Auswahl der Proben auf der Basis geologischer Einteilungen<sup>[6]</sup> getroffen. Zu jeder Bodenart (Kies, Sand, schluffiges/sandiges Stillwassersediment) bestehen erste Kornverteilungen der Bohrkernproben<sup>[7]</sup>. Aus jeder Bodenart wurde eine Probe ausgewählt.

Die Auswahl wurde von Dr. Andreas Böhm (Montanuniversität Leoben), DI. Tobias Schachinger (ÖBB), Andreas Moser BSc und DI. Hans-Jörg Sandter (zuständiger und mit der örtlichen Geologie vertrauter Geologe) getroffen.

Die meisten Beprobungsergebnisse der Bohrkern liegen im Bereich der Bodenart schluffiges/sandiges Stillwassersediment. Es wurde hier noch weiter unterschieden zwischen leicht, mittel und ausgeprägt plastisch. Mit Ausnahme von zwei lagen alle Proben im Bereich der beiden erstgenannten Einteilungskriterien. Aus zwei unterschiedlichen Bereichen wurde jeweils eine Probe (ÖBB2 und ÖBB4) genommen. Um Versuche auch mit der maximal zu erwartenden Korngröße durchführen zu können, wurde ÖBB3 gewählt. Als Probenmaterial für Laborversuche, welches den sandigen Korngrößenbereich abdeckt, wurde die Bodenprobe ÖBB1 genommen.

Ein Vergleich der mineralogischen Untersuchungsergebnisse aus dem Bericht von Dr. Böhm<sup>[11]</sup> mit den an der Montanuniversität durchgeführten Untersuchungen zeigt, dass kein Unterschied in der Mineralogie zwischen den Tunnels Srejach und Untersammelsdorf vorliegt.

Um das Spektrum der Entwässerungseigenschaften zu beschreiben, wurden folgende Proben für Beispiele der Extremtypen gewählt:

Tab. 3-1: Bodenphysikalische Ergebnisse der zu beprobenden Bohrkern

Interne Probennr.	Bodenart	Kernbohrung Nummer	Tiefe der Laborprobe	Probenahme geplant	Probengröße	63 mm	63 mm	2,00 mm	0,063 mm	0,002 mm
			[m]			[kg]	> [%]	< > [%]	< > [%]	< > [%]
ÖBB 1	SU	76-B15A-09	19,0-19,6	16,9-22,5	> 40	0	0	75	25	5
			20,0-20,5			0	0	72	28	6
ÖBB 2	TM	76-B32-08	13,4-13,8	11,9-21,5	> 40	0	0	1	99	24
ÖBB 3	GU	76-B16-09	22,0-22,8	22,0-25,3	> 30	9	54	25	12	2
ÖBB 4	TL	76-B21-09	5,6-6,0	4,0-9,9	> 40	0	0	3	97	20
			9,0-9,4			0	0	1	99	25

Bestand TL      Versuchsfeld      Untersammelsdorf      -      -      -      -      -      -

In Abb.3-2 ist die geplante Probennahmestelle der Bodenprobe ÖBB1 eingezeichnet. Die Probenahme erfolgte aus dem Bohrfahlaustrag MA15, der dem Boden des DSV-Bereiches Srejach OST entspricht. Die Angabe der Stationierung in Abb. 3-2 und Abb. 3-4 der Bohrkern wurde dem jeweiligen Längenschnitt entnommen.

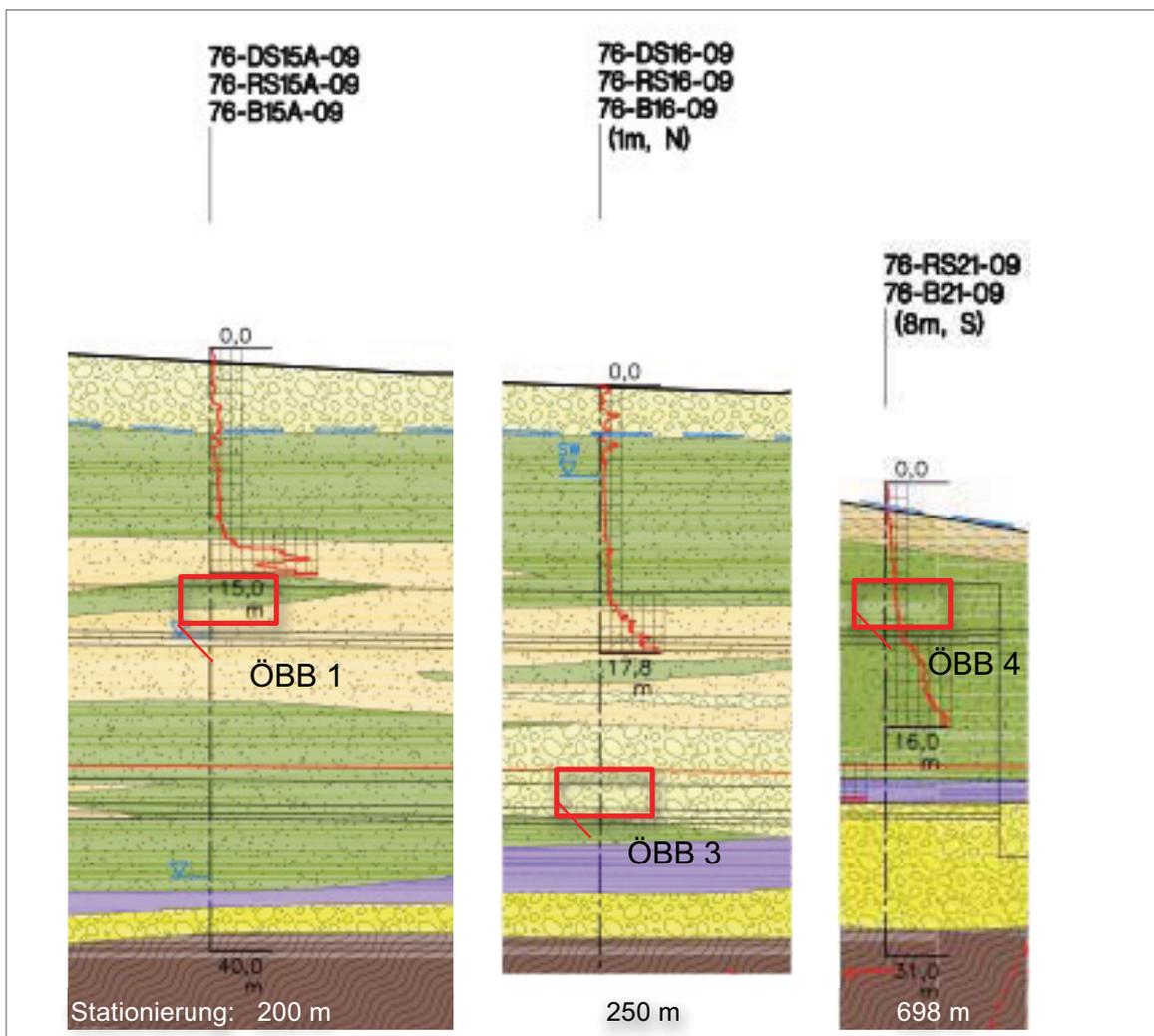


Abb. 3-2: Ausschnitte aus dem Längenschnitt Tunnel Untersammelsdorf<sup>f10</sup>

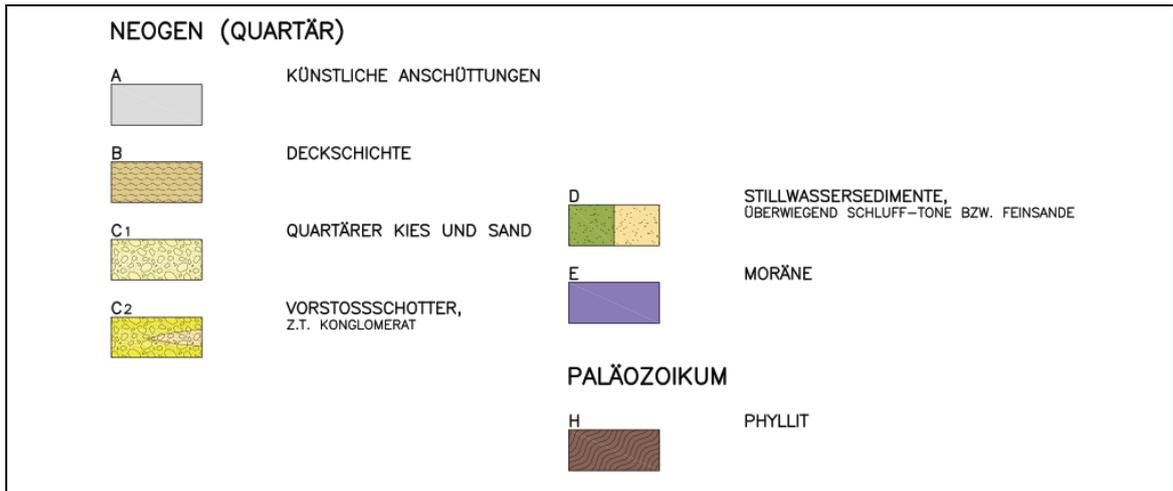


Abb. 3-3: Legende zu den Längenschnitten des Tunnels Untersammelsdorf<sup>[10]</sup> und des Tunnels Srejach

Das rote Rechteck in Abb. 3-2 und Abb. 3-4 stellt den Bereich der Probenahme dar.

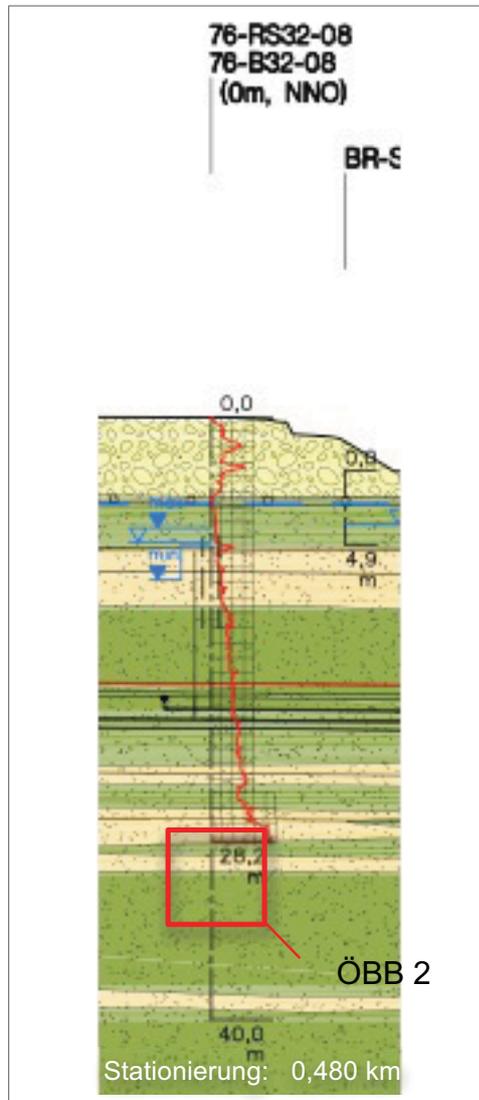


Abb. 3-4: Ausschnitt aus dem Längenschnitt Tunnel Srejach<sup>[9]</sup>

Als *Daten Labor/fremd* sind in der Tab. 3-3,4,5 und Abb. 3-8,10,14 die Korngrößenverteilung der Laborergebnisse<sup>[6]</sup> der *Fa. BGG Consult Dr. Peter Waibel ZT-GmbH* mit Sitz in Wolfsberg angeführt.

### **3.1.2 ÖBB1**

Die Probenahme erfolgte aus dem Aushub des Bohrfahls mittels Schaufel. Die genaue Bezeichnung der Probenahmestelle, welche sich in der Nähe des Ortes Peratschitzen befunden hat, lautet:

*Baulos 60.2 Kühnsdorf; Einreichabschnitt: Mittlern - Althofen; Eisenbahnbrücke MA 15; Pfeiler 5; Pfahl 5.8A*

Der Bohransatzpunkt hat sich 421,60 m.ü.A. befunden.



Abb. 3-5: Bohrfahlaustragsmaterial. Im vorderen Bereich schluffiger im hinteren Bereich sandiger Boden

Es wurden zwei Proben aus einer Tiefe von -20 m bis -30 m (391,60 m.ü.A. bis 401,60 m.ü.A.) mit einer Gesamtmasse von 42,3 kg genommen. Dieser Boden wird vom Geologen als *Feinsand, örtlich fein bis mittelsandig, schluffig* bezeichnet. Diese Probe entspricht dem Boden des DSV-Bereiches Srejach OST.

Der Bohrkern 76-B22-08 liegt wie im Längenschnitt<sup>[13]</sup> ersichtlich im Bereich des Pfeilers 5. Die Bodenanalyse des Bohrkernes aus der Tiefe zwischen 23,60 m und 24,00 m (396,32 m.ü.A. bis 396,72 m.ü.A.) entspricht dem der mittels Schaufel aus dem Bohrfahlaustrag genommenen Probe. Werte aus der vorhandenen Analyse im Labor siehe Tabelle 3-2.

Tab. 3-2: Bodenphysikalisches Ergebnis<sup>[6]</sup> des Bohrkernes der sich in unmittelbarer Nähe des Bohrfahles befunden hatte

Bodenart	$w_n$	< 63 mm	< 63 mm > 2,00 mm	< 2,00 mm > 0,063 mm	< 0,063 mm	< 0,002 mm
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
SU	14,6	0	0	76	24	5



Abb. 3-6: Probenahmestelle des Sand dominierten Bodens, ÖBB1

Die Gesamtprobe wurde auf einen sauberen Untergrund im Labor aufgeschüttet und umgeschaufelt. Mittels Viertelungsmethode (Viertelungsbleche) wurde eine Teilprobe mit in etwa 700 Gramm geteilt. Diese diente zur Bestimmung des Wassergehaltes und der Feststoffkennwerte Korngrößenverteilung, Feststoffdichte der gesamten Probe sowie der einzelnen Korngrößenklassen und lose wie auch gerüttelte Schüttdichte.

Es erfolgte eine Nassabsiebung der Probe bei den Maschenweiten 2000, 1000, 500, 200 und 100  $\mu\text{m}$ . Mit dem Rhewurm Laborsieb erfolgte die Nassabsiebung bei der Maschenweite 40 und 25  $\mu\text{m}$ . Der Abzug des Klarwassers der Trübe der Fraktion kleiner 25  $\mu\text{m}$  erfolgte nach Sedimentation, in etwa 12 Stunden nach der Nasssiebung. Nach der Homogenisierung der entwässerten Trübe wurde mittels Pipette eine Teilprobe entnommen und der Feststoffgehalt ermittelt. Durch diesen und den der Trübemasse konnte die Masse der Kornklasse kleiner 25  $\mu\text{m}$  berechnet werden. Die Korngrößenverteilung der in Trübe vorliegenden kleiner 25  $\mu\text{m}$  Fraktion wurde durch Sedimentationsanalyse, durchgeführt in der Andreasen-Pipette, bestimmt.



Abb. 3-7: Ende der Sedimentationsanalyse in der Andreasen-Pipette der Bodenprobe ÖBB1  
Es werden hierbei die Änderungen der Feststoffmassenkonzentration (Masse Feststoff pro Volumen), einer Suspension in einer Messebene, erfasst.  
Die Auswertung dieses Versuches ergab auch Werte größer  $25\ \mu\text{m}$ . Es zeigt sich, dass bei Einfügen der Werte des Andreasen-Versuches ab der Korngröße kleiner  $25\ \mu\text{m}$ , und bei dem grafischen Angleichen der Kurve, es zu einem stetigen Kurvenverlauf ohne Sprung kommt.  
In Abb. 3-8 wurde der Siebdurchgang über die Maschenweite in einem doppellogarithmischen Diagramm (GGs-Netz) eingetragen.  
Der Rest der homogenisierten Probe wurde in Kübeln mit dicht schließenden Deckeln zwischengelagert. Mit den bestimmten Werten der Sammelprobe wurden die Versuche ausgelegt. Aufgrund der Homogenisierung und Lagerung hatte jede Teilprobenahme für die weiteren Versuche die gleiche Zusammensetzung (Korngröße etc.) wie die analysierte Teilprobe.

Tab. 3-3: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB1

Ausgangsmassen: 42,228 kg		Probenteilung mittels Viertelungsmethode					
Wassergehalt w = 15,7 %							
Volumen für Dichtebestimmung: micromeritics, AccuPyc 1330; Heliumpyknometer							
Daten Labor/fremd							
MW µm	Klasse %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Durchg. %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	MW µm	Klasse %	DG %
2000	1,75	2,77	98	2,77	2000	0	100
1000	3,74	2,72	98	n.b.	-	-	-
500	1,71	2,72	96	2,72	-	-	-
200	14,88	2,73	81	2,73	-	-	-
100	59,45	2,75	52	2,74	-	-	-
40	5,64	2,77	22	2,77	63	76	24
25	16,29	n.b.	16	2,77	2	19	5
0	100,00	-	0	n.b.	0	5	0
Summe	100,00	-	-	-		100	

Schüttdichte bestimmt mit ERWEKA, Stampfvolumeter, 5 min		lose und gerüttelt	
Bezeichnung	Einheit	Vers. 1	Vers. 2 Mittelw.
Dichte lose	g/cm <sup>3</sup>	1,25	1,34
Dichte gerüttelt	g/cm <sup>3</sup>	1,65	1,71

< 25 µm Andreasen-Pipette			
MW µm	Klasse %	DG 1 %	DG 2 %
37,6	3,1	97,9	15,9
18,7	13,4	84,5	13,8
9,4	24,3	60,2	9,8
4,7	17,3	43,0	7,0
2,8	9,4	33,6	5,5
1,9	6,1	27,5	4,5
1,0	6,9	20,6	3,4
0,7	6,5	14,2	2,3
0	14,2	0,0	0,0

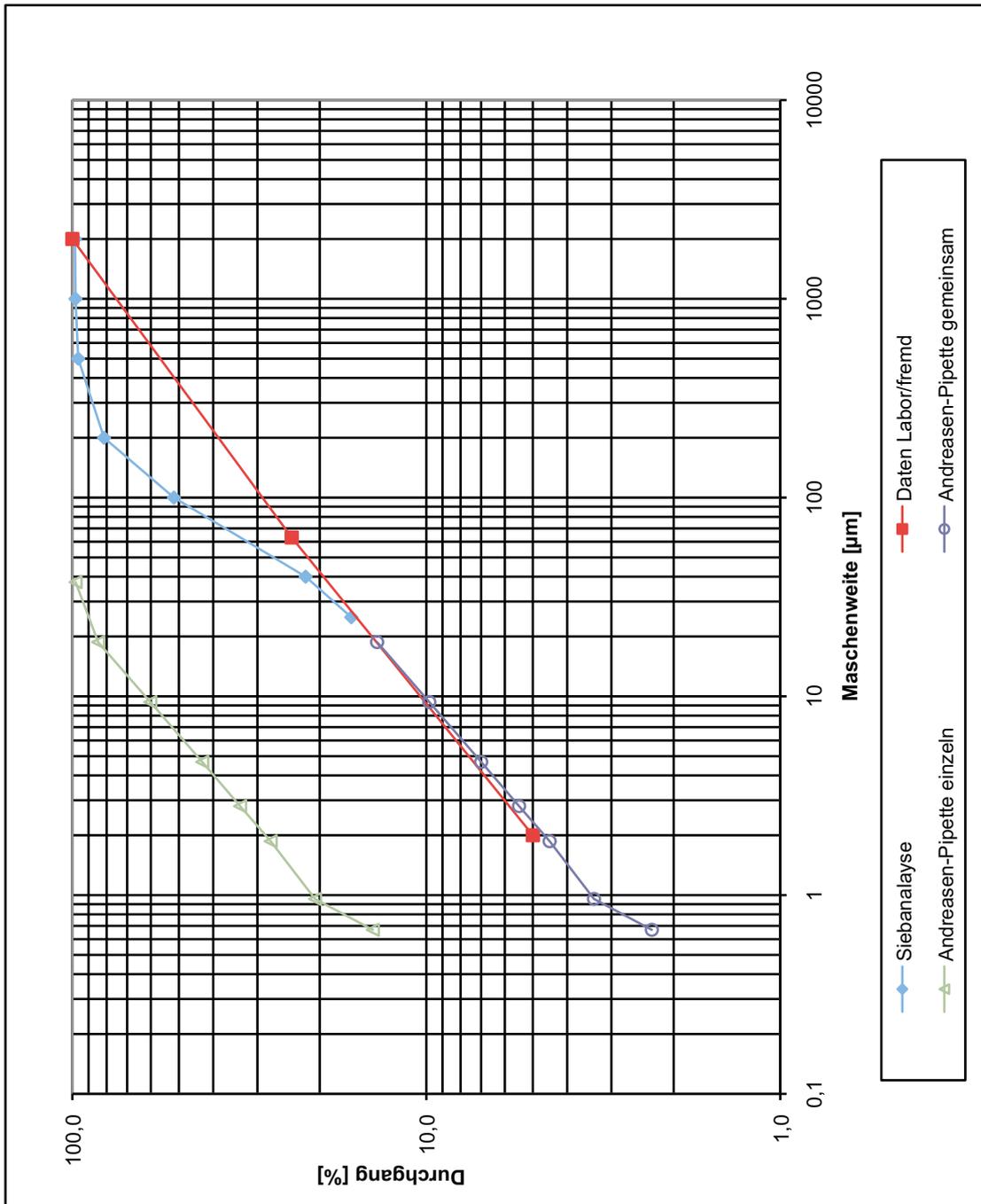


Abb. 3-8: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Bodenprobe ÖBB1 im doppellogarithmischen GGS-Netz

### **3.1.3 ÖBB2**

Beschreibung der Bohrkernkiste:  
Bohrmeter 12,0 bis 14,0 m  
Mittlern - SREJACH  
Bohrkernnummer: 76 - B32 - 08  
Probenmenge: > 40 kg



Abb. 3-9: Bohrkernkiste der Probe ÖBB2

Die Proben für die Versuche im Labor sind aus Bohrkernen entnommen worden. Diese wurden etwa drei Jahre in Bohrkernkisten in einer Folie eingeschlagen gelagert wie in Abb. 3-9 erkennbar. Aufgrund der Lagerzeit waren die Bohrkernkerne zum Teil ausgetrocknet. Es erfolgte eine Probeentnahme eines Teiles des Bohrkernes (17 kg). Diese wurde mit einem Meißel und einem Hammer soweit desagglomeriert, dass 100% < 12,5 mm war.

Mit dem Riffelteiler wurde im Anschluss die Probe so oft geteilt, bis eine Teilprobe von 700 Gramm für eine Analyse im Labor zur Verfügung stand. An dieser wurden der Wassergehalt und die Feststoffkennwerte Korngrößenverteilung, Feststoffdichte der gesamten Probe, sowie der einzelnen Korngrößenklassen und lose wie auch gerüttelte Schüttdichte bestimmt. Die Beschreibung der Überprüfung bezüglich dem Desagglomerieren im Eirich-Intensivmischer befindet sich in der Versuchsbeschreibung.

Es erfolgte eine Nassabsiebung der Probe bei den Maschenweiten 2000, 1000, 500, 200 und 100 µm. Mit dem Rhewurm Laborsieb erfolgte die Nassabsiebung bei der Maschenweite 40 und 25 µm. Der Abzug des Klarwassers der Trübe der Fraktion kleiner 25 µm erfolgte nach Sedimentation, in etwa 12 Stunden nach der Nasssiebung. Nach der Homogenisierung der entwässerten Trübe wurde mittels Pipette eine Teilprobe entnommen und der Feststoffgehalt ermittelt. Durch diesen und den der Trübemasse konnte die Masse der Kornklasse kleiner 25 µm berechnet werden. Die Korngrößenverteilung der in Trübe vorliegenden kleiner 25 µm Fraktion wurde durch Sedimentationsanalyse, durchgeführt in der Andreasen-Pipette, bestimmt.

Es werden hierbei die Änderungen der Feststoffmassenkonzentration (Masse Feststoff pro Volumen), einer Suspension in einer Messebene, erfasst.

Bei dem grafischen Angleichen der Kurve kommt es zu einem stetigen Kurvenverlauf ohne Sprung.

In Abb. 3-10 wurde der Siebdurchgang über die Maschenweite in einem doppellogarithmischen Diagramm (GGS-Netz) eingetragen.

Der Rest der homogenisierten Probe wurde in Kübeln mit dicht schließenden Deckeln zwischengelagert. Mit den bestimmten Werten der Sammelprobe wurden die Versuche ausgelegt. Aufgrund der Homogenisierung und Lagerung hatte jede Teilprobenahme für die weiteren Versuche die gleiche Zusammensetzung (Korngröße etc.) wie die analysierte Teilprobe.

Tab. 3-4: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB2

Probe genommen aus folgenden Bohrmeter der Kernkiste: 12,9-13,0 m; 13,0-13,4 m; 13,8-14,0 m  
 Probenahme Geologe (Labor/fremd): 13,4-13,8 m  
 Probenteilung mittels Riffelteiler

Ausgangsmenge: 16,970 kg  
 Wassergehalt w = 7,5 %

Volumen für Dichtebestimmung: micromeritics, AccuPyc 1330; Heliumpyknometer

MW		Klasse		DG	Dichte		Daten Labor/fremd		MW		Klasse		DG
$\mu\text{m}$		%	%	%	$\text{g}/\text{cm}^3$	$\text{g}/\text{cm}^3$	$\mu\text{m}$	%	$\mu\text{m}$	%	%	%	
12500		0,00		100	n.b.								
2000		0,00		100	n.b.		2000	0				100	
1000		0,01		100	n.b.		-	-				-	
500		0,01		100	n.b.		-	-				-	
200		0,10		100	n.b.		-	-				-	
100		0,99		99	2,74		-	-				-	
40		9,70		89	2,74		63	1				99	
25		7,05		82	2,76		2	75				24	
0		82,15		0	n.b.		0	24				0	
Summe		100,00		-	-			100				0	

< 25 $\mu\text{m}$ Andreason-Pipette			
MW	Klasse	DG 1	DG 2
$\mu\text{m}$	%	%	%
18,8	9,8	93,1	76,5
9,3	17,1	76,0	62,5
4,7	18,9	57,2	47,0
2,8	14,3	42,8	35,2
1,9	3,1	39,8	32,7
0,9	11,3	28,5	23,4
0,5	6,5	22,0	18,1
0	22,0	0,0	0,0

Schüttdichte bestimmt mit ERWEKA, Stampfvolumeter, 5 min lose und gerüttelt

Bezeichnung	Einheit	Vers. 1	Vers. 2	Mittelw.
Dichte lose	$\text{g}/\text{cm}^3$	0,82	0,85	0,84
Dichte gerüttelt	$\text{g}/\text{cm}^3$	1,21	1,23	1,22

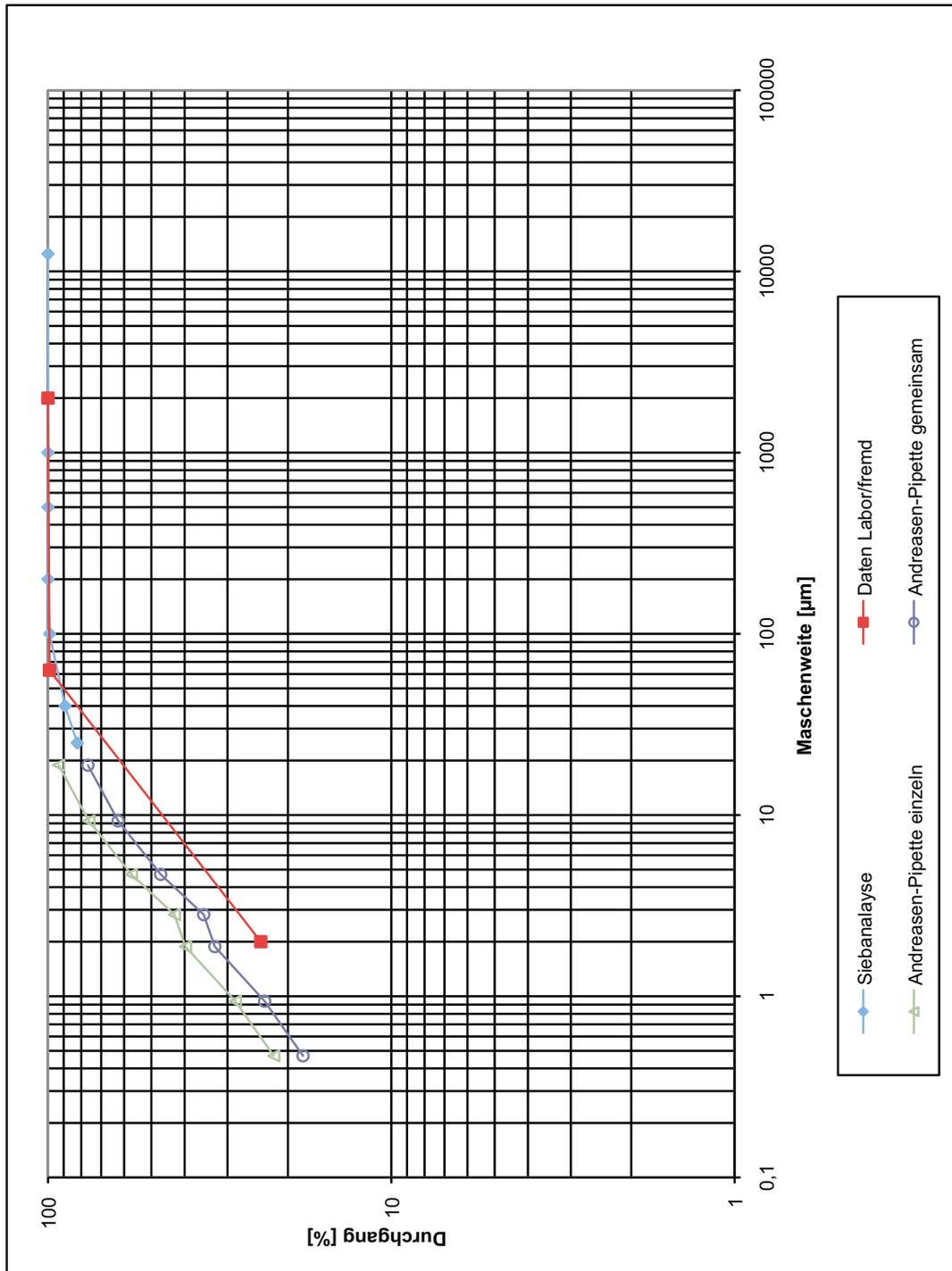


Abb. 3-10: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB2 im doppellogarithmischen GGS-Netz

### **3.1.4 ÖBB3**

Hierbei handelte es sich um die kiesige Probe. Die Entwässerung dieses Bodentyps ist unproblematisch denn, je größer Partikel sind, desto schneller sedimentieren diese, beziehungsweise desto kürzer sind die Filtrationszeiten. Es wurde hier weder die Dichte noch der Wassergehalt oder die Korngrößenverteilung im Labor in Leoben bestimmt. Die Werte aus der Ausschreibung BL60.3, Ersteller Fa. BGG Consult, siehe Tab. 3-1.

In der Praxis wird die Korngrößenverteilung des DSV-Rücklaufes durch den Ringraum nach oben begrenzt. Die Entwässerung des sandig/kiesigen Bereiches ist unproblematisch im Vergleich zu den schluffigen/sandigen Stillwassersedimenten (ÖBB2,4). Die kiesige Bodenart hat ein untergeordnetes Auftreten im Tunnel Untersammeldorf in Kieslinsen von Stationierung 240 m bis 305 m. Würde eine Absiebung der Bodenprobe im Labor vorgenommen werden, etwa in dem Bereich des Ringraumes der DSV-Bohrgestänges, würde sich die Korngrößenverteilung in Richtung der Probe ÖBB1 verschieben. Wichtig ist die Information, dass sich kiesige Linsen im Bereich der DSV-Körper befinden und somit eine Absiebung der gröberen Partikeln zum Schutz der nachgeschalteten Entwässerungsaggregate vorgesehen werden muss. Somit lag das Hauptaugenmerk der Untersuchungen auf der Entwässerung der feinkörnigen Fraktionen (ÖBB2,4) und des sandigen Bodens (ÖBB1). Es wurden keine Untersuchungen mit der Probe ÖBB3 durchgeführt. Eine Bohrkernkiste ist als Rückstellprobe im Probenlager in Leoben eingelagert worden und eine weitere Bohrkernkiste ist noch im Bohrkernlager der Fa. Velox eingelagert.

Beschreibung der Bohrkernkiste die Leoben eingelagert worden ist:

Bohrmeter 22,0 bis 24,0 m

Abschnitt Mittlern Althofen

Bohrkernnummer: 76 - B16 - 09

Probenmenge: > 30 kg

(Bohrmeter 24,0 bis 26,0 m lagert noch im Bohrkernlager der Firma Velox, da es sich hier um grobkörniges Material handelt und die Probenmenge von einer Bohrkernkiste nicht als repräsentative Probe ausreicht)



Abb. 3-11: Bohrkernkiste der Probe ÖBB3

### 3.1.5 ÖBB4

Beschreibung der Bohrkernkiste:

Bohrmeter 8,0 bis 10,0 m

Mittlern - Althofen

Bohrkernnummer: 76 - B21 - 09

Probenmenge: > 40 kg



Abb. 3-12: Bohrkernkiste der Probe ÖBB4

Die Proben für die Versuche im Labor sind aus Bohrkernen entnommen worden. Diese lagerten etwa drei Jahre in Bohrkernkisten in einer Folie eingeschlagen wie in Abb. 3-12 erkennbar. Aufgrund der bedingten Lagerzeit, waren die Bohrkernkerne zum Teil ausgetrocknet. Es erfolgte eine Probeentnahme eines Teiles des Bohrkernes (17 kg). Diese wurden mit einem Meißel und einem Hammer soweit desagglomeriert, dass  $100\% < 12,5\text{ mm}$  war.

Mit dem Riffelteiler wurde im Anschluss die Probe so oft geteilt, bis eine Teilprobe von 700 Gramm für eine Analyse im Labor zur Verfügung stand. An dieser wurden der Wassergehalt und die Feststoffkennwerte Korngrößenverteilung, Feststoffdichte der gesamten Probe sowie der einzelnen Korngrößenklassen und lose wie auch gerüttelten Schüttdichte bestimmt. Die Beschreibung der Überprüfung bezüglich dem Desagglomerieren im Eirich-Intensivmischer befindet sich in der Versuchsbeschreibung.

Es erfolgte eine Nassabsiebung der Probe bei den Maschenweiten 2000, 1000, 500, 200 und 100  $\mu\text{m}$ . Mit dem Rhewurm Laborsieb erfolgte die Nassabsiebung bei der Maschenweite 40 und 25  $\mu\text{m}$ . Der Abzug des Klarwassers der Trübe der Fraktion kleiner 25  $\mu\text{m}$  erfolgte nach Sedimentation, in etwa 12 Stunden nach der Nasssiebung. Nach der Homogenisierung der entwässerten Trübe wurde mittels Pipette eine Teilprobe entnommen und der Feststoffgehalt ermittelt. Durch diesen und den der Trübemasse konnte die Masse der Kornklasse kleiner 25  $\mu\text{m}$  berechnet werden. Die Korngrößenverteilung der in Trübe

vorliegenden kleiner 25  $\mu\text{m}$  Fraktion wurde durch Sedimentationsanalyse, durchgeführt in der Andreasen-Pipette, bestimmt.



Abb. 3-13: Ende der Sedimentationsanalyse in der Andreasen-Pipette der Bodenprobe ÖBB4  
Es werden hierbei die Änderungen der Feststoffmassenkonzentration (Masse Feststoff pro Volumen), einer Suspension in einer Messebene, erfasst.  
Bei grafischen Angleichen der Kurve kommt es zu einem stetigen Kurvenverlauf ohne Sprung.

In Abb. 3-14 wurde der Siebdurchgang über die Maschenweite in einem doppellogarithmischen Diagramm (GGs-Netz) eingetragen.

Der Rest der homogenisierten Probe wurde in Kübel mit dicht schließendem Deckel zwischengelagert. Mit den bestimmten Werten der Sammelprobe wurden die Versuche ausgelegt. Aufgrund der Homogenisierung und Lagerung hatte jede Teilprobenahme für die weiteren Versuche die gleiche Zusammensetzung (Korngröße etc.) wie die analysierte Teilprobe.

Tab. 3-5: Tabellarische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB4

<p>Probe genommen aus folgenden Bohrmeter der Kernkiste: 8,46-9,00 m                  Probenahme Geologe (Labor/fremd): 9,0-9,4 m                  Ausgangsprobenmenge: 16,970 kg      Probenentzug mittels Riffelteiler                  Wassergehalt w = 12,2 %</p>	<p style="text-align: center;">&gt; 12,5 mm (bezogen auf Gesamtprobe!)                  m<sub>t</sub> = 212,40 g</p>																																																																																																																							
<p>Volumen für Dichtebestimmung: micromeritics, AccuPyc 1330; Heliumpyknometer</p>																																																																																																																								
<p>Daten Labor/fremd</p>																																																																																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Maschenweite µm</th> <th>Klasse %</th> <th>DG %</th> <th>Dichte g/cm<sup>3</sup></th> <th>MW µm</th> <th>Klasse %</th> <th>DG %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>12500</td><td>1,48</td><td>99</td><td>n.b.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2000</td><td>0,01</td><td>99</td><td>n.b.</td><td>2000</td><td>0</td><td>100</td></tr> <tr><td>1000</td><td>0,30</td><td>98</td><td>2,78</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>500</td><td>0,63</td><td>98</td><td>2,74</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>200</td><td>1,10</td><td>96</td><td>2,72</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>100</td><td>0,97</td><td>96</td><td>2,74</td><td>63</td><td>1</td><td>99</td></tr> <tr><td>40</td><td>5,09</td><td>90</td><td>2,76</td><td>2</td><td>74</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>4,50</td><td>86</td><td>2,78</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>85,91</td><td>0</td><td>n.b.</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td></tr> <tr><td>Summe</td><td>100,00</td><td>-</td><td>-</td><td></td><td>100</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Maschenweite µm	Klasse %	DG %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	MW µm	Klasse %	DG %	12500	1,48	99	n.b.				2000	0,01	99	n.b.	2000	0	100	1000	0,30	98	2,78	-	-	-	500	0,63	98	2,74	-	-	-	200	1,10	96	2,72	-	-	-	100	0,97	96	2,74	63	1	99	40	5,09	90	2,76	2	74	25	25	4,50	86	2,78				0	85,91	0	n.b.	0	25	0	Summe	100,00	-	-		100		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">&lt; 25 µm Andreasen-Pipette</th> </tr> <tr> <th>MW</th> <th>Klasse</th> </tr> <tr> <th>µm</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>18,8</td><td>9,2</td></tr> <tr><td>9,4</td><td>17,3</td></tr> <tr><td>4,7</td><td>18,1</td></tr> <tr><td>2,8</td><td>10,5</td></tr> <tr><td>1,9</td><td>7,4</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>9,6</td></tr> <tr><td>0,7</td><td>6,1</td></tr> <tr><td>0</td><td>21,8</td></tr> <tr><td></td><td>0,0</td></tr> <tr><td></td><td>0,0</td></tr> </tbody> </table>	< 25 µm Andreasen-Pipette		MW	Klasse	µm	%	18,8	9,2	9,4	17,3	4,7	18,1	2,8	10,5	1,9	7,4	1,0	9,6	0,7	6,1	0	21,8		0,0		0,0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Einheit</th> <th>Vers. 1</th> <th>Vers. 2</th> <th>Mittelw.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dichte lose</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>0,95</td> <td>1,02</td> <td>0,98</td> </tr> <tr> <td>Dichte gerüttelt</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>1,35</td> <td>1,36</td> <td>1,35</td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	Einheit	Vers. 1	Vers. 2	Mittelw.	Dichte lose	g/cm <sup>3</sup>	0,95	1,02	0,98	Dichte gerüttelt	g/cm <sup>3</sup>	1,35	1,36	1,35
Maschenweite µm	Klasse %	DG %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	MW µm	Klasse %	DG %																																																																																																																		
12500	1,48	99	n.b.																																																																																																																					
2000	0,01	99	n.b.	2000	0	100																																																																																																																		
1000	0,30	98	2,78	-	-	-																																																																																																																		
500	0,63	98	2,74	-	-	-																																																																																																																		
200	1,10	96	2,72	-	-	-																																																																																																																		
100	0,97	96	2,74	63	1	99																																																																																																																		
40	5,09	90	2,76	2	74	25																																																																																																																		
25	4,50	86	2,78																																																																																																																					
0	85,91	0	n.b.	0	25	0																																																																																																																		
Summe	100,00	-	-		100																																																																																																																			
< 25 µm Andreasen-Pipette																																																																																																																								
MW	Klasse																																																																																																																							
µm	%																																																																																																																							
18,8	9,2																																																																																																																							
9,4	17,3																																																																																																																							
4,7	18,1																																																																																																																							
2,8	10,5																																																																																																																							
1,9	7,4																																																																																																																							
1,0	9,6																																																																																																																							
0,7	6,1																																																																																																																							
0	21,8																																																																																																																							
	0,0																																																																																																																							
	0,0																																																																																																																							
Bezeichnung	Einheit	Vers. 1	Vers. 2	Mittelw.																																																																																																																				
Dichte lose	g/cm <sup>3</sup>	0,95	1,02	0,98																																																																																																																				
Dichte gerüttelt	g/cm <sup>3</sup>	1,35	1,36	1,35																																																																																																																				
<p>Schüttdichte bestimmt mit ERWEKA, Stampfvolumeter, 5 min    lose und gerüttelt</p>																																																																																																																								

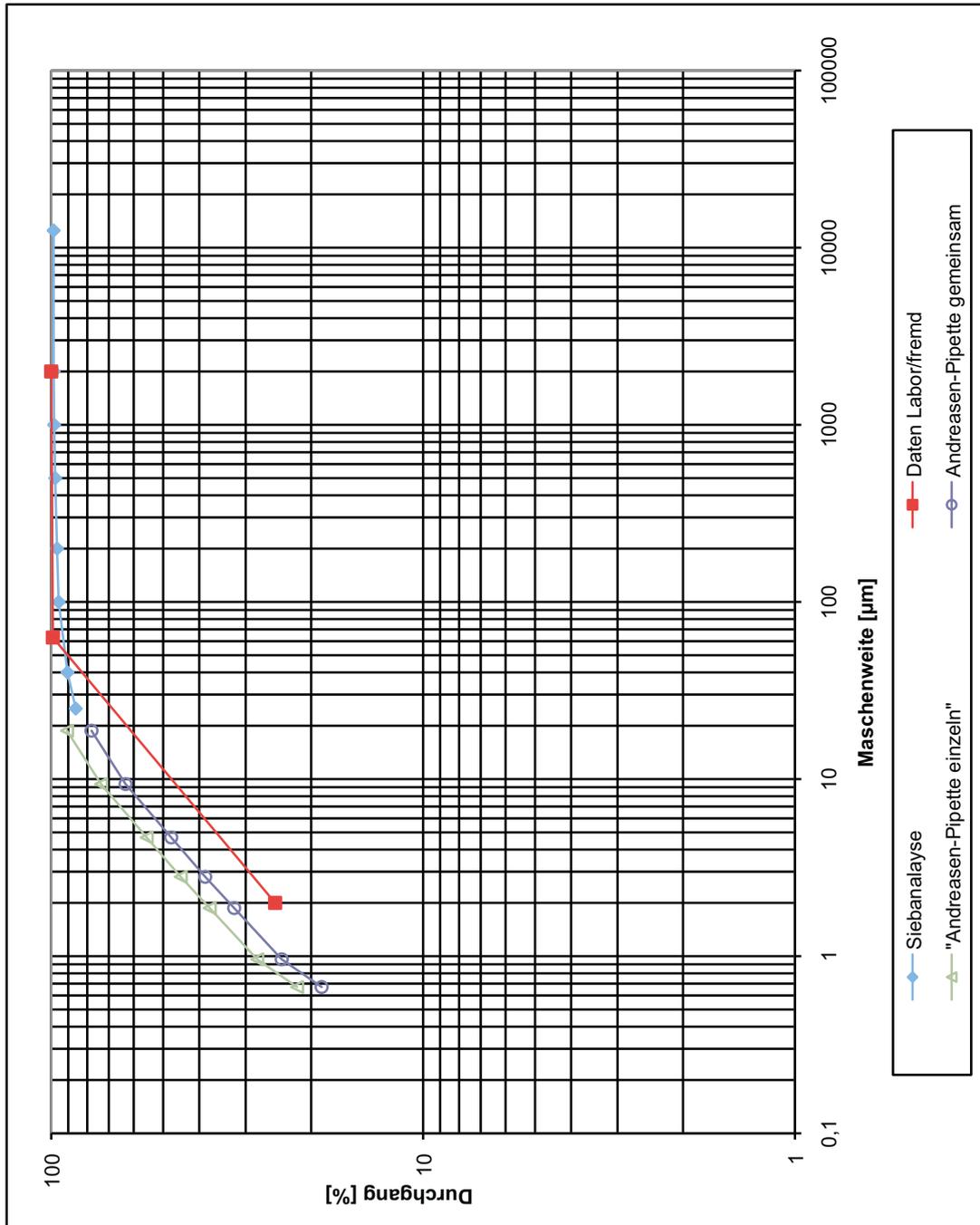


Abb. 3-14: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Probe ÖBB4 im doppellogarithmischen GGS-Netz

### 3.1.6 Gesamtdarstellung der Korngrößenverteilung

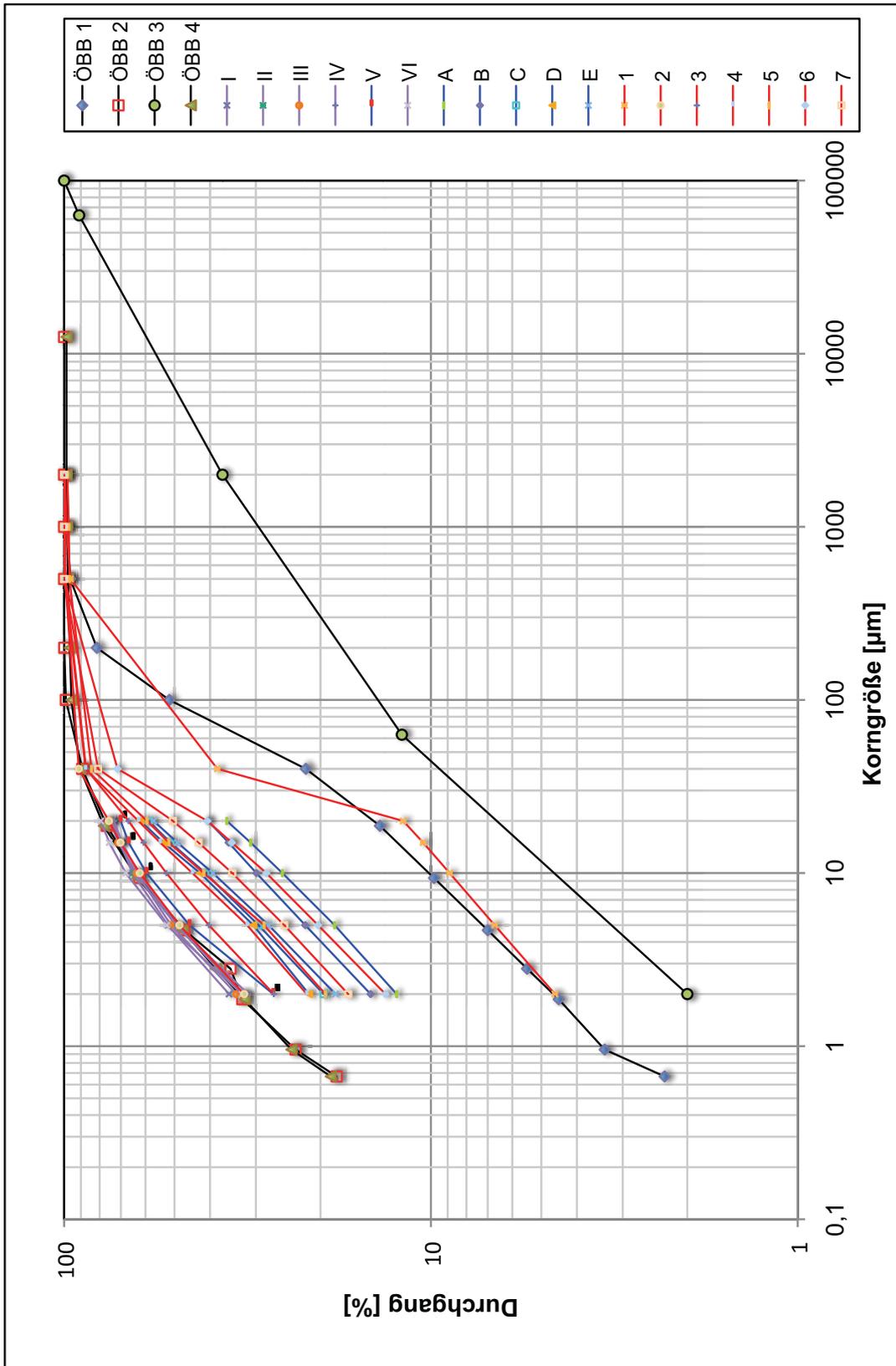


Abb. 3-15: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung aller untersuchten Proben im doppellogarithmischen GGS-Netz

Erklärung zu Abb. 3-15:

Die Korngrößenverteilung der Proben ÖBB1, ÖBB2 und ÖBB4 ist im Rahmen dieser Arbeit bestimmt worden. Die Korngrößenverteilung der Probe ÖBB3 wurde aus dem „Geotechnisch – Hydrogeologischen Gutachten“<sup>[6]</sup> der Fa. BGG Consult Dr. Peter Waibel ZT-GmbH entnommen. Die restlichen Korngrößenverteilungen wurden in dem Bericht: „Entwässerungsverhalten von Seeton Versuchsfeld Untersammelsdorf“ von Dr. Böhm ermittelt. Hierbei entsprechen die Proben mit der Bezeichnung I-VI der 1.Serie und A-E der 2.Serie aus den Probenahmen des DSV-Rücklaufes aus dem Einlauf in die Mulde (Pumpproben). Die Proben mit der Bezeichnung 1-7 waren Probenahmen direkt aus dem Bohrlochmund des DSV-Rücklaufes.

Es ist eine Parallelverschiebung der Korngrößenverteilung der untersuchten Proben im Bereich kleiner 20 µm zu erkennen.

Aus der Steigung der Siebkurve lässt sich der GGS-Exponent berechnen. Eine weitere Bezeichnung hierfür ist natürliche Bruchcharakteristik, welche eine Materialeigenschaft des Gesteins ist. Diese Parallelverschiebung ist deshalb ein Hinweis, dass es sich bei den unterschiedlichen Proben immer um das gleiche Ausgangsgestein und somit eine gleiche Mineralogie der Proben handelt.

## **3.2 Bindemittel**

### **3.2.1 Beschreibung des eingesetzten Bindemittels**

Bei den im Versuchsfeld Untersammelsdorf hergestellten DSV-Körper wurde das Bindemittel „Rolinjekt S 90 A“ der Fa. Rohrdorfer eingesetzt. Hierbei handelte es sich um ein Bindemittel das laut Herstellerfirma von der Zusammensetzung etwa einem CEM II B-M (S-L) entspricht.

Dieses eingesetzte Bindemittel hat eine Dichte von 2,92 g/cm<sup>3</sup>, einen Blaine-Wert (nach EN 196-6) von 4.400 cm<sup>2</sup>/g und eine 28 Tage Druckfestigkeit (nach EN 196-1, Normeinerschlag) von 44 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt, wie in EN 196-1 angeführt, an Prismenhälften mit den Abmessungen 40x40x>40 mm. Dies entspricht der Festigkeitsklasse 42,5 N. Für weitere Daten siehe „Technisches Datenblatt“ des Bindemittels im Anhang B.

Die Siebanalyseergebnisse in Tab. 3-6 sind im Labor der Fa. Rohrdorfer in Gmunden mittels Laborsiebe der Maschenweiten 250, 200, 125, 90, 63, 45 und 32 µm ermittelt worden.

Tab. 3-6: Tabellarische Darstellung der Siebanalyseergebnisse des Bindemittels

Maschenweite $\mu\text{m}$	Durchgang %	Rückstand %
250	100	0
200	99,9	0,1
125	99,6	0,4
90	97,6	2,4
63	94,4	5,6
45	90,6	9,4
32	85,4	14,6

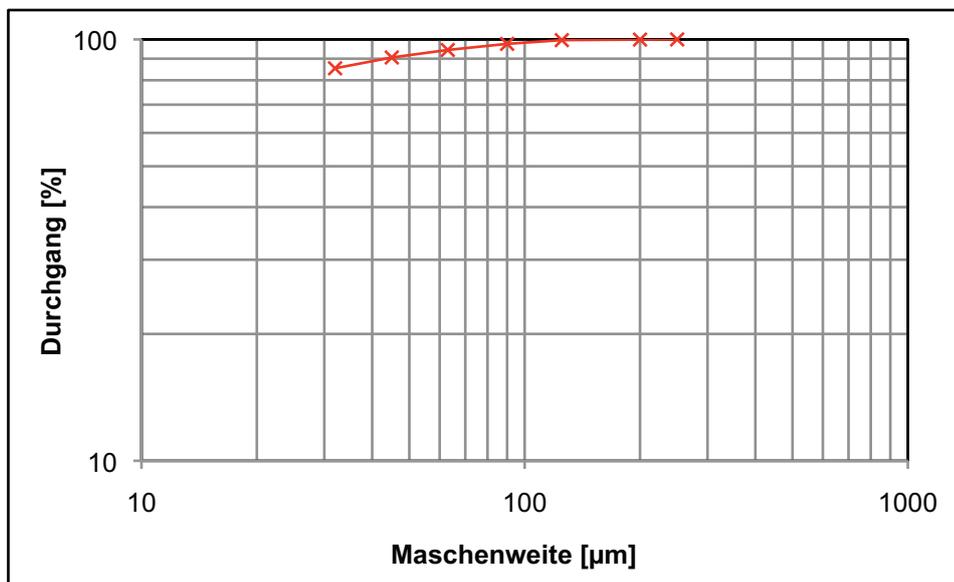


Abb. 3-16: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung des Bindemittels im doppellogarithmischen GGS-Netz

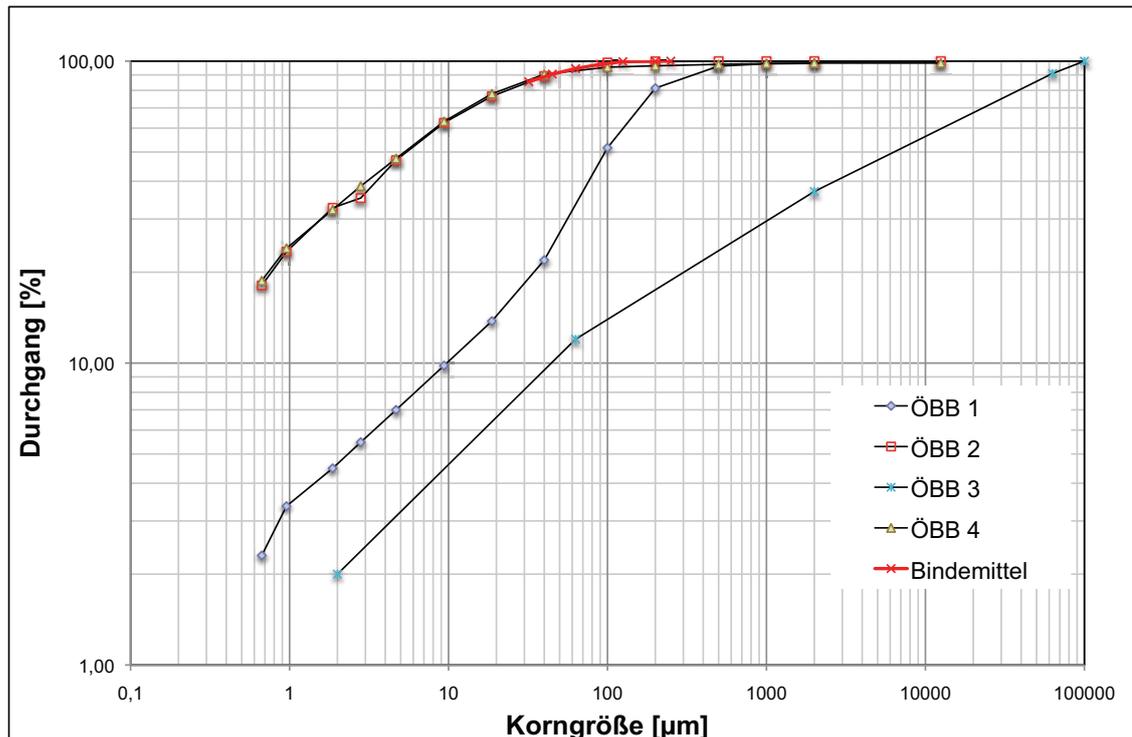


Abb. 3-17: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung der Boden- sowie der Bindemittelprobe im doppellogarithmischen GGS-Netz

In Abb. 3-17 ist zu erkennen, dass die Korngrößenverteilung des Bindemittels in etwa der des Bodens (ÖBB2 und ÖBB4) entspricht. Somit kommt es bei Zugabe von Bindemittel zu einer tonigen Bodenprobe zu keiner Verschiebung der Korngrößenverteilung.

### 3.2.2 Theoretische Betrachtung der Wirkung von Zement in den Trüben<sup>[20,22]</sup>

Zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit des Zementleims muss dem Zementklinker Calciumsulfat als Erstarrungsregler zugegeben werden. Wird kein Sulfatträger zugesetzt, bilden sich sofort nach der Wasserzugabe zum Portlandzementklinker tafelförmige Calciumaluminathydrate ( $C_4AH_{13}$ ), welche gleichmäßig verteilt in den Zwischenräumen als Brücken wirken. Diese „Löffelbinder“ erstarren sofort nach dem Anmachen. Eine Verarbeitung ist nicht möglich, es sei denn, der Beton wird wie bei speziellen Spritzbetontechnologien auf extrem kurze Abbindezeiten optimiert.

Durch Sulfatzusatz entsteht statt der Calciumaluminiumhydrate Trisulfat (Ettringit) unmittelbar auf der Oberfläche der Tricalciumaluminat( $C_3A$ )-Körner. Calciumsulfate gehen teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in Lösung. Es kommt nicht zur Brückenbildung, sondern zu einer Hüllenbildung um die  $C_3A$ -Körner durch Ettringit. An dieser ersten Reaktion sind nur das  $C_3A$  und der

Sulfatträger beteiligt. Die entstandene Hülle bremst die Reaktion des  $C_3A$ . Sie kommt bereits nach wenigen Minuten zum Stillstand, und es folgt eine Ruheperiode von 3 bis 6 Stunden.

Ettringit bildet lange schlanke prismatische Nadeln mit einem Durchmesser von 0,06 bis 1  $\mu\text{m}$ . Die Längen können sehr unterschiedlich sein.

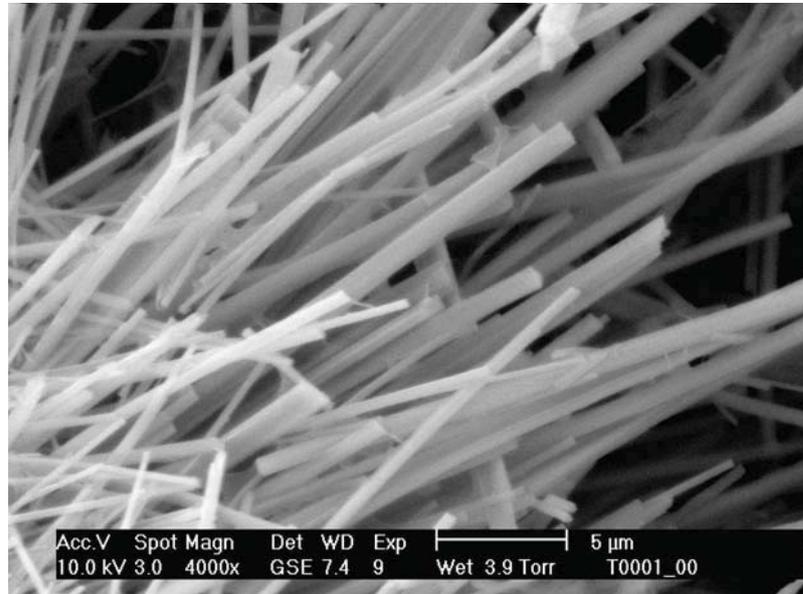


Abb. 3-18: ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope )- Aufnahme von prismatisch nadelförmigen Ettringitkristallen<sup>[19]</sup>

Ettringit besteht aus 45,9 %  $H_2O$ , 32,6 %  $CaSO_4$  und 21,5 %  $C_3A$ . Es ist als primäres Hydratationsprodukt nur so lange stabil, wie ausreichend Sulfat zur Verfügung steht. Sobald die  $SO_4^{2-}$  - Ionenkonzentration in der Lösung unter einen bestimmten Wert abfällt, wird Ettringit instabil und wandelt sich in Monosulfat um. Während dieser Sekundärreaktion werden die primär gebildeten Ettringithüllen aufgebrochen, sodass das  $C_3A$  mit einer verminderten Sulfatmenge zu Monosulfat weiterreagieren kann.

Bei starkem Sulfatmangel können stattdessen  $C_4AH_{13}$  und  $C_2AH_8$  auftreten.

Erst ab dem Erstarrungsanfang (laut Hersteller nach 610 bis 640 Minuten) kommt es zu einer chemischen Reaktion, die die Eigenschaften der Suspension verändert. Das bedeutet, dass vor der eigentlichen Hydratation etwa 95 % des Bindemittels noch ohne chemische Veränderungen in der Suspension vorliegen. Bei Zugabe von kleinsten Mengen an Bindemittel kommt es sofort zu einer Erhöhung des pH-Wertes von dem neutralen Bereich auf pH-Wert 12 (alkalisch).

Auf die Boden-Bindemittel-Suspension kann somit bis Erstarrungsbeginn nur die pH-Wert Erhöhung sowie die mechanische Eigenschaften der

Zementpartikel eine Auswirkung haben, aber nicht die Abbindereaktion des Bindemittels, da diese erst ab dem Erstarrungsanfang zum Tragen kommt. Das Filtrat der Boden-Bindemittel-Suspension hat einen pH-Wert von 12. Nach Meinung des Autors ist nicht außer Acht zu lassen, dass die sich in Lösung befindlichen Sulfate und Alkalien mit aus dem Filterkuchen entfernt werden. Der W/Z Wert wird durch die Filtration herabgesetzt, doch dem Filterkuchen sind ein Teil der gelösten Substanzen entzogen, die für eine vollständige Abbindereaktion benötigt werden. Es kommt zu einem früheren Erstarrungsanfang, da dem Ettringit  $\text{SO}_4^{2-}$  für eine stabile Reaktion fehlt, sowie zu einer verringerten Endfestigkeit.

Während der Hydratation verändert sich der zunächst flüssige bis plastische Zementleim kontinuierlich über das Ansteifen, Erstarren und Erhärten zum festen Zementstein.

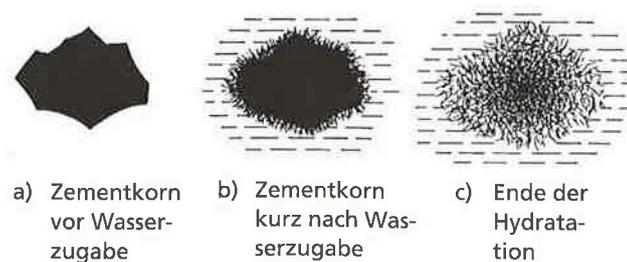


Abb. 3-19: Schematische Darstellung der Hydratation eines Zementkorns<sup>[5]</sup>

Der Zementleim besteht unmittelbar nach dem Anmischen aus Zementkörnern, die von einer Wasserhülle umgeben sind. Mit dem Einsetzen der Hydratationsreaktion bilden sich die Hydratationsprodukte. Sie lagern sich um die Oberfläche der Zementkörner an und bilden in ihrer Gesamtheit das sogenannte Zementgel. Die zwischen den Partikeln, aus denen das Zementgel besteht, verbleibenden Hohlräume werden Gelporen genannt.

Während des Hydratationsverlaufs wird das Zementkorn sukzessive aufgelöst und in Zementgel umgewandelt. Die Hydratationsprodukte wachsen in den wassergefüllten Raum zwischen den einzelnen Zementkörnern hinein. Ist diese Umwandlung vollständig vollzogen, so ist die Hydratation abgeschlossen. Die Hydratationsprodukte nehmen dann etwa das Doppelte des Platzbedarfs des ursprünglichen Zementkorns ein.

### 3.2.3 Einfluss des W/Z-Wertes

Eine besondere Bedeutung für die Betonherstellung kommt dem Verhältnis von Wasser zu Zement, dem Wasserzementwert, zu. Er errechnet sich aus dem Verhältnis der Wassermasse [kg oder  $\text{kg/m}^3$ ] zur Zementenmasse [kg oder  $\text{kg/m}^3$ ].

Beim Wasser muss zudem auch die Oberflächenfeuchtigkeit des Zuschlags berücksichtigt werden. Wie in Abb. 3-18 zu sehen, entsteht bei geringerem Wasserzementwert ein dichterer, festerer Zementstein. Der Zuschlag ist gewöhnlich dichter und fester als der Zementstein. Unter der Voraussetzung, dass der Beton gut verarbeitet und behandelt wurde, ist der Wasser-Zement-Wert der maßgebende Kennwert auch für die Dichtigkeit und Festigkeit des Normalbetons.<sup>[3]</sup>

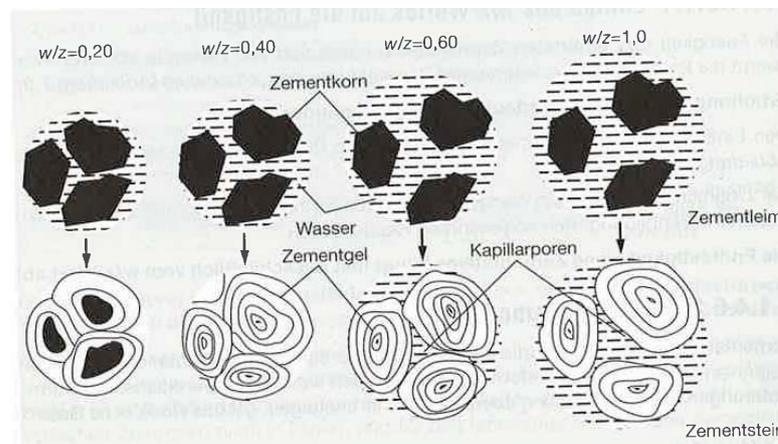


Abb. 3-20: Schematische Darstellung der Hydratation des Zementes bei unterschiedlichem Wasser-Zement-Wert<sup>[4]</sup>

Wie die Abb. 3-19 zeigt, hängt der Anteil an Kapillarporen direkt vom W/Z-Wert ab:

Bei W/Z-Werten von 0,40 reicht die Menge des Zementgels gerade aus, um den Platz der ursprünglich vorhandenen Zementkörner sowie der ursprünglich mit Wasser gefüllten Zwischenräume vollständig zu füllen. Es treten nahezu keine Kapillarporen auf.

Bei W/Z-Werten  $> 0,40$  sind Kapillarporen ein unvermeidbarer Bestandteil des Zementsteingefüges. Je höher aber der W/Z-Wert ist, umso größer ist der Kapillarporenraum und umso geringer sind Festigkeit und Wasserdichtigkeit des Gefüges.

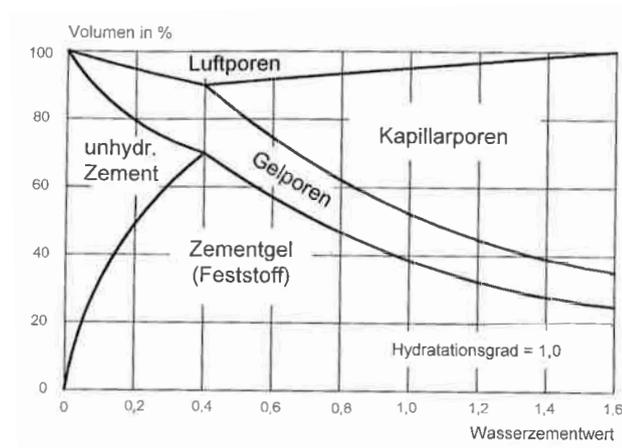


Abb. 3-21: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert<sup>[5]</sup>

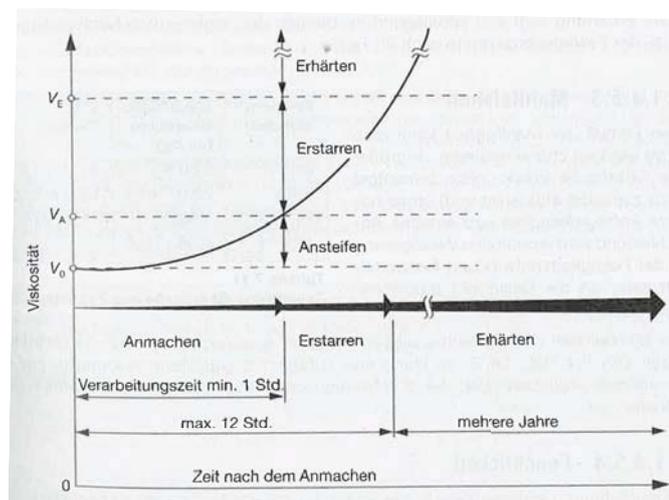


Abb. 3-22: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement bei einer Prüfung der Erstarrungszeiten nach DIN EN 196<sup>[4]</sup>

### 3.3 Wasser

Zuerst wurde für die Bindemittelsuspension sowie als Wasser für das DSV an eine Wasserentnahme aus dem Klopeiner Seebach gedacht, da dieser sich in unmittelbarer Nähe zu dem geplanten Bauvorhaben befindet. Doch nach kurzer Recherche hatte sich herausgestellt, dass dieser als Vorfluter für die Kläranlage dient. Das Zugabewasser muss nach ÖNORM B 4710-1:2007 Punkt 5.1.4. Trinkwasserqualität aufweisen. Im Zweifelsfall muss von einer akkreditierten Prüf Stelle die Eignung durch Untersuchungen im Rahmen einer Betonerstprüfung bestätigt werden. Es konnte ohne Untersuchung nicht sichergestellt werden ob der Bach Trinkwasserqualität hat. Weiters kommt es zu Schwankungen des Volumenstromes sowie der Temperatur des Wassers je nach Jahreszeit.

Aufgrund der angeführten Überlegungen wurde das Ortswassernetz St. Kanzian am Klopeinersee, es ist das nächstgelegene öffentliche Wassernetz zum Bauvorhaben, als Wasser für die Durchführung der Versuche gewählt. Für die DSV-Körper wird dieses Wasser auch eingesetzt werden.

Als wichtigste Parameter für das Anmachwasser wurden aus Sicht des Betontechnologen (Dr. Holger Maurer; Fa. Rohrdorfer, Geosystems) der pH-Wert, die Leitfähigkeit sowie die Temperatur betrachtet. Aus Sicht des Autors, hat der pH-Wert des Anmachwassers geringe Auswirkungen, da sobald kleine Mengen Bindemittel hinzugegeben werden der pH-Wert im erhöhten alkalischen Bereich (pH-Wert 12 bis 13) liegt. Die Temperatur des Anmachwassers ist wesentlich für das Erstarrungs-/Erhärtungsverhalten zementgebundener Bindemittel.

Im Alter von zwölf Stunden wird zum Beispiel bei gleichen Wärmeabfließbedingungen die Festigkeit bei einer Frischbetontemperatur von 25°C im Vergleich zu einer Frischbetontemperatur von 20°C fast verdoppelt (Abb. 3-23).<sup>[21]</sup>

Deshalb wird eine Temperaturmessung empfohlen.

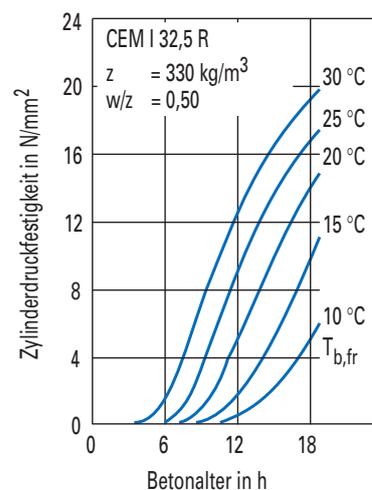


Abb. 3-23: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für einen Beton in einem Bauteil mit 0,6 m Dicke in Stahlschalung<sup>[21, Bild II.5.3-7]</sup>



Abb. 3-24: Bestimmung der Parameter vor Ort des Ortswassernetzes St. Kanzian am Klopeinersee

Tab. 3-7: Ergebnisse der beiden Messungen und Probenahmen des Ortswassernetzes St Kanzian am Klopeinersee

Datum	13-07-2011	19-09-2011
Uhrzeit	12:10	18:25
Wassertemp.	18,5°C	19,1°C
pH-Wert	7,35	7,46
Elektr. Leitf.	640 µS/cm	n.b.
Probemenge	62,7 kg	83,6 kg

Wie der Vergleich von Tab. 3-7 und Tab. 3-8 zeigt, waren der vor Ort gemessene pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit der Wasserprobe im Schwankungsbereich der amtlichen Wassergütemessung des Brunnens. Die Temperatur wich ab, da das Anmachwasser aus einem privaten Hauswasseranschluss entnommen wurde und die gemessenen Werte des Amtes an einer aus dem Brunnen entnommenen Probe ermittelt wurden. Nachzulesen sind die Werte auf der Homepage des Umweltbundesamtes unter der Rubrik „H2O Fachdatenbank“. Die Messstelle des Brunnens hat die Bezeichnung PG20817012.

Tab. 3-8: Ergebnisse der amtlichen Wassergütemessung des Brunnens, aus dem das Ortswassernetzes St. Kanzian am Klopeinersee gespeist wird<sup>[12]</sup>

GZÜV-ID	Parameter Name	B010	B020	B030	B040	B110	B120	B130
PG20817012	Entnahmedatum TT-MM-JJJJ	13-01-2010	21-04-2010	08-07-2010	28-10-2010	13-01-2011	18-04-2011	05-07-2011
PG20817012	Wssertemp. °C	10,0	10,5	11,6	10,3	9,7	10,6	11,1
PG20817012	pH-Wert	7,1	7,3	7,3	7,2	7,2	7,6	7,2
PG20817012	Elektr. Leitf. (bei 20°C) µS/cm	615,59	620,97	618,28	625,45	640,68	630,82	637,99

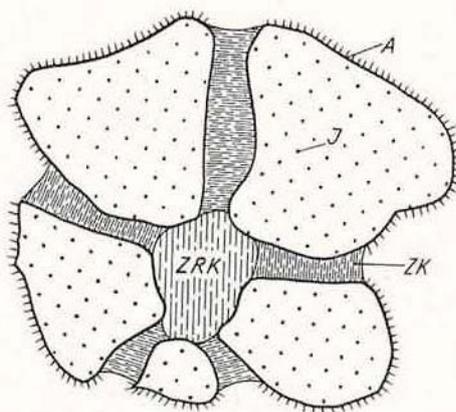
## 4 Versuche

Der erste Schritt in der Fest/Flüssig-Trennung ist die Sedimentation, die zum Beispiel im Schwerkraftfeld mit Rund- oder Lamelleneindicker und im Fliehkraftfeld mit Hydrozyklonen stattfinden kann. Es erfolgt hier die erste Entwässerung des Schlammes in den zumeist sehr großen (Rundeindicker) und wenig energieintensiven Apparaten. Erst der gerade noch pumpfähige Dickschlamm wird durch Druck- oder Saugfiltration, wie zum Beispiel einer Kammerfilter- oder Siebbandpresse, weiter entwässert. Der letzte Schritt der Entwässerung ist die thermische Trocknung. Diese ist mit einem sehr hohen Energieeinsatz verbunden, daher ist eine stufenweise Vorentwässerung nötig. Feststoff- und Trübeigenschaften bilden die Grundlage für die Auswahl von Entwässerungsapparaten.

Bei der Sedimentation bzw. auch Filtration wird oftmals Flockungsmittel als Hilfsmittel eingesetzt.

Die Versuchsführung richtet sich nach diesem Konzept. In einem ersten Schritt wurden das Sedimentationsverhalten und dann das Filtrationsverhalten und die Scherparameter des Filterkuchens untersucht. Des Weiteren wurden auch der Einsatz von Flockungsmittel sowie die Bestimmung der Pumpbarkeit analysiert.

### 4.1 Grundlagen der Bindungskräfte zwischen Feststoff und Flüssigkeit<sup>[1]</sup>



- A = Adsorptions- und Haftwasser
- I = Innenwasser
- ZK = Zwickelkapillarwasser
- ZRK = Zwischenraumkapillarwasser

Abb. 4-1: Schematische Darstellung des Restwassergehalters in einem körnigen Haufwerk<sup>[1, Bild 261]</sup>

Innenwasser und Adsorptionswasser können nicht durch mechanische Kräfte entfernt werden. Letzteres ist ein dünner Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche des Feststoffes mit einer Dicke von 0,1 – 1  $\mu\text{m}$ .

Haft-, Zwickelkapillar- und Zwischenraumkapillarwasser können auf mechanischem Wege abgetrennt werden.

Die Menge des Haftwassers hängt von der spezifischen Oberfläche und der Rauigkeit ab. An den Berührungspunkten der Körner können sich auf Grund von Kapillarwirkungen Flüssigkeitsringe bilden, die als Zwickelkapillarwasser bezeichnet werden. Die hierdurch gebundene Wassermenge nimmt mit der Anzahl der Körner im Haufwerk zu. Die in einem Haufwerk befindlichen Einzelkörner bilden ein Netz von Poren. Dieses Volumen füllt sich im Bereich der kapillaren Steighöhe mit Wasser, das Zwischenraumkapillarwasser oder auch kapillare Steigflüssigkeit genannt wird.

Zur Trennung von Feststoff und Flüssigkeit müssen von außen Kräfte einwirken, die größer sind als die Summe der Bindungskräfte und der Widerstandskräfte im strömenden Medium. Bei der mechanischen Trennung werden hierfür ausschließlich Beschleunigungskräfte im Schwere- oder Zentrifugalfeld und Druckkräfte angewendet.

## **4.2 Sedimentationsversuche**

Das Klarwasser, welches bei der Sedimentation abgegossen oder abgepumpt werden kann, muss vor der Einleitung in einen Vorfluter untersucht werden. Es wurden im Labor hierfür der pH-Wert, das Anmachwasser sowie das Klarwasser der einzelnen Serien mit Hilfe des „handylab pH/LF 12“ der Firma Schott mit Glaselektrode analysiert. Durch die Zugabe des Bindemittels wurde der pH-Wert des Klarwassers der Boden-Bindemittel-Wasser-Suspension im basischen Bereich erwartet. Die Kalibrierung des Messgerätes erfolgte daher mit den Schott-Pufferlösungen, die einen pH-Wert von 4,0 und 10,0 hatten.

### **4.2.1 Zusammensetzung der Suspension für die Versuche**

Aufgrund der unterschiedlichen Tätigkeiten beim DSV schwanken die Mengen Boden, Bindemittel und Wasser die als DSV-Rücklauf anfallen.

Wie in dem Abschlussbericht<sup>[11]</sup> von Dr. Böhm zu entnehmen ist, variieren die Feststoffmassenkonzentrationen in dem Versuchsfeld in Untersammelsdorf zwischen einem minimalen Wert von 310 g/l und einem maximalen Wert von 924 g/l. Der mittlere Wert der Bohrlochprobe hat 656 g/l und der der Pumpprobe 350 g/l betragen. Die geringere Konzentration der Pumpprobe ist aufgrund von Waschwasser und einem Verdünnen mit Frischwasser erfolgt, um die Pumpbarkeit mittels Schlauchquetschpumpe aufrecht zu halten.

Der Parameter Feststoffmassenkonzentration wurde im Labor von 150, 300, 450, 600 bis 750 g/l variiert. Hiermit wurden die angeführten Grenzwerte untersucht. Je nach Baufortschritt werden unterschiedliche Tätigkeiten wie

Vorschneiden, Düsen, Spülen und Reinigen durchgeführt. Aufgrund dessen schwanken die Feststoffmassenkonzentrationen und können nicht auf einen Zahlenwert fixiert werden.

Die Variationen der Konzentration wurden in die Abszisse der Zusammensetzungsmatrix eingetragen.

Das Verhältnis des im Rücklauf enthaltenen Bindemittels zu Wasser und zu Boden ist nicht bestimmt worden. Das Verhältnis von Boden zu Bindemittel zu Wasser kann daher nicht eingegrenzt werden. Gedüst wurde beim Versuchsfeld Untersammelsdorf beim DSV mit einer Zementsuspension (siehe 3.Probenbeschreibung), die einen W/Z Wert von 1,0 aufweist.

Für das Verhältnis dieser drei Komponenten konnten keine fixen Grenzen mit Sicherheit festgelegt werden, deshalb wurde, um die Versuchsdurchführung nachvollziehbar zu gestalten, das Verhältnis von Bindemittel zu Boden variiert. Diese Verhältnisse variierten von 0/1; 0,25/0,75; 0,5/0,5; 0,75/0,25 bis zu 1/0 und wurden in die Ordinate der Zusammensetzungsmatrix eingetragen.

Der Boden variiert in dem Bereich, in dem die DSV-Körper hergestellt werden, zwischen einigen Bodenarten. Dies wurde mit eingebunden in die Untersuchungen, in der Weise, dass die verschiedenen als repräsentativ für Grenzwerte erachteten Böden (ÖBB1, ÖBB2, ÖBB3 und ÖBB4) als Probe für den Boden eingesetzt worden sind. Diese Variation wurde als dritte Dimension der Matrix gewählt.

Tab. 4-1: Matrix der Variationen der Zusammensetzung für die Durchführung der Sedimentationsversuche

		(a) Feststoffmassenkonzentration $c_{FS}$ [g/l]				
		150	300	450	600	750
		(b) Feststoffgehalt $\rho_{FS}$ [%]				
		13,7	25,1	34,8	43,2	50,5
		(c) Trübedichte $\rho_{Trübe}$ [g/cm <sup>3</sup> ]				
		1,10	1,20	1,29	1,39	1,49
Verhältnis Z/B	Einwaage Verhältnis	Einwaage Verhältnis	Einwaage Verhältnis	Einwaage Verhältnis	Einwaage Verhältnis	Einwaage Verhältnis
	g	g	g	g	g	g
0,00	Wasser	945,8	891,7	837,5	783,4	729,2
1,00	Zement	-	-	-	-	-
	Boden	150,0	300,0	450,0	600,0	750,0
0,25	Wasser	946,5	893,1	839,6	786,2	732,7
0,75	Zement	37,5	75,0	112,5	150,0	187,5
	Boden	112,5	225,0	337,5	450,0	562,5
0,50	Wasser	947,2	894,5	841,7	789,0	736,2
0,50	Zement	75,0	150,0	225,0	300,0	375,0
	Boden	75,0	150,0	225,0	300,0	375,0
0,75	Wasser	947,9	895,9	843,8	791,7	739,7
0,25	Zement	112,5	225,0	337,5	450,0	562,5
	Boden	37,5	75,0	112,5	150,0	187,5
1,00	Wasser	948,6	897,3	845,9	794,5	743,2
0,00	Zement	150,0	300,0	450,0	600,0	750,0
	Boden	-	-	-	-	-
Parameter						
$\rho_{Zement}$	2,92	g/cm <sup>3</sup>		Zementbedarf: 5625,0	g	
$\rho_{Boden}$	2,77	g/cm <sup>3</sup>		Bodenbedarf: 5625,0	g	
Volumen	1000	cm <sup>3</sup>		Wasserbedarf: 21042,94	g	

Legende zu Tab. 4-1:

$m_F$  .... Masse Feststoff [g]

$m_W$  .... Masse Wasser [g]

$m_{ges}$  .. Gesamtmasse ( $m_F + m_W$ ) [g]

$V_F$  .... Volumen Feststoff [ $cm^3$ ]

$V_W$  .... Volumen Wasser [ $cm^3$ ]

$V_{ges}$  .. gesamtes Trübevolumen ( $V_F + V_W$ ) [ $cm^3$ ]

(a) Feststoffmassenkonzentration ...  $c_{FS} = m_T / V_{ges} * 1000$  [g/l]

(b) Feststoffgehalt .....  $g_{FS} = m_T / m_{ges} * 100$  [%]

(c) Trübedichte .....  $\rho_{Trübe} = m_{ges} / V_{ges}$  [g/ $cm^3$ ]

Umrechnungsformel:  $c_{FS} = (g_{FS} / 100) * \rho_{Trübe} * 1000$

## **4.2.2 Durchführung der Versuche**

### **4.2.2.1 Auswahl des Sedimentationszylinders**

Allgemein ist festzuhalten, dass der Innendurchmesser eines Sedimentationszylinders  $\geq 50 \text{ mm}^{[2]}$  betragen soll, um Wandreibungseffekte weitgehend ausschließen zu können.

Die Bindemittel-Boden-Suspensionen können zum Teil nach Beendigung der Versuche nicht aus dem Standzylinder ausgegossen werden, aufgrund des Verfestigens einiger Zusammensetzungsvariationen. Nachdem Versuche an unzerstörten Sedimentationskörper geplant waren, mussten diese aus dem Zylinder gedrückt werden können. Somit musste der Boden des Zylinders abnehmbar sein.

Es wurde ein Acrylglasrohr  $\varnothing 70/64 \times 350 \text{ mm}$  gewählt. Der Boden war aus einer 5 mm Acrylglasplatte  $90 \times 90 \text{ mm}$  mit aufgeklebten Acrylglasrohr  $\varnothing 80/70 \times 20 \text{ mm}$ . Um diese Steckverbindung gegen Austritt von Flüssigkeit/Suspension dicht zu bekommen, wurde die Berührungsfläche mit Laborfett Hochvakuumqualität „glisseal®“ der Firma borerchemie bestrichen. Dies erleichterte auch das Zusammenstecken der beiden Teile. Auf der Außenseite der Acrylglasrohre wurde eine Messmarke aufgeklebt. Diese bestand aus einem ein cm breiten Millimeterpapierstreifen. Jeden Zentimeter war eine Markierung mit der zugehörigen Messmarke aufgetragen um das spätere Ablesen zu erleichtern. Das obere Ende der Messmarke war 31 cm, hier entsprach das Volumen 1 Liter ( $0,322 * \pi * 3,1 = 0,997 \approx 1 \text{ dm}^3$ ).

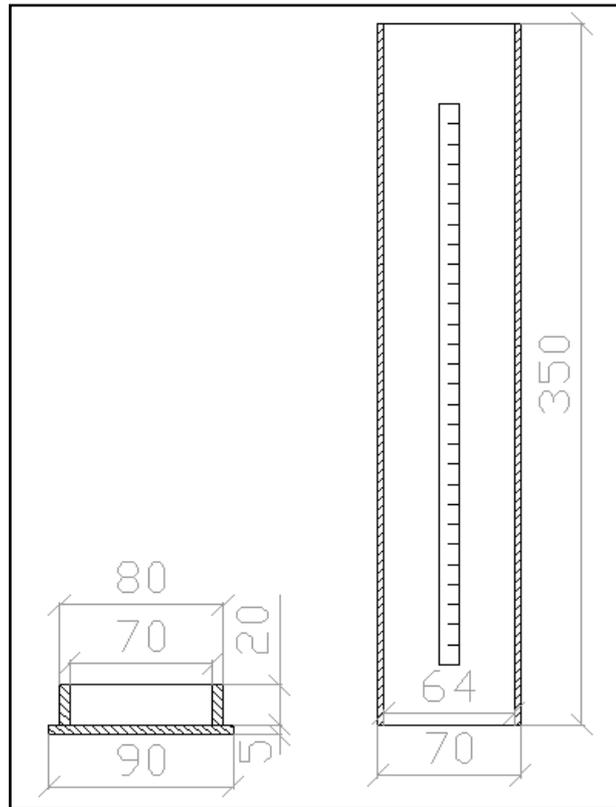


Abb. 4-2: Konstruktionszeichnung des Bodens und des Acrylglasstandzylinders

#### 4.2.2.2 **Desagglomeration und Homogenisierung der Bodenproben**

Die Proben wurden je nach Ausgangszustand unterschiedlich desagglomert und homogenisiert.

Überprüft wurde dies durch Nasssiebung bis  $25\ \mu\text{m}$ , sowie mittels Sedimentationsversuch nach Andreasen für die Kornklasse kleiner  $25\ \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung wurden grafisch im doppellogarithmischen Diagramm (GGs-Netz) dargestellt. Agglomerate sind durch Sprünge in der grafischen Darstellung der Kurve abzulesen. In den Versuchen wurde die Bodenprobe als aufgeschlämmt betrachtet, sobald die Suspension einen stetigem Kurvenverlauf der Korngrößenverteilung im GGs-Netz zeigte.

##### a) *Homogenisierung Bodenprobe ÖBB1(sandig)*

Bei dieser Bodenprobe handelte es sich um eine in zwei Probenahmekübeln abgefüllte Probe.

Ein Aufschlämmen dieser Bodenprobe war nicht notwendig, da die Probe frisch entnommen wurde und noch bodenfeucht in den Plastikeimern zur Verfügung stand. Die Homogenisierung mittels Eirich Intensivmischers war aufgrund der schnellen Sedimentation des Sandes ( $> 0,063\ \text{mm}$  und  $< 2\ \text{mm}$ ) in der Probe nicht möglich. Die notwendige Bodenprobenmasse

wurde nach Bestimmung des Wassergehaltes der Probe bodenfeucht in die Zylinder eingewogen. Die benötigte Wassermenge wurde wie folgt errechnet: Erforderliche Feststoffmassenkonzentration abzüglich dem Wassergehalt der bodenfeuchten Probe. Die Proben wurden etwa fünf Minuten mit der Standbohrmaschine (Propellerrührer- $\varnothing$  5,0 cm) bei maximaler Drehzahl von 2000 U/min homogenisiert.

Bei Boden-Bindemittel-Wasser-Suspensionen wurden zuerst der Boden, dann zirka die Hälfte des Wassers, im Anschluss der zuvor abgewogene Zement und erst zum Schluss noch das restliche fehlende Wasser zugegeben. Diese Proben wurden zirka zehn Minuten mit Hilfe der Standbohrmaschine bei maximaler Drehzahl homogenisiert.

*b) Desagglomeration und Homogenisierung der Bodenproben ÖBB2 und ÖBB4*

Diese Bodenproben wurden aus drei Jahre gelagerten Bohrkernen entnommen. Nach dem Vorzerkleinern mit Meißel und Hammer wurde mit einem Laborsieb, Maschenweite 12,5 mm, solange zerkleinert und abgesiebt, bis 100 % Durchgang erreicht wurden.

Wie in der grafischen Darstellung der Korngrößenanalyse zu erkennen, waren 100 % der Partikel des Bodens kleiner als 100  $\mu$ m. Der Versuch, mit Hilfe der Standbohrmaschine die Agglomerate in Suspension zu bekommen, scheiterte. Es waren makroskopisch erkennbare Partikelkonglomerate sichtbar und die Siebanalyse zeigte keinen stetigen Verlauf.

Die eingewogene Bodenprobe wurde eine Stunde in dem Mischertopf mit dem nötigen Anmachwasser stehen gelassen. Anschließend wurde diese mit dem Intensivmischer R02E der Firma Eirich gemischt. Der  $\varnothing$  des Scheibenwirlers betrug 13,1 cm. Der leicht schräg gestellte Topf wurde im Gegenlauf des Wirlers bewegt, wodurch mehr Scherkraft eingebracht wurde und es kam zu einer noch besseren Aufschlammung, im Gegensatz zu einem Mischen mit einer Standbohrmaschine. Die Wirblerdrehzahl konnte stufenlos verstellt werden. Für die Homogenisierung der Bodenproben in der Suspension wurde eine Minute eine Rührerdrehzahl von 236 U/min, dann vier Minuten 2268 U/min und im Anschluss vier Minuten 3175 U/min gewählt.

Zur Bestimmung der Probengröße wurde der Bedarf an trockener Probe je Serie ermittelt. Eine Serie bestand jeweils aus fünf verschiedenen Feststoffmassenkonzentrationen (150, 300, 450, 600, 750 g/l), die in je

einen ein Liter Standzylinder eingefüllt wurden. Der Anteil Boden zu Bindemittel wurde wie in der Matrix Tab.4-1 nachzulesen, variiert. Nach der Ermittlung des Trockenbodenbedarfs wurde mit dem im Labor ermittelten Wassergehalt der Probe der Bedarf an Feuchtprobe berechnet. Dieser Wert wurde um 10 % erhöht, um Anhaftungsverluste im Topf und Wirbler des Eirichmischers mit zu berücksichtigen.

Die erforderliche Wassermasse wurde berechnet in Bezug auf den höchsten Feststoffgehalt. Wichtig ist den schon in der feuchten Probe enthaltenen Wassergehalt mit zu berücksichtigen. Nach dem Desagglomerieren wurde durch Wasserzugabe auf die niedrigeren Feststoffmassenkonzentrationen in den Standzylindern verdünnt.

Die Suspension wurde in den Standzylindern eingewogen. Mit Hilfe einer Pipette wurde die exakte Einwaage erreicht. Es musste bei allen außer bei der 750 g/l Standzylindereinwaage noch Wasser zugegeben werden um die geringeren Feststoffmassenkonzentrationen zu erreichen.

Handelte es sich um eine Boden-Bindemittel-Suspension, wurde nun die erforderliche Bindemittelmasse zugegeben. Nur diese Proben wurden fünf Minuten mit Hilfe der Standbohrmaschine bei maximaler Drehzahl gerührt um das Bindemittel in Suspension zu bekommen und diese zu homogenisieren.

#### *c) Bodenproben ÖBB3*

Im Rahmen der Versuche sind keine Untersuchungen mit der Bodenprobe ÖBB3 durchgeführt worden.

Diese Bodenprobe würde gleich wie die Bodenprobe ÖBB1 homogenisiert und für die Versuche vorbereitet werden. Der Standzylinder für den Sedimentationsversuch muss an die maximale Korngröße der Probe angepasst werden. Wobei die obere Korngröße aufgrund der Begrenzung durch den Ringraum in der Praxis nicht so wie in den Bohrkernen vorliegen wird.

#### **4.2.2.3 Start des Sedimentationsversuches**

Es wurde jeweils eine Serie gemeinsam vorbereitet, gestartet und ausgewertet. Die vorbereiteten Suspensionen wurden noch einmal homogenisiert durch Auf- und Niederlassen einer Lochscheibe  $\varnothing$  5,4 cm welche an einem Stab geführt wurde („Stampfer“). Die Stoppuhr wurde gedrückt, sobald der Stab aus der Probe gezogen wurde. Das erste Wertepaar war bei allen Versuchen 31,0 cm, denn dies war die Füllhöhe der Zylinder, und Null Sekunden. Es wurden je nach

Sedimentationsgeschwindigkeit in etwa alle 0,5 bis 1,0 cm die Veränderung der Höhe der Grenzfläche zwischen Klarwasser und der darunter befindlichen Sedimentationszone und die zugehörige Zeit in einer Tabelle festgehalten. Die Darstellung der Funktion zwischen dem Weg der Grenzfläche und der Zeit wurde in einer Absetzkurve dargestellt.

#### **4.2.2.4 Auswertung des Sedimentationsversuches**

Nach sieben Tagen wurde der sich auf dem Klarwasser befindliche Feststoff, welcher eine Art „Kruste“ gebildet hatte, abgeschöpft, getrocknet und gewogen. Entweder wurde das Klarwasser der 300 g/l Feststoffvolumenkonzentration Probe als Rückstellprobe in einem verschließbaren transparenten Kunststoffbehälter eingelagert, oder, wenn hierfür zu wenig Volumen vorhanden war, wurde das Klarwasser der 150 g/l Probe gewählt. Das restliche Klarwasser der Standzylinder der gewählten Serie wurde abgegossen und die Sedimentationskörper wurden möglichst zerstörungsfrei aus dem Acrylglaszylinder gedrückt.

Die Probe wurde sofort mit der zugehörigen Beschriftung fotografiert.

Der Sedimentationskörper wurde geviertelt und ein Viertel der Probe und je Serie ein Klarwasser, wurde beschriftet und als Rückstellprobe aufgehoben.

Es wurde sofort festgehalten, wie sich der Probekörper vierteln lässt. Entweder war der Körper flüssig oder er konnte mit einer Gummilippe, einem Messer oder mit Hilfe des Meißels oder gar nicht gespalten werden.

Wenn der Körper spaltbar war, wurde ein Viertel der Sedimentationsprobe für „Handknetversuche“ verwendet, um die Konsistenz nach ÖNORM B 4400-1: 2010-03-15 zu bestimmen.

Von einem weiteren Viertel wurde ein Teil (60 bis 80 g) in einen 250 ml Kunststoffbecher gegeben und zehn Minuten auf dem Vibrationstisch der Laborsiebmaschine gerüttelt. Die Überlegung dazu war, hier die möglichen Auswirkungen eines Transportes des DSV-Rücklaufes auf einer LKW Ladefläche zu simulieren. Die Probe wurde vor und nach dem Versuch makroskopisch beschrieben.

Von dem letzten der vier Vierteln wurden zirka sieben cm, vom Boden weg gemessen, für die Bestimmung des Wassergehaltes abgewogen und im Trockenschrank bei 105°C auf Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

### **4.3 Filtrationsversuche**

Die Filtration bezeichnet den Vorgang, bei dem ein Feststoff einer Trübe von einem Filtermedium (Filtertuch) zurückgehalten wird und das Filtrat

(Klarwasser) infolge der Druckdifferenz durch das Filtermedium und wenn vorhanden den Filterkuchen (Kuchenfiltration) hindurchfließt.

In Abb. 3-1 wurde die Korngrößenverteilung der untersuchten Proben in eine Grafik, die aus der Literatur entnommen wurde, eingetragen. Diese Erkenntnis aus der Literatur, dass eine Saugfiltration für die zu untersuchende Probe ungeeignet ist, war mit den empirischen Erkenntnissen, die Dr. Böhm im Abschlussbericht<sup>[11]</sup> angeführt hat, deckungsgleich. In den durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit wurden keine Saug- sondern nur Druckfiltrationsversuche durchgeführt.

Da der schluffige Boden (ÖBB2,4) für die Filtration sowie für die Scherparameter ungünstiger gegenüber der sandigen Probe (ÖBB1) ist, wurde die Bodenprobe ÖBB2 für die Versuche gewählt. Es wurden die Filtrationsversuche nicht zusätzlich mit der Bodenprobe ÖBB4 durchgeführt. Die Korngrößenanalyse sowie die mineralogische Untersuchung (Aussage von Dr. Böhm) haben gezeigt, dass die Proben ÖBB2 und ÖBB4 von den untersuchten Eigenschaften ident waren. Eine weitere differenzierte Betrachtung war somit nicht mehr notwendig.

Als Feststoffmassenkonzentration wurde 450 g/l gewählt. Es wurde die Boden-Bindemittel-Zusammensetzung von 1:0; 0,75:0,25; 0,5:0,5 und 0,25:0,75 variiert. Alle Variationen wurden mit sieben bar Druck beaufschlagt, bis ein entweichen der Luft zu hören war. Dies ist der Punkt der maximal möglichen Entwässerung bei dem gewählten Druck. Der Filtratanfall pro Zeit war durch einen Vorversuch bei einer 100 % Bodenprobe bekannt. Somit konnte die Zeit die entwässert werden muss, um einen geplanten Restwassergehalt im Filterkuchen zu erreichen, bestimmt werden. Bei einer 100 % Bodenprobe wurde ein Versuch mit einer bis zirka 27 % Restwassergehalt entwässerten Probe durchgeführt, um erste Einblicke auf den Einfluss des Restwassergehaltes zu erhalten. Die Zykluszeit der Kammerfilterpresse setzt sich aus der Filtrationszeit und der Rüstzeit zusammen. Wenn die Filtrationszeit verkürzt wird, erhöht dies den Trübevolumenstrom der entwässert werden kann und erhöht den Restwassergehalt im Filterkuchen.

Die DSV-Rücklaufsimulationssuspension wurde gleich wie für die Sedimentationsversuche hergestellt. (Boden Einweichen, Eirich-Intensivmischer, wenn gefordert mit Standbohrmaschine Bindemittel einrühren)

Die Trübe wurde gewogen und in die Druckfiltrationszelle eingefüllt. Es wurde Suspension bis einen cm unterhalb des oberen Randes eingefüllt. Der Rest der verbleibenden Trübe im Becher wurde rückgewogen und somit konnte die in der Druckzelle befindliche Trübe rechnerisch ermittelt werden.

Die Zellenhöhe war 8,8 cm und der Innendurchmesser betrug 7,8 cm. Somit war das zur Verfügung stehende Volumen:  $7,8^2/4 \cdot \pi \cdot (8,8-1,0) = 372,7 \text{ cm}^3$ .



Abb. 4-3: Explosionsdarstellung der einzelnen Komponenten des Labordruckfiltrationsapparates

Als Filtermedium kam das Filterpapier „Cat No 1001 110“ der Fa. Whatman Schleicher&Schuell zum Einsatz. Nach dem Zusammenbau der Druckfilterzelle wurde das Ventil geöffnet. Es war sofort ein Druck von sieben bar (Stickstoff) auf der Suspension wirksam.



Abb. 4-4: Druckfiltrationszelle zusammengebaut

Das austretende Filtrat wurde in vorher gewogenen Bechergläsern aufgefangen. Je nach Menge pro Zeiteinheit anfallendem Filtrat wurden die Becher alle zwei bis 20 Minuten ausgetauscht, gewogen und die Zeit sowie die Filtratmasse festgehalten.

Der Versuch wurde abgebrochen, sobald ein Entweichen von Luft bei der Filtratöffnung zu hören war.

Somit konnte die maximal erreichbare Entwässerung mit diesem Apparat bei einer Druckbeaufschlagung von sieben bar und mit der gegebenen Suspensionszusammensetzung ermittelt werden.

Weiters wurde ein Versuch gefahren, der einen höheren Wassergehalt von 27 % des Filterkuchens zum Ziel hatte, um die Scherparameter von einer verschieden entwässerten Probe ermitteln zu können. Es sollte hiermit bestimmt werden, ab welchem Wassergehalt die entwässerten Körper die geforderten Scherparameter erfüllen. Denn eine geringere Restfeuchte bedeutet einen höheren apparativen Aufwand sowie eine längere Zykluszeit.

Die Versuche wurden, um den Umfang für erste orientierende Untersuchungen nicht zu umfangreich zu gestalten, mit geringen Variationen durchgeführt. Es wurden bei den durchgeführten Versuchen nur die Boden-Bindemittel-Zusammensetzung in vier Variationen beprobt sowie bei der 100 % Boden-Suspension zwei verschiedene Restwassergehalte. Es ist daher davon auszugehen, dass weitere Versuche nach Abschluss dieser Arbeit notwendig werden, damit verschiedenste Möglichkeiten und die damit verbundenen Auswirkungen getestet und überprüft werden können.

Folgende Einflussfaktoren sind für einen Entwässerungserfolg zu berücksichtigen und können variiert werden.

- Feststoffmassenkonzentration ( $c_{FS}$  [g/l]) der Aufgabe
- Boden zu Bindemittel zu Wasser Verhältnis
- Korngrößen- und Kornformverteilung (unterschiedliche Bodentypen)
- Restfeuchtigkeit (wird 21 oder 28 % gefordert)
- Filtermedium (Filterpapier/Filtertuch)
- Aufgabe (Aufgabe bei Andritz war 80 bis 160 g<sup>[11]</sup>. Die Versuche im Labor in Leoben wurden mit in etwa 470 g Aufgabe durchgeführt)
- Druckgefälle (wie hoch? Stufenweiser Druckaufbau oder sofort 100 % Enddruck)
- Zeit (wie lange Rühren, wie viel Zeit zwischen Anmischen und Versuchsdurchführung. Suspension immer in Bewegung halten oder ruhig stehen lassen vor dem Druckfiltrationsversuch)

#### **4.4 Rahmenscherversuche**

Für die Durchführung von Rahmenscherversuche war es notwendig, eine Suspension anzurühren und im Anschluss in der Druckfilterpresse Filterkuchen herzustellen. Diese Filterkuchen sind als Versuchskörper für die Rahmenscherversuche verwendet worden. Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche können nur eingeschränkt verwendet werden, da die Schergeschwindigkeit zu schnell gewählt und die Versuche unkonsolidiert durchgeführt wurden.

Um den hergestellten Filterkuchen auf eine mögliche Deponiefähigkeit zu untersuchen, wurden die Scherparameter mit Hilfe eines Rahmenschergertes<sup>[17]</sup> ermittelt. Innerhalb einer Manipulationsdauer von maximal 30 Minuten wurde der Filterkuchen in das Rahmenschergertät eingebracht und der Versuch begonnen.

Die Normalspannung  $\sigma$  wurde durch eine Auflast von 51,8; 154,2; 255,6 N auf die Probenfläche von 50x50 mm variiert. Nach dem Aufbringen der Auflast wurde an der Spindel mit der Hand gleichmässig gedreht. Die Dauer der Scherversuche lag jeweils unter einer Minute. Auf der Federwaage konnte die Schubkraft abgelesen werden. Somit konnte jeder Normalspannung eine Schubspannung  $\tau$  zugeordnet werden. Durch das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium konnten der unkonsolidierte innere Reibungswinkel sowie die unkonsolidierte Kohäsion rechnerisch bestimmt werden.

Diese unkonsolidierten Werte sind Anfangswerte und sind daher für ein bis zwei Meter Höhe des Einbaues in der Deponie interessssant, doch nicht für die gesamte Einbauhöhe. Hierfür wären konsolidierte Versuche notwendig. Für diesen Fall muss mittels eines elektrischen Motors mit einer sehr geringen Geschwindigkeit der Scherversuch durchgeführt werden. Je undurchlässiger der Boden (sowie schluffige/sandige Stillwassersedimente) ist, desto geringer muss die Schergeschwindigkeit gewählt werden.

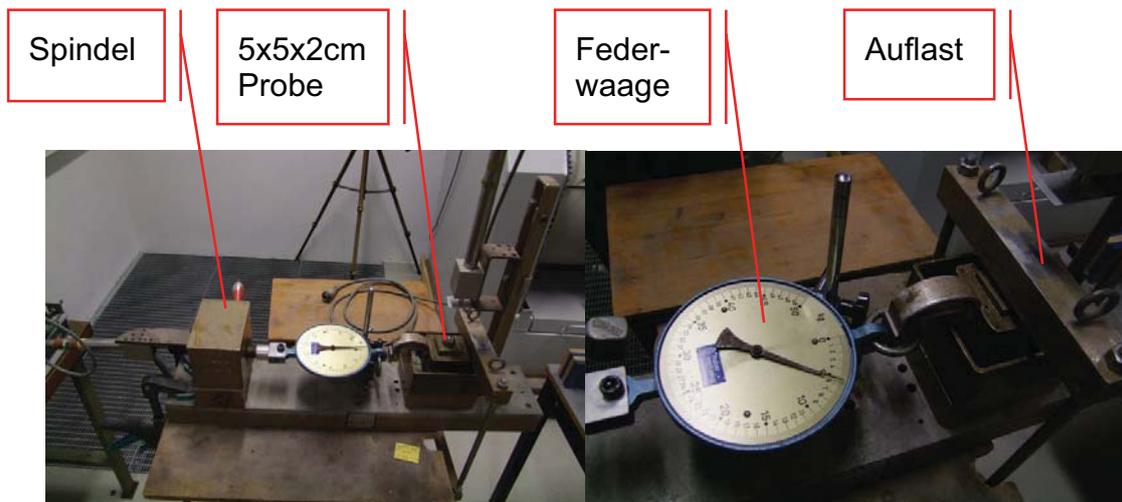
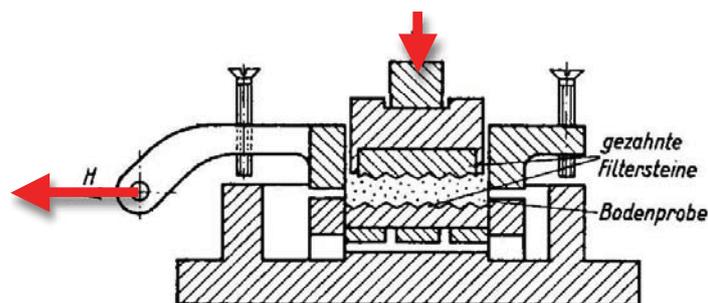


Abb. 4-5: Versuchsaufbau des Rahmenscherversuches

Abb. 4-6: Schematische Darstellung des Scherversuches<sup>[18]</sup>

Für konsolidierte Rahmenscherversuche ist eine geringe Schergeschwindigkeit erforderlich. Aus Sicht des Autors verändert sich während der Versuchsdurchführung die Eigenschaft der Probe, weil das Bindemittel hydraulisch abbindet.

## 4.5 Flockungsversuche

Die Flockung von Feinstpartikeln zu Partikelkonglomeraten hat bei der Sedimentation den Vorteil, dass es zu einer höheren Klärgeschwindigkeit kommt. Das Sediment hat jedoch einen erhöhten Restwassergehalt. Bei der Siebbandpresse ist das Ziel der Flockung, einen möglichst scherfesten Kuchen zu erzeugen. Es wird damit einerseits verhindert, dass die Suspension trüb (mit Feststoff) durch das Siebband fließt und andererseits, dass der Kuchen beim Zusammenpressen der beiden Siebbänder nicht seitlich ausgedrückt wird.

### **4.5.1 Anionisches polymeres Flockungsmittel**

(Sedipur AF 403, modifizierte Polyacrylamide; Fa. BASF)

Die Molekülkette kann eine Länge von bis über 15 µm erreichen und ist bereits in einer Konzentration von 0,1 % extrem viskos. Das Flockungsmittel führt zu einer Vernetzung der Partikel zu einer Flocke, indem sie sich nicht nur an ein Teilchen anlagert, sondern auf Grund der negativen Ladung auch andere Partikel anzieht.

Dieses Flockungsmittel war in Pulverform im Labor vorhanden. Es wurde eine 0,1 %ige Lösung hergestellt. Damit eine Auflösung, Homogenisierung und Reifung sichergestellt werden konnte, wurde 18 Stunden mittels Magnetrührer bei gleichzeitig eingeschalteter Heizplatte gerührt.

Die Konzentration die zugegeben wird bezieht sich immer auf Gramm Sedipurpulver pro Tonne Feststoff. Deshalb wird die Konzentration in der Einheit ppm angegeben.



Abb. 4-7: Mittels Magnetrührer und Wärmeplatte in Suspension gebrachtes Flockungsmittel „Sedipur AF 403“ der Fa. BASF

In einem ersten Schritt wurde bei der 100 %igen Bodensuspension mit einer Feststoffmassenkonzentration von 450 g/l (90 g Feststoff in 200 ml Trübe, 500 ml Becher) die Konzentration des Flockungsmittels variiert. Bei der Bodenprobe ÖBB1 von 400, 800, 822, 1000 und 1200 ppm variiert und bei der Bodenprobe ÖBB2 wurde die Konzentration von 200, 400, 600 und 800 ppm variiert.

Die nächsten Untersuchungen wurden mit der Konzentration durchgeführt, die makroskopisch das beste Resultat für eine Siebbandpresse („puddingartige“ Konsistenz) lieferte. Im Anschluss wurde die Suspensionszusammensetzung verändert. Es wurde das Masseverhältnis Boden (ÖBB1, ÖBB2 und ÖBB4) zu Bindemittel von 1:0; 0,75:0,25; 0,5:0,5; 0,25:0,75; und 0:1 variiert.

Die augenscheinliche Beobachtung erfolgte nach Zugabe des Flockungsmittels zur Suspension, welche im optimalen Fall eine „puddingartige“ Konsistenz aufweist. Die geflockte Trübe wurde auf ein Laborsieb mit der Maschenweite von 1,25 mm mit einem Laborlöffel aufgegeben. Das durchlaufende Filtrat wurde beobachtet. Mit einem kleinen Sieb wurde als Nächstes mit der gleichen Maschenweite auf diesen Kuchen gedrückt und die Beobachtung der Klarheit/Trübung des Filtrates festgehalten.

Der Wassergehalt der geflockten Suspension wurde durch Trocknen bei 105°C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz ermittelt.

Das polymere Flockungsmittel wurde als stark verdünnte Lösung ( $c_{FS} = 1,0 \text{ g/l}$ ) der Suspension zugemischt. Um eine optimale Vermischung zu erreichen, wurde während dem Rühren mit einer Standbohrmaschine Flockungsmittel zugegeben. Um die gebildete Struktur möglichst wenig zu zerstören, wurde die geringstmögliche Drehzahl gewählt. Es ist zu beachten, dass einmal gebildete Flocken gegen Scherbeanspruchung, wie zum Beispiel beim Rühren oder Pumpen mittels Kreiselpumpe, irreversibel zerstört werden können.

#### **4.5.2 Ionisches Flockungsmittel**

(Donau PAC Venezia; Fa. Donau Chemie)

Im Gegensatz zu anionischen polymeren Flockungsmitteln, werden bei ionischen Flockungsmitteln die Ladungen der Körner geändert. Die Partikel, die eine negative Ladung tragen, und sich somit abstoßen, werden durch Zugabe positiv geladener Flockungsmittel (z.B. Aluminium- oder Eisensalze) neutralisiert bzw. umgeladen. Diese Teilchen treten zu größeren Flocken zusammen.

Dieses Flockungsmittel lag schon gebrauchsfertig vor und konnte unverdünnt verwendet werden. Die Wirksubstanz war hochbasisches Polyaluminiumchlorid ( $(\text{Al}(\text{OH})_x\text{Cl}_{3-x})_m$ ) und lag  $> 40 \text{ g/kg}$  ( $1,5 \text{ mol/kg}$ ) vor.

Das Flockungsmittel wurde mit 90 g Feststoff einer Bodenprobe ÖBB2 und mit einer Feststoffmassenkonzentration von 450 g/l in einem 500 ml Becherglas dosiert, zugegeben und sofort die Wirkung beobachtet, beschrieben und festgehalten. Das Ziel des Versuches war, die optimale Konzentration der Flockungsmittelzugabe empirisch zu ermitteln, sodass die Konsistenz der Suspension „puddingartig“ wird. Um eine optimale Vermischung zu erreichen, wurde während dem Rühren mit einer Standbohrmaschine Flockungsmittel zugegeben. Um die gebildete Struktur möglichst wenig zu zerstören, wurde die geringstmögliche Drehzahl gewählt.

## 4.6 Hydrozyklonversuche

Die Trennung im Hydrozyklon erfolgt nach der Korngröße. Deshalb wird dieses Aggregat als Klassierer oder zur Entwässerung eingesetzt. Der im Labor verwendete Keramikzyklon hat einen Durchmesser von 25,4 mm. Partikel, die größer als der Trennschnitt sind, werden im Unterlauf ausgetragen und die kleineren Partikel im Überlauf. Es kann ein „Sandprodukt“ im Unterlauf erzeugt werden, welches schon einen geringeren Wassergehalt als die Aufgabe hat.

Eine erfolgreiche Entwässerung mit dem Hydrozyklon wurde aufgrund des feinstkörnigen Feststoffes, der als Aufgabe diente, in Frage gestellt. Bei der Bodenprobe ÖBB2 und ÖBB4 beträgt der Anteil kleiner 63  $\mu\text{m}$  in etwa 95 %.

Das Fließschema der Laborschaltung ist in Abb. 4-9 grafisch dargestellt. Der Zyklon wurde im Kreislauf aus einem Pumpensumpf mit drei Liter Suspension mittels einer Kreiselpumpe beschickt. Der Über- und Unterlauf des Zyklons wurden wieder in den Pumpensumpf zurückgeleitet. Die Feststoffmassenkonzentration im 1. Versuch war 415,1 g/l und im 2. Versuch 165,0 g/l. Das Masseverhältnis der Bodenprobe ÖBB4 zu Bindemittel war 0,75 zu 0,25.

Beim Erreichen von konstanten Strömen wurden beim Über- und beim Unterlauf zeitkontrolliert im 1. Versuch drei Einzelproben gezogen und zu einer Sammelprobe vereint. Im 2. Versuch erfolgte eine zeitkontrollierte Beprobung. Die so erhaltenen vier Proben wurden nach dem Wiegen nass mit dem Rehwurmsieb bei 25  $\mu\text{m}$  abgesiebt. Die Fraktion größer 25  $\mu\text{m}$  wurde getrocknet und die Feststoffmasse bestimmt. Bei der Trübe kleiner 25  $\mu\text{m}$  wurde nach der Sedimentation des Feststoffes das Klarwasser abgezogen. Nach dem Homogenisieren der Trübe wurde der Feststoffgehalt bestimmt. Somit konnte auch die Masse des Feststoffes dieser Proben errechnet werden.

Die Korngrößenverteilung der kleiner 25  $\mu\text{m}$  Proben wurde mittels Sedimentationsanalyse nach Andreasen und dem Sedigraph 5120 der Firma micromeritics bestimmt.

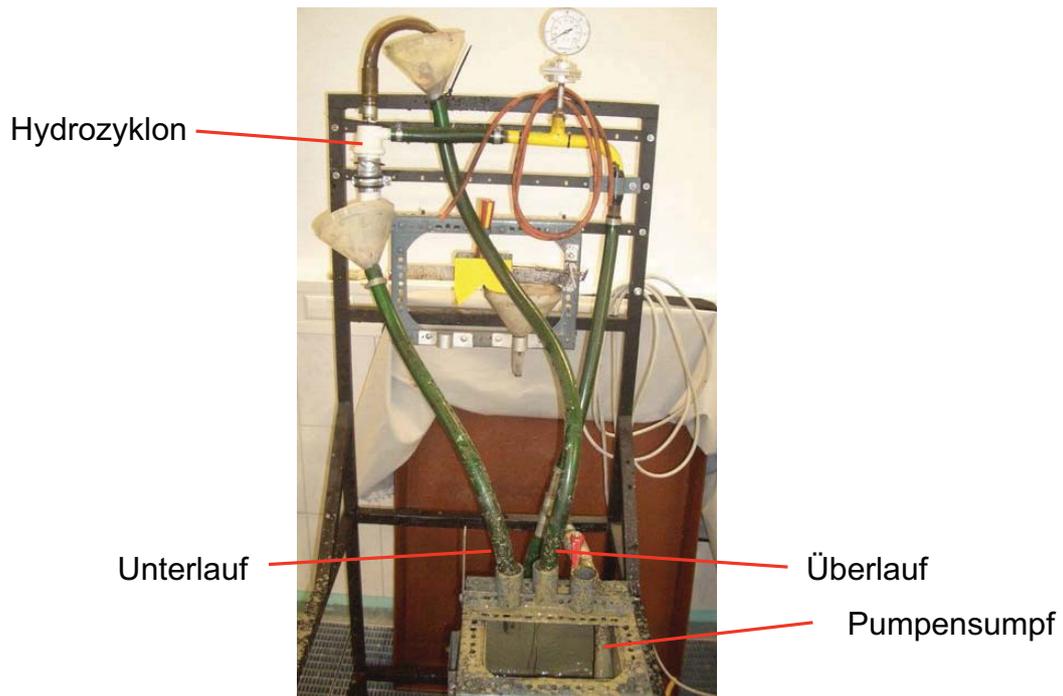


Abb. 4-8: Aufbau des Hydrozyklons im Labor

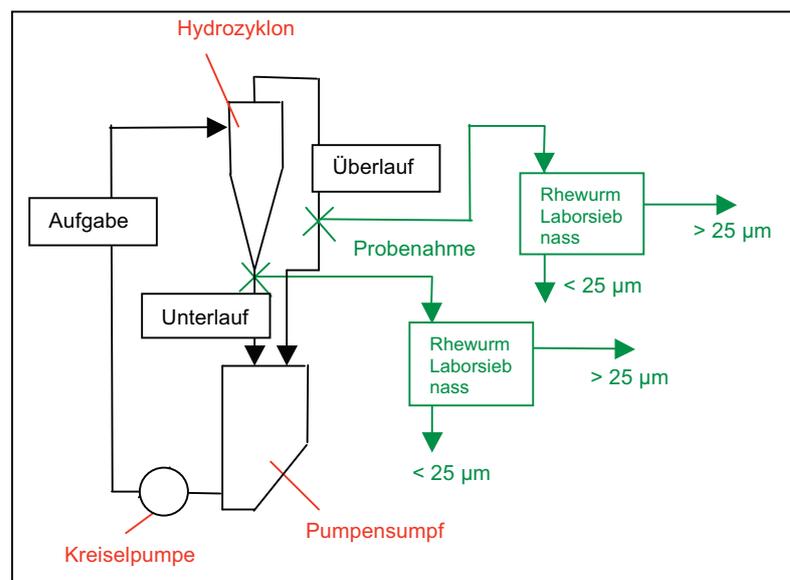


Abb. 4-9: Fließbild des in Kreislaufschtaltung betriebenen Hydrozyklons

## 4.7 Pumpenauswahl

Für die Auslegung, Dimensionierung und Wahl der Pumpen sind der Volumenstrom und die Feststoffmassenkonzentration entscheidende Faktoren. Die Boden-Bindemittel-Wasser-Suspension zeigt zusätzlich zeitlich veränderte Eigenschaften. Hierbei ist es wichtig, wie lange die Pumpbarkeit bei einer gewählten Feststoffmassenkonzentration gegeben ist.

Der DSV-Rücklauf bindet in den auf der Baustelle auftretenden Feststoffmassenkonzentrationen aufgrund der hohen W/Z-Werte nicht, wie es vom Baustoff Beton bekannt ist, ab. Es kommt vielmehr zu einem „Ansteifen“, welches zwar einen festen Kuchen darstellt, doch nach Einbringen von Scherkraft (Rühren, Kneten) wurde dies wieder flüssig (siehe Auswertung Sedimentationsversuche).

## 5 Versuchsauswertung

Jeder der angeführten Versuche wurde unabhängig von den anderen Untersuchungen durchgeführt, analysiert und ausgewertet.

### 5.1 Auswertung der Sedimentationsversuche

Eine Entwässerung des Rücklaufes senkt den W/Z-Wert. Erfolgt diese Entwässerung bis in etwa 6 Stunden nach dem Herstellen der Bindemittelsuspension, ist der neue W'/Z-Wert wirksam. Berechnet wird W' durch das Wasser der Einwaage, vermindert um das sich auf dem Sedimentkörper abgießbare Klarwasser. Das Bindemittel geht nicht in Lösung, doch aber die Sulfate und die Alkalien (siehe Beschreibung Bindemittel), und wird daher mit dem Klarwasser nicht mit ausgetragen, somit steht weniger Wasser der gleichen (stimmt nicht 100 %, weil Gips in Lösung geht) Zementmasse gegenüber. Es kommt zu einer Erhöhung der Festigkeitseigenschaften des Materials.

In der Aufbereitung wird der Wassergehalt einer Probe anders berechnet als zum Beispiel in der Geotechnik. Hier ist Vorsicht geboten beim Vergleich verschiedener Wassergehaltsangaben.

$$w = \frac{m_w}{m_t + m_w} \times 100 \quad (1)$$

w..... Wassergehalt [%]  
 m<sub>w</sub>... Wassermasse [g]  
 m<sub>t</sub>.... Feststoffmasse [g]  
 m<sub>f</sub>.... Feuchtmasse = m<sub>w</sub>+m<sub>t</sub> [g]

Zum Vergleich der Wassergehalt wie er in der Geotechnik berechnet wird. Diese Formel findet in der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung.

$$w = \frac{m_w}{m_t} \times 100$$

Die Klärleistung wird berechnet wie folgt:

$$\Psi = c \times v_e \quad (2)$$

Ψ..... flächenspezifischer Feststoffmassenstrom (Klärleistung) [kg/(m<sup>2</sup>\*s)]  
 c..... Feststoffmassenkonzentration [kg/m<sup>3</sup>]  
 v<sub>e</sub>..... Endfallgeschwindigkeit (Klärgeschwindigkeit) [m/s]

Eine Regressionsgerade wurde dem linearisierenden Anfangsbereich der Absetzkurven hinzugefügt, wobei die Steigung dieser die Endfallgeschwindigkeit ist.

Die Klärleistung dient dazu, um die optimale Feststoffmassenkonzentration der Aufgabe ermitteln zu können. Die Klärleistung sowie die Klärgeschwindigkeit sind zwei Standardwerte, die für die Auslegung und Dimensionierung von Eindickern verwendet werden.

Die benötigte Klärfläche kann aus der Klärgeschwindigkeit und dem Trübevolumenstrom bei gleicher Feststoffmassenkonzentration berechnet werden.

$$A = \frac{\dot{V}_{Tr}}{v_e} \quad (3)$$

A .... Klärfläche [m<sup>2</sup>]

$\dot{V}_{Tr}$  ... Trübevolumenstrom [m<sup>3</sup>/h]

$v_e$ ..... Endfallgeschwindigkeit (Klärgeschwindigkeit) [m/h]

Wenn der Körper spaltbar war, wurde ein Viertel der Sedimentationsprobe für „Handknetversuche“ verwendet, um die Konsistenz nach ÖNORM B 4400-1: 2010-03-15 zu bestimmen.

Manche Sedimentationskörper wurden mit einem Hydraulikstempel aus den Acrylglasrohren gedrückt und mussten mit einem Messer geviertelt werden. Diese Körper sind auch beim Schneiden in Stücke zerbrochen. Nach einer ersten makroskopischen Beobachtung war die Vermutung eines festen Probekörpers gegeben. Die Stücke konnten mit der Hand in weitere Stücke zerbrochen werden. Trotzdem wurden diese Viertel nach drei- bis achtmaligen Kneten in der Hand wieder flüssig. Diese zuerst festen Stücke quollen während dem Pressen in der Faust zwischen den Fingern hindurch. Nach dem Knetversuch wurden die Proben auf eine glatte Fläche gelegt. Unter ihrer Eigenmasse haben diese begonnen zu fließen. Dies ist nach Norm die Definition für eine flüssige Konsistenz eines bindigen Bodens.

Da die Wiederverfestigung nicht ident mit der Ausgangsfestigkeit ist, kann diese Fähigkeit nur als teilweise thixotrope Eigenschaft beschrieben werden.

Erklärte wird dies damit, dass die echten CSH Phasen eine nadelige und verfilzende Struktur im Zuge des Abbindevorganges des Bindemittels ausbilden. Durch das Kneten werden diese teilweise zersört und nicht neu gebildet.

## 5.2 Auswertung der Filtrationsversuche

Der erste Versuch wurde mit einer 100 % Bodenprobe (ÖBB2) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 450 g/l durchgeführt. Die Aufgabe hatte einen Wassergehalt von 65,1 %.

Das Kuchenvolumen berechnet sich aus der Kuchenhöhe multipliziert mit der Druckfiltrationszellenfläche

$$V_k = A_z \times h_k \quad (4)$$

$V_k$  .... Kuchenvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$h_k$  .... Kuchenhöhe [cm]

$A_z$  .... Zellenfläche  $(7,8/2)^2 \times \pi = 47,8$  [ $\text{cm}^2$ ]

Das Feststoffvolumen wird anhand der eingewogenen Feststoffmasse dividiert durch die Feststoffdichte berechnet.

$$V_T = \frac{m_T}{\rho_T} \quad (5)$$

$V_T$  .... Feststoffvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$m_T$  .... Feststoffmasse [g]

$\rho_T$  .... Feststoffdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

Das Porenvolumen wird ermittelt durch die Differenz zwischen Kuchenvolumen und Feststoffvolumen. Diese Poren können mit Wasser oder mit Luft gefüllt sein.

$$V_P = V_k - V_T \quad (6)$$

$V_P$  .... Porenvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$V_T$  .... Feststoffvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$V_k$  .... Kuchenvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$$V_W = \frac{m_T \times \frac{w}{100}}{1 - \frac{w}{100}} \quad (7)$$

$V_W$  .... Wasservolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$m_T$  .... Feststoffmasse [g]

$w$  ..... Wassergehalt [%] (Berechnung:  $w = \frac{m_w}{m_w + m_T} \times 100$  )

Die Sättigungszahl gibt an, zu wieviel Prozent die Poren mit Wasser gefüllt sind.

$$S_R = \frac{V_P}{V_W} \times 100 \quad (8)$$

$S_R$  .... Sättigungszahl [%]

$V_P$  .... Porenvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$V_W$  .... Wasservolumen [ $\text{cm}^3$ ]

Die Porosität des Filterkuchens kann bestimmt werden, durch das Porenvolumen dividiert durch das Kuchenvolumen.

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_K} \quad (9)^{[2]}$$

$\varepsilon$  ..... Porosität der Kornschicht [1]  
 $V_p$  ..... Porenvolumen [cm<sup>3</sup>]  
 $V_K$  ..... Kuchenvolumen [cm<sup>3</sup>]

Der Feststoffgehalt des Filterkuchens wird berechnet durch die Feststoffmasse (Bindemittel + Boden) dividiert durch die Gesamtmasse des Filterkuchens.

$$g_F = \frac{m_T}{m_T + m_w} \times 100 \quad (10)$$

$g_F$  .... Feststoffgehalt [%]  
 $m_T$  .... Feststoffmasse [g]  
 $m_w$  .... Wassermasse [g]

Die Filterleistung wird in der Aufbereitung berechnet durch den Filtratvolumenstrom dividiert durch die Filtrationszeit.

$$\dot{q} = \frac{V_F}{t \times A_Z} \dots (11)$$

$\dot{q}$  .... Filterleistung [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s]  
 $t$  ..... Filtrationszeit [sec]  
 $A_Z$  .... Zellenfläche  $(7,8/2)^2 \times \pi = 47,8$  [cm<sup>2</sup>]

Die Durchströmung des Filterkuchens geschieht im Allgemeinen laminar. Deshalb gilt für den spezifischen Durchflusswiderstand das Gesetz von Darcy<sup>[2]</sup>. Der Widerstand des Filtermediums wird nur bis zu einigen mm Filterkuchenhöhe berücksichtigt und kann darüber aufgrund des geringen Einflusses vernachlässigt werden.

$$r = \frac{\Delta p \times A}{\frac{V_F}{t} \times \eta \times h_k} \quad (12)^{[2]}$$

$r$  ..... spezifischer Durchflusswiderstand [1/m<sup>2</sup>]  
 $\Delta p$  ..... Druckdifferenz [Pa]  
 $\eta$  ..... dynamische Viskosität (Wasser 1,00 mPa\*s)  
 $h_k$  ..... Filterkuchenhöhe [m]  
 $A$  ..... Filterfläche [m<sup>2</sup>]  
 $V_F$  ..... Filtratvolumen [m<sup>3</sup>]  
 $t$  ..... Filtrationszeit [s]

Der spezifische Durchflusswiderstand dient zur Auslegung für Filtrationseinrichtungen, zum Beispiel zur Dimensionierung einer Kammerfilterpresse. Die Formel (12) muss dazu auf A umgeformt werden.

Als Rüstzeit wird jene Zeit bezeichnet die zum Öffnen, Räumen und Schließen während eines Zykluses der Kammerfilterpresse benötigt wird. Hierfür wurden von Dr. Böhm und dem Autor folgende Annahmen getroffen. Für die Rüstzeit wurde ein Aufschlag von 50 % der Filtrationszeit gewählt. Es liegt beim Befüllen der Kammern nicht sofort ein Druck von sieben bar an, deshalb wird die Filtrationszeit zusätzlich um 20 % erhöht. Zur Berechnung der Dauer eines Zykluses wird somit die Filtrationszeit mit dem Faktor 1,7 multipliziert.

### 5.3 Auswertung der Rahmenscherversuche

Der erste entstandene Filterkuchen wurde in Folie verpackt und Herrn Dr. mont. Pittino vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering in Leoben zur Bestimmung der Scherparameter übergeben.

Sechs Tage nach Herstellung des ersten Filterkuchens wurde ein Rahmenscherversuch durchgeführt.

Die weiteren Versuche wurden unmittelbar nach der Herstellung der Filterkuchen durchgeführt. Für die weitere Versuchsdurchführung wurde festgelegt, sowohl an gestörten als auch ungestörten Proben durchgeführt werden, und ihre Werte getrennt betrachtet werden. Wobei für den ungestörten Versuch jeweils ein neuer Filterkuchen nötig war. Die durch den Rahmenscherversuch abgescherten Proben wurden als gestörte Proben folgendermaßen wiederverwendet. Der gestörte Versuchskörper wurde zusammengeknetet, auf einer glatten Unterlage flach gedrückt und mit dem Ausstecher wurde wieder ein Versuchskörper mit den definierten Abmessungen ausgestochen. Bei den gestörten Proben konnten dadurch mit einem Versuchskörper mehrere, in der Regel drei, Versuche durchgeführt werden. Der Wassergehalt war bei der Versuchsdurchführung (Kneten, Ausstechen, Abscheren) nicht konstant.

Der erste Rahmenscherversuch erfolgte durch Dr. mont. Pittino. Die weiteren Versuche wurden selbstständig, nach der Unterweisung durch Dr. mont. Pittino, durchgeführt.

Die Normalspannung  $\sigma$  wurde durch eine Auflast von 51,8; 154,2 und 255,6 N auf die Probenfläche von 50x50 mm variiert.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13)$$

$\sigma$  .... Normalspannung [N/mm<sup>2</sup>]

F .... Kraft (Auflast) [N]

A .... Druckfläche [mm<sup>2</sup>]

Nach Aufbringen der Auflast wurde an der Spindel händisch gleichmässig gedreht. Die Dauer der Scherversuche lag jeweils unter 1 Minute. Auf der Federwaage konnte die Schubkraft abgelesen werden. Somit konnte jeder Normalspannung eine Schubspannung  $\tau$  zugeordnet werden. Die Scherfläche hat 50x50 mm betragen.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (14)$$

$\tau$  .... Schubspannung [N/mm<sup>2</sup>]

F .... Schubkraft [N]

A .... Scherfläche [mm<sup>2</sup>]

Durch das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium konnte der unkonsolidierte innere Reibungswinkel, sowie die unkonsolidierte Kohäsion rechnerisch bestimmt werden. Gekennzeichnet werden die unkonsolidierten Werte durch den Index „u“.

$$\tau = \sigma * \tan(\varphi_u) + c_u \quad (15)^{[16]}$$

$\tau$  .... Schubspannung [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma$  .... Normalspannung [N/mm<sup>2</sup>]

$\varphi_u$  .... unkonsolidierter Reibungswinkel [°]

$c_u$  ..... unkonsolidierte Kohäsion [N/mm<sup>2</sup>]

## **5.4 Auswertung der Flockungsmittelversuche**

### **5.4.1 Versuchsauswertung des anionischen polymeren Flockungsmittels**

(Sedipur AF 403)

Die Feststoffmassenkonzentration war in den Versuchen 450 g/l und das Probenvolumen hat 200 cm<sup>3</sup> betragen. Der Wassergehalt wurde nach Formel (1) berechnet. Die Masse die von der 0,1 %igen SedipurLösung zugegeben werden musste, berechnet sich aus der Feststoffmassenkonzentration multipliziert mit dem Probenvolumen, der gewählten Konzentration und zwei Umrechnungsfaktoren.

$$m_s = c \times v_p \times k \times 10^{-6} \times 10^3 \quad (16)$$

$m_s$  ..... 0,1 %ige SedipurLösungszugabe [g]

$c$  ..... Feststoffmassenkonzentration, 450 [g/l]

$v_p$  ..... Probenvolumen, 0,2 [dm<sup>3</sup>]

$k$  ..... Konzentration [ppm]

$10^{-6}$  ... Umrechnungsfaktor der Konzentrationsangabe von ppm in eine dimensionslose Größe

$10^3$  .... Umrechnungsfaktor der 100 %igen SedipurLösung zur verwendeten 0,1 %igen Lösung

### **5.4.2 Versuchsauswertung des ionischen Flockungsmittels**

(Donau PAC Venezia)

Der Versuch wurde durchgeführt in einer 200 ml Boden (ÖBB2, schluffig/sandig) – Wasser – Suspension in einem 500 ml Becherglas. Die Feststoffmassenkonzentration hat 450 g/l betragen.

Der Versuch führte zu keinem Erfolg, somit gibt es auch keine Berechnungen der Ergebnisse.

## **5.5 Auswertung der Hydrozyklonversuche**

Der Massestrom wird berechnet anhand der Probemasse der Trübe dividiert durch die Probenahmezeit.

$$\dot{M} = \frac{m_{Pr}}{t} \quad (17)$$

$\dot{M}$  ... Massestrom [g/sec]

$m_{Pr}$ ... Probenmasse der Trübe [g]

$t$  ..... Probenahmezeit [sec]

Eine Teilprobe der sich in Trübe befindlichen < 25 µm Fraktion wird mit der Pipette entnommen. Der Feststoff wird durch Trocknung im Trockenschrank bei 105°C bestimmt. Wie in Formel (10) beschrieben, wird für die Berechnung des Feststoffgehaltes die Masse des Feststoffes dividiert durch die mit der Pipette entnommene Trübemasse.

Die Feststoffmasse einer Trübe wird berechnet anhand der Masse der Trübe multipliziert mit dem Feststoffgehalt der Trübe dividiert durch 100.

$$m_T = m_{Trübe} * \frac{g_{FS}}{100} \quad (18)$$

$m_T$  ..... Feststoffmasse [g]

$m_{Trübe}$ ... Trübemasse [g]

$g_{FS}$  ..... Feststoffgehalt [%]

$$r_{m,j} = \frac{m_j}{m_o} \times 100 \quad (19)$$

$r_{m,j}$  ..... Masseausbringen [%]

$m_j$  ..... Überlauf-/Unterlaufmasse [g]

$m_o$  ..... Aufgabemasse [g]

$$c_{FS} = \frac{m_T}{V_{Trübe}} \quad (20)$$

$c_{FS}$  ..... Feststoffmassenkonzentration [g/l]

$m_T$ ..... Feststoffmasse [g]

$V_{Trübe}$ ... Trübevolumen [l]

Die Teilungszahl ist definiert als das Verhältnis des Inhaltes der Merkmalsklasse i im Produkt j zum Inhalt dieser Merkmalsklasse i in der Aufgabe.

Im Weiteren wird in der Aufbereitung aus der Berechnung der Teilungszahlen eine Teilungskurve ermittelt und aus dieser kann die Trennschnittlage ermittelt werden. Weiters kann daraus der Ecárt Probable abgelesen werden, welcher ein Maß für die Trennschärfe ist. In diesem Versuch war die Korngrößenverteilung der Fraktion < 25 µm nicht bestimmbar. Somit konnte keine Teilungskurve und auch nicht die Trennschärfe bestimmt werden.

Die sonst benötigten Formeln sind in der Bilanztafel mit angeführt. Der Gehalt berechnet sich aus der Masse, von der der Gehalt bestimmt werden soll, wie z.B. Wasser- oder Feingutmasse, dividiert durch die Gesamtmasse der Probe, wie z.B. Wasser- und Feststoffmasse oder Feingut- und Grobgutmasse addiert.

## **5.6 Auswertung der möglichen Pumpen**

Der DSV-Rücklauf bindet in den auf der Baustelle auftretenden Feststoffmassenkonzentrationen aufgrund der hohen W/Z-Werte nicht, wie es vom Baustoff Beton bekannt ist, ab. Es kommt vielmehr zu einem „Ansteifen“, welches ein freies Zufließen zum Ansaugstutzen verhindert. Sobald es zur Bildung eines Hohlraumes kommt, sinkt der Ansaugdruck der Pumpe. Es kann zu Kavitation kommen. Dies erhöht den Verschleiß der Pumpe bis zu einer Zerstörung derselben. Die Pumpbarkeit wäre somit nicht mehr gegeben aufgrund eines ausfallenden Zuflusses. Ein Ausfall der Pumpe würde den Stillstand des Entwässerungssystem bedeuten sowie einen Stillstand des DSV zur Folge haben, denn der Rücklauf aus den Zwischenbecken kann nicht mehr abgezogen werden und somit kann kein weiteres Rücklaufvolumen in den Zwischenbecken aufgenommen werden.

Nach Recherche der Fachliteratur und Gesprächen mit Prof. Dr. Jaberg, Spezialist für Pumpen, des Institutes für hydraulische Strömungsmaschinen an der Technischen Universität Graz sowie, Gesprächen mit Pumpenspezialisten aus der Industrie (Roman van Ommen, Geschäftsführer FLSmidth Krebs GmbH / Hr. Michael Panholzer, Laborleiter, Andritz Graz / Franz Hammer, ITT-Austria GmbH, (unter anderem Schmutzwasserpumpen, Kreiselpumpen) / Helmar Friedl, Geschäftsführer seepex (Exzentrerschneckenpumpen) / Mag. J. Eibinger, Putzmeister, (Kolbenpumpen)) hatte sich herausgestellt, dass es keinen Standardversuch gibt, mit dem die Pumpbarkeitsgrenze klar festgesetzt werden kann. Es wurde darauf hingewiesen, dass ein Versuch vor Ort mit dem gewählten Pumpentyp und der vorgesehenen Suspension in der festgesetzten Feststoffmassenkonzentration durchgeführt werden muss. Das bedeutet, es muss empirisch ermittelt werden.

## 6 Ergebnisse der Versuche

### 6.1 Ergebnisse der Sedimentationsversuche

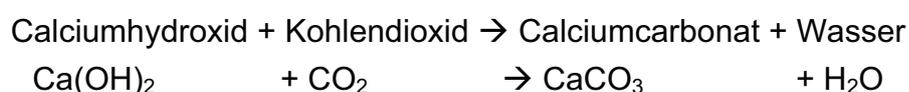
Die Ergebnisse der Analyse der Klarwasser-Rückstellproben sind in Tab. 5-1 angeführt. Wenn genug Klarwasser in der Probe aus der Serie mit der Feststoffmassenkonzentration von 300 g/l vorhanden war, wurde dieses für die Versuche gewählt. Wenn hierfür zu wenig Klarwasser vorhanden war, wurde der pH-Wert der 150 g/l Probe bestimmt.

Zu erkennen ist, dass es bei Zugabe der sandigen Probe ÖBB1 zu einer geringeren pH-Wert Erhöhung kam als bei den schluffigen/sandigen Stillwassersedimentproben ÖBB2 und ÖBB4. Sobald geringe Mengen Bindemittel der Suspension zugegeben wurden, kam es zu einem sprunghaften Anstieg des pH-Wertes von etwa 8 in den basischen Bereich zwischen 12,0 und 12,9. Dies hat zur Folge, dass jegliches anfallende Wasser neutralisiert werden muss.

Tab. 6-1: pH Wertmessungsergebnisse des abgießbaren Klarwassers der Sedimentationsversuche sowie der Probenahmen des Anmachwassers

pH-Wert-Messung vom 29.09.2011								
	100% Boden	75% Boden	50% Boden	25% Boden				
ÖBB 1	300 g/l	<b>7,8</b>	300 g/l	<b>12,8</b>	300 g/l	<b>12,8</b>	300 g/l	<b>12,9</b>
ÖBB 2	300 g/l	<b>8,1</b>	150 g/l	<b>12,0</b>	150 g/l	<b>12,8</b>	150 g/l	<b>12,9</b>
ÖBB 4	300 g/l	<b>8,3</b>	150 g/l	<b>12,7</b>	150 g/l	<b>12,8</b>	150 g/l	<b>12,9</b>
100% Zement   300 g/l   <b>12,8</b>								
							Probenahme und pH-Wert-Messung:	
1.Probenahme Ortswassernetz St.Kanzian/Klopeinersee						<b>7,4</b>	13.07.11	
2.Probenahme Ortswassernetz St.Kanzian/Klopeinersee						<b>7,5</b>	29.09.11	

Nach Herstellerangaben der Firma „Linde Gas“, siehe dazu auch Tab. 6-2 werden zur Neutralisierung von einem Kubikmeter Klarwasser 440 Gramm Kohlendioxid benötigt damit der pH-Wert von etwa 12,0 auf 8,5 gesenkt wird. Damit verbunden ist eine zusätzliche Feststofffracht von einem kg/m<sup>3</sup>, die sich aus der chemischen Reaktion ergibt. Calciumcarbonat fällt als weiße, feinkörnige (µm-Korngrößenbereich) Partikel aus. Welche Auswirkungen diese Feststofffracht und der gesenkte pH-Wert auf die Sedimentation und die Filtration haben, wenn die Neutralisierung vor den genannten Apparaten durchgeführt wird, muss in weiteren Versuchen untersucht werden.



Gelöst in Wasser wirkt Kohlendioxid als Kohlensäure und reduziert den pH-Wert. Je höher der Druck in der Leitung und je geringer die Temperatur der Suspension ist, desto leichter geht das Kohlendioxid in Lösung zu Kohlensäure.

Wasser + Kohlendioxid → Kohlensäure



Die Kosten für den Einsatz von Kohlendioxid sind auf Anfrage bei der Firma Linde Gas mit 120 Euro pro Tonne  $\text{CO}_2$ , exklusive der Mietgebühr für den Tank auf der Baustelle, zu berechnen. Für die mobile Variante mit gebündelten Flaschen sind Kosten von ein Euro pro Kilogramm Kohlendioxid zu berechnen. Diese erhöhten Kosten sind auf den größeren logistischen Aufwand zurückzuführen.

Tab. 6-2: Stöchiometrische Umrechnung zur Neutralisation von ungepufferter Natronlauge mit unterschiedlichen Säuren auf pH 8,5 (HCL 30%ig;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  96 %ig;  $\text{HNO}_3$  65 %ig). Tabelle zur Verfügung gestellt von Fa. Linde Gas GmbH

ph	NaOH [kg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	HCl [kg/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	HNO <sub>3</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
10,0	0,004	0,004	0,012	0,005	0,01
10,5	0,013	0,014	0,038	0,016	0,031
11,0	0,04	0,044	0,12	0,05	0,1
11,5	0,13	0,14	0,38	0,16	0,31
12,0	0,4	0,44	1,22	0,51	0,97
12,5	1,3	1,39	3,84	1,6	3,1
13,0	4,0	4,4	12,2	5,1	9,7
13,5	12,6	13,9	38,4	16,1	30,7
14,0	40	44	122	51	97

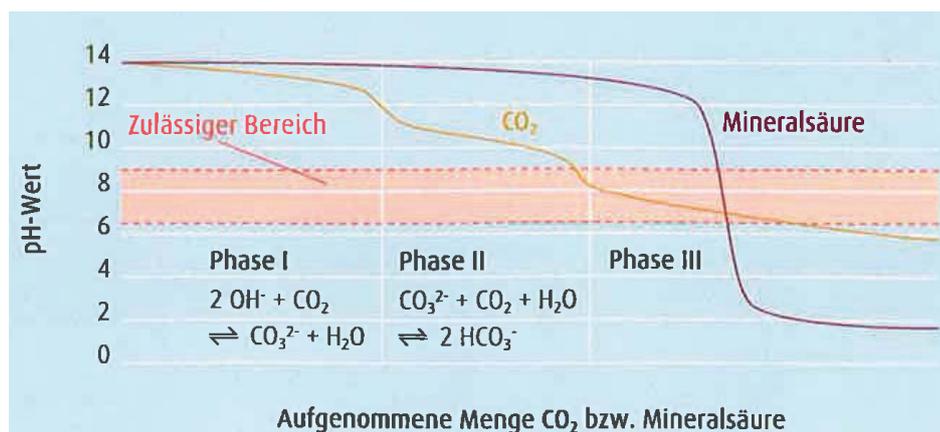


Abb. 6-1: Neutralisationskurven von Natronlauge mit Kohlendioxid und einer Mineralsäure. Diagramm zur Verfügung gestellt von Fa. Linde Gas GmbH

Wie aus Abb. 6-1 zu erkennen kommt es nicht zu einer Übersäuerung mit Kohlendioxid des Klarwassers aufgrund der flacheren Neutralisierungskurve.

Kohlendioxid ist nicht als wassergefährlicher Stoff eingestuft und es kommt zu keiner Korrosion der Anlagenbauteile.

Es wurde die Wassertemperatur vor und nach neun Minuten Mischen mit dem Eirich Intensivmischer mit dem „Präzisionstemperaturmessgerät P300 W Temp der Firma TFA-Dostmann“ bestimmt. Die Starttemperatur der Wasser-Boden-Suspension hat 21,6°C und die Endtemperatur nach neun Minuten Rühren hat 29,6°C betragen.

Bei Annahme einer mittleren Feststoffmassenkonzentration von 300 g/l und einen Trübevolumenstrom von 50 m<sup>3</sup>/h bei einer Feststoffzusammensetzung von 25 % Bindemittel und 75 % Boden kann in die Formel (3) eingesetzt werden und die benötigte Klärfläche berechnet werden.

Tab. 6-3: Berechnungsbeispiel der nötigen Klärfläche

Bodenart	Klärgeschwindigkeit $v_e$ [m/h]	Trübevolumenstrom $\dot{V}_{Tr}$ [m <sup>3</sup> /h]	Klärfläche A [m <sup>2</sup> ]
ÖBB1 (sandig)	0,6840	50	73
ÖBB2 (schluffig)	0,0036	50	13.889
ÖBB4 (schluffig)	0,0032	50	15.432

In Tab. 6-3 ist zu erkennen, dass für die Sedimentation der Suspensionen der Bodenart ÖBB2 und ÖBB4 sehr große Flächen nötig wären. Die Korngrößenverteilung der Bodenarten zeigt, dass die Probe ÖBB2 und ÖBB4 95 % kleiner 100 µm ist. Die Bodenart ÖBB1 hat 50 % kleiner 100 µm. Je feinkörniger die Partikel sind, desto geringer ist deren Sinkgeschwindigkeit, und somit sind größere Flächen zur Klärung notwendig.

Die Klärleistung  $\Psi$  [t/m<sup>2</sup>d] der einzelnen Versuche war um zirka das 3-4 fache bei der Bodenprobe ÖBB1 (sandig) höher als bei den Bodenproben ÖBB2,4 (schluffig). In Formel (2) ist zu erkennen, dass die Klärleistung zur Klärgeschwindigkeit proportional ist.

In den Abb. 6-4,7,11 ist in der Abszisse der Feststoffgehalt in Prozent und in der Ordinate der effektive  $W'/Z$ -Wert eingetragen. Die Zusammensetzung der einzelnen Untersuchungen ist der Legende im Diagramm zu entnehmen. Versuchskörper die mittels des Knetversuches als fest/halbfest charakterisiert wurden, sind grün und die als flüssig/breilig bestimmt wurden, rot dargestellt.

Die Konsistenz nach dem Kneten ist bei den Bodenproben ÖBB2,4 ab  $W'/Z$ -Wert kleiner gleich 2,0 halbfest beziehungsweise fest. Dieser Wert wurde nur in

Zusammensetzungsvarianten erreicht, die nicht häufig vor Ort auftreten. Es müssten hierzu mindestens 75 % Bindemittel in der Suspension vorliegen oder die Feststoffmassenkonzentration 750 g/l betragen und die Zusammensetzung der Probe müsste aus mindestens 50 % Bindemittel bestehen. Nachdem die eben angeführten Faktoren nicht als realistisch erachtet werden, muss davon ausgegangen werden, dass nach einer Sedimentation die Sedimentationskörper flüssig oder nach einer gewissen Scherkraft die auf die Probe einwirkt flüssig sein werden.

### **6.1.1 Ergebnisse der Probe ÖBB1**

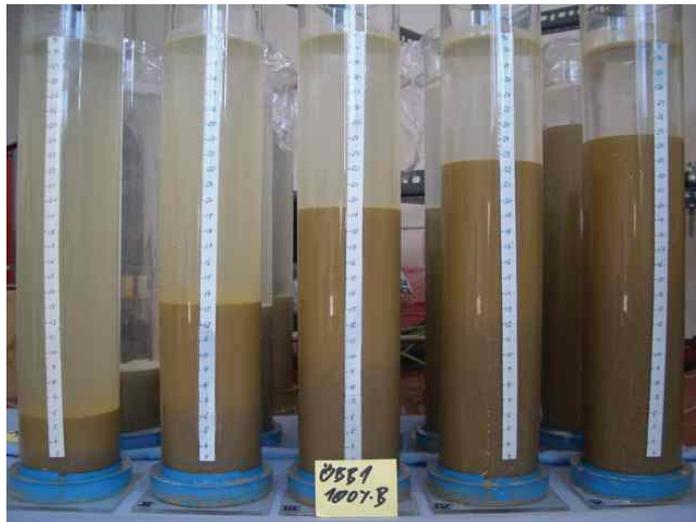


Abb. 6-2: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB1 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l)



Abb. 6-3: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB1 und 50% Zement (Rolnjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.

Tab. 6-4: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB1

Z/B	Feststoffmassenkonz. cFS [g/l]	150	300	450	600	750
Ver- hältnis	Feststoffgehalt gFS [%]	13,7	25,1	34,8	43,2	50,5
	Trübedichte $\rho$ Trübe [g/cm <sup>3</sup> ]	1,10	1,20	1,29	1,39	1,49
0/100	Grenzschicht [cm]	4,4	8,3	12,4	15,7	19,2
0/100	Klarwasser/Sediment [%]	604,5	273,5	150,0	97,5	61,5
0/100	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	161,4	146,5	145,5	133,2	128,1
0/100	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0/100	w [%]	24,75	23,16	23,00	21,47	20,71
0/100	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	2,488	2,411	1,516	1,192	1,037
0/100	W'/Z	-	-	-	-	-
0/100	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG
0/100	Schneidbarkeitsprüfung:	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig
25/75	Grenzschicht [cm]	6,8	11,9	17,0	19,7	22,6
25/75	Klarwasser/Sediment [%]	355,9	160,5	82,4	57,4	37,2
25/75	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	308,9	257,8	240,7	196,1	171,8
25/75	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	17,36	5,79	3,36	2,82	0,26
25/75	w [%]	35,08	32,28	32,50	30,07	33,86
25/75	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	8,865	5,003	2,994	2,436	2,268
25/75	W'/Z	4,5	3,7	3,5	2,8	2,5
25/75	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG
25/75	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer +	Messer +	Messer +	Messer	Messer
50/50	Grenzschicht [cm]	6,8	17,2	17,2	20,5	27,8
50/50	Klarwasser/Sediment [%]	355,9	80,2	80,2	51,2	11,5
50/50	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	313,9	423,5	249,0	212,0	238,4
50/50	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	15,10	4,09	0,0	0,0	0,0
50/50	w [%]	49,69	41,91	31,07	45,93	43,32
50/50	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	7,608	2,799	1,827	1,452	0,259
50/50	W'/Z	2,2	3,0	1,8	1,5	1,7
50/50	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	BREIIG	FEST (HART)	FEST (HART)
50/50	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer -	Messer -	Messer -	Meißel	Meißel
75/25	Grenzschicht [cm]	7,0	12,1	17,2	21,4	25,5
75/25	Klarwasser/Sediment [%]	342,9	156,2	80,2	44,9	21,6
75/25	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	331,4	272,9	253,4	229,7	214,3
75/25	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	5,91	0,0	0,0	0,0	0,0
75/25	w [%]	52,00	35,34	40,32	35,56	38,97
75/25	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	4,108	1,374	0,972	0,933	0,778
75/25	W'/Z	1,6	1,3	1,2	1,1	1,0
75/25	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)
75/25	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer -	Meißel	Meißel	Meißel -	Meißel -
100/0	Grenzschicht [cm]	6,9	12,3	18,2	22,3	27,3
100/0	Klarwasser/Sediment [%]	349,3	152,0	70,3	39,0	13,6
100/0	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	330,6	283,8	278,6	247,9	240,8
100/0	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100/0	w [%]	41,20	41,19	38,99	37,91	38,11
100/0	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	3,020	1,011	0,622	0,570	0,454
100/0	W'/Z	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8
100/0	Konsistenz (nach Kneten):	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)
100/0	Schneidbarkeitsprüfung:	nicht spalt-/schneidbar mit den ausgewählten Hilfsmittel				

Legende für Schneidbarkeitsprüfung, durchgeführt an einer ungestörten Probe

Messer +	leicht	mit dem Hilfsmittel schneidbar
Messer	mittel	
Messer -	schwer	
zur Auswahl stehen: Gummilippe, Messer, Meißel		

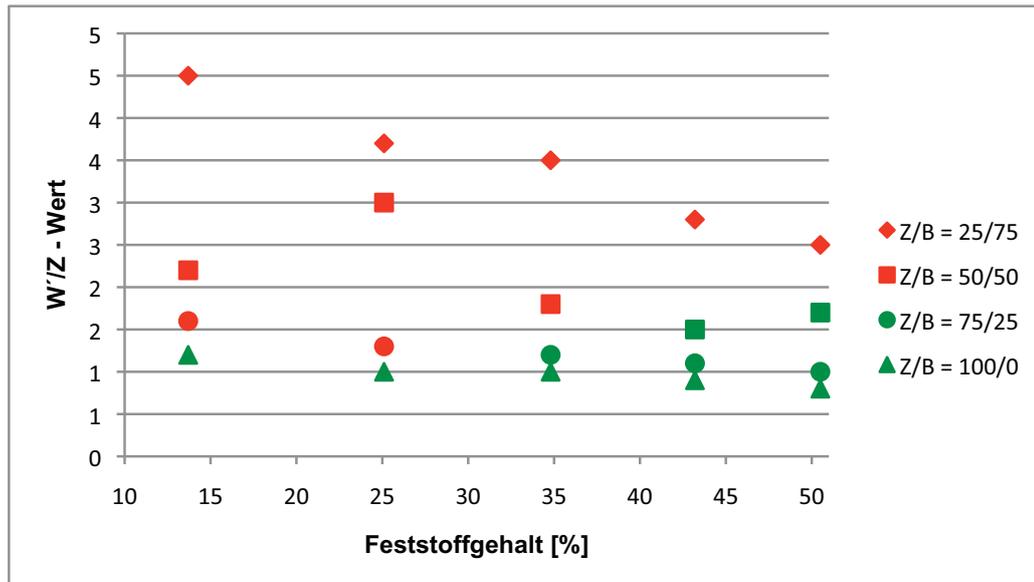


Abb. 6-4: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des  $W'/Z$ -Wertes und des Feststoffgehaltes

### 6.1.2 Ergebnisse der Probe ÖBB2



Abb. 6-5: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB2 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l) 100 %



Abb. 6-6: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB2 und 50% Zement (Rolnjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.

Tab. 6-5: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB2

Z/B	Feststoffmassenkonz. cFS [g/l]	150	300	450	600	750
Ver-	Feststoffgehalt gFS [%]	13,7	25,1	34,8	43,2	50,5
hältnis	Trübedichte $\rho_{Trübe}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,10	1,20	1,29	1,39	1,49
0/100	Grenzschicht [cm]	7,7	13,5	19,6	24,8	27,7
0/100	Klarwasser/Sediment [%]	302,6	129,6	58,2	25,0	11,9
0/100	$V_{Wasser}/V_{Feststoff}$ Sediment [%]	357,4	301,0	288,1	268,3	229,1
0/100	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0/100	w [%]	52,96	50,95	47,15	46,83	43,54
0/100	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	0,246	0,104	0,019	0,036	0,005
0/100	W'/Z	-	-	-	-	-
0/100	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG
0/100	Schneidbarkeitsprüfung:	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig
25/75	Grenzschicht [cm]	20,2	29,7	30,8	30,9	31,0
25/75	Klarwasser/Sediment [%]	53,5	4,4	0,6	0,3	0,0
25/75	$V_{Wasser}/V_{Feststoff}$ Sediment [%]	1114,6	792,9	517,3	364,5	272,8
25/75	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	27,93	2,58	0,0	0,0	0,0
25/75	w [%]	79,60	72,23	63,32	55,41	48,10
25/75	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	0,505	0,026	0,012	0,010	0,000
25/75	W'/Z	16,0	11,3	7,4	5,2	3,9
25/75	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	BREIIG
25/75	Schneidbarkeitsprüfung:	Gummilippe	Messer +	Messer +	Messer	Messer
50/50	Grenzschicht [cm]	16,2	27,8	30,2	30,8	30,9
50/50	Klarwasser/Sediment [%]	91,4	11,5	2,6	0,8	0,3
50/50	$V_{Wasser}/V_{Feststoff}$ Sediment [%]	886,1	746,1	512,8	367,9	276,2
50/50	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	17,39	14,10	0,0	0,0	0,0
50/50	w [%]	73,36	68,08	60,73	52,78	45,63
50/50	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	1,335	0,078	0,031	0,010	0,006
50/50	W'/Z	6,3	5,3	3,6	2,6	2,0
50/50	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	BREIIG	HALBFEST
50/50	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer +	Messer	Messer	Messer -	Meißel
75/25	Grenzschicht [cm]	12,0	23,9	29,1	29,9	30,7
75/25	Klarwasser/Sediment [%]	158,3	29,7	6,5	3,7	1,0
75/25	$V_{Wasser}/V_{Feststoff}$ Sediment [%]	639,6	636,5	497,8	360,7	278,4
75/25	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	10,89	11,71	0,0	0,0	0,0
75/25	w [%]	70,87	62,76	57,04	50,01	43,87
75/25	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	1,646	0,233	0,078	0,104	0,032
75/25	W'/Z	3,0	3,0	2,3	1,7	1,3
75/25	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	HALBFEST	FEST (HART)
75/25	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer	Messer	Messer -	Meißel	Meißel -
100/0	Grenzschicht [cm]	6,9	12,3	18,2	22,3	27,3
100/0	Klarwasser/Sediment [%]	349,3	152,0	70,3	39,0	13,6
100/0	$V_{Wasser}/V_{Feststoff}$ Sediment [%]	330,6	283,8	278,6	247,9	240,8
100/0	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100/0	w [%]	41,20	41,19	38,99	37,91	38,11
100/0	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	3,020	1,011	0,622	0,570	0,454
100/0	W'/Z	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8
100/0	Konsistenz (nach Kneten):	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)
100/0	Schneidbarkeitsprüfung:	nicht spalt-/schneidbar mit den ausgewählten Hilfsmittel				

Legende für Schneidbarkeitsprüfung, durchgeführt an einer ungestörten Probe

Messer +	leicht	mit dem Hilfsmittel schneidbar
Messer	mittel	
Messer -	schwer	
zur Auswahl stehen: Gummilippe, Messer, Meißel		

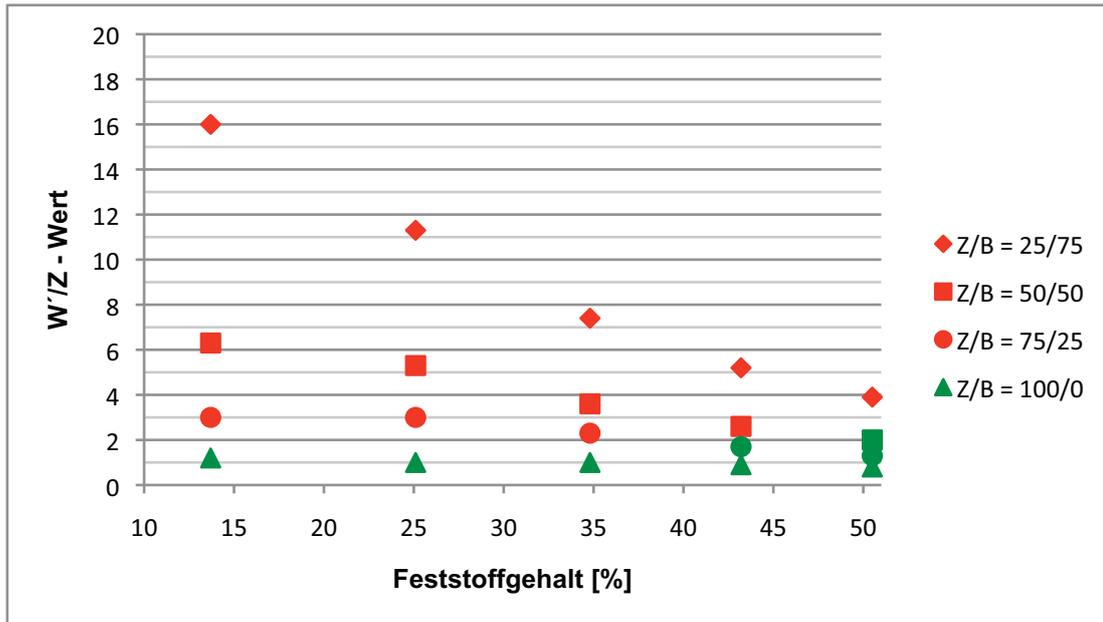


Abb. 6-7: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des W'/Z-Wertes und des Feststoffgehaltes

### 6.1.3 Ergebnisse der Probe ÖBB4



Abb. 6-8: Sedimentationsversuche der Bodenprobe ÖBB4 mit unterschiedlichen Feststoffmassenkonzentrationen (v.l.n.r. 150, 300, 450, 600, 750 g/l)



Abb. 6-9: Sedimentationskörper, nach 7 Tagen ausgepresst aus dem Acrylglasstandzylinder. Zusammensetzung der Probe: 50% Bodenprobe ÖBB4 und 50% Zement (Rolnjekt S 90 A) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 600 g/l.



Abb. 6-10: Beschreibung siehe Abb. 6-8. Mit Messer schwer schneidbar.

Tab. 6-6: Versuchsergebnisse der Matrix, ÖBB4

Z/B	Feststoffmassenkonz. cFS [g/l]	150	300	450	600	750
Ver-	Feststoffgehalt gFS [%]	13,7	25,1	34,8	43,2	50,5
hältnis	Trübedichte $\rho$ Trübe [g/cm <sup>3</sup> ]	1,10	1,20	1,29	1,39	1,49
0/100	Grenzschicht [cm]	7,6	13,1	19,1	24,0	26,8
0/100	Klarwasser/Sediment [%]	307,9	136,6	62,3	29,2	15,7
0/100	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	351,5	289,1	278,2	256,4	218,4
0/100	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0/100	w [%]	54,24	51,64	51,36	49,96	46,32
0/100	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	0,207	0,233	0,027	0,031	0,005
0/100	W'/Z	-	-	-	-	-
0/100	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG
0/100	Schneidbarkeitsprüfung:	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig	Flüssig
25/75	Grenzschicht [cm]	24,0	30,2	30,9	30,9	30,9
25/75	Klarwasser/Sediment [%]	29,2	2,6	0,3	0,3	0,3
25/75	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	1343,1	808,0	519,3	364,5	271,6
25/75	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0
25/75	w [%]	82,44	72,73	63,60	55,26	47,87
25/75	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	0,220	0,023	0,004	0,004	0,013
25/75	W'/Z	19,2	11,6	7,4	5,2	3,9
25/75	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	BREIIG
25/75	Schneidbarkeitsprüfung:	Flüssig	Gummilippe	Gummilippe	Messer	Messer -
50/50	Grenzschicht [cm]	19,3	28,5	30,5	30,7	30,8
50/50	Klarwasser/Sediment [%]	60,6	8,8	1,6	1,0	0,6
50/50	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	1074,8	767,4	518,9	367,2	275,0
50/50	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	38,79	21,06	0,74	0,0	0,0
50/50	w [%]	76,42	68,76	61,36	53,36	46,37
50/50	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	0,998	0,052	0,023	0,026	0,026
50/50	W'/Z	7,6	5,4	3,7	2,6	1,9
50/50	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	FLÜSSIG	HALBFEST
50/50	Schneidbarkeitsprüfung:	Gummilippe	Messer +	Messer	Messer -	Messer -
75/25	Grenzschicht [cm]	12,1	24,0	28,9	30,0	30,6
75/25	Klarwasser/Sediment [%]	156,2	29,2	7,3	3,3	1,3
75/25	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	645,7	639,6	493,7	362,2	277,2
75/25	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	16,96	12,63	0,0	0,0	0,0
75/25	w [%]	63,69	62,79	56,40	49,94	45,77
75/25	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	1,257	0,181	0,078	0,041	0,032
75/25	W'/Z	3,0	3,0	2,3	1,7	1,3
75/25	Konsistenz (nach Kneten):	FLÜSSIG	FLÜSSIG	BREIIG	HALBFEST	FEST (HART)
75/25	Schneidbarkeitsprüfung:	Messer	Messer	Messer -	Meißel	Meißel -
100/0	Grenzschicht [cm]	6,9	12,3	18,2	22,3	27,3
100/0	Klarwasser/Sediment [%]	349,3	152,0	70,3	39,0	13,6
100/0	$V_{\text{Wasser}}/V_{\text{Feststoff}}$ Sediment [%]	330,6	283,8	278,6	247,9	240,8
100/0	abgießbare Trübe (nach Vibr.) [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100/0	w [%]	41,20	41,19	38,99	37,91	38,11
100/0	$\Psi$ [t/m <sup>2</sup> d]	3,020	1,011	0,622	0,570	0,454
100/0	W'/Z	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8
100/0	Konsistenz (nach Kneten):	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)	FEST (HART)
100/0	Schneidbarkeitsprüfung:	nicht spalt-/schneidbar mit den ausgewählten Hilfsmittel				

Legende für Schneidbarkeitsprüfung, durchgeführt an einer ungestörten Probe

Messer +	leicht	mit dem Hilfsmittel schneid-/spaltbar
Messer	mittel	
Messer -	schwer	
zur Auswahl stehen: Gummilippe, Messer, Meißel		

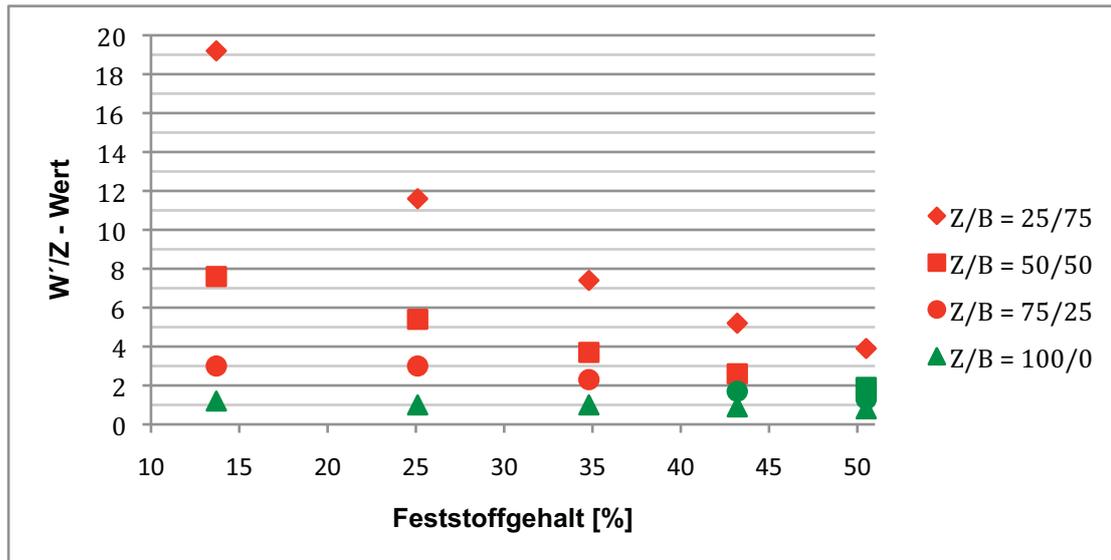


Abb. 6-11: Darstellung der Ergebnisse der Knetversuche (flüssig/breig rot und fest/halbfest grün) der geviertelten Sedimentationskörper in Abhängigkeit des W'/Z-Wertes und des Feststoffgehaltes

## 6.2 Ergebnisse der Filtrationsversuche

Der 1. Versuch wurde mit einer 100 % Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) mit einer Feststoffmassenkonzentration von 450 g/l durchgeführt. Die Aufgabe hatte einen Wassergehalt von 65,1 % und der Filterkuchen hatte bei sieben bar Stickstoffdruckbeaufschlagung nach drei Stunden 22 Minuten eine Restfeuchte von 21,3 %. Der Versuch wurde beendet, sobald ein Entweichen von Luft bei der Filtratöffnung zu hören war.

Es wurde sechs Tage nach Herstellung des ersten Filterkuchens der Rahmenscherversuch durchgeführt. In einem ersten Versuch wurde die ungestörte Probe geprüft. Der Versuchskörper wurde mit 115 N beaufschlagt. Es kam bei einem Ausschlag der Federwaage von 106 N zu einem Abscheren.

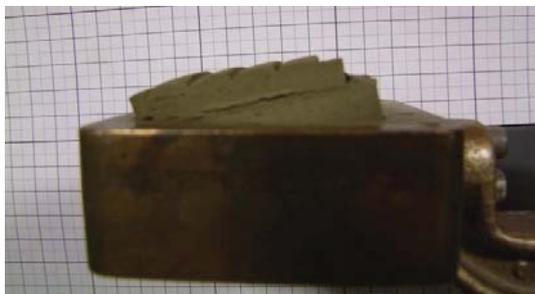


Abb. 6-12: Abgescherte Bodenprobe (ÖBB2) des 1. Versuches mit einem Wassergehalt von 21,3 %.

Der zweite Versuch mit dieser nun gestörten Probe lieferte bei einer Normalkraft von 200 N auf den Versuchskörper einen geringeren Federwaagenausschlag von 62 N. Um hier die unkonsolidierte Kohäsion sowie

den unkonsolidierten inneren Reibungswinkel berechnen zu können, müssten die Werte der Federwaage bei höherer Normalkraft größere Werte liefern. Es wird der Abfall des Wertes damit erklärt, dass es sich beim zweiten Versuch um einen gestörten Versuchskörper handelte.

Für die aufgezeichneten Werte der Untersuchung siehe Anhang D, Filtrations- und Scherversuchsprotokolle

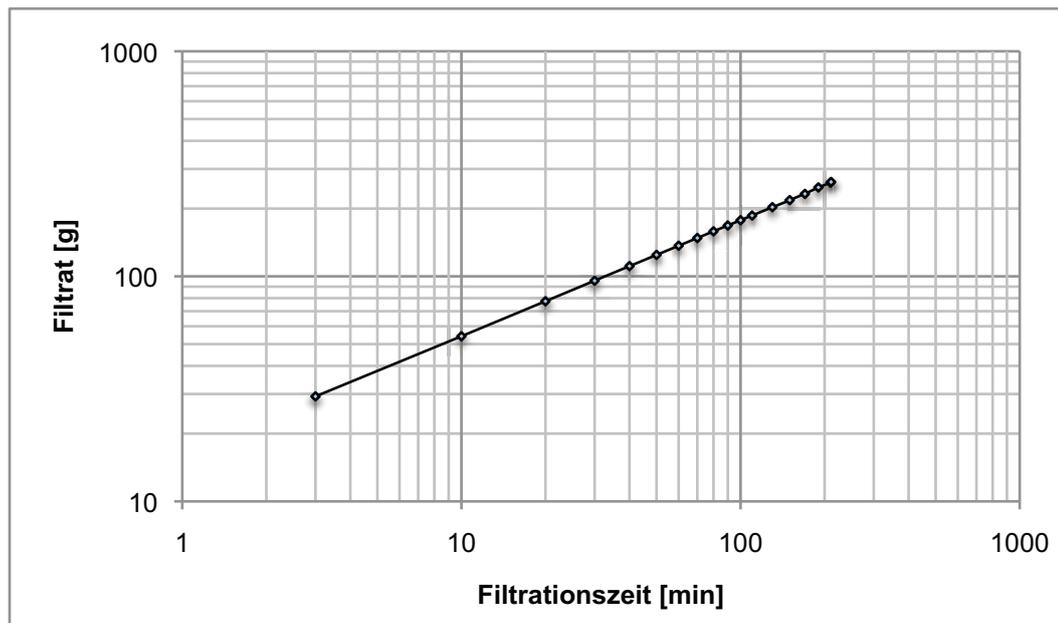


Abb. 6-13: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 2. Versuches mit einer 100% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz

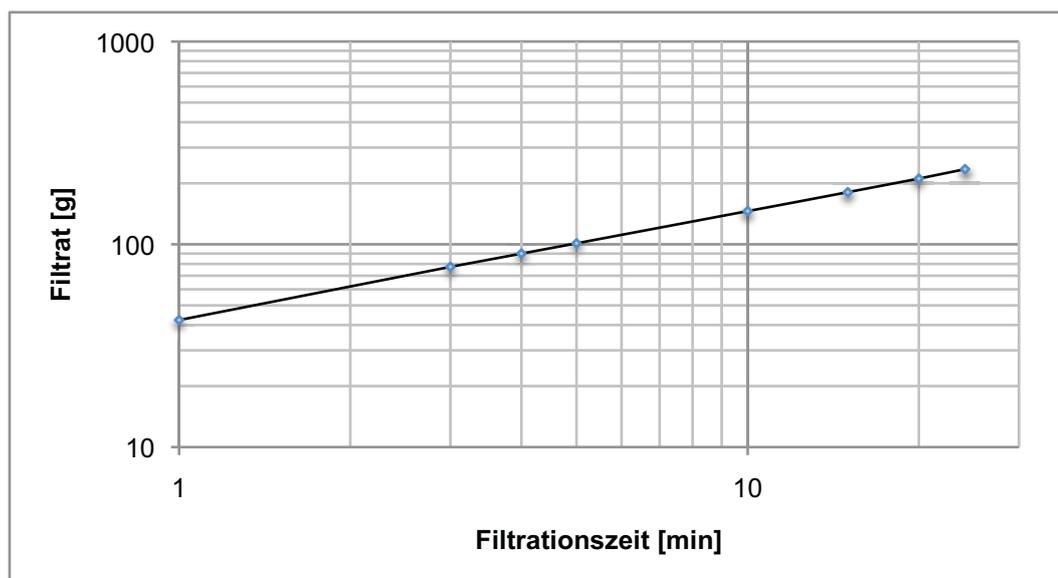


Abb. 6-14: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 8. Versuches mit einer 75% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz

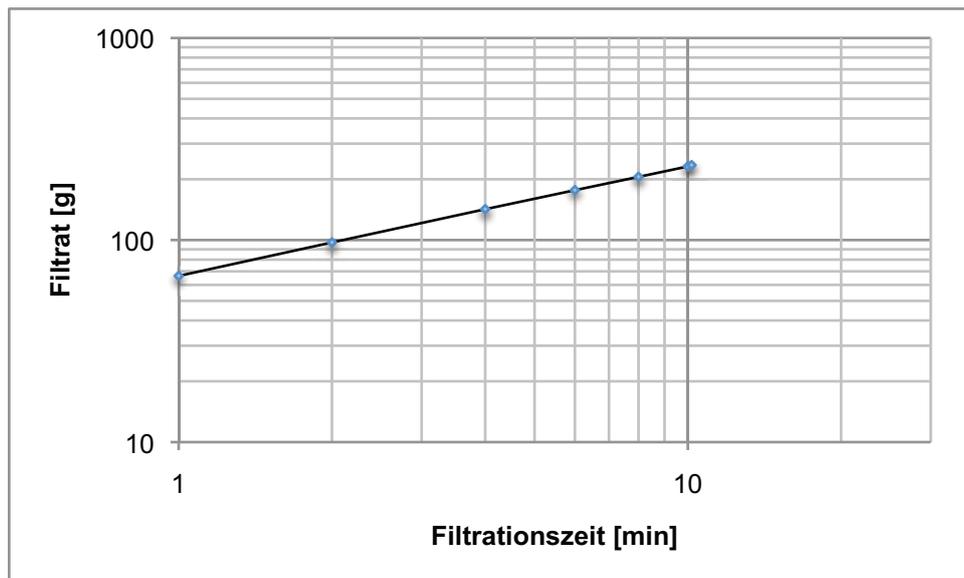


Abb. 6-15: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 6. Versuches mit einer 50% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz

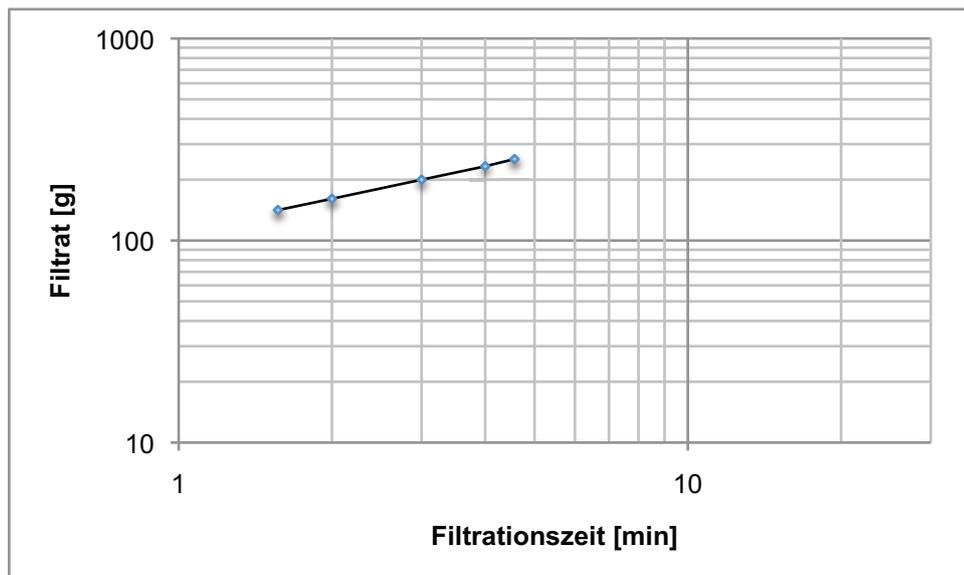


Abb. 6-16: Darstellung der kumulierten Filtrationsergebnisse des 13. Versuches mit einer 25% Bodenprobe (ÖBB2, schluffig) im doppellogarithmischen Netz

Auf den Abbildungen 6-13 bis 6-16 ist zu erkennen, dass im doppellogarithmischen Netz die Verbindung der Wertepaare kumulierte Filtrationszeit und kumuliertes Filtrat eine Gerade darstellen. Diese kann als Potenzfunktion wie folgt angeschrieben werden:  $f(x) = a \cdot x^b$ , wobei  $a$  und  $b$  Konstanten sind.

Tab. 6-7: Berechnung der nötigen Kammernanzahl einer Kammerfilterpresse

Zusammen- setzung	Feststoff- massen- konzentration $c$ [g/l]	spez. Durchfluss- widerstand $r$ [1/m <sup>2</sup> ]	Filtrations- zeit $t$ [sec]	Filtrations- +Rüstzeit $t^{*1,7}$ [sec]	Filterkuchen- höhe $h_k$ [m]	Viskosität Wasser $\eta$ [Pa*sec]	verwendete Formel		Kammer- anzahl (4 m <sup>2</sup> ) [Anzahl]	
							Differenz- druck $\Delta p$ [Pa]	Filtrat- volumen pro Zyklus $V_F$ [m <sup>3</sup> ]		
100 % B / 0 % Z	450	6,033E+15	11568,8	19666,9	0,025	0,001	598675	181,5	3952,8	988
75 % B / 25 % Z	450	7,18E+14	1431,0	2432,7	0,025	0,001	598675	20,7	432,9	108
50 % B / 50 % Z	450	3,114E+14	478,0	812,6	0,025	0,001	598675	7,0	190,5	48
25 % B / 75 % Z	450	1,243E+14	263,0	447,1	0,025	0,001	598675	4,1	81,7	20

Für eine erste Abschätzung der Dimensionierung einer Kammerfilterpresse wurden folgende Annahmen getroffen.

Die Kammerabmessung wurde mit 1,5 x 1,5 m angenommen. Jede Kammer entwässert beidseitig. Daraus ergibt sich etwa 4 m<sup>2</sup> nutzbare Filtrationsfläche. Die Kuchendicke wurde mit 50 mm angenommen. Aufgrund dieser doppelseitigen Entwässerung wurde die Kuchendicke in der Berechnung mit 25 mm gewählt. Die Filtrationszeit, das Filtratvolumen pro Zyklus und der spezifische Durchflusswiderstand wurden den Ergebnissen aus den Druckfiltrationsversuchen entnommen. Der Volumenstrom wurde mit 47 m<sup>3</sup>/h und die Feststoffmassenkonzentration mit 450 g/l gewählt. Die Druckdifferenz ergibt sich aus sieben bar Druckbeaufschlagung abzüglich des Luftdrucks.

Es gibt Kammerfilterpressen mit bis zu 100 Kammern. Es kommt zu einer Durchmischung von Boden-Suspensionen und Boden-Bindemittel-Suspensionen. Es ist davon auszugehen, dass die Entwässerung des DSV-Rücklaufes mit zwei bis drei Kammerfilterpressen ohne Einsatz von Flockungsmittel bewältigt werden kann.

Tab. 6-8: Ergebnisse der Luftvolumenberechnung der einzelnen Filterkuchen

				verwendete Formeln zur Berechnung							
				m <sub>T</sub>		(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
		w [%]	Kuchenhöhe h <sub>k</sub> [cm]	Boden Einw. [g]	Zement Einw. [g]	Kuchenvolumen V <sub>k</sub> [cm <sup>3</sup> ]	Feststoffvolumen V <sub>T</sub> [cm <sup>3</sup> ]	Porenvolumen V <sub>P</sub> [cm <sup>3</sup> ]	Wasservolumen V <sub>W</sub> [cm <sup>3</sup> ]	Sättigungszahl S <sub>R</sub> [%]	Porosität ε [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]
100% B 0% Z	1.V	21,3	2,3	166,1	0,0	109,9	59,7	50,2	45,0	89,6	0,5
	2.V	20,7	2,2	165,6	0	105,1	59,6	45,6	43,2	94,9	0,4
	3.V	21,3	2,0	144	0	95,6	51,8	43,8	39,0	89,0	0,5
	10.V	20,5	2,2	164,4	0	105,1	59,1	46,0	42,4	92,2	0,4
Mittelwert		21,0	2,2	160,0	0,0	103,9	57,6	46,4	42,4	91,4	0,4
St.abw.		0,4	0,1	10,7	0,0	6,0	3,9	2,7	2,5	2,7	0,0
75% B 25% Z	7.V	28,2	2,4	117,9	39,3	114,7	55,9	58,8	61,7	105,0	0,5
	8.V	26,7	2,5	119,5	39,8	119,5	56,6	62,8	58,0	92,3	0,5
	9.V	27,5	2,5	119	39,6	119,5	56,4	63,1	60,2	95,4	0,5
Mittelwert		27,5	2,5	118,8	39,6	117,9	56,3	61,6	60,0	97,6	0,5
St.abw.		0,8	0,1	0,8	0,3	2,8	0,4	2,4	1,9	6,6	0,0
50% B 50% Z	4.V	28,1	2,5	80,9	80,9	119,5	56,8	62,7	63,2	100,9	0,5
	6.V	28,7	2,5	79,4	79,4	119,5	55,8	63,7	63,9	100,3	0,5
	14.V	28,1	2,4	80,1	80,1	114,7	56,2	58,4	62,6	107,1	0,5
Mittelwert		28,3	2,5	80,1	80,1	117,9	56,3	61,6	63,3	102,8	0,5
St.abw.		0,3	0,1	0,8	0,8	2,8	0,5	2,8	0,7	3,8	0,0
25% B 75% Z	11.V	25,6	2,4	41	123,2	114,7	56,9	57,7	56,5	97,8	0,5
	12.V	25,6	2,4	41,3	123,9	114,7	57,3	57,4	56,8	99,0	0,5
	13.V	25,5	2,4	41,3	124	114,7	57,3	57,4	56,6	98,6	0,5
Mittelwert		25,6	2,4	41,2	123,7	114,7	57,2	57,5	56,6	98,5	0,5
St.abw.		0,1	0,0	0,2	0,4	0,0	0,2	0,2	0,2	0,6	0,0

Die grau hinterlegten Werte in Tab. 6-8 wurden im Labor ermittelt und die anderen Ergebnisse wurden durch Einsetzen der Zahlenwerte in den Formeln (4) bis (9) errechnet.

Es ist aus dieser Tabelle zu erkennen, dass das Luftporenvolumen des bindemittelhaltigen Filterkuchens trotz größerem Restfeuchtegehalt (berechnet nach Formel (1)) geringer war. Die Porosität  $\varepsilon$  [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] beträgt bei der 100 % Bodenprobe 0,4 und bei den anderen Variationen mit Zement immer 0,5.

Aus der Tab. 6-8 ist zu entnehmen, dass der Schwankungsbereich des Restwassergehaltes der Filterkuchen geringer wird, je mehr Zement der Suspension zugegeben wurde. Zudem wurde der spezifische Durchflusswiderstand, wie in Tab. 6-9 angeführt, immer kleiner bei gleichzeitig steigendem Restwassergehalt in den Proben. Diese Eigenschaft wird auch bei der Zugabe von Flockungsmittel zu Suspensionen beobachtet, somit kann Zement als Filterhilfsmittel angesehen werden.

Tab. 6-9: Ergebnisse der Berechnung der Filterleistung sowie des spez. Durchflusswiderstandes

					verwendete Formeln zur Berechnung				
					(10)		(11)	(12)	
					Feststoff- gehalt d. F.-kuchen $g_F$ [%]	Kuchen- höhe $h_K$ [m]	Filter- leistung $q$ [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ]	spez. Durchfluss- widerstand $r$ [ $1/\text{m}^2$ ]	
	Filtrat $V_F$ [ $\text{cm}^3$ ]	Filtrat $V_F$ [ $\text{m}^3$ ]	Filtration- zeit $t$ [min]	Filtration- zeit $t$ [sec]					
100% B 0% Z	1.V	255,0	0,0002550	202,0	12120	78,7	0,023	4,4031E-06	5,9116E+15
	2.V	262,6	0,0002626	211,0	12660	79,3	0,022	4,3413E-06	6,26835E+15
	3.V	225,8	0,0002258	156,0	9360	78,7	0,020	5,0495E-06	5,9281E+15
	10.V	262,0	0,0002620	202,3	12135	79,5	0,022	4,5184E-06	6,02263E+15
	Mittelwert	251,4	0,0002514	192,8	11568,8	79,1	0,022	4,578E-06	6,03267E+15
St.abw.	17,4	0,0000174	24,9	1493,8	0,4	0,001	3,2274E-07	1,64562E+14	
75% B 25% Z	7.V	228,4	0,0002284	24,0	1440	71,8	0,024	3,3189E-05	7,51592E+14
	8.V	234,7	0,0002347	24,1	1447	73,3	0,025	3,3941E-05	7,05542E+14
	9.V	230,8	0,0002308	23,4	1406	72,5	0,025	3,4357E-05	6,97015E+14
	Mittelwert	231,3	0,0002313	23,9	1431,0	72,5	0,025	3,3829E-05	7,1805E+14
St.abw.	3,2	0,0000032	0,4	21,9	0,8	0,001	5,9167E-07	2,93601E+13	
50% B 50% Z	4.V	235,6	0,0002356	11,0	660	71,9	0,025	7,4705E-05	3,20552E+14
	6.V	235,9	0,0002359	10,2	610	71,3	0,025	8,0918E-05	2,95941E+14
	14.V	232,7	0,0002327	10,3	620	71,9	0,024	7,8543E-05	3,17594E+14
	Mittelwert	234,7	0,0002347	10,5	630,0	71,7	0,025	7,8055E-05	3,11363E+14
St.abw.	1,8	0,0000018	0,4	26,5	0,3	0,001	3,1349E-06	1,34369E+13	
25% B 75% Z	11.V	250,2	0,0002502	4,2	250	74,4	0,024	0,00020946	1,1909E+14
	12.V	253,1	0,0002531	4,4	265	74,4	0,024	0,00019986	1,24814E+14
	13.V	253,0	0,0002530	4,6	274	74,5	0,024	0,00019321	1,29104E+14
	Mittelwert	252,1	0,0002521	4,4	263,0	74,4	0,024	0,00020084	1,24336E+14
St.abw.	1,6	0,0000016	0,2	12,1	0,1	0,000	8,1682E-06	5,02397E+12	

Filtrationsfläche $A_z$	47,78	$\text{cm}^2$
	0,0048	$\text{m}^2$
Luftdruck	101325	Pa
Gasdruck	700000	Pa
Differenzdruck $\Delta p$	598675	Pa
Viskosität Wasser $\eta$	0,00100	$\text{Pa}\cdot\text{s}$

In Tab. 6-9 ist zu erkennen, dass der spezifische Durchflusswiderstand desto geringer wurde, je mehr Zement in der Suspension enthalten war. Der spezifische Durchflusswiderstand der 100 % Bodenprobe im Vergleich zur 75 % Bodenprobe hat sich um den Faktor 10 verringert. Von der 75 % zur 50 %

sowie von der 50 % zur 25 % Bodenprobe hatte sich der Widerstand jeweils noch um die Hälfte verringert.

Es wurde beim Herausdrücken der Filterkuchen aus der Zelle beobachtet, dass je mehr Zement der Suspension beigegeben wurde, desto leichter der Körper in Stücke gebrochen ist.

### 6.3 Ergebnisse der Rahmenscherversuche

Tab. 6-10: Ergebnisse der Rahmenscherversuche mit Eigenschaftsangaben der Versuchskörper

		$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
1. Versuch	ungest. Pr.:	0,046	0,042	100% Boden / 0% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,080	0,025	Restwassergehalt: 21,3 %
	gest. Pr. 2	-	-	Entwässerungszeit: 202 Minuten
	gest. Pr. 3	-	-	(Versuchskörper 6 Tage gelagert)
2. Versuch	ungest. Pr.:	0,062	0,028	100% Boden / 0% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,015	Restwassergehalt: 20,7 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,023	Entwässerungszeit: 211 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,029	
3. Versuch	ungest. Pr.:	0,102	0,031	100% Boden / 0% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,018	Restwassergehalt: 21,3 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,020	Entwässerungszeit: 156 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,030	(ca 60 g geringere Aufgabemasse)
4. Versuch	ungest. Pr.:	0,062	0,039	50 % Boden / 50 % Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,019	Restwassergehalt: 28,1 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,035	Entwässerungszeit: 11 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,067	
5. Versuch	ungest. Pr.:	0,062	0,016	100% Boden / 0% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,010	Restwassergehalt: $\approx$ 27 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,013	Entwässerungszeit: 180 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,014	(Wasser auf Filterkuchen)
6. Versuch	ungest. Pr.:	0,102	0,064	50 % Boden / 50 % Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,019	Restwassergehalt: 28,7 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,031	Entwässerungszeit: 10,17 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,065	
7. Versuch	ungest. Pr.:	0,021	0,032	75 % Boden / 25 % Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,018	Restwassergehalt: 28,2 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,027	Entwässerungszeit: 24 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,040	
8. Versuch	ungest. Pr.:	0,062	0,053	75 % Boden / 25 % Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,022	Restwassergehalt: 26,7 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,035	Entwässerungszeit: 24,12 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,051	
9. Versuch	ungest. Pr.:	0,102	0,061	75 % Boden / 25 % Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,025	Restwassergehalt: 27,5 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,033	Entwässerungszeit: 23,43 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,052	
10. Versuch	ungest. Pr.:	0,021	n.b.	100% Boden / 0% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,023	Restwassergehalt: 20,5 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,026	Entwässerungszeit: 202 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,030	
11. Versuch	ungest. Pr.:	0,021	0,024	25% Boden / 75% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,017	Restwassergehalt: 25,6 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,041	Entwässerungszeit: 4,17 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,087	
12. Versuch	ungest. Pr.:	0,062	0,043	25% Boden / 75% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,021	Restwassergehalt: 25,6 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,046	Entwässerungszeit: 4,42 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,082	
13. Versuch	ungest. Pr.:	0,102	0,078	25% Boden / 75% Bindemittel
	gest. Pr. 1	0,021	0,020	Restwassergehalt: 25,5 %
	gest. Pr. 2	0,062	0,040	Entwässerungszeit: 4,57 Minuten
	gest. Pr. 3	0,102	0,079	
14. Versuch	ungest. Pr.:	0,021	0,027	50% Boden / 50% Bindemittel
				Restwassergehalt: 28,1 %
				Entwässerungszeit: 10,33 Minuten

Die in Tab. 6-10 angegebene Normalspannung  $\sigma$  wurde nach Formel (13) und die Schubspannung  $\tau$  nach Formel (14) berechnet. In Anhang D sind die Normalkraft und die Schubkraft je Rahmenscherversuch protokolliert.

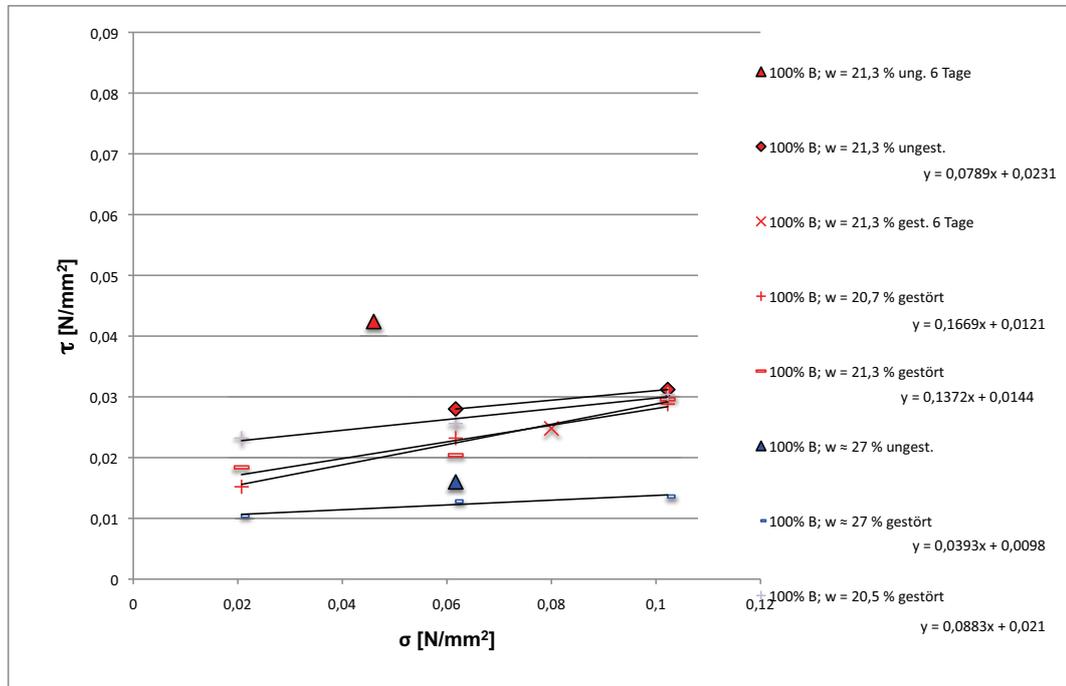


Abb. 6-17: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 100% Boden und 0% Bindemittel

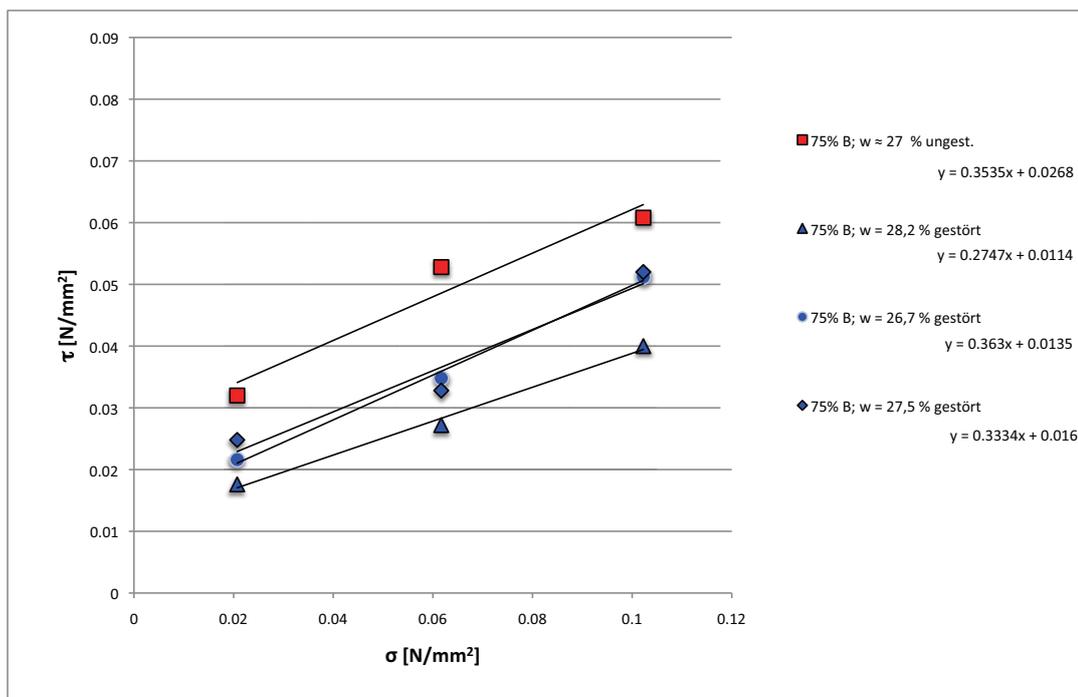


Abb. 6-18: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 75% Boden und 25% Bindemittel

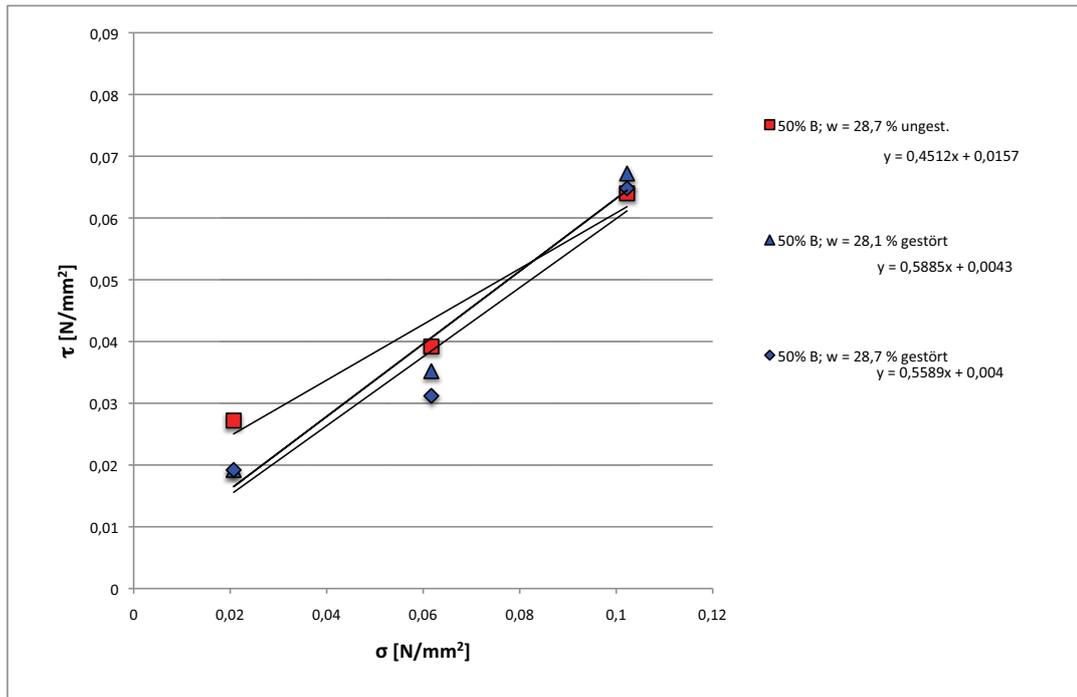


Abb. 6-19: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 50% Boden und 50% Bindemittel

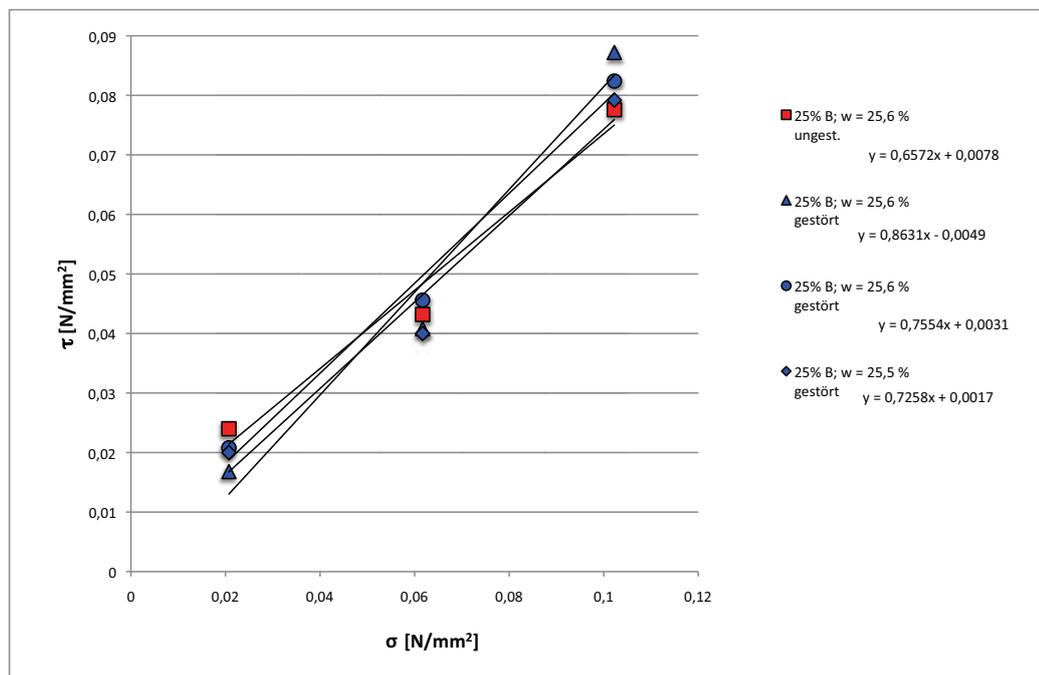


Abb. 6-20: Darstellung der Ergebnisse der Scherversuche der Probe 25% Boden und 75% Bindemittel

Tab. 6-11: Mithilfe der Formel (15) und den Geradengleichungen der Abb. 6-12 bis Abb. 6-15 errechnete unkonsolidierte Scherparameter

Boden [%]	Bindem. [%]	w [%]	Notiz	$\phi_u$ [°]	$c_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
100	0	≈ 20	ungest.	4,5	0,023
100	0	20,7	gest.	9,5	0,012
100	0	21,3	gest.	7,8	0,014
100	0	≈ 27	gest.	2,3	0,010
100	0	20,5	gest.	5,0	0,021
75	25	≈ 27	ungest.	19,5	0,027
75	25	28,2	gest.	20,0	0,014
75	25	26,7	gest.	18,4	0,016
75	25	27,5	gest.	15,4	0,011
50	50	≈ 28	ungest.	24,3	0,016
50	50	28,1	gest.	30,5	0,004
50	50	28,7	gest.	29,2	0,004
25	75	≈ 25,6	ungest.	33,3	0,008
25	75	25,6	gest.	40,8	0,005
25	75	25,6	gest.	37,1	0,003
25	75	25,5	gest.	36,0	0,002

In Abb. 6-17 bis Abb. 6-20 wurden alle Ergebnisse der Scherversuche an ungestörten sowie gestörten Versuchskörpern mit den entwässerten Proben eingetragen. Der nach sechs Tagen durchgeführte Scherversuch der ungestörten 100 % Bodenprobe wich sehr stark von den anderen Ergebnissen ab, wie in Abb. 6-17 zu erkennen. Dieser Wert wurde nicht zur Bestimmung der Geradengleichung der ungestörten 100 % Bodenproben mit hinzugenommen. Diese Probe hat aufgrund der längeren Lagerdauer womöglich noch Feuchtigkeit abgegeben und hatte somit nicht mehr die ursprünglich hergestellten Eigenschaften. Der Wert der gestörten Probe nach sechs Tagen Lagerung war, im Schwankungsbereich der anderen Versuchsergebnisse, die unmittelbar nach der Filterkuchenherstellung geprüft wurden.

Der unkonsolidierte innere Reibungswinkel ist bei Zugabe von 50 % Bindemittel um zirka das Dreifache gestiegen im Gegensatz zu den 100 % Bodenproben. Die unkonsolidierte Kohäsion war scheinbar weniger vom Bindemittelgehalt sondern mehr von der Restfeuchtigkeit abhängig. Der unkonsolidierte innere Reibungswinkel der ungestörten 100 % Bodenprobe hat nur die Hälfte des Wertes der gestörten 100 % Bodenproben erreicht. Im Gegensatz dazu war die unkonsolidierte Kohäsion des ungestörten Versuchskörpers um zirka das Doppelte höher als die der gestörten Proben.

Die Rahmenscherversuche mit einer bindemittelhaltigen Suspension wurden alle unmittelbar nach der Herstellung des Filterkuchens durchgeführt. Der Einfluss des Sulfatanteils, welcher mit dem Filtrat ausgepresst wurde, führt zu

einer Veränderung des Erstarrungsbeginns des Filterkuchens. Dies wurde nicht untersucht und konnte somit nicht beobachtet werden.

In einem Gespräch mit Prof. Harmuth sowie nach Recherche in der fach einschlägigen Literatur wurde ein Modell entwickelt, weshalb der unkonsolidierte Reibungswinkel  $\varphi_u$  bei der Zugabe von Bindemittel viel höher und die unkonsolidierte Kohäsion  $c_u$  geringer wurde.

Die 100 % Bodenprobe bestand zu einem erheblichen Anteil aus Schichtsilikaten (wie z.B. Glimmer, Chlorit und nicht quellfähigen Tonmineralen). Eine Orientierung dieser Plättchen während der Druckfiltration könnte ein Grund für die geringere innere Reibung gewesen sein.

Es kam zu einer Erhöhung des unkonsolidierten inneren Reibungswinkels („Verzahnung“ der Struktur), je mehr Zement hinzugefügt wurde, da diese Körner eher isometrisch und nicht plättchenförmig strukturiert waren. Die Korngrößenverteilung des Bodens (tonig, Schichtsilikate) und die des Zements sind ident und haben deshalb keinen Einfluss auf die Scherparameter.

Somit kann dieser Effekt als ein rein mechanischer gesehen werden, der mit der Struktur (Partikelform) der beiden gemischten Stoffe zusammenhängt. Ein chemischer Effekt kann ausgeschlossen werden, da der Versuch noch vor dem Erstarrungsbeginn durchgeführt wurde. Weiters haben auch die Ettringitkristalle keinen Einfluss auf die Scherparameter.

Die unkonsolidierten Werte sind nur Anfangswerte und sind daher für ein bis zwei Meter Höhe des Einbaues in der Deponie interessant, doch nicht für die gesamte Einbauhöhe. Diese Ergebnisse waren für eine erste Beurteilung interessant, doch können diese nicht alleine für die Berechnung und Auslegung einer Deponie herangezogen werden. Es werden noch weitere konsolidierte und drainierte Scherversuche notwendig sein.

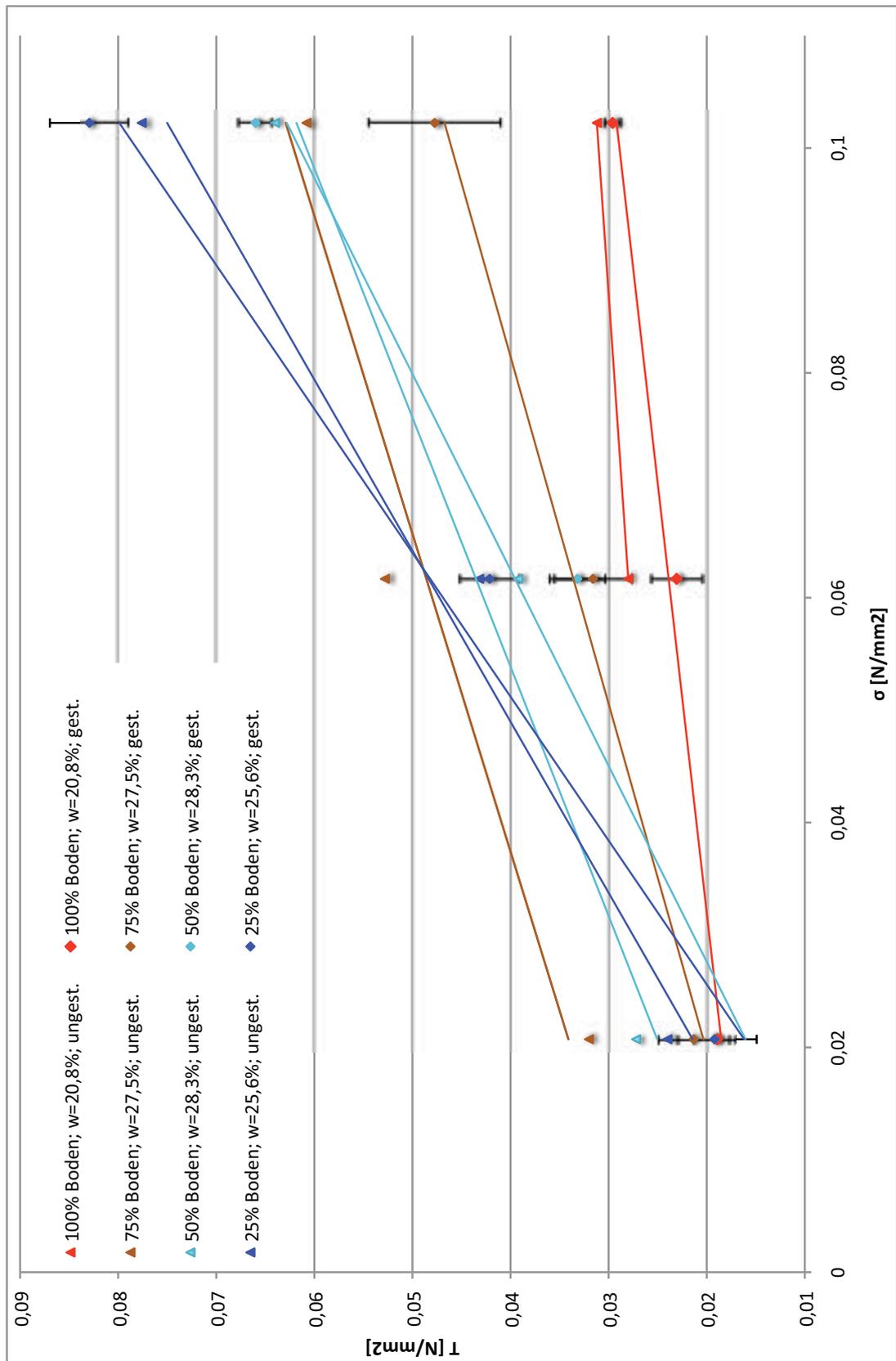


Abb. 6-21: Darstellung der gemittelten Ergebnisse der Scherversuche mit ungestörten Filterkuchen und der zugehörigen Standardabweichung, sowie die Ergebnisse der mit gestörten Proben durchgeführten Versuche

In der Abb. 6-21 ist kein Trend der durchgeführten Versuche zu erkennen. Es ist daraus zu schließen, dass der Schwankungsbereich auf den nicht gleichmäßig durchgeführten Versuchen beruht und weniger auf den variierten Zusammensetzungen der Proben. Es wäre durch eine Verbesserung der gleichmäßig geführten Spindel (elektrischer Motor führt die gleichmäßige Spindeldrehbewegung aus und nicht mehr handgeführt) eine Verringerung des Schwankungsbereiches denkbar.

Hauptproblem der Rahmenscherversuche ist, dass die Scherzeit sehr kurz ist, damit handelt es sich um einen unkonsolidierten undrainierten Versuch.

Weitere Versuche sind durch ein bodenmechanisches Labor durchzuführen, welches die Erfahrung und die Versuchsausrüstung zur Durchführung konsolidierter und drainierter Scherversuche mit bindigen Böden hat.

Weiters könnte durch eine Anschliffuntersuchung eines getrockneten Filterkuchens festgestellt werden, ob eine Orientierung in der Mikrostruktur (plättchen) erkennbar ist.

## 6.4 Ergebnisse der Flockungsmittelversuche

### 6.4.1 Ergebnisse des anionischen polymeren Flockungsmittels

Die Versuche mit dem Flockungsmittel wurden mit einer Feststoffmassenkonzentration von 450 g/l durchgeführt.

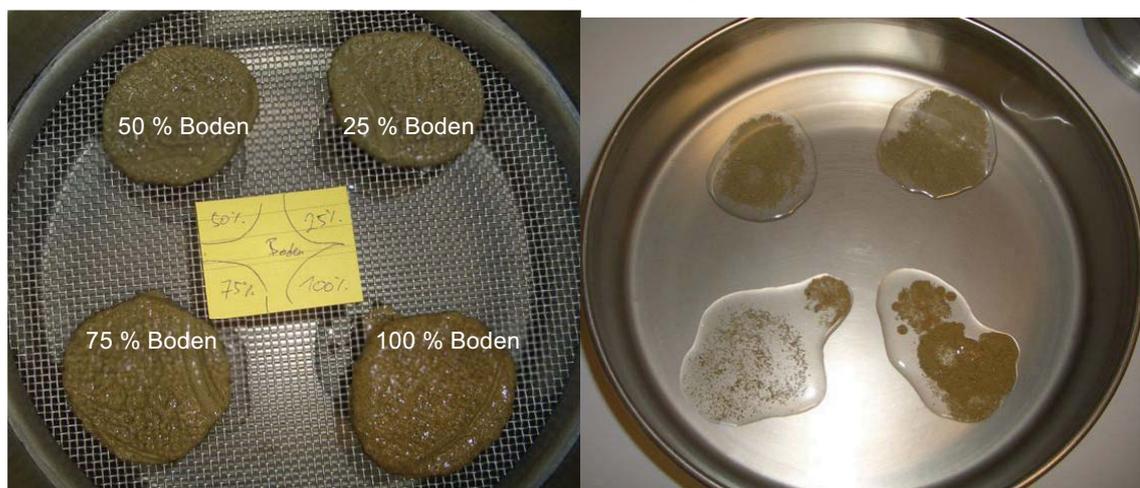


Abb. 6-22: In der linken Bildhälfte sind die geflockten und belasteten Bodenproben ÖBB1 (sandig). Sedipurkonzentration 600 ppm. Rechte Bildhälfte zeigt das Filtrat.



Abb. 6-23: In der linken Bildhälfte sind die geflochtenen Bodenprobe ÖBB2 (schluffig) unbelastet und auf der rechten Seite belastet mit einem zweiten kleineren Laborsieb der Maschenweite 1,25 mm. Es wurde die Sedipurkonzentration variiert.

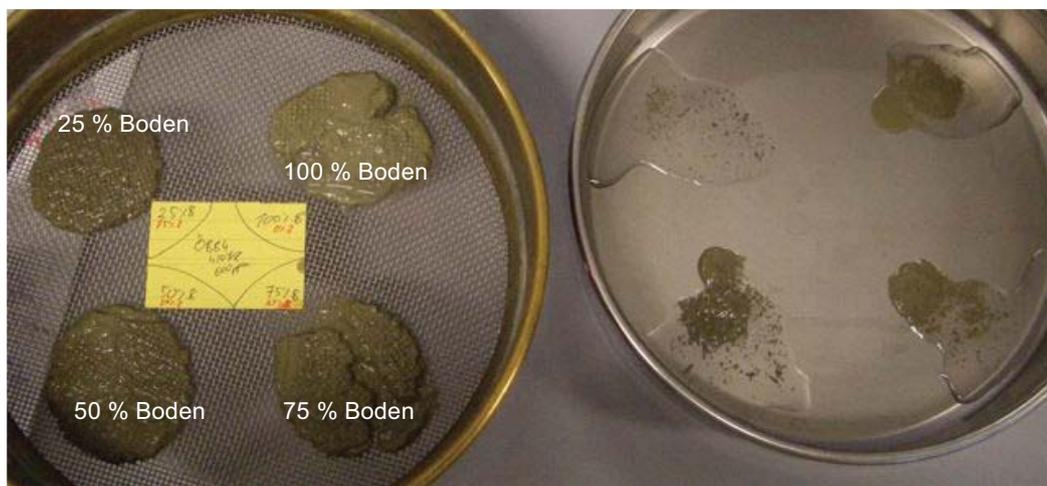


Abb. 6-24: In der linken Bildhälfte sind die geflochtenen und belasteten Bodenproben ÖBB4 (schluffig). Sedipurkonzentration 600 ppm. Rechte Bildhälfte zeigt das Filtrat.

Das Filtrat der Bodenprobe ÖBB2 war nach dem Belasten mit einem weiteren kleineren Sieb bei der Bodenprobe mit einer Konzentration von 400 ppm Sedipur leicht trüb, bei 600 ppm klar und bei der 800 ppm Probe wieder trüb. Die 200 ppm Probe ist, wie auf den Abbildungen 6-23 zu erkennen, einfach durch das Sieb durchgelaufen. Eine Belastung mit dem kleineren Sieb war nicht möglich. Die optimale Konzentration von Flockungsmittel war bei 600 ppm. Diese Flockungsmittelkonzentration wurde auch von der Firma Andritz empirisch ermittelt und ist im Abschlussbericht<sup>[11]</sup> von Dr. Böhm angeführt worden.

Bei dem Vergleich der Tab. 6-12 mit Tab. 6-13,14 ist zu erkennen, dass der Wassergehalt durch Zugabe des Flockungsmittels bei der sandigen Probe ÖBB1 mindestens um das Dreifache mehr gesenkt wurde, als der Wassergehalt der schluffigen/sandigen Stillwassersedimentproben ÖBB2 und ÖBB4.

Tab. 6-12: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB1

Datum	Probenbez. <b>ÖBB 1</b> (sandig)	Sedipur [ppm]	c [g/l]	Proben- volumen [cm <sup>3</sup> ]	m <sub>feucht</sub> [g]	m <sub>trocken</sub> [g]	w nach Sedipur- zugabe Feststoff [%]	Einwaage (ohne Sedipur) w [%]	Sedipur (0,1%) Zugabe [g]	Wasser + Sedipur- lösung [g]	Einwaage w durch Sedipur Zugabe [%]	Diff w Sedipur - w [%]	Anmerkung
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.11.11	100% Boden	400	450	200	21,59	12,49	42,15	65,1	36	203,5	69,34	27,2	2), 3)
22.11.11	100% Boden	600	450	200	24,20	13,97	42,27	65,1	54	221,5	71,11	28,8	2), 3)
22.11.11	100% Boden	800	450	200	22,37	12,71	43,18	65,1	72	239,5	72,69	29,5	2), 3)
22.11.11	100% Boden	822	450	200	21,95	12,09	44,92	65,1	74	241,5	72,85	27,9	2), 3)
23.11.11	100% Boden	1000	450	200	23,11	13,66	40,89	65,1	90	257,5	74,10	33,2	2), 3)
23.11.11	100% Boden	1200	450	200	23,90	14,12	40,92	65,1	108	275,5	75,38	34,5	2), 3)
22.11.11	75% B 25% Z	600	450	200	22,65	12,16	46,31	65,1	54	221,5	71,11	24,8	2), 3)
22.11.11	50% B 50% Z	600	450	200	23,69	12,13	48,80	65,2	54	221,5	71,11	22,3	2), 3)
22.11.11	25% B 75% Z	600	450	200	21,17	10,59	49,98	65,2	54	221,5	71,11	21,1	2), 3)

Tab. 6-13: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB2

Datum	Probenbez. <b>ÖBB 2</b> (tonig)	Sedi- pur [ppm]	c [g/l]	Proben- volumen [cm <sup>3</sup> ]	m <sub>feucht</sub> [g]	m <sub>trocken</sub> [g]	w nach Sedipur- zugabe Feststoff [%]	Einwaage (ohne Sedipur) w [%]	Sedipur (0,1%) Zugabe [g]	Wasser + Sedipur- lösung [g]	Einwaage w durch Sedipur Zugabe [%]	"Entwässerung"	
												Diff w Sedipur - w [%]	Anmerkung
08.11.11	100% Boden	200	450	200	7,79	3,06	60,72	65,1	18	185,5	67,33	6,6	1)
08.11.11	100% Boden	400	450	200	9,89	3,70	62,59	65,1	36	203,5	69,34	6,7	1)
08.11.11	100% Boden	600	450	200	13,85	5,19	62,53	65,1	54	221,5	71,11	8,6	1)
08.11.11	100% Boden	800	450	200	12,14	5,05	58,40	65,1	72	239,5	72,69	14,3	1)
09.11.11	75% B 25% Z	600	450	200	11,21	3,51	68,69	65,1	54	221,5	71,11	2,4	1)
09.11.11	50% B 50% Z	600	450	200	8,44	2,80	66,82	65,2	54	221,5	71,11	4,3	1)
09.11.11	25% B 75% Z	600	450	200	12,28	3,97	67,67	65,2	54	221,5	71,11	3,4	1)
09.11.11	100% Zement	600	450	200	12,13	4,30	64,55	65,3	54	221,5	71,11	6,6	1)
23.11.11	100% Boden	600	450	200	20,19	8,14	59,68	65,1	54	221,5	71,11	11,4	2), 3)
23.11.11	75% B 25% Z	600	450	200	21,72	8,92	58,93	65,1	54	221,5	71,11	12,2	2), 3)
23.11.11	50% B 50% Z	600	450	200	21,59	9,46	56,18	65,2	54	221,5	71,11	14,9	2), 3)
23.11.11	25% B 75% Z	600	450	200	21,10	9,26	56,11	65,2	54	221,5	71,11	15,0	2), 3)

Tab. 6-14: Versuchsauswertung der Sedipurversuche mit der Bodenprobe ÖBB4

Datum	Probenbez. <b>ÖBB 4</b> (tonig)	Sedi- pur [ppm]	c [g/l]	Proben- volumen [cm <sup>3</sup> ]	m <sub>feucht</sub> [g]	m <sub>trocken</sub> [g]	w nach Sedipur- zugabe Feststoff [%]	Einwaage (ohne Sedipur) w [%]	Sedipur (0,1%) Zugabe [g]	Wasser + Sedipur- lösung [g]	Einwaage w durch Sedipur Zugabe [%]	"Entwässerung"		
												Diff w Sedipur - w [%]	Anmerkung	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14.12.11	100% Boden	600	450	200	11,72	4,13	64,76	65,1	54	221,5	71,11	6,3	1), 3)	
14.12.11	75% B 25% Z	600	450	200	27,80	9,82	64,68	65,1	54	221,5	71,11	6,4	1), 3)	
14.12.11	50% B 50% Z	600	450	200	24,67	9,74	60,52	65,2	54	221,5	71,11	10,6	1), 3)	
14.12.11	25% B 75% Z	600	450	200	27,20	12,05	55,70	65,2	54	221,5	71,11	15,4	1), 3)	

Anmerkung (für Tab. 6-12,13,14)

- 1) in Suspension gebracht mit Hilfe Eirich Intensivmischer
- 2) in Suspension gebracht durch etwa zehn Minuten Rühren mit der Standbohrmaschine
- 3) Klares Wasser bei Feststoff mit Pipette abgezogen

w nach Sedipurzugabe feststoffbezogen → dies entspricht dem Wassergehalt (simuliert) nach der Seihzone einer Siebandpresse

#### **6.4.2 Ergebnisse des ionischen Flockungsmittels**

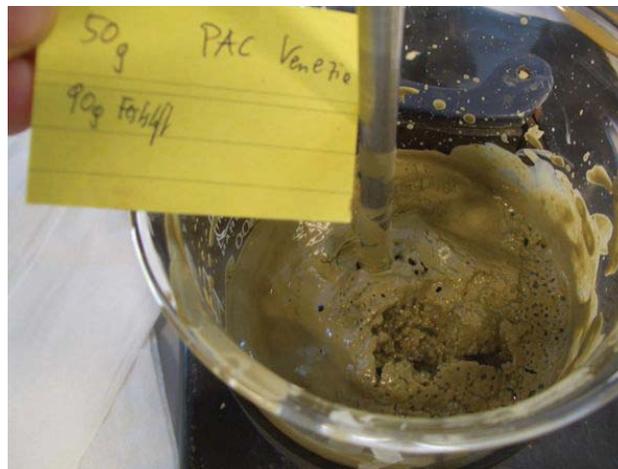


Abb. 6-25: Boden{90 g} (ÖBB2) - Wasser{167,5 g} - Flockungsmittel{50 g} - Suspension

Bei Zugabe des Flockungsmittels war eine Volumenvergrößerung erkennbar. Es waren Blasen makroskopisch zu beobachten. Bei 50 g Flockungsmittelzugabe auf 90 g Feststoff war die Schaumdecke schneidbar, wie auf den Abb. 6-24 zu erkennen ist. Durch Rühren mit der Standbohrmaschine wurde diese Schaumdecke wieder zerstört.

Nach einer Zugabe des Flockungsmittels von 100 g war die Probe wieder flüssig. Nach einem kurzen Stehenlassen der Boden-Wasser-Flockungsmittelsuspension wurde diese wieder fester, doch nicht mehr so fest wie nach der 50 g Zugabe.

Der Versuch wurde nach der Zugabe von Flockungsmittel von 118 g abgebrochen.

Es wurde bei keiner Konzentration eine Klarwasserzone gebildet.

## 6.5 Ergebnisse des Hydrozyklonversuches

Bei dem Versuch zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der  $< 25 \mu\text{m}$  Probe in der Andreasen-Pipette kam es bei Zugabe von Natrium-meta-phosphat  $(\text{NaPO}_3)_x$  zu einer Flockung wie in Abb. 5-21 zu erkennen ist. Somit war eine Bestimmung hiermit nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit die Korngrößen im Bereich  $< 25 \mu\text{m}$  zu bestimmen war im Sedigraph 5120 der Fa. micromeritics. Die hiermit bestimmten Werte lagen zwischen  $2,0$  bis  $2,5 \mu\text{m}$ . Dies wurde als unglaublich beurteilt. Dies könnte auf eine Trübung oder ein Beschlagen der Glasscheibe des Detektors zurückgeführt werden. Der Grund für diese Unbestimmbarkeit war das Bindemittel Zement, denn die Messung davor und danach, die ohne Bindemittel durchgeführt wurden, hat mit der Andreasen-Pipette sowie mit dem Sedigraphen vertrauenswürdige Werte geliefert. Ein Defekt der Apparate wurde somit ausgeschlossen.



Abb. 6-26: Flockung der  $< 25 \mu\text{m}$  Proben des Zyklonversuchs in der Andreasen-Pipette  
Nachdem die Korngrößenverteilung  $< 25 \mu\text{m}$  nicht bestimmt werden konnte, kann auch keine Aussage über die Trennschnittlage getroffen werden.

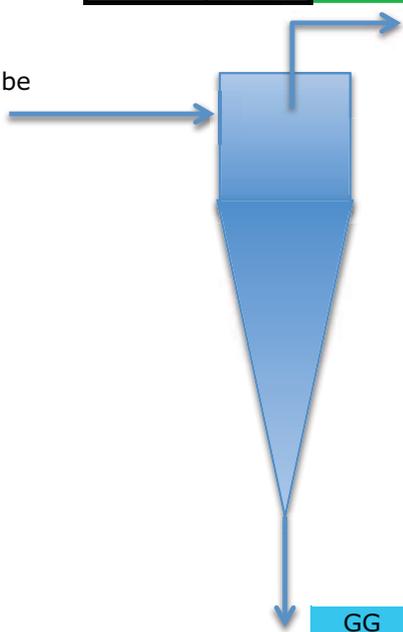
Tab. 6-15: Auswertetabelle der gemessenen (gelb hinterlegt) und der gerechneten Werte des 1.Zyklonversuches

	Überlauf (Feingut)			Unterlauf (Grobgut)		
	$m_{Pr}$	t	M (17)	$m_{Pr}$	t	M (17)
	Masse	Zeit	Massestrom	Masse	Zeit	Massestrom
	[g]	[sec]	[g/sec]	[g]	[sec]	[g/sec]
Nr 1	47,7	2,78	17,16	250,6	2,84	88,24
Nr 2	95,8	2,40	39,92	246,6	2,39	103,18
Nr 3	101,4	2,42	41,90	228,4	2,48	92,10
$\Sigma$	244,9	7,6	32,99	725,6	7,71	94,51

Aufgabe:

> 25 $\mu$ m	13,5	[%]
< 25 $\mu$ m	86,5	[%]
	415,2	[g/l] FG

Aufgabe



Massestrom:	32,99 [g/sec]	rm [%]	25,9 (19)
Masse Trübe:	244,9 [g]		407,1 [g/l] (20)
Nasssiebung bei 25 $\mu$ m			
> 25 $\mu$ m	7,58 [g]		9,6 [%]
< 25 $\mu$ m	71,50 [g]		90,4 [%]
(10) $g_{FS}$	32,3 [%]		
NR für < 25 $\mu$ m			
Trübemasse	768,04 [g]		
1. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	2,25 [g]		
Masse trocken	0,21 [g]		
(10) $g_{FS}$	9,3 [%]		verworfenener Wert
2. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	15,79 [g]		
Masse trocken	1,47 [g]		
(10) $g_{FS}$	9,3 [%]		eingesetzter Wert

Massestrom:	94,51 [g/sec]	rm [%]	74,1 (19)
Masse Trübe:	725,6 [g]		417,95 [g/l] (20)
Nasssiebung bei 25 $\mu$ m			
> 25 $\mu$ m	35,69 [g]		14,9 [%]
< 25 $\mu$ m	203,55 [g]		85,1 [%]
(10) $g_{FS}$	33,0 [%]		
NR für < 25 $\mu$ m			
Trübemasse	1851,6 [g]		
1. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	1,81 [g]		
Masse trocken	0,21 [g]		
(10) $g_{FS}$	11,6 [%]		verworfenener Wert
2. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	16,01 [g]		
Masse trocken	1,76 [g]		
(10) $g_{FS}$	11,0 [%]		eingesetzter Wert

Tab. 6-16: Bilanztafel des 1. Zyklonversuches

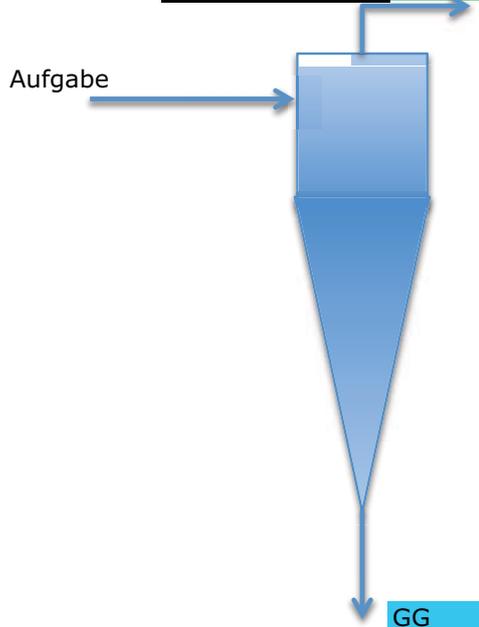
Zyklon- versuch 415,1 [g/l]	Masse- ausbringen Trübe	Gehalt Feststoff	Feststoffinhalt	Inhalts- ausbringen	Gehalt <25µm im Feststoff	Gehalt >25µm im Feststoff	MW	Teilungszahl feingut- bezogen	Teilungszahl grobgut- bezogen
	$r_{m,j}$	$g_{FS,j}$	$r_{m,j} \cdot g_{FS,j}$ = $I_{FS,j}$	$I_{s,j} / I_{FS,a} \cdot 100$ = $r_{FS,j}$	$g_{<25\mu m,j}$	$g_{>25\mu m,j}$		$g_{i,FG} / g_{i,a} \cdot 100$ = $TZ_{i,FG}$	$g_{GG,i} / g_{i,a} \cdot 100$ = $TZ_{i,GG}$
	[%]	[%]	[%%]	[%]	[%]	[%]	[µm]	[%]	[%]
Überlauf, FG $\bar{u}$	25,9	32,3	835,6	25,5	23,0	2,4	> 25	18,0	82,0
Unterlauf, GG $\bar{u}$	74,1	33,0	2444,0	74,5	63,4	11,1	< 25	26,7	73,3
Aufgabe $\bar{a}$	100,0	32,8	3279,6	100,0	86,4	13,6		-	-

Tab. 6-17: Auswertetabelle der gemessenen (gelb hinterlegt) und der gerechneten Werte des 2. Zyklonversuches

	Überlauf (Feingut)			Unterlauf (Grobgut)		
	$m_{Pr}$	t	M (17)	$m_{Pr}$	t	M (17)
	Masse	Zeit	Massestrom	Masse	Zeit	Massestrom
verdünnt	[g]	[sec]	[g/sec]	[g]	[sec]	[g/sec]
Nr 4	926,3	13,12	70,60	440,8	13,10	33,65

Aufgabe:

> 25µm	10,5	[%]
< 25µm	89,4	[%]
	165,0	[g/l] FG



Massestrom:	70,60 [g/sec]	$r_m$ [%]	67,7 (19)
Masse Trübe:	926,3 [g]	112,19 [g/l] (20)	
Nasssiebung bei 25µm			
> 25µm	1,61 [g]	1,7 [%]	
< 25µm	95,35 [g]	98,3 [%]	
(10) $g_{FS}$	10,5 [%]		
NR für < 25µm			
Trübemasse	1207,8 [g]		
1. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	1,87 [g]		
Masse trocken	0,16 [g]		
(10) $g_{FS}$	8,6 [%]	verworfen Wert	
2. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	15,58 [g]		
Masse trocken	1,23 [g]		
(10) $g_{FS}$	7,9 [%]	eingesetzter Wert	

Massestrom:	33,65 [g/sec]	$r_m$ [%]	32,3 (19)
Masse Trübe:	440,8 [g]	275,76 [g/l] (20)	
Nasssiebung bei 25µm			
> 25µm	30,13 [g]	29,2 [%]	
< 25µm	73,18 [g]	70,8 [%]	
(10) $g_{FS}$	23,4 [%]		
NR für < 25µm			
Trübemasse	492,28 [g]		
1. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	1,56 [g]		
Masse trocken	0,23 [g]		
(10) $g_{FS}$	14,7 [%]	verworfen Wert	
2. Feststoffgehaltsbestimmung			
Masse feucht	16,48 [g]		
Masse trocken	2,45 [g]		
(10) $g_{FS}$	14,9 [%]	eingesetzter Wert	

Tab. 6-18: Bilanztafel des 2.Zyklonversuches

Zyklon- versuch 165,0 [g/l]	Masse- ausbringen Trübe	Gehalt Feststoff	Feststoffinhalt	Inhalts- ausbringen	Gehalt <25µm im Feststoff	Gehalt >25µm im Feststoff	MW	Teilungszahl feingut- bezogen	Teilungszahl grobgut- bezogen
	$r_{m,j}$	$g_{FS,j}$	$r_{m,j} \cdot g_{FS,j}$ = $I_{FS,j}$	$I_{s,j}/I_{FS,a} \cdot 100$ = $r_{FS,j}$	$g_{<25\mu m,j}$	$g_{>25\mu m,j}$		$g_{i,FG}/g_{i,a} \cdot 100$ = $TZ_{i,FG}$	$g_{GG}/g_{i,a} \cdot 100$ = $TZ_{i,GG}$
	[%]	[%]	[%%]	[%]	[%]	[%]	[µm]	[%]	[%]
Überlauf, FG	67,7	10,5	708,9	48,4	47,6	0,8	> 25	5,1	94,9
Unterlauf, GG	32,3	23,4	756,5	51,6	36,6	15,1	< 25	56,5	43,5
Aufgabe	100,0	14,7	1465,4	100,0	84,1	15,9		-	-

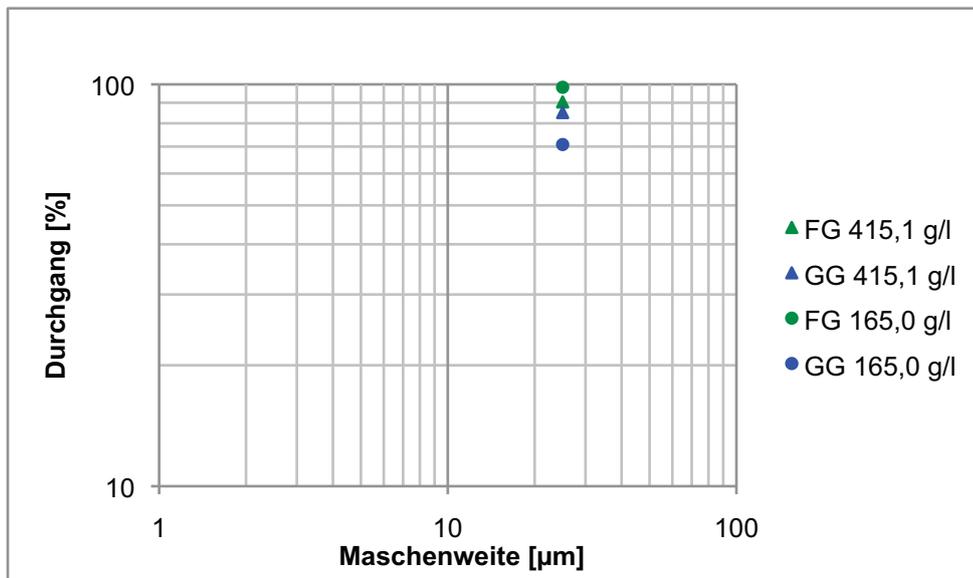


Abb. 6-27: Korngrößenverteilung der Zyklonprobenahmen dargestellt im doppellogarithmischen GGS-Netz

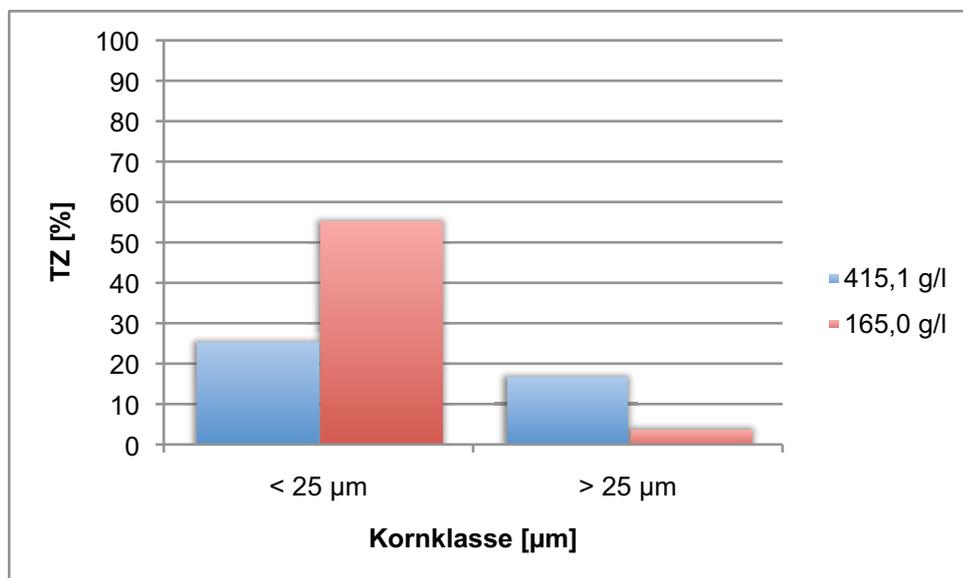


Abb. 6-28: Feingutbezogene Teilungszahl der Zyklonprobenahmen

Zur Analyse des Klassiererfolges ist es entscheidend, welcher Anteil des Inhaltes einer Merkmalsklasse von der Aufgabe in eines der Trennprodukte überführt wurde.

Bei dem Trennschnitt des Zyklons von zirka 10  $\mu\text{m}$  muss bei einem geeigneten Material die feingutbezogene Teilungszahl  $> 25 \mu\text{m}$  Null oder beinahe Null sein. Dies würde bedeuten, dass kein Grobgut im Überlauf ausgebracht wird. Wie in Abb. 6-26 zu erkennen ist, war dies bei keinem der beiden durchgeführten Versuche der Fall. Die  $TZ_{\text{FG}}$  des 1.Versuches lag bei 18,0 und die des 2.Versuches bei 5,1.

Ziel des Versuches war es in erster Linie ein leicht zu entwässerndes bzw. teilweise entwässertes Produkt zu bekommen und nur noch einen kleineren Gutstrom der zum Beispiel durch Druckfiltereinrichtungen zu entwässern wäre. Wenn der Wassergehalt von Aufgabe und Unterlauf verglichen wird, ist zu erkennen, dass beim 1.Versuch dieser von 67,2 % der Aufgabe auf 67,0 % des Unterlaufes und bei dem 2.Versuch von 85,3 % auf 76,6 % gesenkt wurde. Im 1.Versuch war eine große Trübemenge von 74,0 % der Aufgabe im Unterlauf und im 2.Versuch war diese noch 32,3 %. Somit kann man darauf schließen, dass der Hydrozyklon eine Aufgabetrübe mit geringerer Feststoffmassenkonzentration benötigt, um das angestrebte Unterlaufprodukt zu erzeugen. Den DSV-Rücklauf auf eine geringere Feststoffmassenkonzentration zu verdünnen, würde bedeuten, dass das Rücklaufvolumen vergrößert und somit der Volumenstrom erhöht wird. Dies würde den Einsatz der notwendigen Anzahl von Apparaten erhöhen.

## **6.6 Ergebnisse der möglichen Pumpen**

Solange der DSV-Rücklauf gerührt (in Bewegung gehalten) wird, ist die Pumpbarkeit mit jedem üblichen Trübeumpentyp möglich. Es wurde z.B. der Hydrozyklon problemlos mit einer Kreiselpumpe beschickt. Mit diesem Pumpentyp sind Drücke bis sieben bar möglich, bei höheren Drücken muss z.B. auf eine Exzentrerschnecken- oder Kolbenpumpe gewechselt werden. Es hat sich herausgestellt, dass die Suspension mit den Trübeumpen immer pumpbar ist, solange diese frei zum Pumpenansaugstutzen fließt. Dies muss gewährleistet werden, um Schäden an der Pumpe durch Kavitation wie auch den Ausfall des Entwässerungssystems zu vermeiden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten um dies zu verhindern. Eine in der Industrie eingesetzte Variante ist, dass der Rücklauf auf zwei archimedische Schrauben aufgegeben wird. Damit wird garantiert, dass die Suspension immer flüssig der Pumpe zufließt. Es kommt somit nicht zu Brückenbildungen oder zu einem Ansteifen der Suspension im Bereich des Pumpenansaugstutzens.

Um feststellen zu können, wie lange die Suspension nach einer Verweilzeit in einem Becken noch pumpfähig wäre, müssten Versuche bei den jeweiligen Pumpenherstellern oder vor Ort durchgeführt werden, da es keinen einfachen im Labor durchzuführenden Versuch gibt, um dies im Kleinmaßstab zu simulieren. Je nach Anbieter ist jeweils für einen Versuch zwischen 600 Liter (Putzmeister) und 1500 Liter (seepex) Trübe notwendig.

## Literaturverzeichnis

- [1] Gründer, W.: Aufbereitungskunde: Band I Allgemeine Aufbereitung, Hermann Hübener Verlag KG, Goslar, 1965, S. 458/459
- [2] H.Schubert; Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band III; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig; 1984
- [3] Schäffler/Bruy/Schelling; Baustoffkunde; Vogel Buchverlag; Würzburg; 1996
- [4] Wendehorst, Vollenschaar; Baustoffkunde; Vincentz Verlag; Hannover; 1998
- [5] Härig/Klausen/Hoscheid; Technologie der Baustoffe; C.F.Müller Verlag; Augsburg; 2003
- [6] Dokumententitel: Aufschlussdarstellung Bohrkerne (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [7] Plan Nr.: K\_MA\_AS\_GG\_00\_3000\_0004\_E\_02 (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [8] Plan Nr.: K-MA-AS-OBJEAR-TY-NUMM-Exx (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [9] SREJACH Plan Nr.: K\_MA\_AS\_GG\_04\_3000\_0004\_E\_02 (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [10] UNTERSAMMELSDORF Plan Nr.: K\_MA\_AS\_GG\_04\_3000\_0007\_E\_02 (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [11] Bericht: 018-17/09; Entwässerungsverhalten von Seeton Versuchsfeld Untersammelsdorf, Dr. Böhm, 2009
- [12]<http://www5.umweltbundesamt.at/h2ogispub/webgisAuswahlBI.do;jsessionid=220D71586CD9ABC1C20881CA22070682.h2o400webgis> (14.12.2011)
- [13] Plan Nr.: K\_MA\_AS\_GG\_04\_xxx\_0005\_f\_00 (Längenschnitt – Untergrundaufbau, Eisenbahnbrücke Peratschitzen (Objekt MA 15) ) (von ÖBB zur Verfügung gestellt)
- [14] Versuchsfeld Untersammelsdorf, Schlussbericht, Dezember 2009 (S E-3)
- [15] <http://maps.google.com/> (07.01.2012)
- [16] Lang/Huder/Amann/Puzrin; Bodenmechanik und Grundbau; Springer Verlag; Berlin Heidelberg 2011; S. 72
- [17] Ernst&Sohn; Der Ingenieurbau: Grundwissen; Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH; Berlin; 1996; S 279ff
- [18][http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=schergeschwindigkeit%20ton&source=web&cd=8&ved=0CEsQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.tu-dresden.de%2Fbiwigt%2Fgrundbau%2Fstudium%2Fbau%2Fvt%2Fbau\\_vt\\_pt\\_anl.pdf&ei=resnT8v8F8XK0QX328TzBA&usq=AFQjCNG3xRNJYqIKXkgmy5YWC1gRNeVE5A](http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=schergeschwindigkeit%20ton&source=web&cd=8&ved=0CEsQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.tu-dresden.de%2Fbiwigt%2Fgrundbau%2Fstudium%2Fbau%2Fvt%2Fbau_vt_pt_anl.pdf&ei=resnT8v8F8XK0QX328TzBA&usq=AFQjCNG3xRNJYqIKXkgmy5YWC1gRNeVE5A) ; TU-Dresden (31.01.2012)
- [19] Hydratation des Zements und Gefüge des Zementsteins; Verein Deutsche Zementindustrie; 2011
- [20] J. Stark/B. Wicht; Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff; Birkhäuser Verlag; Basel; 2000

- [21] <http://www.vdz-online.de/2096.html> ; Zement-Taschenbuch des VDZ  
(Fassung 2002) Kapitel: 5 Festigkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton  
(30.08.2011)
- [22] A. Herb; Indirekte Beobachtung des Erstarrens und Erhärtens von  
Zementleim, Mörtel und Beton mittels Schallwellenausbreitung; Dissertation  
Universität Stuttgart; 2003

---

## Anhang A, Protokolle

### Protokoll der 1.Sitzung vom 08.Juni 2011

Ort: Leoben/Stmk	Beginn: 10:00 Uhr
Raum: Büro Dr. Böhm	Ende: 11:00 Uhr
Sitzungsleiter: Dr. Böhm	Protokollführer: Moser

---

Teilnehmer:	
Vertreter	Person
Montanuniversität	Dr. Andreas Böhm
ÖBB, Infrastruktur AG	DI Tobias Schachinger
Diplomant	BSc Andreas Moser

#### Thema der Sitzung:

Erstellung/Erarbeitung eines Eröffnungsprotokolles der DA des Diplomanten Herrn A. Moser.

#### Thema der DA:

Entwässerung des DSV-Rücklaufes in einem Teilbereich (Tunnel Untersammelsdorf und Srejach) des Koralmtunnels der ÖBB.

#### Titel der DA:

#### **Auswahl von Filterapparaten und Aufbau eines Entwässerungssystems für zementbehaftete DSV-Schlämme**

Nach einer freundlichen Begrüßung der Anwesenden durch den Sitzungsleiter erfolgte durch diesen auch gleich zu Beginn der Vorschlag einer Gliederung bzw Vorgehensweise der Diplomarbeit (DA).

#### 1. Teil

Suspensionseigenschaften: - (Trübe-)stabilität  
- Klärgeschwindigkeit  
diese variieren je nach Körnung (KGV,  $D_{40}$ ), Zementanteil (W/B-Wert) und Feststoffgehalt

#### 2. Teil

wenn im 1. Teil positive Ergebnisse ermittelt werden (Speicher-/Pufferbarkeit)

- Filtrationseigenschaften der Trübe
- Ziel: Matrix (y-Achse W/Z-Wert beginnend bei 0, ca 4 Bereiche. x-Achse  $D_{40}$ ) in der eine oder mehrere Filtrationseinheiten vorgeschlagen werden (Als mögliche Apparate kommen zur Auswahl: Kammerfilterpresse, Siebbandpresse, Dekanter)
- Ziel: 25 % Restfeuchtigkeitsgehalt (deponiefähig bzw für den Einsatz im Zementdrehrohrofen geeignet)

### 3. Teil

- Wo und wie (mobil/stationär) wird die Apparatur aufgestellt.
- Dimensionierung der Rohre/Leitungen, Pumpen usw.

Weitere Punkte, die kurz besprochen wurden bzw Fragen, die abzuklären sind:

- Bindemittel: Datenblatt vorhanden (Dr. Böhm).
  - Welche Körnung nimmt man an?
  - Wie wird die Trübesuspensionssimulation der Betonsuspension hergestellt?
  - aus dem Tunnelprofil sind die Extreme bez. Körnung zu ermitteln. (nur DSV-Bereich!!!!)
  - Wenn Termin mit Geologe bzw Betontechniker gewünscht, dann unbedingt zwei Wochen vorher bekanntgeben.
  - Hinweis Literatur: bezüglich DSV-Rücklauf studieren (Vorsicht: normal wird DSV in kiesigen Untergrund verwendet und hierbei handelt es sich um toniges/sandiges/schluffiges Material!!)
- Das Tunnelprofil sowie der Bericht des Testfeldes sind zu studieren.  
Als weitere wichtige Unterlage ist der Bericht von Dr. Böhm in Bezug auf dieses Projekt zu lesen.

- weiters wurde die Gesamtlaufzeit der DA (wenn diese in dem vorgegeben Rahmen bleibt und keine laufzeitverlängernden Änderungen vorgenommen werden) mit sechs Monaten festgelegt.

## Protokoll der 2.Sitzung vom 27.Juni 2011

Ort: Gmunden/OÖ	Beginn: 10:00 Uhr
Raum: Büro Dr. Maurer	Ende: 11:30 Uhr
Sitzungsleiter: -	Protokollführer: Moser

Teilnehmer:	
Vertreter	Person
Rohrdorfer; Geosystems	Dr. Holger Maurer
Diplomant	BSc Andreas Moser

### Thema der Sitzung:

Verwendetes Bindemittel (RoInjekt S 90A) im Versuchsfeld Untersammelsdorf, sowie DSV-Rücklaufanalysen

Bei dem eingesetzten Bindemittel handelt es sich um einen Baustoff der von der Zusammensetzung her in etwa einem CEM II B-M (S-L) entspricht. Düsenstrahlbindemittel sind auf das Spezialtiefbauverfahren abgestimmt. In vielen Fällen ist vor allem das Wasserabsetzen des Bindemittels wichtig, welches in einem Bereich von ca. 15 Vol-% und nicht darüber liegen sollte um vergleichbare Prüfergebnisse im Labor zu erzielen

Im Gespräch wurde u.a. auf die Berechnungsformel von Dr. Michael Lesnik hingewiesen, die dieser in seiner Dissertation mit dem Titel: „Ermittlung der Reichweite beim Düsenstrahlverfahren unter Berücksichtigung der Herstellparameter und der Bodeneigenschaften mittels Rückflussanalyse“, 2002, TU Graz ermittelt hat. Diese Formel kann unter Umständen in Form einer Excel-Datei zur Verfügung gestellt werden.

Aus den Dokumenten der Fa. GPS sollte der zu erzielende Bindemittelgehalt je m<sup>3</sup> DSV-Säule herauszulesen sein (liegt in der Regel zwischen 200 bis 300 kg/m<sup>3</sup>). Mit Hilfe der Dichte der Bohrkerns lässt sich somit der W/B-Wert errechnen. Dieser Wert sollte dem zu erzielenden DSV-Körper entsprechen (ein W/B-Wert von ungefähr 1,5 wird vermutet). Es kann der W/B-Wert auch über die Dichte der Suspension, des Bodens, des Bindemittels und des Rücklaufes ermittelt werden...  $\rho_{\text{Rücklauf}} \sim 1,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{Bindemittel}} 2,9 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{Boden}} \sim 1,8-2,1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{Suspension}} \sim 1,48 \text{ g/cm}^3$ .

Im Falle des BV Untersammelsdorf kann aufgrund des Bodens angenommen werden, dass der Rücklauf eine sehr ähnliche bzw gleiche Zusammensetzung wie die produzierte Säule aufweist. Somit wäre hiermit der maximale Wert für die zu erstellende Matrix gefunden. Der andere Extremwert ist Null, wie es auch beim Vorschneiden der Fall ist. Es werden in dem Zwischenbereich noch zwei weitere W/B-Werte frei gewählt.

Als Wassergehalt wird vorgeschlagen 25% bzw 50% zu wählen. Im Versuchsfeld Untersammelsdorf lagen die ermittelten Werte des DSV-Rückflusses zwischen 29,8% und 46,3%.

Wichtige Parameter des Anmachwassers:

- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Temperatur

Wobei der pH-Wert sobald geringe Mengen Bindemittel hinzugefügt werden im erhöhten alkalischen Bereich (pH-Wert 12-13) liegt. Hier hat der pH-Wert des Anmachwassers keinen großen Einfluss auf den pH-Wert des DSV-Rückflusses.

Die Temperatur des Anmachwassers ist wesentlich für das Erstarrungs-/Erhärtungsverhalten zementgebundener Bindemittel. Eine Reduktion von 20°C auf 10°C kann eine Verzögerung der Reaktion um mehrere Stunden bedeuten. Zudem wird die Erhärtung des DSV-Elements unter Umständen verzögert. Deshalb unbedingt Temperatur messen (in Fließgewässer zirka zwischen 8°C bis 12°C)

Vorgang Mischen:

- (Anmach-)wasser und Bindemittel einwiegen (W/B 1,0)
- Wasser in geeigneten Behälter einfüllen
- Bindemittel unter ständigem Rühren beifügen (ca 5000 U/min)
- mit geeignetem Mischer der im hochfrequenten Bereich arbeitet zb: Ultra-Turrax (zw 3500 – 5000 U/min) 5 Minuten aufmischen

im Anschluss bestimmen von:

→ Marsh-Zahl mit Hilfe des Marsh-Trichter (1,5L) 1L Suspension

→ Suspensionsdichte 1 L Suspension in Standzylinder

→ Erstarrungsbeginn/Ende Vicat-Nadelgerät

Verarbeitungszeit ungefähr 1,5 Stunden!

Hiermit ist die beim DSV verwendete Suspension hergestellt.

Um den Rücklauf zu simulieren, muss jetzt in die Suspension, je nach gewünschtem Verhältnis, der Boden (erdfeucht!) hinzugefügt werden. Die Durchmischung erfolgt hier mit einem gewöhnlichen Mörtelmischer.

Es kann auf Wunsch der Universität und nach Rücksprache mit dem Auftraggeber im Labor der Firma Rohrdorfer in Gmunden ein Parallelversuch gefahren werden, um Vergleichswerte für weitere Versuche zu erhalten.

Eine „frisch“ gemischte ca 20 kg Probe des verwendeten Bindemittels Roinjekt S 90A wurde in einem Kunststoff sack für weitere Verwendungszwecke im Labor zur Verfügung gestellt. Bei einem Bedarf, der über die zur Verfügung gestellte Probemenge hinausgeht, kann jederzeit weiteres Bindemittel von der Firma Rohrdorfer zu Verfügung gestellt werden. (Herzlichen Dank für die unkomplizierte Hilfestellung!)

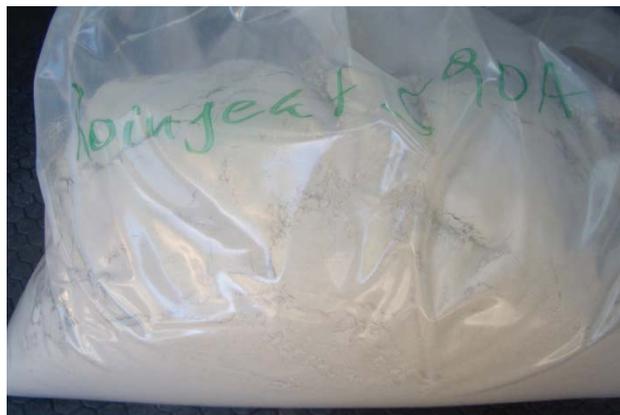


Abb.1.: Bindemittelprobe, Roinjekt S 90A, Rohrdorfer

---

## Protokoll der 3.Sitzung vom 28.Juni 2011

Ort: Wolfsberg/Kärnten	Beginn: 13:00 Uhr
Raum: Büro DI Sandter	Ende: 14:30 Uhr
Sitzungsleiter: -	Protokollführer: Moser

---

Teilnehmer:

Vertreter	Person
BGG, Geologe	DI Hans-Jörg Sandter
ÖBB, Infrastruktur AG	DI Tobias Schachinger
Diplomant	BSc Andreas Moser

### Thema der Sitzung:

Abstimmung der Probenauswahl für die Entwässerungsversuche mit dem Geologen, der mit der örtlichen Geologie vertraut ist

Der Boden des Tunnels Srejach und Untersammelsdorf kommt aus demselben „Liefergebiet“ und deshalb ist die Mineralogie der Böden gleich. Es ist nur die KGV verschieden.

Somit hat sich bestätigt, dass eine gemeinsame Probenahme der beiden Tunnels und eine gemeinsame Analyse und Auswertung der Entwässerungsversuche möglich ist.

Um die Probenahme zu vereinfachen, ist die Möglichkeit angesprochen worden, dass nicht Teilproben aus den Bohrkernen genommen werden, sondern gesamte Holzkisten mit Bohrkernen mit nach Leoben als Probenmaterial mitgenommen werden können. Somit ist sichergestellt, dass die Probenmenge auf jeden Fall mehr als 20 kg beträgt und dadurch genug Material der jeweiligen repräsentativen Schichten zur Verfügung steht, um die Versuche gewissenhaft durchführen zu können.

Die ausgewählten Bohrkernkisten werden in der Velox-Lagerhalle herausgeschlichtet. Geplanter Termin der Probenahme: Mittwoch 13.Juli 2011.

Da bei den Arbeiten zur Zeit Sand dominierte Bereiche in Bearbeitung sind und dies nur den DSV-Bereich Srejach OST entspricht wird die Abfüllung eines BigBags auf unbestimmte Zeit verschoben. Geplant ist hierbei die Probenahme von schluffig/tonigem Material aus einem Schurf heraus. Dies würde nämlich die dominierenden Bereiche des Bodens, welcher im DSV-Bereich vorkommt, repräsentieren. Der schluffig/tonige Boden stellt vermutlich auch die größere Herausforderung im Bezug auf die Filtrierbarkeit dar.

Bei den Gesprächen und Sichtung der Pläne in ausgedruckter Version wird klar, dass nicht alle DSV-Bereiche mit der getroffenen Probenauswahl Beachtung finden. Es wurde darauf hingewiesen, dass die zwischen den aufgelösten Bohrpfahlwänden erforderlichen Zwickelabdichtungen mittels DSV-Körpern hergestellt werden. In die Überlegung zur Auswahl des kiesigen/groben Bereiches sollen noch die Bohrungen 76-B16-09 und 76-B17-09

mitberücksichtigt werden. Womöglich ist einer dieser Bohrkerne mit dem aus der Vorauswahl getroffenen Bohrkern 76-B64-05 zu tauschen.

Aus Sicht des örtlichen Geologen und als Zusammenfassung des Gespräches mit den Anwesenden kann festgehalten werden, dass es sich bei der Probenauswahl (bis auf die oben beschriebenen Änderungen) um repräsentative Proben für die Grenzbereiche handelt, die dem zu erwartenden DSV-Rücklauf entsprechen!

## Bodenprobenahmeprotokoll

Anwesend:

Vertreter

BGG, Geologe → **Probennehmer**

ÖBA, Metz&Partner

ÖBB, Infrastruktur AG

Diplomant

Person

DI Hans-Jörg Sandter

DI Andreas Orthacker

DI Tobias Schachinger

BSc Andreas Moser

Datum: 28.Juni 2011

Uhrzeit: ~15:30

Probenahme aus dem Bohrfahlaustrag mittels Schaufel.

Bezeichnung der Probenahmestelle:

Baulos 60.2 Kühnsdorf; Einreichabschnitt: Mittlern - Althofen; Eisenbahnbrücke MA 15; Pfeiler 5; Pfahl 5.8A (Nähe Ort Peratschitzen)

Bohransatzpunkt 421,60 m.ü.A.

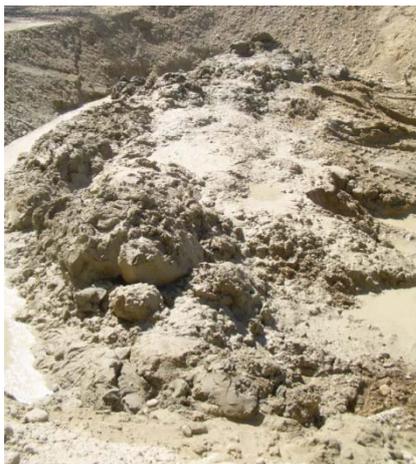


Abb.1.: Bohrfahlaustrag. Im vorderen Bereich schluffig im hinteren Bereich sandig.

→ 2 Probenkübel aus einer Tiefe von -20 m bis -30 m (391,60 m.ü.A. bis 401,60 m.ü.A.)

entspricht dem Boden des DSV-Bereiches Srejach OST.

FEINSAND (örtlich fein bis mittelsandig, schluffig)

Probenmenge: (21,346 + 20,882 → **42,228 kg**)

Der Bohrkern 76-B22-08 liegt wie im Plan „Längenschnitt – Untergrundaufbau, Eisenbahnbrücke Peratschitzen (Objekt MA 15); Plannummer: K\_MA\_AS\_GG\_04\_xxx\_0005\_f\_00“ ersichtlich im Bereich des Pfeilers 5.

Die Bodenanalyse des Bohrkerns aus der Tiefe zwischen 23,60 m und 24,00 m (396,32 m.ü.A. bis 396,72 m.ü.A.) entspricht der Bodenanalyse der genommenen Probe. Werte aus der vorhandenen Analyse im Labor siehe folgende Tabelle:

Bodenart	$w_n$	< 63 mm	< 63 mm > 2,00 mm	< 2,00 mm > 0,063 mm	< 0,063 mm	< 0,002 mm
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
SU	14,6	0	0	76	24	5



Abb.2.: Probenahmestelle des Sand dominierten Bodens

→ 1 Probenkübel aus einer Tiefe von -30 m bis -36 m (385,60 m.ü.A. bis 391,60 m.ü.A.)

SCHLUFF, mittelplastisch, örtlich feinsandig, Konsistenz: steif

Probenmenge: **19,166 kg**

Der Bohrkern 76-B22-08 liegt wie im Plan „Längenschnitt – Untergrundaufbau, Eisenbahnbrücke Peratschitzen (Objekt MA 15); Plannummer: K\_MA\_AS\_GG\_04\_xxx\_0005\_f\_00“ ersichtlich im Bereich des Pfeilers 5.

Die Bodenanalyse des Bohrkerns aus der Tiefe zwischen 28,60 m und 29,00 m (390,92 m.ü.A. bis 391,32 m.ü.A.) entspricht der Bodenanalyse der genommenen Probe. Werte aus der vorhandenen Analyse im Labor siehe folgende Tabelle:

Bodenart	$w_n$	< 63 mm	< 63 mm > 2,00 mm	< 2,00 mm > 0,063 mm	< 0,063 mm	< 0,002 mm
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
SU/ST	17,6	0	0	67	33	7



Abb.3.: Probenahmestelle des schluffigen Bodens

## Wasserprobenahmeprotokoll

Anwesend:

Vertreter

Person

ÖBB, Infrastruktur AG → **Probennehmer**

DI Tobias Schachinger

Diplomant

BSc Andreas Moser

Datum: 28. Juni 2011

Uhrzeit: ~16:30

Entnahme aus einem Fließgewässer: Klopeiner Seebach

Bezeichnung der Probenahmestelle:

Zwischen Untersammelsdorf und Srejach.

Die 3 Behälter wurden zuerst 3-5 mal mit Flusswasser gespült. Im Anschluss wurde die Wasserprobe nach einer Brücke rechts in Fließrichtung entnommen. Die Wassertemperatur wurde mit dem „Präzisionstemperaturmessgerät P300 W Temp von der Firma TFA-Dostmann“ bestimmt. Die Werte schwankten zwischen 19,3°C und 19,1°C. Somit wird die Temperatur mit 19,2°C als bestimmt angesehen.

Probenmenge [kg]	pH - Wert	Temperatur [°C]
3,062	8,39	19,3
3,030	8,34	19,1
2,990	8,33	19,2



Abb. 4.: Wasserprobenahmestelle

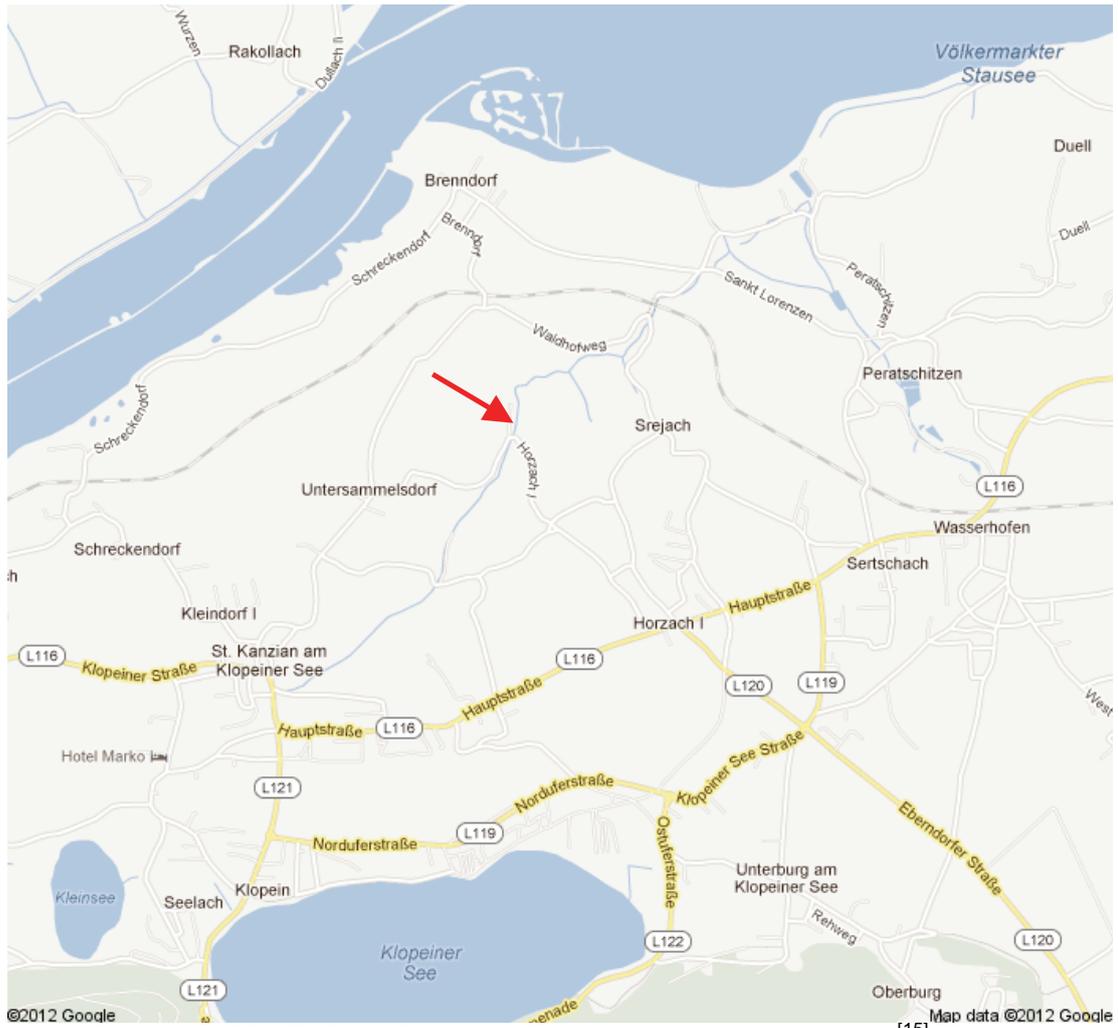


Abb. 5.: Beprobungsstelle des Klopeiner Seebaches<sup>[15]</sup>

# Protokoll 4; Probenahme am 13.Juli 2011

## Bohrkernprobenahmeprotokoll

Anwesend:

Vertreter

BGG, Geologe

ÖBB, Infrastruktur AG

ÖBB, Infrastruktur AG

Montanuniversität

Diplomant

Person

DI Hans-Jörg Sandter

DI Tobias Schachinger

DI Josef Koinig

Dr. Andreas Böhm

BSc Andreas Moser

Datum: 13.Juli 2011

Uhrzeit: ~ 09:30

Ort: „hinter“ dem VELOX Werk in einem Hochregallager für Bohrkerne

Anschrift VELOX-Werk: A-9422 Maria Rojach/Ktn., Dachberg 10

Die ausgewählten Bohrkerne wurden von den anwesenden Personen begutachtet und im Anschluss daran wurde gemeinsam entschieden, welche Bohrernkisten nach Leoben ins Labor mitgenommen werden. Es wurden immer Bohrernkisten gewählt in dem Nahbereich zu der Probenentnahmestelle des Geologen, um hier vergleichbare Ergebnisse für die Untersuchungen zu bekommen.

### ÖBB 1

Hier wurde auf eine Bohrernkiste als Probenahme verzichtet. Eine entsprechende „frische“ Probe wurde bei der letzten Probenahme (8.Juni 2011) schon nach Leoben gebracht. Sicherheitshalber wurde eine „frische“ Rückstellprobe genommen. (siehe Punkt: Rückstellprobe für ÖBB 1)

### ÖBB 2

Bohrmeter 12,0 bis 14,0 m

Mittlern - SREJACH

Bohrernnummer: 76 - B32 - 08

Probenmenge: > 40 kg



Abb.1.: Bohrernkiste der Probe ÖBB 2

### **ÖBB 3**

Bohrmeter 22,0 bis 24,0 m

Abschnitt Mittlere Althofen

Bohrkernnummer: 76 - B16 - 09

Probenmenge: > 30 kg

(Bohrmeter 24,0 bis 26,0 m wird griffbereit gelagert, da es sich hier um grobkörniges Material handelt und die Probenmenge in der Bohrkiste nicht als repräsentative Probe ausreicht)



Abb.2.: Bohrkernkiste der Probe ÖBB 3

### **ÖBB 4**

(FOTO)

Bohrmeter 8,0 bis 10,0 m

Mittlern - Althofen

Bohrkernnummer: 76 - B21 - 09

Probenmenge: > 40 kg



Abb.3.: Bohrkernkiste der Probe ÖBB 4

### **RÜCKSTELLPROBE für ÖBB 1**

Datum: 13.Juli 2011

Uhrzeit: ~11:00

Bezeichnung der Probenahmestelle:

Baulos 60.2 Kühnsdorf; Einreichabschnitt: Mittlern - Althofen; Eisenbahnbrücke MA 15; Pfeiler 5; Pfahl 5.8A (Nähe Ort Peratschitzen)

Probenahme aus dem Bohrfahlaustrag mittels Schaufel.



Abb.5.: Probenahme aus dem Bohrfahlaustrag.

→ 2 Probenkübel aus unbestimmter Tiefe.

Nach Auskunft des zuständigen Geologen entspricht dieses Material dem Boden des DSV-Bereiches Srejach OST.

FEINSAND

Probenmenge: (20,6 + 20,5 →) **41,1 kg**

## Wasserprobenahmeprotokoll

Anwesend:

Vertreter

BGG, Geologe → **Parameter bestimmt**

ÖBB, Infrastruktur AG

ÖBB, Infrastruktur AG

Diplomant → **Probennehmer**

Person

DI Hans-Jörg Sandter

DI Tobias Schachinger

DI Josef Koinig

BSc Andreas Moser

Datum: 13. Juli 2011

Uhrzeit: ~12:10

Entnahme aus dem **Ortswassernetz: St. Kanzian am Klopeinersee**

Die zwei Fässer wurden mehrmals mit dem zu beprobenden Wasser gespült.

Temperatur: 18,5°C

pH-Wert: 7,35

elektrische Leitfähigkeit: 640 µS/cm

Probenahmemasse:

2 Fässer (31,5 kg + 31,2 kg → ) **62,7 kg**



Abb. 4.: Bestimmung der Parameter des Ortswassers



Abb. 5.: Gebinde der Probenahme

## Protokoll 5; Probenahme am 19.September 2011

### Wasserprobenahmeprotokoll

Anwesend:

Vertreter

Person

Diplomant→**Probennehmer**

BSc Andreas Moser

Datum: 19.September 2011

Uhrzeit: ~18:25

Entnahme aus dem **Ortswassernetz: St. Kanzian am Klopeinersee**

Die zwei Fässer und ein 20 Liter Kanister wurden mehrmals mit dem zu beprobenden Wasser gespült.

Temperatur: 19,1°C

pH-Wert: 7,46 (7,35 pH-Wert der 1.Probenahme)

elektrische Leitfähigkeit: nicht bestimmt

Probenahmemasse:

2 Fässer + Kanister (31,3 kg + 31,1 kg + 21,2 kg → ) **83,6 kg**

---

## Protokoll 6 der Sitzung in Leoben am 26. September 2011

Ort: Leoben/Stmk	Beginn: 16:30 Uhr
Raum: Labor	Ende: 18:30 Uhr
Sitzungsleiter: Dr. Böhm	Protokollführer: Moser

---

Teilnehmer:	
Vertreter	Person
Montanuniversität	Dr. Andreas Böhm
ÖBB, Infrastruktur AG	DI Tobias Schachinger
BGG Consult Dr. Peter Waibel ZT	DI Markus Mehlführer
Diplomant	BSc Andreas Moser

### Thema der Sitzung:

Besprechung der ersten Versuchserie sowie der weiteren Versuchsdurchführung

Zuerst wurden die Ergebnisse der Versuche anhand von Auswertungstabellen und Diagrammen (Absetzkurve, Klärgeschwindigkeit, Ergebnismatrix) erklärt. Auch die Rückstellproben, um diesen Effekt (Art Thixotropie) noch einmal vor Augen zu führen, wurden bereitgestellt. Es konnte sich somit jeder der Anwesenden selbst davon überzeugen.

DI Mehlführer merkte an, dass eine Einfärbung der Auswertematrix (Trennung von FLÜSSIG/FEST) die Lesbarkeit erheblich erleichtern würde. Die minimalen Werte (Scherparameter), die ein Material für den sicheren Aufbau und die Standfestigkeit einer Deponie aufweisen muss, wurde von ihm wie folgt festgelegt:  
Innerer Reibungswinkel von  $18^\circ$   
Kohäsion  $5 \text{ KN/m}^2$

Das bedeutet, dass der Boden bzw. das Boden/Bindemittelgemisch mindestens die oben genannten Scherparameter aufweisen muss. Dies erfüllt, nach den Absetzversuchen augenscheinlich beurteilt, das Material nach sieben Tagen Verweildauer im Standzylinder, in dem entscheidenden Bereich der Matrix (450 g/l und 100% bzw 75% bzw 50% Boden), nicht. Daher wurde festgehalten, dass weitere (Druck-)Filtrationsversuche durchzuführen sind und im Anschluss Versuche (vielleicht in dem Labor des Tunnelbauinstitutes) zur Ermittlung der Scherparameter durchgeführt werden.

Weiters wurde besprochen, dass die Standzeit des Materials bis zum „Ansteifen“ ermittelt werden soll. (zb nach 1,2,3,4,5,6 usw Stunden). Die Parameter, die das Bodengemisch aufweisen muss, um noch „pumpbar“ zu sein, werden von Dr.Böhm die nächsten Tage mit einem renommierten Pumpenhersteller abgeklärt.

Ein Ruhenlassen des Boden/Bindemittelgemisches in Absetzbecken wurde aufgrund der geringen Klarwasserbildung sowie dem Problem des „Ansteifen“ des Materials als nicht sinnvoll erachtet. Weiters ist unklar, wie eine „Wiederverflüssigung“ der Suspension durch Einbringen von Scherkräften auszusehen hat. (Einbauten in den Absetzbecken werden ausgeschlossen. Muss hier ein Hydraulikbagger „umrühren“/ „umschaufeln“?)

Ein getrenntes Behandeln des Vorschnittes (ohne Bindemittel) und des Düsenrücklaufes (mit Bindemittel) wird ausgeschlossen, denn es werden mehrere Bohrgeräte im Einsatz sein.

Es wird daran gedacht, den Rücklauf in Leitungen zu einer stationären Filtrationseinheit zu bringen. Dies würde den LKW-Verkehr und die damit verbundenen Belästigungen (Lärm, Vibrationen, Abgase, Staub) für die Anrainer gering halten. Es wurde hier nochmals aufmerksam gemacht, dass es sich bei dieser Trübe um ein Boden-/Bindemittelgemisch handelt. Hier ist besondere Aufmerksamkeit auf die Verlegung/Verstopfung der Leitung zu legen. (Durchspülen etc.)

---

## Protokoll 7 der Sitzung in Gmunden am 18.Oktober 2011

Ort: Gmunden/OÖ	Beginn: 15:30 Uhr
Raum: Besprechungszimmer	Ende: 17:00 Uhr
Sitzungsleiter: DI Schachinger	Protokollführer: Moser

---

Teilnehmer:

Vertreter	Person
Rohrdorfer; Geosystems	Dr. Holger Maurer
Rohrdorfer; Geosystems; QS	DI Franziska Maier
ÖBB, Infrastruktur AG	DI Tobias Schachinger
Diplomant	BSc Andreas Moser

### Thema der Sitzung:

Besprechung der ersten Versuchserie, sowie der weiteren Versuchsdurchführung

Nach einer kurzen Übersicht des Projektes (DSV-Rücklauf des Koralmtunnels...) wurde die Versuchsdurchführung im Labor in Leoben vorgestellt und kritisch hinterfragt.

Die Erklärung der Durchführung wird mit Bildern unterstützt und, um die Ergebnisse der Versuche besser erklären zu können, werden Rückstellproben bereitgestellt. Somit konnte sich jeder der Teilnehmer selbst von der Art thixotropen Eigenschaft ein Bild machen. Rückstellproben sowie erste Auswertungsergebnisse wurden der Fa. Rohrdorfer zur Verfügung gestellt.

Dr. Maurer war verwundert über die Art thixotrope Eigenschaft und hat hierfür nicht wirklich eine Erklärung, da er mit einem derartigen Problem noch nicht konfrontiert wurde.

Dr. Maurer hat keine Bedenken bezüglich der Versuchsdurchführung (Anmischen etc.). Es wird auch bei der Fa. Rohrdorfer für DSV-Rücklaufsimulationen keine Luft im Labor mit eingebracht. Es wird auch darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse im Labor nicht die hohen Festigkeiten wie im DSV-Körper erreichen können, denn im Labor wird die Suspension nicht mit hohem Druck (zB 400 bar) in den Boden eingebracht. Dr. Maurer führt dies darauf zurück, dass sich die Oberfläche und damit die Fläche, an der eine Verbindung mit dem Zement entsteht, verändert. Dies ist eine Überlegung und wurde nicht durch Untersuchungen bestätigt.

Dr. Maurer erklärt auch, dass die hydraulisch wirksamen Phasen im Sediment sind. Dies bedeutet diese gehen nicht in Lösung und befinden sich somit nicht im Klarwasser. Es gibt somit einen W/Z-Wert, der angemischt wird, und einen W'/Z-Wert effektiv. Hierbei muss das Klarwasser vom Anmachwasser abgezogen werden und ein neuer W'/Z-Wert berechnet werden.

Es ist nicht bekannt ob es zu einer Wirkungsunfähigkeit bei zu hohen W/Z-Werten kommt. Angeführt wird, dass die maximal bekannten W/Z-Werte (4,0 bis 4,5) für Schlitzwände eingesetzt werden.

Bezüglich des Anmachwassers wird darauf hingewiesen, dass die Temperatur den größten Einfluss hat. Als Beispiel wird angeführt: Eine Temperaturänderung von 20°C auf 10°C bedeutet die Hälfte der Anfangsfestigkeit. Für die Endfestigkeit spielt dies keine Rolle, denn diese ist gleich. Die Härtebildner im Wasser haben noch einen gewissen Einfluss. Weiters muss auf Sulfat im Anmachwasser geachtet werden, denn dieses führt mit der Zeit zu Problemen, da der Beton angegriffen wird. Dies kann aber in unserem Fall ausgeschlossen werden, da Trinkwasser verwendet wird und die Grenzwerte zur Einhaltung der Trinkwasserqualität unter den Grenzwerten für die Herstellung von Beton liegen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Dr. Maurer bzw die Fa. Rohrdorfer den DSV-Rücklauf sofort bei dem Bohrlochmund beprobt haben, um hier auf die Eigenschaften und die Zusammensetzung des DSV-Körpers schließen zu können. Dem weiteren Verlauf des DSV-Rücklaufs wurde bis jetzt noch keine Aufmerksamkeit gewidmet. (weitere Wasserzugabe der Bohrmannschaft, Absetzbecken, Deponierung etc.)

Dr. Maurer merkt an, dass die Quellfähigkeit und der Sulfitgehalt (Verdacht Pyrit  $\text{FeS}_2$ , da Rostfahnen in der Trübe aufbewahrten < 25  $\mu\text{m}$  Fraktion des Bodens sichtbar) des Materials untersucht werden sollten. Er bietet an, verschiedene Flockungsmittel (Salze, da schon sehr basisch), wenn gewünscht, zur Verfügung zu stellen, um diese in Laborversuchen zu testen. Vielleicht wäre somit eine erste Entwässerung in Absetzbecken möglich.

Eine weitere „frisch“ gemischte ca 18 kg Probe des verwendeten Bindemittels Rolnjekt S 90A wurde in einem Kunststoff sack für weitere Verwendungszecke im Labor zur Verfügung gestellt. Bei einem Bedarf über die zur Verfügung gestellte Probemenge hinaus, kann jederzeit weiteres Bindemittel von der Fa. Rohrdorfer zur Verfügung gestellt werden. (Herzlichen Dank für die unkomplizierte Hilfestellung!)

# Protokoll 8 der Sitzung in Leoben am 27. Oktober 2011

Ort: Leoben/Stmk	Beginn: 16:30 Uhr
Raum: Labor	Ende: 18:30 Uhr
Sitzungsleiter: Dr. Böhm	Protokollführer: Moser

---

Teilnehmer:

Vertreter	Person
SEEPEX, Geschäftsführer	Helmar Friedl
Montanuniversität	Dr. Andreas Böhm
ÖBB, Infrastruktur AG	DI Tobias Schachinger
Diplomant	BSc Andreas Moser

## Thema der Sitzung:

Parameter zur Bestimmung der Pumpbarkeit der Trübe

Nach einer kurzen Übersicht des Projektes (DSV-Rücklauf des Koralmtunnel...) wurde die Versuchsdurchführung im Labor in Leoben vorgestellt.

Folgende Proben wurden in 250ml Becher vorbereitet:

	300 g/l	450 g/l
25% Zement, 75% Boden	I, A	II, B
50% Zement, 50% Boden	III, C	IV, D

Es wurden aus dieser Matrix jeweils eine fünf und eine acht Stunden Probe hergestellt. Als Boden wurden ÖBB1 (sandig; Bez.: I, II, III, IV) und ÖBB4 (schluffig/tonig; Bez.: A, B, C, D) gewählt. Somit sind in Summe acht Becher mit fünf Stunden Proben und acht Becher mit acht Stunden Proben zur Anschauung bereitgestellt worden. Da die zu untersuchenden Suspensionen Zeiteigenschaften (steift an) aufweisen, sind hiermit verschiedenste Zustände mit verschiedenen Viskositäten bereitgestellt worden. Ziel der Sitzung war es, einen Zustand als Grenzzustand für die Pumpbarkeit zu fixieren, um sich orientieren zu können und eine Verarbeitungszeit festlegen zu können.

Allgemeine Erklärungen des Pumpenfachmannes Herrn Friedl

Exzenterschneckenpumpen:

- kein Problem mit Viskositäten etc
- Pumpe nie im Grenzbereich betreiben → sehr rasch kaputt
- Stator besteht aus einem Elastomer (Gummi)
- Rotor besteht aus Metall
- Klemmung zw. Rotor und Stator ca. 0,7 mm, sobald dies beschädigt wird ist kein Druckaufbau mehr möglich
- Unterdruck bis 0,7 bar, dies bedeutet ein Ansaugen bis 7,5 m ist möglich. Wenn mehr → Gefahr von Kavitation → 30 bis 45 Minuten → Pumpe kaputt

- 4 stufige Exzentrerschneckenpumpe für Kammerfilterpresse (max 24 bar möglich, dh 6 bar je Stufe...), 5 m lang, 45 KW Motor
- kontinuierlicher Betrieb der Pumpe kein Problem, Problem bei Stop and Go!! → wegen Sedimentieren des Materials → Anfahren, erhöhte TS (Trockensubstanz, Feststoffgehalt...)
  - o Abhilfe: Spülsituation
    - Saugseite zu (Schieber)
    - Wasser einspülen
    - Start: Pumpe mit „Wasser“ losfahren → Material in Bewegung → flüssig
- nicht über 200 U/min
- kein Problem wegen Abrasion (z.B. Quarz in Suspension)
- 50 bis 60 m<sup>3</sup>/h Förderleistung im kostengünstigen Bereich (Größe der Bauteile, Wartungsmöglichkeiten etc). Förderleistung bis 120 m<sup>3</sup>/h möglich.
- Betriebszeit mindestens 6000 h, dh 1 Jahr, sonst Fehler in der Auswahl oder im Betrieb der Pumpe
- Losbrechmoment ca 2,5 fache des normalen Betriebes, deshalb Pumpe überdimensionieren (auch wegen Anfahrtschwierigkeiten z.B. mit Zement...)
- Ansaugstutzen ca 60 mm. D.h. alles was hier angesaugt wird kann auch gefördert werden.

Idee: das Problem in zwei Teile aufteilen: Becken in dem der DSV-Rücklauf eingeleitet wird. Vorbecken, in dem die Suspension bewegt wird und somit flüssig bleibt. Aus diesem wird dann die Kammerfilterpresse beschickt.

Problem: WIE bekommt man die „steife“ Suspension aus dem Becken ins Vorbecken....??

Idee: Vorbecken → Einbau (Rührwerk, etc) → in Bewegung

Größe des Vorbeckens: Kammerfilterpressenvolumen

Pumpe (zb Exzentrerschneckenpumpe) saugt aus Vorbecken.

Ideen zur Bestimmung Pumpbarkeitsparameter:

- Suspension muss sich am Boden verteilen
- Suspension muss aus Becher selbstständig auslaufen
- Suspension muss von schiefer Fläche ablaufen
- ...

Idee der Abhilfe gegen Brückenbildung: - Rüttler im Ansaugbereich

Prinzipiell ist es möglich eine Garantie zu geben. Diese könnte in Form einer Rücknahme der Pumpe oder einer Veränderung der Pumpenauswahl aussehen, wenn für die ausgewählte Pumpe ein Bewegen der Suspension nicht möglich ist. Mit dieser Garantie werden aber keine Folgekosten (Stillstand der Anlage etc) abgedeckt.

Weiters wäre es möglich, eine Simulation durchzuführen. Hierfür werden 1500 l/h Suspension benötigt!! Dies ist die kleinste Förderleistung, die möglich ist. Dieser Versuch könnte auf dem Gelände der Firma, oder wo auch immer gewünscht, kostenlos durchgeführt werden.

Andreas Stettinger hat 35 Exzentrerschneckenpumpen (der Fa. seepex) in der Kläranlage in Leoben im Einsatz.

---

Einschub Skriptum Prof. Jaberg (Seite 102 ff), TU Graz, Institut für hydraulische Strömungsmaschinen:

Es können alle fließfähigen Medien gepumpt werden, solange das Medium zum Saugstutzen der Pumpe kommt. Es ist eventuell eine Fluidisierung erforderlich (Mischer, Rührer) und Brückenbildung muss vermieden werden. → Saugt Luft, Kavitationsgefahr!

Günstig für Förderung von Feststoffsuspensionen ist eine Mischung von kleinen und großen Körnern → höhere Gemischdichte (Korngrößenverteilung beachten). Dies bedeutet, feine Körner helfen bei der Förderung von groben. Schlecht für die Förderung von Feststoffsuspensionen ist Separation.

Je schneller Partikel ausfallen, umso mehr H-Einbuße (Rohrleitungswiderstand in Meter).

Bei hohen Feststoffgehalten (ab ca 40 %  $g_{FS}$ ) gibt es keine Gesetzmäßigkeiten, den Druckverlust im Voraus zu bestimmen. Daraus resultiert die eigentliche Einsatzgrenze für Kreiselpumpen.

---

Für die weitere Versuchsdurchführung ist die Argumentationslinie wie folgt:

Die Ergebnisse der Absetzversuche im Labor in den Standzylindern zeigen deutlich, dass das Boden-/Zement-/Wasser-Gemisch keinen standfesten bzw. stichfesten Kuchen bildet. Das bedeutet, dass noch keine deponierbare Konsistenz nach dem Absetzen vorliegt.

Um die geeignete mechanische Entwässerung zu ermitteln, sind noch weitere Versuche im Labor in Leoben nötig.

Folgende Firmen bzw Personen wurden kontaktiert:

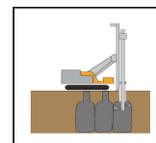
- Roman van Ommen, Geschäftsführer FLSmidth Krebs GmbH
- Prof. Jaberg, TU Graz, Institut für hydraulische Strömungsmaschinen
- Ing. Michael Panholzer, Laborleiter, Andritz Graz
- Franz Hammer, ITT-Austria GmbH, (unter anderem Schmutzwasserpumpen, Kreiselpumpen)
- Helmar Friedl, Geschäftsführer seepex (Exzentrerschneckenpumpen)
- Mag. J. Eibinger, Putzmeister, (Kolbenpumpen)

Keiner der hier genannten Herren kannte einen Standardversuch, mit Hilfe dessen die Pumpbarkeitsgrenze klar festgesetzt werden kann. Zusammengefasst kann gesagt werden, alle haben darauf hingewiesen, dass ein Versuch notwendig ist. Die Pumpbarkeitsgrenze kann somit nur empirisch ermittelt werden. Hierfür sind je nach Anbieter zwischen 600 Liter (Putzmeister) und 1500 Liter (seepex) notwendig.

Zum Unterschied zwischen Kolben-und Exzenterpumpe führt Herr Friedl an:

- Kolbenpumpe arbeitet pulsierend
- Exzentrerschneckenpumpe arbeitet kontinuierlich und ist um ca 20 % billiger, weiters wird diese oft für Kammerfilterpressen verwendet. Es wird mit höchster Drehzahl begonnen und dann geht die Drehzahl runter und der Druck steigt...

# Anhang B, Bindemitteldatenblatt



## Technisches Datenblatt

### RoInjekt S 90 A

Stand 12/2010

Anwendung	Zusammensetzung	Verarbeitung
<p><b>Düsenstrahlverfahren</b> (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting)</p> <p>Speziell entwickelt für Hochdruckinjektionen nach EN 12716 mit statischer und dichtender Funktion.</p> <p>Einaxialdruckfestigkeiten im DSV-Körper von 3 - 6 N/mm<sup>2</sup> (28 Tage bei W/B 1,0).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zemente (EN 197-1)</li> <li>• Latent hydraulische und puzzolanische Stoffe (prEN 15167-1/2 und EN 450)</li> <li>• Füller (EN 12620)</li> </ul> <p>Das Bindemittel ist chromatarm gemäß EG-Verordnung 1907/2006 (REACH).</p>	<p>RoInjekt-Bindemittel können mit allen gängigen Mischanlagen und Injektionspumpen problemlos aufbereitet und transportiert werden.</p> <p>Suspensionseigenschaften abgestimmt auf W/B 0,8 - 1,0.</p>
<b>Kennwerte Trockenbaustoff</b>		
Korndichte	ca.	2,92 [t/m <sup>3</sup> ]
Schüttdichte	ca.	1,0 [t/m <sup>3</sup> ]
Siebrückstand auf 0,09 mm Sieb	<	5,0 [%]
Blaine-Wert (EN 196-6)	ca.	4.400 [cm <sup>2</sup> /g]
<b>Charakteristik (EN 196-3)</b>		
Erstarren	Anfang	140-180 [min.]
	Ende	200-210 [min.]
Wasseranspruch	ca.	28,5 [M.- %]
<b>Druckfestigkeiten (EN 196-1, Normeinschlag)</b>		
28 d	ca.	44 [N/mm <sup>2</sup> ]

**INJEKTIONSBAUSTOFFE**

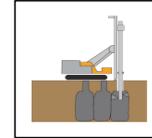
Die vorstehenden Daten beziehen sich auf Versuche unter Laborbedingungen mit den üblichen messtechnischen Toleranzen. Diese – wie auch Aufzeichnungen über sonstige „Eignungsversuche“ – dienen dazu, Erkenntnisse über die grundsätzliche Eignung unseres Produktes in Bezug auf den Einsatzzweck zu gewinnen. Die Angaben sind nicht – auch nicht im Fall einer projektbezogenen Untersuchung – als Eigenschaftszusicherung mit der Folge zu verstehen, dass wir für Schäden infolge Fehlens von Merkmalen und/oder Eigenschaften verantwortlich gemacht werden können. Unsere Erkenntnisse entbinden den Auftraggeber deshalb nicht von eigenen orientierenden Versuchen und eigenverantwortlichen Entscheidungen.

#### Deutschland (Germany) :

GEOSYSTEMS Spezialbaustoffe GmbH  
Sinning 1  
D-83101 Rohrdorf  
Tel: +49 8032/182-112  
Fax: +49 8032/182-197  
Email: info@rohrdorfer.eu

#### Österreich (Austria) :

GEOSYSTEMS Spezialbaustoffe GmbH  
Hatschekstr. 25  
A-4810 Gmunden  
Tel: +43 7612/788-301  
Fax: +43 7612/788-401  
Email : info@rohrdorfer.eu



## Technisches Datenblatt

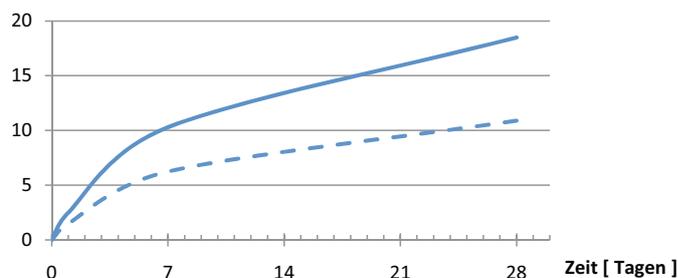
**RoInjekt S 90 A**

Stand 12/2010

<b>Verarbeitung für W/B</b>		<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	
Einwaage Baustoff	ca.	880	745	[kg/m <sup>3</sup> ]
Einwaage Wasser	ca.	705	745	[kg/m <sup>3</sup> ]
Suspensionsdichte	ca.	1,56	1,48	[t/m <sup>3</sup> ]
<b>Suspensionseigenschaften für W/B</b>		<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	
Marsh-Zeit t <sub>0</sub>	ca.	33	30	[sek.]
Fließgrenze	≥	9,0	4,5	[N/m <sup>2</sup> ]
Verarbeitungszeit	ca.	1-2	2-3	[h]
Erstarren	Anfang	500 - 530	610 - 640	[min.]
	Ende	650 - 880	910 - 1.300	[min.]
Wasserabsetzen T <sub>3h</sub>	ca.	7,5 - 13	14-18	[Vol. %]
Wasserabsetzen T <sub>24h</sub>	ca.	9 - 14	16-20	[Vol. %]

**Druckfestigkeitsentwicklung (W/B 1,0)**

**Druckfestigkeit**  
[N/mm<sup>2</sup>]



— Prismendruckfestigkeit der reinen Suspension in Anlehnung an DIN EN 196-1  
 - - Zylinderdruckfestigkeit mit Normsand in Anlehnung an DIN 18136/ ÖNORM B 4415

Hinweise zur Druckfestigkeit:

Alle Werte sind langfristige Mittelwerte und wurden unter Laborbedingungen bei 20 °C ermittelt.

**INJEKTIONSBAUSTOFFE**

Die vorstehenden Daten beziehen sich auf Versuche unter Laborbedingungen mit den üblichen messtechnischen Toleranzen. Diese – wie auch Aufzeichnungen über sonstige „Eignungsversuche“ – dienen dazu, Erkenntnisse über die grundsätzliche Eignung unseres Produktes in Bezug auf den Einsatzzweck zu gewinnen. Die Angaben sind nicht – auch nicht im Fall einer projektbezogenen Untersuchung – als Eigenschaftszusicherung mit der Folge zu verstehen, dass wir für Schäden infolge Fehlens von Merkmalen und/oder Eigenschaften verantwortlich gemacht werden können. Unsere Erkenntnisse entbinden den Auftraggeber deshalb nicht von eigenen orientierenden Versuchen und eigenverantwortlichen Entscheidungen.

Deutschland (Germany):

GEOSYSTEMS Spezialbaustoffe GmbH Tel: +49 8032/182-112  
 Sinning 1 Fax: +49 8032/182-197  
 D-83101 Rohrdorf Email: info@rohrdorfer.eu

Österreich (Austria):

GEOSYSTEMS Spezialbaustoffe GmbH  
 Hatschekstr. 25  
 A-4810 Gmunden

Tel: +43 7612/788-301  
 Fax: +43 7612/788-401  
 Email: info@rohrdorfer.eu

## Anhang C, Grundlagen zu den Sedimentationsversuchen<sup>[2]</sup>

Die Absetzgeschwindigkeit muss experimentell bestimmt werden. Dies geschieht in Messzylindern, deren Durchmesser im Hinblick auf das weitgehende Ausschließen von Wandeffekten  $\geq 50$  mm betragen sollte und die bei Vorliegen eines komprimierbaren Dickschlammes auch möglichst hoch sein sollten.

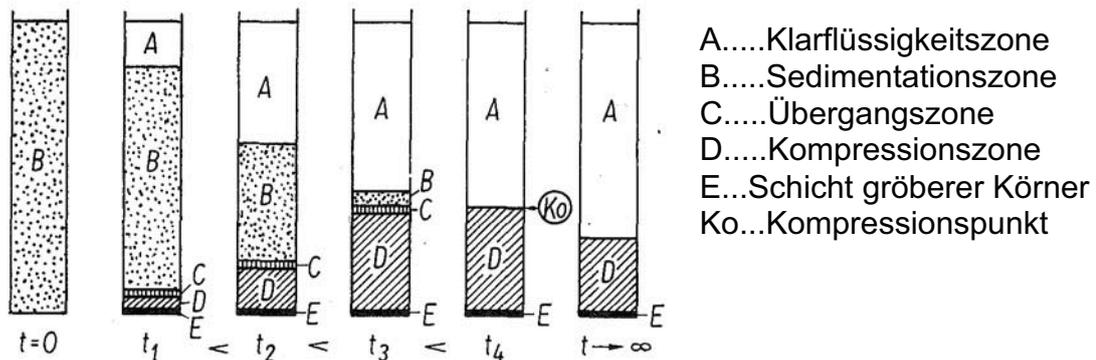


Abb.1: Sedimentations-(Absetz-)Versuch im Messzylinder; Ausbildung der verschiedenen Absetzzonen in Abhängigkeit von der Zeit<sup>[2]</sup>

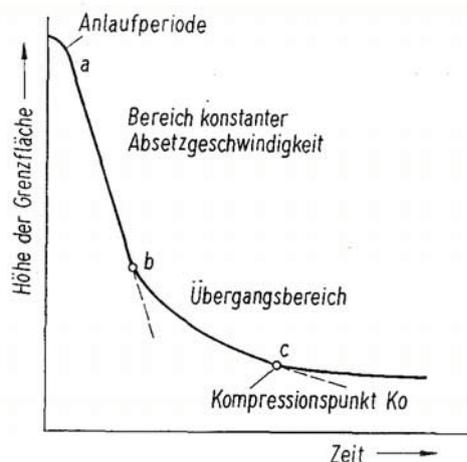


Abb.2: Absetzkurve für geflokkte Trübe<sup>[2]</sup>

Die Trübeprobe wird in den Messzylinder eingefüllt und durch mehrfaches Wenden des Zylinders eine ausreichende Mischung bewirkt.

Nunmehr beginnt der Absetzversuch.

Unter den Bedingungen der Zonensedimentation bildet sich schon bald nach Versuchsbeginn eine deutliche Grenzfläche zwischen der darüber anstehenden Klarflüssigkeitszone und der darunter befindlichen Sedimentationszone heraus. Der Weg dieser Grenzfläche als Funktion der Zeit wird während der Versuchsdauer erfasst und in Absetzkurven dargestellt.

Mit fortschreitender Sedimentation wird die Sedimentationszone immer kleiner, und schließlich ist der Zeitpunkt erreicht, wo B bzw. C in die Kompressionszone eintauchen. Diese Verhältnisse kennzeichnen den Kompressionspunkt  $Ko$ . Anschließend verdichtet sich das Sediment, bis sich die Höhenlage der

Grenzflächen zwischen der Klarflüssigkeit und dem Dickschlamm nicht mehr ändert.

Es ist im Bereich der Zonensedimentation möglich, alle für die Auslegung erforderlichen Informationen (also oberhalb des Kompressionspunktes) aus einer einzigen Absetzkurve – und damit auch nur einem Absetzversuch – zu gewinnen.

## Anhang D, Filtrations-Scherversuchsprotokolle

1.Versuch		100 % Boden		0 % Zement	
Bodentyp:	ÖBB 2	Datum:		16.12.11	
	Einwaage	effektiv	Volumen Zelle - 1cm Sicherheitsabstand		
Boden [g]	167,7	166,1	$7,8^2/4 * \pi * 7,8 = 372,7 \text{ cm}^2$		
Wasser [g]	312,2	309,3			
Zement [g]	0	0,0	Bodenfeuchte (w):		
c	450	[g/l]	ÖBB 2 = 7,5 %		
Masse ges.	479,9	[g]	ÖBB 4 = 12,2 %		
W/Z-Wert	-		Druckbeaufschlagung 7 bar, Stickstoff		
W'/Z-Wert	-		Raumtemp.	23	[°C]
			Suspensionstemp.	-	[°C]
eff. Suspensionsmasse in Zelle			rel. Luftfeuchtigkeit	40	[%]
	475,4 [g]				

Druckfiltrationsauswertung					
Zeit [min]	Filtrat [g]	$\Sigma$ Filtrat [g]	w [%]	Filtrat/Zeit [g/min]	Notiz
1,67	20,99	20,99	63,44	12,57	immer nur
3	7,75	28,74	62,81	2,58	Tropfen
5	8,98	37,72	62,04	1,80	
7	7,33	45,05	61,40	1,05	
12	15,00	60,05	60,00	1,25	
19	16,60	76,65	58,34	0,87	
28	17,40	94,05	56,44	0,62	
35	11,75	105,80	55,05	0,34	
47	17,63	123,43	52,80	0,38	
57	8,32	131,75	51,66	0,15	neu abgedich.
67	10,50	142,25	50,13	0,16	
77	9,75	152,00	48,63	0,13	
87	9,37	161,37	47,10	0,11	
97	9,35	170,72	45,47	0,10	
107	9,17	179,89	43,78	0,09	
128	17,95	197,84	40,15	0,14	
142	11,21	209,05	37,63	0,08	
162	15,17	224,22	33,86	0,09	
179	14,36	238,58	29,85	0,08	
198	12,93	251,51	25,80	0,07	
202	3,18	254,69	24,73	0,02	zischt/Ende
w Aufgabe =	65,1	[%]			
Kuchendicke=	2,3	[cm]			
mF =	11,70	[g]			
mT =	9,21	[g]			
w Filterk. =	21,3	[%]			

Rahmenscherversuchsauswertung:					Probenkörper: 5x5x2 cm
	Auflast [N]	Spindel [N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$T$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
ungest. Pr.:	115	106	0,0460	0,0424	Scherversuch
gest. Pr. 1	200	62	0,0800	0,0248	6 Tage nach
gest. Pr. 2			0,0000	0,0000	Filtration
gest. Pr. 3			0,0000	0,0000	durchgeführt

2. Versuch		100 % Boden		0 % Zement	
Bodentyp:	ÖBB 2			Datum:	17.01.12
	Einwaage	effektiv	Volumen Zelle - 1cm Sicherheitsabstand		
Boden [g]	167,7	165,6	$7,8^2/4 * \pi * 7,8 = 372,7 \text{ cm}^2$		
Wasser [g]	312,2	308,2			
Zement [g]	0	0,0	Bodenfeuchte (w):		
c	450	[g/l]	ÖBB 2 = 7,5 %		
Masse ges.	479,9	[g]	ÖBB 4 = 12,2 %		
W/Z-Wert	-	Druckbeaufschlagung 7 bar, Stickstoff			
W'/Z-Wert	-	Raumtemp.	23	[°C]	
		Suspensionstemp.	-	[°C]	
eff. Suspensionsmasse in Zelle		rel. Luftfeuchtigkeit	36	[%]	
	473,78	[g]			

Druckfiltrationsauswertung					
Zeit [min]	Filtrat [g]	$\Sigma$ Filtrat [g]	w [%]	Filtrat/Zeit [g/min]	Notiz
3,00	29,27	29,27	62,75	9,76	immer nur
10	24,90	54,17	60,54	2,49	Tropfen
20	23,33	77,50	58,22	1,17	
30	18,09	95,59	56,22	0,60	
40	15,44	111,03	54,36	0,39	
50	13,50	124,53	52,60	0,27	
60	12,23	136,76	50,87	0,20	
70	11,23	147,99	49,18	0,16	
80	10,51	158,50	47,49	0,13	
90	9,75	168,25	45,81	0,11	
100	9,27	177,52	44,12	0,09	
110	8,74	186,26	42,42	0,08	
130	16,65	202,91	38,88	0,13	
150	15,20	218,11	35,24	0,10	
170	14,28	232,39	31,41	0,08	
190	15,96	248,35	26,56	0,08	
210	12,61	260,96	22,21	0,06	
211	1,66	262,62	21,59	0,01	zischt/Ende
w Aufgabe =	65,1	[%]	gekneteter Kuchen nach Scherversuch		
Kuchendicke =	2,2	[cm]	mF =	178,12	[g]
mF =	18,30	[g]	mT =	144,65	[g]
mT =	14,52	[g]	w Filterk. =	18,8	[%]
w Filterk. =	20,7	[%]			

Rahmenscherserversuchsauswertung:					Probenkörper: 5x5x2 cm	
	Auflast [N]	Spindel [N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$T$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
ungest. Pr.:	154,2	70	0,0617	0,0280		
gest. Pr. 1	51,8	38	0,0207	0,0152		
gest. Pr. 2	154,2	58	0,0617	0,0232		
gest. Pr. 3	255,6	72	0,1022	0,0288		















10.Versuch		100 % Boden	0 % Zement
Bodentyp:	ÖBB 2		Datum: 24.01.12
	Einwaage	effektiv	Volumen Zelle - 1cm Sicherheitsabstand
Boden [g]	167,7	164,4	$7,8^2/4 * \pi * 7,8 = 372,7 \text{ cm}^2$
Wasser [g]	312,2	306,1	
Zement [g]	0	0,0	Bodenfeuchte (w):
c	450	[g/l]	ÖBB 2 = 7,5 %
Masse ges.	479,9	[g]	ÖBB 4 = 12,2 %
W/Z-Wert	-		Druckbeaufschlagung 7 bar, Stickstoff
W'/Z-Wert	-		Raumtemp. 23 [°C]
			Suspensionstemp. 22,5 [°C]
eff. Suspensionsmasse in Zelle			rel. Luftfeuchtigkeit 42 [%]
	470,59	[g]	

Druckfiltrationsauswertung					
Zeit [min]	Filtrat [g]	$\Sigma$ Filtrat [g]	w [%]	Filtrat/Zeit [g/min]	Notiz
1	16,89	16,89	63,75	16,89	ersten 5 Sek. Strahl, dann Tropfen
3	12,52	29,41	62,73	4,17	
4	4,58	33,99	62,33	1,15	
5	4,05	38,04	61,98	0,81	
10	16,21	54,25	60,50	1,62	
20	23,51	77,76	58,14	1,18	
30	18,26	96,02	56,10	0,61	
40	15,53	111,55	54,20	0,39	
50	13,80	125,35	52,37	0,28	
60	12,46	137,81	50,58	0,21	
80	22,31	160,12	47,03	0,28	
100	19,76	179,88	43,43	0,20	
120	18,06	197,94	39,69	0,15	
140	16,84	214,78	35,72	0,12	
160	15,26	230,04	31,64	0,10	
170	7,53	237,57	29,43	0,04	
180	9,21	246,78	26,52	0,05	
190	7,19	253,97	24,09	0,04	
202,25	8,03	262,00	21,16	0,04	
w Aufgabe =	65,1	[%]			
Kuchendicke =	2,2	[cm]			gekneteter Kuchen nach Scherversuch
mF =	27,08	[g]		mF = 166,28	[g]
mT =	21,54	[g]		mT = 134,02	[g]
w Filterk. =	20,5	[%]		w Filterk. = 19,4	[%]

Rahmenscherversuchsauswertung:				Probenkörper: 5x5x2 cm	
	Auflast [N]	Spindel [N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	T [N/mm <sup>2</sup> ]	
ungest. Pr.:	51,8	90	0,0207	0,0360	
gest. Pr. 1	51,8	58	0,0207	0,0232	
gest. Pr. 2	154,2	64	0,0617	0,0256	
gest. Pr. 3	255,6	76	0,1022	0,0304	







14. Versuch		50 % Boden		50 % Zement	
Bodentyp:	ÖBB 2			Datum:	25.01.12
	Einwaage	effektiv	Volumen Zelle - 1cm Sicherheitsabstand		
Boden [g]	83,9	80,1	$7,8^2/4 * \pi * 7,8 = 372,7 \text{ cm}^2$		
Wasser [g]	313,7	299,6			
Zement [g]	83,9	80,1	Bodenfeuchte (w):		
c	450	[g/l]	ÖBB 2 = 7,5 %		
Masse ges.	481,5	[g]	ÖBB 4 = 12,2 %		
W/Z-Wert	3,7		Druckbeaufschlagung 7 bar, Stickstoff		
W'/Z-Wert	0,8		Raumtemp.	23	[°C]
			Suspensionstemp.	24,2	[°C]
eff. Suspensionsmasse in Zelle			rel. Luftfeuchtigkeit	37	[%]
	459,83	[g]			

Druckfiltrationsauswertung					
Zeit [min]	Filtrat [g]	$\Sigma$ Filtrat [g]	w [%]	Filtrat/Zeit [g/min]	Notiz
1	67,31	67,31	59,17	67,31	ersten 22 Sek. Strahl, dann Tropfen
2	30,57	97,88	55,73	15,29	
4	42,63	140,51	49,82	10,66	
6	33,36	173,87	43,96	5,56	
8	27,86	201,73	37,91	3,48	
10	25,40	227,13	31,14	2,54	
10,33	6,28	233,41	29,23	0,61	

w Aufgabe =	65,2	[%]		
Kuchendicke =	2,4	[cm]	gekneteter Kuchen nach Scherversuch	
mF =	32,42	[g]	mF =	171,06 [g]
mT =	23,30	[g]	mT =	124,43 [g]
w Filterk. =	28,1	[%]	w Filterk. =	27,3 [%]

Rahmenscherversuchsauswertung:				Probenkörper: 5x5x2 cm	
	Auflast [N]	Spindel [N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	T [N/mm <sup>2</sup> ]	
ungest. Pr.:	51,8	68	0,0207	0,0272	
gest. Pr. 1					
gest. Pr. 2					
gest. Pr. 3					

## Anhang E, Informationen von folgenden Personen erhalten

### ***\*Bindemittel***

**Fa. Rohrdorfer, Geosystems, Spezialbaustoffe GmbH**

Dr. Holger Maurer

Hatschekstraße 25

A-4810 Gmunden

+49 160 5830642

[holger.maurer@rohrdorfer.eu](mailto:holger.maurer@rohrdorfer.eu)

### ***\*Institut für hydraulische Strömungsmaschinen (TU-Graz)***

Vorst. Prof. Helmut Jaberg

Kopernikusgasse 24/IV

A-8010 Graz

+43 316 873 7570

[helmut.jaberg@tugraz.at](mailto:helmut.jaberg@tugraz.at)

### ***\*Exzentrerschneckenpumpen***

**seepex**

Helmar Friedl

Geschäftsführer

Obermüllergasse 18

A-3003 Gablitz

+43 676 5161258

[hfriedl@seepex.com](mailto:hfriedl@seepex.com)

### ***\* Kohlendioxid***

**Fa. Linde Gas GmbH**

DI. Thomas Fluch

Technischer Verkauf, Fachbereich Chemie

Carl von Linde-Gasse 1

A-2492-Eggendorf

+43 664 8042733436

[thomas.fluch@at.linde-gas.com](mailto:thomas.fluch@at.linde-gas.com)

### ***\*Restbetonauswäscher***

**ecofrog® GmbH**

Stephan Leutner

Geschäftsführer

Heinkelstr. 13-15

D-68804 Altlussheim

+49 6205 20482 12

[si@ecofrog.eu](mailto:si@ecofrog.eu)