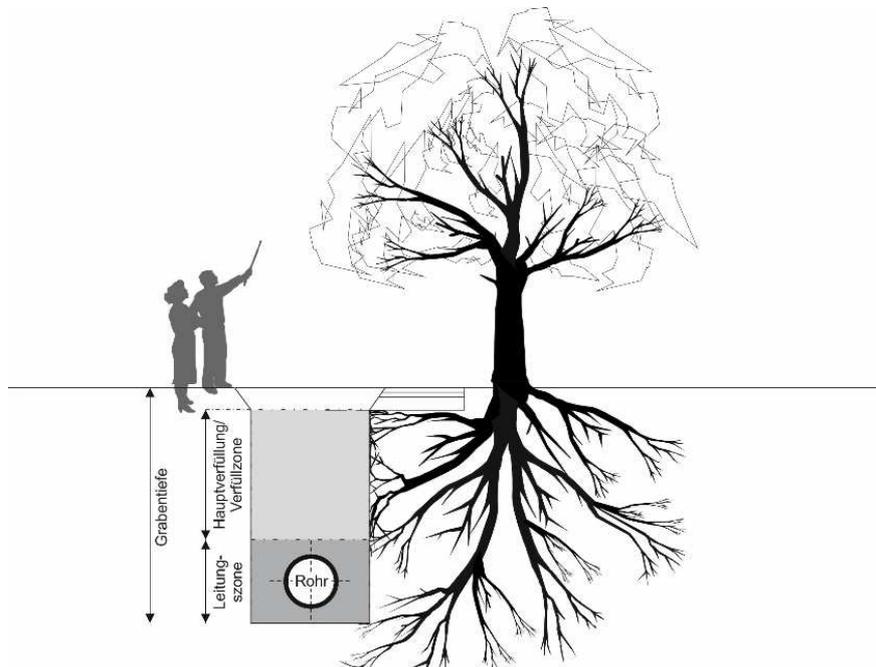


## Entwicklung selbstverdichtender Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs

zum Schutz von Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur in urbanen Räumen  
(1. Teilprojekt)



Abschlussbericht,  
Förderkennzeichen DBU-AZ 31515-23  
(Kurztitel: „Wurzelhemmende Verfüllbaustoffe“)

von

Dipl.-Ing. Jana Simon  
M. Sc. Vincent Felde  
Prof. Dr. Stephan Peth  
Dipl.-Ing. Stefan Kimm-Friedenberg  
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf

Kassel, Februar 2016



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

<p><b>Antragsteller / Forschungseinrichtungen</b></p>	<p><b>U N I K A S S E L V E R S I T Ä T</b></p> <p>Universität Kassel Mönchebergstraße 19 34125 Kassel</p> <p><a href="http://www.uni-kassel.de">www.uni-kassel.de</a></p> <hr/> <p><b>Projektleitung / 1. ausführende Stelle:</b></p> <p>Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf</p> <p>Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie Mönchebergstr. 7 34125 Kassel</p> <p>Tel. 0561-804-2601 · Fax 0561-804-2662</p> <hr/> <p><b>2. ausführende Stelle:</b></p> <p>Univ.-Prof. Dr. Stephan Peth</p> <p>Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften Fachgebiet Bodenkunde Nordbahnhofstr. 1a 37213 Witzenhausen</p> <p>Tel. 0561-804-1594 · Fax 0561-804-1590</p>
<p><b>Bewilligungs- empfänger / kmU</b></p>	<p></p> <p>Stefan Kimm-Friedenberg (GF)</p> <p>KIMM Sand-Kies-Betonzeugnisse Fertigbeton GmbH &amp; Co. KG Stegerwaldstraße 26-28 34123 Kassel</p> <p>Telefon: 0561-9519-0 · Fax: 0561-9519-190</p>

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>31515</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>118.538 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel**      **Entwicklung selbstverdichtender Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs - zum Schutz von Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur in urbanen Räumen (1. Phase)**

**Stichworte**      Verfahren, Baustoff, Boden

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>12 Monate</b>	<b>01.09.2014</b>	<b>31.08.2015</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte      keine

<b>Bewilligungsempfänger</b>	KIMM Sand-Kies-Betonzeugnisse, Fertigbeton GmbH & Co. KG Stegerwaldstr. 26 - 28 34123 Kassel	Tel	0561-9519-0
		Fax	0561-9519-190
		Projektleitung	
		Prof. Dr. B. Middendorf (Uni)	
		Bearbeiter	
		Dipl. Ing. J. Simon (Uni)	
		M. Sc. Vincent Felde	

**Kooperationspartner**      Universität Kassel, Der Präsident, Mönchebergstr. 19, 34125 Kassel  
1. Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie,  
Prof. Dr. rer. nat. B. Middendorf  
2. Fachgebiet Bodenkunde, Prof. Dr. S. Peth

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Unterirdisch steht den Stadtbäumen, aufgrund von Leitungen, Rohren und Gebäudewänden, immer weniger Platz zur Ausdehnung zur Verfügung. Auch ein immer größer werdender Anteil von versiegelten Flächen erschwert den Bäumen die Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie den Luftaustausch. Das Bodengefüge der z.T. schlecht verdichteten Leitungszonen bildet dagegen einen erweiterten Lebensraum. Wurzeln wachsen aber nicht nur in bestehende Porenräume des Bodens, sondern auch in undichte Rohrverbindungen, wo sie zu Verstopfungen, Spannungen und größeren Undichtigkeiten oder Rissen führen können. Selbstverdichtende Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand sollen zum Schutz von Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur in urbanen Räumen als Alternative zu verdichtbaren Schüttgütern entwickelt werden. Sie sollen Rohre und Leitungen spannungs- und hohlraumfrei ohne mechanische Verdichtung ummanteln und den Einwuchs von Baumwurzeln in die Leitungszonen unterbinden. So werden einerseits Rohre und Leitungen vor Wurzeleinwuchs und Schädigungen in Form von Zugschlingen oder Druckstempel und andererseits auch die Bäume vor immer neuen Aufgrabungen und Wurzelkappungen bei Rohrsanierungen geschützt. Ferner führt es zu Kosteneinsparungen der Netzbetreiber und Kommunen, sowie sinkende Lärm-, CO<sub>2</sub> und Staubbelastung der Anwohner und Passanten. Dies ermöglicht eine ausgewogene Koexistenz von Bäumen und unterirdischer Infrastruktur.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die Erarbeitung der Forschungsziele soll in zwei Projektphasen erfolgen. In einer ersten Phase wurden sämtliche vegetations- und bautechnische Kenngrößen definiert und Rezepturen für geeignete selbstverdichtende Verfüllbaustoffe erstellt. Die Erarbeitung der Ergebnisse der ersten Phase erfolgte in 5 Arbeitspaketen, wobei das FG Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie die baustofftechnologischen und das FG Bodenkunde die vegetationstechnischen Untersuchungen durchführte. Die Firma KIMM beschaffte die notwendigen Ausgangsstoffe. Probekörperherstellung, Rezepturermittlungen und Packungsdichteberechnungen waren über die ganze Projektlaufzeit unumgänglich und wurden immer wieder aktualisiert.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Da urbanen Böden oftmals hochgradig verdichtet sind, treffen Baumwurzeln auf maximal verdichtete Böden (> 30 V.-%), die aber aufgrund der unterschiedlichen Tonmineralien und organischen Bestandteile auch wechselnden Quellungs- und Schrumpfungsvorgängen ausgesetzt sind. Da Wurzeln immer den Weg des geringsten Widerstandes wählen, versuchen sie sich Räume mit höherem Porenvolumen und besserem Gasaustausch zu erschließen. Die oft unzureichend verdichteten Leitungsgräben stellen günstige Lebensbedingungen für die Pflanzenwurzel dar. Lediglich mit einer breit gestuften Sieblinie bei optimalen Verdichtungsgraden könnte im Labor theoretisch ein erhöhter Durchwurzelungswiderstand geschaffen werden. Dieser ist allerdings in der Praxis nicht realisierbar, da dort maximale Lasten und geringe Schichthöhen kaum erreichbar sind, sowie Behinderungen durch die Leitungen selbst eine homogene Verdichtung verhindern. Auch konventionelle Flüssigböden können mit Porositäten um 35 V.-% keinen konsequenten Durchwurzelungsschutz gewährleisten. Dies wäre lediglich bei Umgebungsböden mit dauerhaften deutlich höheren Porositäten möglich. Ein sicherer und dauerhafter Wurzelschutz des Leitungsgrabens ist dann gewährleistet, wenn das Bettungsmaterial eine deutlich geringere Porosität aufweist als der umgebende Boden. Auch wenn dieser (je nach Zusammensetzung) unterschiedliche Verdichtungsgrade aufweist, sollten Verfüllbaustoffe eine Porosität von < 30 V.-% dauerhaft gewährleisten. Es ist deutlich geworden, dass dies durch Flüssigböden mit entsprechender Packungsdichteoptimierung (breite, gute abgestimmte Sieblinie, maximales Größtkorn und minimaler Gehalt quellfähigen Tonen) durchaus möglich.

Die damit erreichte hohe Packungsdichte erhöhte aber nicht nur den Durchwurzelungswiderstand, sondern reduzierte auch die Wasserleitfähigkeit sowie den Gasaustausch im Boden durch einen geringen Gehalt an Sekundärporen und eine geringe Luftkapazität. Damit wurden weitere für die Baumwurzeln unattraktive Umgebungsbedingungen geschaffen, die dem Wurzeleinwuchs in den Leitungsgräben entgegenwirken und damit schädliche Interaktionen zwischen Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur verhindern und so eine Koexistenz ermöglichen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

- Simon, J, Felde, V, Middendorf, B & Peth, S 2015, 'Flüssigböden/ZFSV mit hohem Durchwurzelungswiderstand', 3R - Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme, 12/2015, S. 92-95.
- Simon, J, Felde, V, Peth, S, Middendorf, B & Kimm-Friedenberg, S 2015, 'Protecting tree roots and subterranean infrastructure in urban areas by developing self-compacting flowable fills with root growth impeding properties', EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Copernicus GmbH (Copernicus Publications), Wien, Österreich, S. ID 9172.
- Einbindung der Forschungsergebnisse in die universitäre Lehre (Vorlesungen, Bachelorarbeiten usw.)
- Vortrag bei den IKT-Praxistagen 2015

## **Fazit**

Um die labortechnischen Untersuchungen und Ergebnisse auch für die Praxis belegen zu können, sind für die Zukunft großtechnische Erprobungsversuche notwendig. Denkbar sind hier zum einen Trogversuche im Gewächshaus unter definierten und konstanten abiotischen Bedingungen (Klima, Bewässerung, Düngung etc.). Des Weiteren wären Dauerhaftigkeitsversuche unter realen Bedingungen sinnvoll, bei denen der hier entwickelte Flüssigboden unter praxisrelevanten Umständen getestet werden kann. Ein Synergieeffekt wäre erzielbar, wenn die Versuchsreihe, betreut vom IKT in Gelsenkirchen und gefördert von der DBU (AZ 28019), mit einbezogen würde. Dort werden z. Zt. verschiedene Verfüllbaustoffe im Umfeld von Großbäumen am Standort Osnabrück getestet.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>VII</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. Gegenüberstellung der unterschiedlichen Verfüllmaßnahmen im Vergleich zum angrenzenden Boden</b> .....	<b>1</b>
1.1 Charakterisierung der Korngrößenverteilung (Sieblinie, Feinanteile).....	1
1.2 Kornformanalyse.....	1
1.3 Verdichtungsverhalten .....	2
1.4 Dichtebestimmung (Rohdichte, Reindichte, Schüttdichte) .....	3
1.5 Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität.....	3
1.6 Bestimmung der abrasiven Eigenschaften mittels Böhmescheibe .....	3
1.7 Wasserhaushalt .....	4
1.7.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit.....	4
1.7.2 Matrixpotential-/Wassergehaltskurve (pF-Kurve).....	5
1.8 Bestimmung des pH-Wertes .....	7
1.9 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit, Gasdiffusionsmessungen .....	8
1.10 Nährstoffanalyse (Kationenaustauschkapazität).....	9
1.11 Gegenüberstellung und Ausarbeitung der gewonnenen Erkenntnisse .....	10
<b>2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe für Flüssigböden und Erstellung von Rezepturen</b> .....	<b>10</b>
2.1 Ausgangsstoffe.....	10
2.2 Untersuchung der Gesteinskörnungen und Bodenaushube .....	12
2.2.1 Röntgenographische Phasenanalyse .....	12
2.2.2 LAGA M20 - Auswertung und Beurteilung .....	13
2.2.3 Dichtebestimmung (Rohdichte, Reindichte, Schüttdichte) .....	15
2.2.4 Photometrische Salzanalyse .....	16
2.2.5. Organischer Kohlenstoff.....	18
2.2.6 Kornformanalyse .....	19
2.2.7 Bestimmung der Korngrößenverteilung und Feinanteile.....	19
2.2.8 Packungsdichteberechnung .....	24
2.3 Erstellung von Rezepturen .....	24
<b>3. Prüfung im nicht abgebundenen Zustand und Herstellung von Probekörpern.....</b>	<b>27</b>

---

3.1	Augenscheinliche Prüfung auf Mischungsstabilität .....	27
3.2	Ziehmaß, Setzfließmaß, Rohdichte, Luftporen .....	28
<b>4.</b>	<b>Prüfungen im abgebundenen Zustand.....</b>	<b>28</b>
4.1	Druckfestigkeitsprüfung .....	28
4.2	Prüfung auf Schwinden und Quellen .....	30
4.3	Bestimmung der Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität.....	31
4.4	Charakterisierung des Porenraumes mittels MIP, Dichtebestimmung .....	32
4.5	Bestimmung der abrasiven Eigenschaften mittels Böhmescibe .....	33
4.6	Wasserhaushalt .....	34
	4.6.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit.....	34
	4.6.2 Matrixpotential-/Wassergehaltskurve (pF-Kurve).....	35
4.7	Nährstoffanalyse (KAK) .....	36
4.8	LAGA M20 Auswertung und Beurteilung .....	37
4.9	Bestimmung des pH-Wertes .....	39
4.10	Bestimmung der Gasdurchlässigkeit, Gasdiffusionsmessungen .....	39
<b>5</b>	<b>Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....</b>	<b>41</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>43</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>45</b>
	<b>Anhang A: Röntgenographische Phasenanalyse.....</b>	<b>45</b>
	<b>Abweichungen vom Antrag .....</b>	<b>51</b>

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Kornformanalyse (augenscheinlich) in Anlehnung an DIN EN ISO 14688:2011 ....	2
<b>Tabelle 2:</b> Verdichtungsverhalten.....	2
<b>Tabelle 3:</b> Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte der Gesteinskörnungen und Böden .....	3
<b>Tabelle 4:</b> Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität.....	3
<b>Tabelle 5:</b> Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kF-Wert) der Referenzbaustoffe und der Bodenaushube (N = 10, Standardabweichung in Klammern).....	5
<b>Tabelle 6:</b> pH-Werte (H <sub>2</sub> O und CaCl <sub>2</sub> ) der Referenzbaustoffe, der urbanen Böden.....	8
<b>Tabelle 7:</b> LAGA M20 Untersuchungsprogramm und Grenzwerte .....	14
<b>Tabelle 8:</b> LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs I.....	14
<b>Tabelle 9:</b> LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs II.....	15
<b>Tabelle 10:</b> LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs III.....	15
<b>Tabelle 11:</b> Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte der Gesteinskörnungen und Bodenaushube .....	16
<b>Tabelle 12:</b> Chloridgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse).....	17
<b>Tabelle 13:</b> Sulfatgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse).....	17
<b>Tabelle 14:</b> Nitratgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse).....	18
<b>Tabelle 15:</b> Kornformanalyse (augenscheinlich) in Anlehnung an DIN EN ISO 14688:2011	19
<b>Tabelle 16:</b> Rezepturauswahl für weitere Prüfungen in ungebundenen und abgebundenen Zustand (AP3 und AP4).....	26
<b>Tabelle 17:</b> Frischrohddichte der verschiedenen Flüssigböden .....	28
<b>Tabelle 18:</b> Druckfestigkeiten der Flüssigböden.....	29
<b>Tabelle 19:</b> Reindichte, Rohdichte, Porosität der untersuchten Flüssigböden .....	33
<b>Tabelle 20:</b> Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kF-Wert) der Flüssigböden (N = 6, Standardabweichung in Klammern).....	34
<b>Tabelle 21:</b> LAGA M20 Untersuchungen des FBs ohne Bodenaushub (GK16-F0,35) .....	38
<b>Tabelle 22:</b> LAGA M20 Untersuchungen des FBs mit Bodenaushub (GK16-F0,35-BDAI (53%)).....	38
<b>Tabelle 23:</b> pH-Werte (H <sub>2</sub> O und CaCl <sub>2</sub> ) der Flüssigböden.....	39

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Sieblinien der Referenzbaustoffe und der urbanen Bodenaushube (BDA) .....	1
<b>Abbildung 2:</b> Probekörper während der Prüfung (links), Probekörper nach der Prüfung (rechts), Schleifmittel Sand (oben rechts), Schleifmittel Satog (unten rechts).....	4
<b>Abbildung 3:</b> pF-Kurve des Bodenaushubs BDA I mit jeweils 30% und 40% GPV .....	6
<b>Abbildung 4:</b> pF-Kurve des Bodenaushubs BDA II mit jeweils 30% und 40% GPV .....	6
<b>Abbildung 5:</b> pF-Kurve des Bodenaushubs BDA III mit jeweils 30% und 40% GPV.....	6
<b>Abbildung 6:</b> pF-Kurve des Referenzbaustoffs Sand0/4 mit 30% GPV.....	7
<b>Abbildung 7:</b> pF-Kurve des Referenzbaustoffs Satog mit jeweils 30% und 40% GPV.....	7
<b>Abbildung 8:</b> Gaspermeabilität nach der Cembureaumethode, Darstellung der Versuchsanordnung .....	8
<b>Abbildung 9:</b> Gaspermeabilität der Referenzbaustoffe und Bodenaushube .....	9
<b>Abbildung 10:</b> Potentielle Kationenaustauschkapazität (blau) und um den Skelettgehalt korrigierte Kationenaustauschkapazität (rot) der Referenzbaustoffe und urbanen Bodenaushube.....	10
<b>Abbildung 11:</b> Korngrößenverteilung des Kalksteinmehles von Deuna.....	11
<b>Abbildung 12:</b> Gehalte an organischem Kohlenstoff der Referenzbaustoffe und urbanen Bodenaushuben.....	18
<b>Abbildung 13:</b> Gesteinskörnung Sand 0/1 .....	19
<b>Abbildung 14:</b> Sieblinie Sand 0/1 .....	19
<b>Abbildung 15:</b> Gesteinskörnung Sand 0/1 n.g. ....	20
<b>Abbildung 16:</b> Sieblinie Sand 0/1 n.g. ....	20
<b>Abbildung 17:</b> Gesteinskörnung Sand 0/2 (nur grob Material und komplett).....	20
<b>Abbildung 18:</b> Sieblinie Sand 0/2 .....	20
<b>Abbildung 19:</b> Gesteinskörnung Sand 0/4 (komplett und nur grobes Material).....	20
<b>Abbildung 20:</b> Sieblinie Sand 0/4.....	20
<b>Abbildung 21:</b> Gesteinskörnung Kies 1/3.....	21
<b>Abbildung 22:</b> Sieblinie Kies 1/3.....	21
<b>Abbildung 23:</b> Gesteinskörnung Kies 2/8.....	21
<b>Abbildung 24:</b> Sieblinie Kies 2/8.....	21
<b>Abbildung 25:</b> Gesteinskörnung Kies 8/16 .....	22
<b>Abbildung 26:</b> Sieblinie Kies 8/16 .....	22
<b>Abbildung 27:</b> Kalk 0/8 (komplett und nur grobes Material).....	22
<b>Abbildung 28:</b> Sieblinie Kalk 0/8.....	22
<b>Abbildung 29:</b> BDA I.....	23
<b>Abbildung 30:</b> Sieblinie BDA I.....	23
<b>Abbildung 31:</b> BDA II.....	23
<b>Abbildung 32:</b> Sieblinie BDA II .....	23
<b>Abbildung 33:</b> BDA III.....	23
<b>Abbildung 34:</b> Sieblinie BDA III .....	23
<b>Abbildung 35:</b> Flüssigböden, optimiert mit verschiedenen Fuller-Exponenten [Den14].....	24
<b>Abbildung 36:</b> Vier beispielhafte Ziehmaße von Flüssigböden. Stabile Suspensionen (oben), instabile Suspensionen (unten) .....	27
<b>Abbildung 37:</b> Verfestigungsverlauf gemäß H ZFSV:2012 [FGS12].....	29

<b>Abbildung 38:</b> BAM-Setzdehnungsmesser (links), CBR-Topf nach dem Befüllen und vor der Prüfung (mitte), CBR-Topf während der Prüfung und ohne Folie (rechts).....	30
<b>Abbildung 39:</b> Durchschnittliches Schwinden und Quellen bei unterschiedlichem Größtkorn (4, 8, 16 mm), Schwinden in den ersten 2 d (links), minimaler Schwindwert und Quellen (rechts) .....	31
<b>Abbildung 40:</b> CBR-Wert nach TP BF-StB B 7.1.....	32
<b>Abbildung 41:</b> Volumenanteile von Feststoffen (grün) und Poren (Rot) der Flüssigböden...	33
<b>Abbildung 42:</b> Probekörper mit Mantelrohr nach der Prüfung (Schleifmittel Flüssigboden GK4-F0,35-BDAIII (30%)) .....	34
<b>Abbildung 43:</b> pF-Kurve des Flüssigbodens A-Mischung .....	35
<b>Abbildung 44:</b> pF-Kurve des Flüssigbodens GK16-F0,35.....	36
<b>Abbildung 45:</b> pF-Kurve des Flüssigbodens GK16-F0,35-BDAI (53%) .....	36
<b>Abbildung 46:</b> Potentielle Kationenaustauschkapazität (blau) und um den Skelettgehalt korrigierte Kationenaustauschkapazität (rot) der Flüssigböden .....	37
<b>Abbildung 47:</b> Gaspermeabilität der Flüssigböden .....	40
<b>Abbildung 48:</b> Gaspermeabilität der Flüssigböden (Auswahl).....	41
<b>Abbildung 49:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/1.....	45
<b>Abbildung 50:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/1 n.g. ...	45
<b>Abbildung 51:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/2.....	46
<b>Abbildung 52:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/4.....	46
<b>Abbildung 53:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Kies 1/3 .....	47
<b>Abbildung 54:</b> Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Kalk 0/8 .....	47
<b>Abbildung 55:</b> Röntgenographische Phasenanalyse des Kalksteins der Gesteinskörnung Kalk 0/8 .....	48
<b>Abbildung 56:</b> Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes I (BDA I) .....	48
<b>Abbildung 57:</b> Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes II (BDA II).....	49
<b>Abbildung 58:</b> Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes III (BDA III).....	50
<b>Abbildung 59:</b> (links) Pflanzversuche (Vorversuche) an Kaffeepflanzen (Flüssigboden außen, Lösslehm innen) (rechts) Sichtbarer Blumentopf-Effekt nach dem Aufbrechen des Flüssigbodens nach 32 Wochen. ....	51
<b>Abbildung 60:</b> Original (links) und segmentiertes Bild (mitte) einer Coffea arabica Wurzel aus den Vorversuchen zur bildanalytischen Auswertung der Wurzelmorphologie mittels IJ_Rhizo und erste Ergebnisse der Wurzelgeometrie in Form des Verhältnisses von Wurzel Durchmesser zu Wurzelradius (rechts).....	52

## Zusammenfassung

Da der Wurzelraum, welcher urbanen Bäumen zur Verfügung steht, sehr stark eingeschränkt ist, entsteht eine Konkurrenz zwischen städtischem Grün und unterirdischer Infrastruktur, wenn die Baumwurzeln in wieder verfüllte Leitungsgräben einwachsen und somit die verlegten Leitungen und Rohre schädigen oder deren Funktion beeinträchtigen. Um diesen Schäden vorzubeugen und eine ausgewogene Koexistenz zu ermöglichen, muss ein selbstverdichtender Verfüllbaustoff als Alternative zu verdichtbaren Schüttgütern entwickelt werden, der zum einen eine gleichmäßige und spannungsfreie Bettung der Rohre garantiert, und zum anderen einem Wurzeleinwuchs entgegen wirkt, ohne dabei jedoch mechanisch verdichtet werden zu müssen. Zu diesem Zweck wurden in dem Projekt „Entwicklung selbstverdichtender Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs - zum Schutz von Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur in urbanen Räumen“ über elf Monate die vegetations- und bautechnischen Kenngrößen definiert und Rezepturen für geeignete, zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) erstellt. Zwar sind die selbstverdichtenden Eigenschaften konventioneller Flüssigböden an sich schon ein Fortschritt für die bautechnische Praxis (im Vergleich zu konventionellen Schüttgütern) jedoch können diese mit Porositäten um 35 V.-% noch keinen konsequenten Durchwurzelungsschutz gewährleisten, da der Unterschied zu den umgebenden urbanen Böden noch nicht groß genug ist. Anhand der Ergebnisse ist deutlich geworden, dass durch Flüssigböden mit entsprechender Packungsdichteoptimierung (breite, gute abgestimmte Sieblinie, maximales Größtkorn und minimaler Gehalt quellfähiger Tonminerale) durchaus eine Reduktion der Porosität auf unter 30 V.-% realistisch ist. Die damit erreichte hohe Packungsdichte erhöht aber nicht nur den Durchwurzelungswiderstand, sondern reduziert auch die Wasserleitfähigkeit sowie den Gasaustausch im Boden durch einen geringen Gehalt an Sekundärporen und eine geringe Luftkapazität. Damit werden weitere „unattraktive“ Umgebungsbedingungen für die Baumwurzeln geschaffen, welche einem Wurzeleinwuchs in den Leitungsgräben entgegenwirken, somit mögliche Störungen unterirdischer Infrastruktur durch Baumwurzeln verhindern und einen nachhaltigen Baumbestand im Bereich von Leitungsgräben ermöglichen. Ein Großteil der für die Referenzbaustoffe unter optimalen Laborbedingungen erzielten, das Wurzelwachstum hemmenden Eigenschaften lässt sich jedoch wegen nicht erreichbarer Maximallasten oder zu hoher Schichthöhen bei der mechanischen Verdichtung unter Feldbedingungen nicht realisieren, sodass der Vorteil der Flüssigböden gegenüber den Schüttgütern in der Praxis noch größer sein dürfte. Um ein möglichst hohes Maß an Übertragbarkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse in die bauliche Praxis zu gewährleisten sind daher weitere, im Praxismaßstab durchgeführte Versuche notwendig, welche die Effektivität des Wurzelschutzes mit Großbäumen über längere Zeiträume belegen können. Ein Synergieeffekt wäre erzielbar, wenn die entsprechende Versuchsreihe, welche vom IKT in Gelsenkirchen betreut und von der DBU gefördert werden soll (AZ 28019), mit einbezogen würde. Dort werden verschiedene Verfüllbaustoffe im Umfeld von Großbäumen am Standort Osnabrück getestet.

Dieses von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsvorhaben (Az: 31515-23) wurde durchgeführt von der Firma KIMM Sand-Kies-Betonzeugnisse Fertigbeton GmbH & Co. KG, Kassel, sowie den Fachgebieten Bodenkunde (Prof. Peth) und Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie (Prof. Middendorf) der Universität Kassel.



## Einleitung

Die Verlegung von Ver- und Entsorgungsleitungen wird überwiegend noch in offener Bauweise durchgeführt. Dabei werden ein Graben ausgehoben, Leitungen und Rohre verlegt und anschließend mit Schüttgütern verfüllt und verdichtet. Aufgrund mangelhafter Bauausführung wie z. B. zu schmale Gräben, unzureichende oder unausgewogene Verdichtung und der z. T. störenden Leitungen (Telefon, Stromversorgung etc.) kommt es auch aufgrund von Wurzeleinwuchs oder Wurzelumschlingungen immer wieder zu Spannungen und Schäden an Leitungen und Rohren.

Unterirdisch steht den Stadtbäumen aufgrund von Leitungen, Rohren und Gebäudewänden immer weniger Platz zur Ausdehnung des Wurzelwerks zur Verfügung. Auch ein immer größer werdender Anteil von versiegelten und abgedichteten Flächen erschwert den Bäumen die Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie den Luftaustausch. Das Bodengefüge der z. T. schlecht verdichteten Leitungszonen bildet dagegen einen erweiterten Lebensraum für das Wurzelwerk. Wurzeln wachsen aber nicht nur in bestehende Porenräume des Bodens, sondern auch in undichte Rohrverbindungen, wo sie zu Verstopfungen, Spannungen und größeren Undichtigkeiten oder Rissen führen können. Selbst hochwertige Rohr- und Schachtmaterialien können diesen Schwierigkeiten nicht entgegen wirken [IKT01] [Stu04]. Kostenintensive Aufgrabungen, baumschädigende Wurzelkappungen und zeitlich aufwendige Reparaturen sind die Folge. Trotz der Schäden an den Ver- und Entsorgungsleitungen sind Bäume zweifellos in unseren urbanen Ökosystemen von entscheidender Bedeutung und unverzichtbar. Daraus leitet sich zwangsläufig die Aufgabe ab, eine ausgewogene Koexistenz von Bäumen und unterirdischer Infrastruktur zu erarbeiten.

Zwischen dem Abstand der Rohre und Leitungen zum Baum und der Häufigkeit der Einwüchse können ebenso Zusammenhänge festgestellt werden, wie auch zwischen dem Porenraum des Verfüllbaustoffs und dem Wurzeleinwuchs [Stu04]. Diese Beobachtung erfordert den Einsatz gezielt ausgewählter, schlecht durchwurzelbarer Bettungsmaterialien, die das Risiko des Wurzeleinwuchses in Abwasserleitungen und -kanälen minimieren. An dieser Stelle knüpfen unsere Forschungsarbeiten an, in denen Rezepturen für selbstverdichtende Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs zum Schutz von Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur in urbanen Räumen als Alternative zu verdichtbaren Schüttgütern entwickelt wurden. Diese neu entwickelten Verfüllbaustoffe sollen Rohre und Leitungen spannungs- und hohlraumfrei ohne mechanische Verdichtung ummanteln und den Einwuchs von Baumwurzeln in die Leitungszonen unterbinden. So werden einerseits Rohre und Leitungen vor Wurzeleinwuchs und Schädigungen in Form von Zugschlingen oder Druckstempel und andererseits auch die Bäume vor immer neuen Aufgrabungen und Wurzelkappungen bei Rohrsanierungen geschützt. Ferner führt es zu Kosteneinsparungen der Netzbetreiber und Kommunen, sowie sinkende Lärm- und Staubbelastung der Anwohner und Passanten.

Dafür sind neben den bautechnischen Untersuchungen, die sich hauptsächlich mit der Optimierung des Verfüllbaustoffs nach H ZFSV [FGS12] befassen, auch die vegetationstechnischen Aspekte, welche sich mit dem Boden als durchwurzelbaren Bodenraum und dem Verfüllbaustoff als wurzefeindliche Umgebung befassen, zu berücksichtigen.



## 1. Gegenüberstellung der unterschiedlichen Verfüllmaßnahmen im Vergleich zum angrenzenden Boden

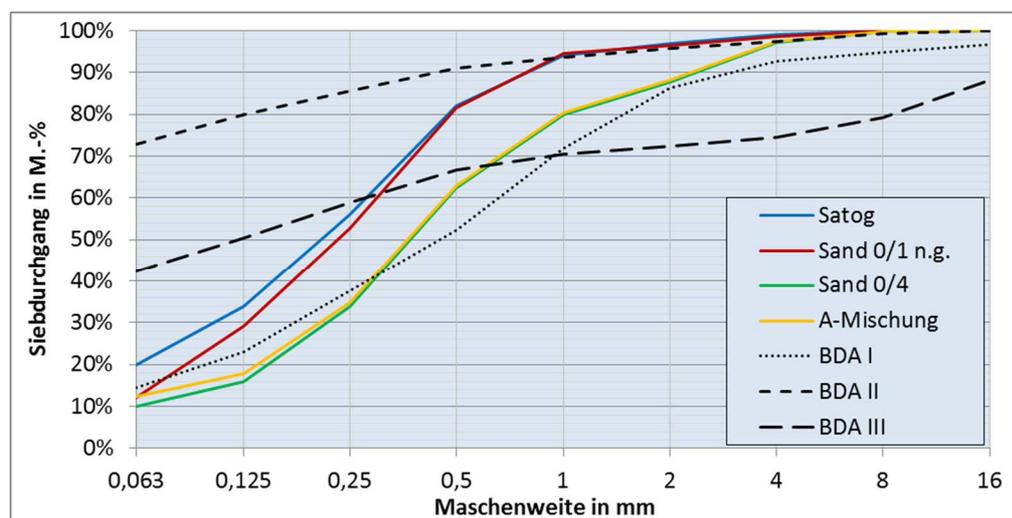
Im konventionellen Leitungsbau werden als Schüttgüter in der Regel ungewaschene Sande verwendet, die schichtenweise verdichtet werden müssen. Des Weiteren werden bei Baumaßnahmen mit erhöhten Anforderungen an die Dichtigkeit auch tonhaltige Schüttgüter (ungewaschene Sande mit tonhaltigen und mineralischen Zusätzen) verwendet. Alternativ werden bei der Grabenverfüllung immer mehr zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV), die sogenannten Flüssigböden, eingesetzt.

In diesem Arbeitspaket werden folgende Verfüllbaustoffe (Referenzbaustoffe) im Vergleich zu konventionellen urbanen Böden (BDA I, BDA II, BDA III → **Kapitel 2**) betrachtet:

- Schüttgüter: Sand 0/1 n.g. (nicht gewaschen), Sand 0/4 (ungewaschen)
- tonhaltiges Schüttgut: Satog der Firma KIMM (Sand 0/1 + tonhaltige Komponente)
- konventioneller Flüssigboden: A-Mischung (Gesteinskörnung: 95 M.-% des Sand 0/4)

### 1.1 Charakterisierung der Korngrößenverteilung (Sieblinie, Feinanteile)

Wie **Abb. 1** zeigt, weisen die Sieblinien der konventionellen Verfüllvarianten breitgestufte Sieblinien mit einem Mehlkorngelalt (<0,125 mm [Mac06]) von 16 bis 34 M.-% auf. Alle vier Sieblinien und insbesondere die mit dem Hauptbestandteil Sand 0/4, bieten somit ideale Voraussetzungen für eine hohe Packungsdichte mit geringem Hohlraumgehalt. Bei den drei ausgewählten Bodenaushuben (BDA) trifft dies nur auf den BDA I zu. BDA II und BDA III zeichnen sich dagegen durch einen sehr hohen Mehlkorngelalt von 50 bis 80 M.-% aus, der im verdichteten Zustand einem hohen Feinporengehalt erwarten lässt [Blu10].



**Abbildung 1:** Sieblinien der Referenzbaustoffe und der urbanen Bodenaushube (BDA)

### 1.2 Kornformanalyse

Da gemäß DIN EN ISO 14688:2011 die Kornformanalyse nur an Teilchen mit einem Durchmesser von mind. 4 mm erfolgen kann, werden bei den Referenzbaustoffen Satog und der A-Mischung nur deren Ausgangsstoffe > 4 mm augenscheinlich, ggf. unter Zuhilfenahme einer Lupe, überprüft. Wie aus **Tabelle 1** deutlich wird, handelt es sich, wie auch in **Kapitel 2.2.7** deutlich wird, um gemischtkörnige Sande und Böden:

**Tabelle 1:** Kornformanalyse (augenscheinlich) in Anlehnung an DIN EN ISO 14688:2011

	Rundung	Oberfläche	Form
Sand 0/1 n.g.	scharfkantig bis gerundet	überwiegend rau	kubisch, flach
Sand 0/4	scharfkantig bis stark gerundet	überwiegend glatt	kubisch, flach, länglich
BDA I	kantig bis gerundet	rau bis glatt	kubisch, flach, länglich
BDA II	überwiegend scharfkantig	rau bis glatt	kubisch, flach
BDA III	scharfkantig bis stark gerundet	rau	kubisch, flach

### 1.3 Verdichtungsverhalten

Die Porosität aller Referenzbaustoffe (ausgenommen Flüssigboden) wurde im lockeren Zustand (Schüttung) und im mechanisch verdichteten Zustand (Last 4,9 kg) analysiert und die Differenz als maximale Verdichtung angenommen (**Tabelle 2**).

In **Tabelle 2** zeigt sich, dass die hier untersuchten Bodenaushube im lockeren Zustand Porositäten von 50 bis 60 V.-% aufweisen. Da Böden in urbanen Räumen aber oftmals hohen Verdichtungsgraden unterliegen, treffen Baumwurzeln auf maximal verdichtete Böden. Die hier untersuchten, mechanisch verdichteten Böden weisen Porositäten von 31 – 37 V.-% auf, was den Wurzeln einen wesentlich höheren Widerstand entgegengesetzt. In der Praxis muss allerdings berücksichtigt werden, dass wechselnde Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge die Porengrößenverteilung ändern, sodass Wurzeln z. B. in neu entstandene Schrumpfrisse leichter einwachsen können. Da Wurzeln immer den Weg des geringsten Widerstandes wählen, versuchen sie sich Räume mit höherem Porenvolumen, bzw. größeren Porendurchmessern und besserem Gasaustausch zu erschließen [Stu04].

**Tabelle 2:** Verdichtungsverhalten

	Porosität Schüttdichte [V.-%]	Porosität nach „Verdichtung“ [V.-%]	$\Delta$ [V.-%]
Sand 0/1 n.g.	59 %	42 %	17 %
Sand 0/4	46 %	30 %	16 %
BDA I	50 %	31 %	19 %
BDA II	60 %	37 %	23 %
BDA III	55 %	33 %	22 %
Satog	41 %	35 %	6 %
A-Mischung	---	36 %	---

Die oft schlecht verdichteten Leitungsgräben stellen mit den hier untersuchten lockeren Verfüllbaustoffen (Porositäten von 41 – 59 V.-%) sehr günstige Lebensbedingungen für die Pflanzenwurzel bereit. Selbst bei hoher Verdichtung könnte der Sand 0/1 mit 42 V.-% Poren keine Durchwurzelung verhindern. Satog würde mit 35 V.-% und der konventionelle Flüssigboden mit 36 V.-%, lediglich im Vergleich zum BDA II ein minimal erhöhten Widerstand darstellen. Ein dauerhafter Wurzelschutz kann damit aber nicht sichergestellt werden. Der beste Wurzelschutz könnte theoretisch von dem perfekt abgestimmten Sand 0/4 erreicht werden. Diese Verdichtungsgrade sind in der Praxis allerdings unrealistisch, da die mechanische Verdichtung im Labor unter optimalen Bedingungen ohne Behinderungen und mit maximalen Lasten und geringen Schichthöhen erzielt wurden. Für praxisrelevante Ergebnisse müssten Großversuche erstellt werden, die alle Einflussgrößen mit betrachten.

Ein sicherer und dauerhafter Wurzelschutz des Leitungsgrabens ist dann gewährleistet, wenn das Bettungsmaterial eine geringere Porosität aufweist als der umgebende Boden. Auch wenn jeder Boden eine andere Zusammensetzung und somit andere, auch

wechselnde, Verdichtungsgrade aufweist, sollte eine Porosität von des Bettungsmaterials < 30 V.-% ausreichen.

#### 1.4 Dichtebestimmung (Rohdichte, Reindichte, Schüttdichte)

Die in diesem Projekt untersuchten Referenzbaustoffe und Böden weisen die in **Tabelle 3** dargestellten Dichten auf. Die Reindichte wurde gemäß DIN 66137-2:2004 mittels Heliumpyknometer „MultiPyknometer“ von „Quantachrome Instruments“ bestimmt. Die Rohdichte wurde an den mechanisch verdichteten und die Schüttdichte an den locker gelagerten Gesteinskörnungen und Böden mittels Masse in Kombination mit dem eingenommenen Volumen im Messzylinder bestimmt:

**Tabelle 3:** Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte der Gesteinskörnungen und Böden

	Reindichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Sand 0/1 n.g.	2625,3	1513,7	1078,8
Sand 0/4	2654,2	1860,8	1445,1
BDA I	2634,8	1821,2	1258,3
BDA II	2669,9	1671,0	1057,9
BDA III	2656,2	1769,4	1219,1
Satog	2136,5	1384,3	1256,6
A-Mischung	2607,6	1677,0	---

#### 1.5 Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität

Nach ZTV-E StB 09:2009 werden die hier zu bestimmenden Referenzbaustoffe wie folgt eingeteilt und hinsichtlich ihrer Stabilitäts- und Tragfähigkeitseigenschaften bewertet:

**Tabelle 4:** Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität

	Kurzzeichen	Wiederaushubfähigkeit (WAF)	Frostbeständigkeit	Volumenstabilität
Sand 0/1 n.g.	SW	Je nach Feuchtegehalt und Verdichtungsgrad eine leichte bis mittlere WAF	nicht frostempfindlich	Je höher der Anteil quellfähiger Tone, desto größer das Schwindverhalten und desto geringer die Volumenstabilität*
Sand 0/4	SW		nicht frostempfindlich	
BDA I	ST		gering bis mittel frostempfindlich	
BDA II	ST*		sehr frostempfindlich	
BDA III	ST*		sehr frostempfindlich	
Satog	SW		nicht frostempfindlich	
A-Mischung	--- (SW <sup>+</sup> )	Mittlere WAF	sehr frostempfindlich <sup>++</sup>	Volumenstabilität*

<sup>+</sup> Bei Betrachtung der ungebundenen Ausgangsstoffe

<sup>++</sup> Im Arbeitskreis FGSV-5.3.2 [FGS12] wird diese Thematik aktuell noch diskutiert. Bisher gilt: Flüssigböden sind frostempfindlich.

\* vgl. auch Kapitel 1.7.2

#### 1.6 Bestimmung der abrasiven Eigenschaften mittels Böhmescheibe

In Anlehnung an DIN EN 13892-3:2015, in der die Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme beschrieben wird, soll die abrasive Wirkung zweier Beispielschüttung an dem Mantelrohr des Fernwärmerohres hergeleitet werden. Als Schleifmittel wird einmal Sand 0/1 und einmal Satog verwendet, da gröbere Körnungen als Schleifmittel nicht eingesetzt werden konnten.

Der Probekörper aus Mörtel (70 · 70 · 70 mm) wird mit dem Mantel eines Fernwärmerohres (bewegt sich im Boden durch Wärmedehnung) bespannt und kraftschlüssig verklebt. Diese Seite bildet dann auch die Prüffläche des Probekörpers **Abb. 2**.



**Abbildung 2:** Probekörper während der Prüfung (links), Probekörper nach der Prüfung (rechts), Schleifmittel Sand (oben rechts), Schleifmittel Satog (unten rechts)

**Abb. 2 (oben rechts)** zeigt deutliche Beschädigung und tiefe Furchen des Schleifmittels Sand auf der Manteloberfläche. Sande als Bettungsmaterial für Rohr- und Kabelmaterialien, die während der Nutzungsdauer Bewegungszyklen unterworfen sind, können eine stark abrasive Wirkung aufweisen, wenn die Körner mit Druck an der Oberfläche entlang gedrückt werden. **Abb. 2 (unten rechts)** zeigt im Vergleich zum reinen Sand geringere Beschädigungen und Schleiffurchen für das tonhaltige Schüttgut Satog. Es ist sogar festzustellen, dass sich die tonhaltigen Bestandteile des Satogs in den Riefen und auf der Oberfläche ablagern und so die Manteloberfläche vor stärkeren Beschädigungen schützen.

## 1.7 Wasserhaushalt

### 1.7.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Um die bloße Reduktion des Porenraumes der Flüssigböden im Vergleich zu den urbanen Böden und Referenzbaustoffen als Einflussgröße auf die Wasserhaushaltskennwerte mit zu erfassen, wurden für diese Analyse von allen Substraten zehn Probekörper mit jeweils 30 % und 40 % Gesamtporenvolumen (GPV) aus gestörten Bodenproben hergestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung nach DIN 19683-9:2012 sind in **Tabelle 5** dargestellt. Bei allen Proben ist der Einfluss der Reduktion des GPV sehr deutlich erkennbar, da die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit abnehmendem GPV in allen Fällen deutlich sinkt (um 73 % bis 91 %). Überdurchschnittlich hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten wurden bestimmt für Sand 0/4 mit 30 % GPV. Im Vergleich zu den anderen Substraten hat Sand 0/4 eine sehr homogene Kornform und ist sehr gut sortiert (Dominanz von Körnern im Bereich des Mittel- und Feinsandes: 125-500 µm). Dies führt zu einem homogenen und sehr konnektiven Porenraum, welcher Wasser in gesättigtem Zustand sehr schnell leitet.

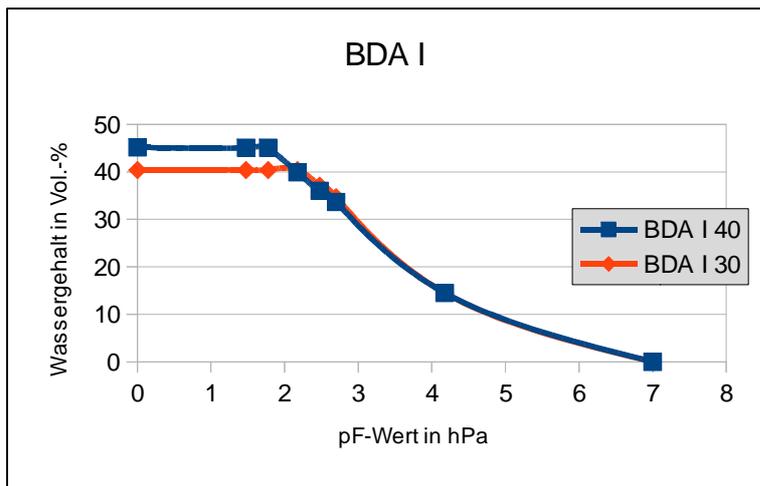
**Tabelle 5:** Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_F$ -Wert) der Referenzbaustoffe und der Bodenaushube ( $N = 10$ , Standardabweichung in Klammern).

Probenbezeichnung	GPV	$\text{cm s}^{-1}$	$\text{cm d}^{-1}$
BDA I	30%	0,000012 ( $\pm 0,000001$ )	1,02 ( $\pm 0,16$ )
	40%	0,000084 ( $\pm 0,000018$ )	7,22 ( $\pm 1,59$ )
BDA II	30%	0,000013 ( $\pm 0,000001$ )	1,09 ( $\pm 0,11$ )
	40%	0,000046 ( $\pm 0,000006$ )	3,98 ( $\pm 0,53$ )
BDA III	30%	0,000008 ( $\pm 0,000001$ )	0,70 ( $\pm 0,09$ )
	40%	0,000038 ( $\pm 0,000004$ )	3,28 ( $\pm 0,36$ )
Satog	30%	0,000008 ( $\pm 0,000001$ )	0,69 ( $\pm 0,12$ )
	40%	0,000086 ( $\pm 0,000046$ )	7,40 ( $\pm 4,06$ )
Sand 0/4	30%	0,000620 ( $\pm 0,000065$ )	53,56 ( $\pm 5,68$ )

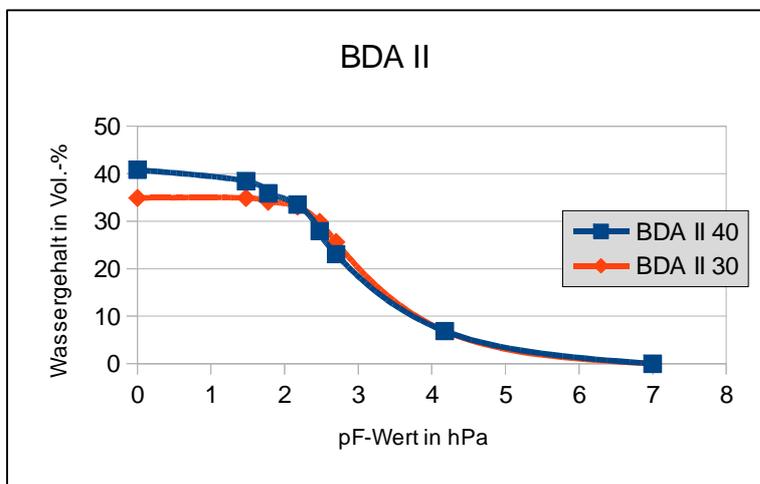
+ Aufgrund der geringen Stabilität ließ sich für die Substrate Sand0/1 für beide GPV, ebenso wie für die Variante Sand0/4 mit 40% GPV kein Probenkörper herstellen.

### 1.7.2 Matrixpotential-/Wassergehaltskurve (pF-Kurve)

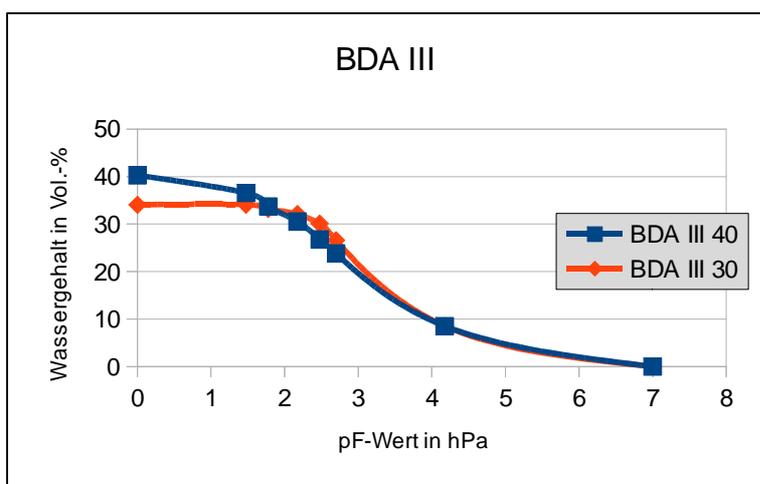
Die Charakterisierung der Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential (auch pF-Kurve genannt) erlaubt es, Aussagen über die Porengrößenverteilung und somit den Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser zu treffen [Har14]. Wasser in Bereichen zwischen pF 1,8-2,5 und pF 4,2 wird als pflanzenverfügbar angesehen und mit dem Begriff der „Feldkapazität“ beschrieben, während jenes ab pF 4,2 als sogenanntes „Totwasser“ bezeichnet wird, da es nicht mehr durch Pflanzen aufgenommen werden kann. Aus diesem Grund wird der Grenzwert von pF 4,2 (bzw. die Wasserspannung von -15.000 hPa) auch als „permanenter Welkepunkt“ ausgedrückt. Man spricht daher auch von „nutzbarer Feldkapazität“, wenn man das Totwasser von der Feldkapazität subtrahiert. In Poren mit Äquivalentdurchmessern größer als 50  $\mu\text{m}$  (entsprechend einem pF-Wert von 0-1,8) bewegt sich das Wasser so rasch, dass diese hauptsächlich für den Lufthaushalt verantwortlich sind und daher mit der s. g. „Luftkapazität“ beschrieben werden [Blu10]. Wie schon im vorangegangenen Kapitel beschrieben, so ist auch bei den pF-Kurven ein deutlicher Einfluss der Reduktion des Gesamtporenvolumens (GPV) erkennbar. Dieser äußert zum einen in dem höheren Startpunkt der Kurve auf der Ordinate, als auch in einem nach rechts verschobenen Verlauf, was eine im Vergleich zur poröseren Variante leicht verzögerte Entwässerung andeutet. Je feinkörniger eine Probe ist, desto weiter rechts verläuft die Kurve, was bedeutet, dass eine Entwässerung und damit ein Lufteintritt ins Porensystem überhaupt erst nach Überschreiten eines gewissen Matrixpotentialwertes beginnt. Dies wird vor allem deutlich beim Vergleich zwischen den verschiedenen Bodenaushuben, welche sehr ähnliche Verläufe aufweisen, und den Substraten Satog und Sand 0/4, welche bei deutlich geringeren Wasserspannungen entwässern. Weiterhin ist zu bemerken, dass die Abweichung vom ursprünglich eingestellten Porenvolumen, welche am Startpunkt der Kurve auf der Ordinate ablesbar ist, umso größer ist, je mehr die Probe nach der Aufsättigung gequollen ist. BDA I (**Abb. 3**) ist hier die Probe mit der am stärksten ausgeprägten Quellungsdynamik, während BDA II (**Abb. 4**) und BDA III (**Abb. 5**) eine mittlere Stellung einnehmen. Diese Unterschiede sind in den verschiedenen Tongehalten und Tonmineralzusammensetzungen begründet (**Kapitel 1.1** und **2.2.1**). Die hauptsächlich aus quarzitäischen und silikatischen Sandkörnern bestehenden Substrate Sand 0/4 (**Abb. 6**) und Satog (**Abb. 7**) keine nennenswerte Veränderung des GPV aufweisen.



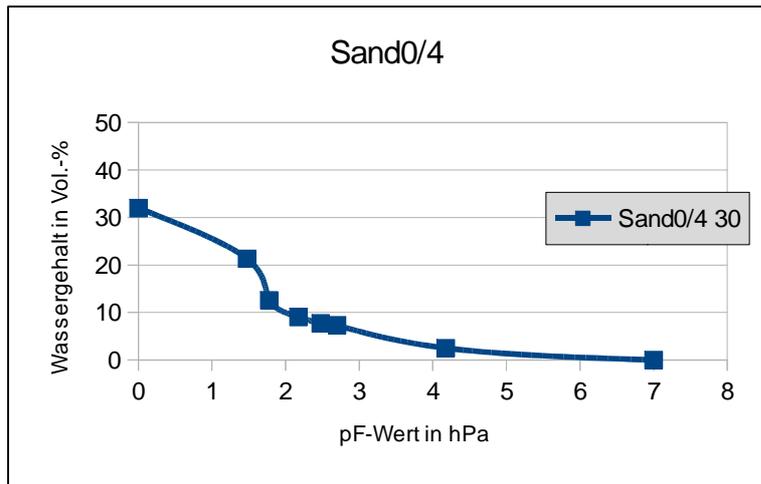
**Abbildung 3:** pF-Kurve des Bodenaushubs BDA I mit jeweils 30% und 40% GPV



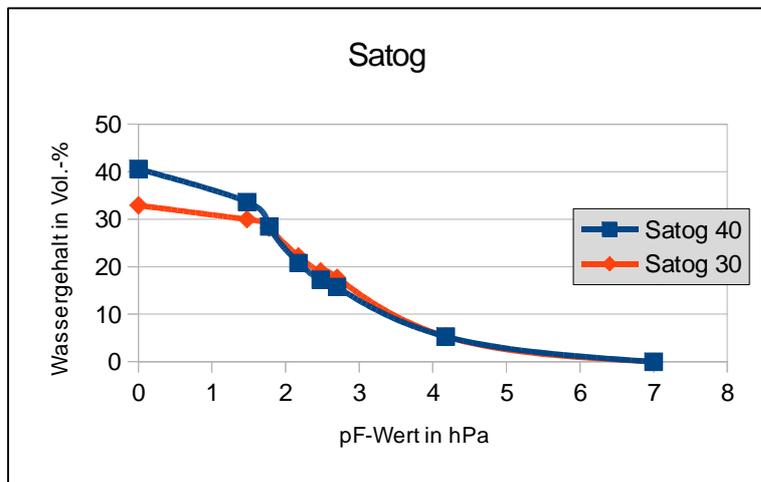
**Abbildung 4:** pF-Kurve des Bodenaushubs BDA II mit jeweils 30% und 40% GPV



**Abbildung 5:** pF-Kurve des Bodenaushubs BDA III mit jeweils 30% und 40% GPV



**Abbildung 6:** pF-Kurve des Referenzbaustoffs Sand0/4 mit 30% GPV



**Abbildung 7:** pF-Kurve des Referenzbaustoffs Satog mit jeweils 30% und 40% GPV

## 1.8 Bestimmung des pH-Wertes

Die pH-Werte der verschiedenen Referenzbaustoffe und urbanen Böden wurden nach DIN ISO 10390:2005 gemessen und weisen mitunter große Unterschiede auf (**Tabelle 6**). Die Böden sowie die Referenzbaustoffe zeigen alle samt Werte im neutralen bis schwach oder mäßig alkalischen Bereich. Die höheren pH-Werte bei den Böden (hier vor allem BDA III) im Gegensatz zu den reinen Referenzbaustoffen lassen sich durch den regelmäßigen Eintrag von Streusalz im Stadtgebiet erklären [Blu10]. Weiter ist zu bemerken, dass der meist geringe Unterschied zwischen aktueller Acidität (d. h.  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ) und potentieller Acidität (d. h.  $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ ) einen Hinweis auf ein enges Verhältnis zwischen gelösten und festen Säuren im Boden darstellt. Der größte Unterschied ist hier bei BDA II gemessen worden. Die makroskopisch gut sichtbaren Tonbeläge auf den Aggregaten von BDA II lassen darauf schließen, dass dieser durch einen Tonanreicherungshorizont (Bt-Horizont) einer Parabraunerde geprägt ist. Es ist daher wahrscheinlich, dass im ehemaligen Tonanreicherungshorizont erhöhte Gehalte an Tonmineralen und organischer Substanz (und damit mehr permanente und variable Austauscheroberflächen) vorhanden sind. Ähnliches gilt auch für Sand 0/4, welcher im Vergleich zu den anderen Sanden höhere Gehalte an

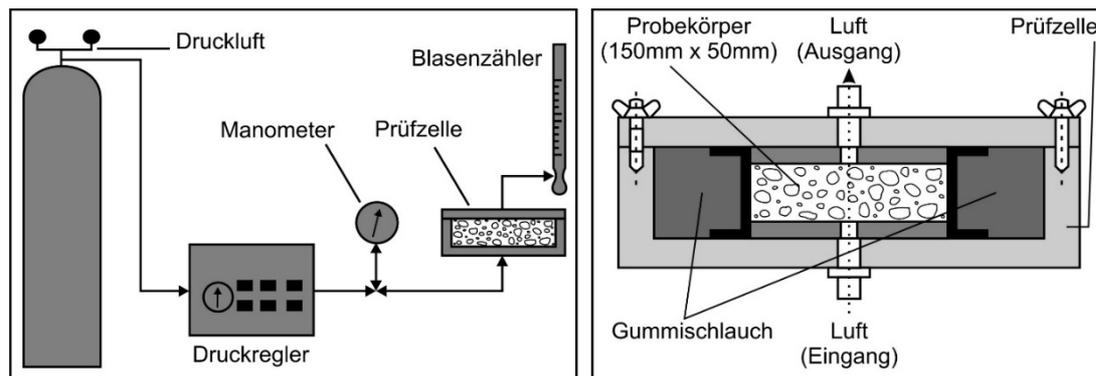
organischem Kohlenstoff aufweist (**Kapitel 2.2.6**), bei allerdings insgesamt sehr geringen Tongehalten.

**Tabelle 6:** pH-Werte (H<sub>2</sub>O und CaCl<sub>2</sub>) der Referenzbaustoffe, der urbanen Böden

Name	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )
BDA I	7,42	7,29
BDA II	8,45	7,63
BDA III	9,16	8,52
Satog	8,56	8,01
Sand 0/1	6,98	6,98
Sand 0/4	7,42	6,96

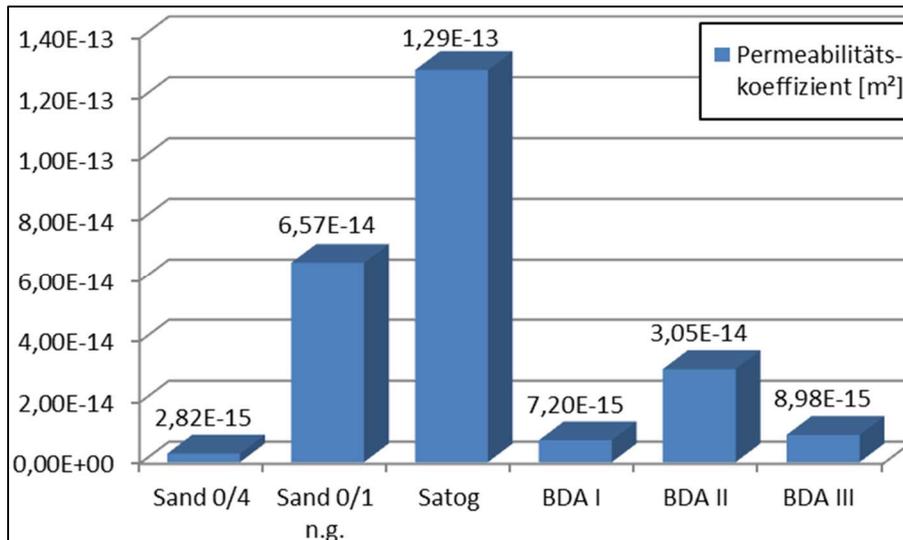
### 1.9 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit, Gasdiffusionsmessungen

Die Gaspermeabilität der Referenzbaustoffe und der Flüssigböden (**Kapitel 4.10**) wurden mit der Cembreaumethode in Anlehnung an [Kol89] und H ZFSV-563:2012 mit einem Prüfdruck von 0,05 bar und einem Reifendruck (Gummischlauch) von 5 bar gemessen. Alle Referenzbaustoffe wurden in der Prüfzelle mit einem 4,9 kg Gewicht homogen verdichtet und mit jeweils einem Filterpapier ( $\varnothing = 15$  cm) am Lufteingang und Luftausgang abgedeckt, um Verschmutzungen durch Körner / Partikel im Luftkreislauf zu verhindern (**Abb. 8**).



**Abbildung 8:** Gaspermeabilität nach der Cembreaumethode, Darstellung der Versuchsanordnung

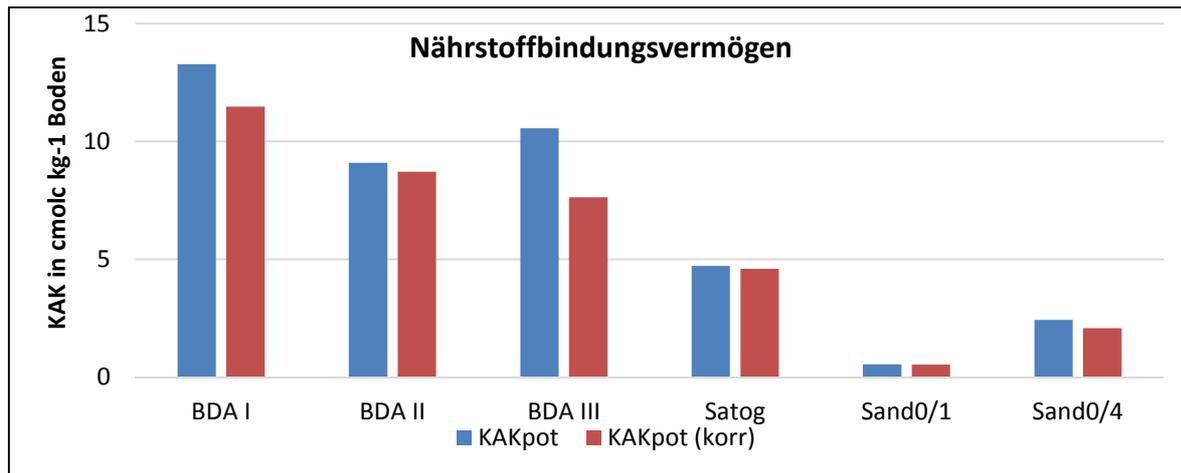
Wie **Abb. 9** zeigt, weisen die feinkörnigen Materialien (Sand 0/1 und Satog) die höchsten Gaspermeabilitäten aller Referenzbaustoffe auf. Lediglich der BDA II, das feinkörnigste Material aller hier bestimmten Materialien, weist aufgrund der gut verdichtbaren tonig-, lehmigen Konsistenz, eine vergleichsweise geringe Durchlässigkeit auf. Der Sand 0/4 und der BDA I, mit breitgestuften Sieblinien, weisen dagegen erwartungsgemäß die geringsten Gasdurchlässigkeiten auf. Daraus lässt sich schließen, dass mit ausgeprägt breiten Kornzusammensetzung Böden und Baustoffe mit geringer Gasdurchlässigkeit und geringem Gasaustausch hergestellt werden können.



**Abbildung 9:** Gaspermeabilität der Referenzbaustoffe und Bodenaushube

### 1.10 Nährstoffanalyse (Kationenaustauschkapazität)

Das Nährstoffbindungsvermögen wird in der Bodenkunde nach DIN ISO 13536:2002 durch die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschrieben. Die KAK entspricht der Summe aller permanenten und variablen negativen Ladungen im Boden, welche die Hauptkationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ) reversibel aufnehmen können, wodurch sie als Pflanzennährstoff zur Verfügung stehen. Da sich der Wert nach DIN ISO 13536:2002 allerdings nur auf den Feinboden bezieht, werden die hier gezeigten Werte um den Skeletgehalt korrigiert, da der Grobboden keine bedeutsame Rolle im Nährstoffhaushalt spielt. Die niedrigsten Werte mit unter  $5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  weisen die drei Referenzsubstrate Sand 0/1, Sand 0/4 und Satog auf (**Abb. 10**). Hier besteht kein nennenswerter Unterschied zwischen den Werten vor und nach der Skelettkorrektur, da diese Proben fast ausschließlich Feinboden enthalten. Ähnlich verhält es sich bei den drei Bodenaushuben, die niedrige Werte zwischen  $11,7$  und  $7,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  aufweisen. Den höchsten Wert der Bodenaushube weist BDA I ( $11,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) auf, was an dem hohen Gehalt an organischem Kohlenstoff liegt (**Kapitel 2.2.6**). Ein weiteres Maß für die Bodenfruchtbarkeit ist die Basensättigung (BS). Diese beschreibt den Anteil, den die Kationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  im Vergleich zu  $\text{Al}^{3+}$  und  $\text{H}^+$  an der gesamten Kationenaustauschkapazität haben. BS-Werte von  $> 80 \%$  gelten als Indikator für eine hohe Fruchtbarkeit [Blu10]. Dieser Wert liegt für die meisten Proben bei über  $90 \%$ , was durch den hohen pH-Wert und den hohen Kalkgehalt erklärt wird. Einzig bei Sand 0/1 und Sand 0/4 finden sich Werte für die BS von  $6 \%$ , bzw.  $61 \%$ .



**Abbildung 10:** Potentielle Kationenaustauschkapazität (blau) und um den Skelettgehalt korrigierte Kationenaustauschkapazität (rot) der Referenzbaustoffe und urbanen Bodenaushube.

### 1.11 Gegenüberstellung und Ausarbeitung der gewonnenen Erkenntnisse

Die hier gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass mit einer breitgestuften Sieblinie (Sand 0/4 und BDA I → **Kapitel 1.1**) eine deutlich dichtere Struktur erreicht werden kann, die dann eine geringere Porosität (**Kapitel 1.3**) und folglich auch eine geringere Permeabilität (**Kapitel 1.9**) zur Folge hat. Ein sehr hoher Gehalt an quellfähigen Tonen oder organischen Bestandteilen (in den Bodenaushuben) führen dann allerdings zu einer hohen Nährstoffbindung (**Kapitel 1.10**) und erhöhen das Risiko von Quellungs- und Schrumpfungsvorgängen. Obwohl BDA II die höchsten Ton- sowie organischen Kohlenstoffgehalte aufweist (**Kapitel 2.2.7**), hat BDA I die höchste Nährstoffbindung (**Kapitel 1.10**) und die größte Quellungsdynamik (**Kapitel 1.7.3**). Eine Erklärung kann vor allem an unterschiedlichen Arten von Tonmineralen liegen (**Kapitel 2.2.1**), da z. B. nur in BDA III das nicht quellfähige zweischicht-Mineral Kaolinit gefunden wurde, während das Dreischicht-Tonmineral Illit, welches zur Quellung neigt, nur in BDA I vorkommt. Das Verdichtungsverhalten der verschiedenen Bodenaushube zeigt deutlich, dass ein hoher Durchwurzelungswiderstand mit einer Porosität < 30 V.-% gewährleistet ist, der in der Praxis von keinem der Referenzbaustoffe wirklich erreicht werden kann.

## 2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe für Flüssigböden und Erstellung von Rezepturen

### 2.1 Ausgangsstoffe

#### Gesteinskörnungen

Die hier verwendeten Gesteinskörnungen werden von der Firma Kimm abgebaut und bearbeitet und unterliegen ständiger Qualitätsprüfungen der werkseigenen Prüfstellen. Sie stellen gängige Gesteinskörnungen des aktuellen Produktprogramms der Schüttgüter dar und liegen in diesem Projekt, aufgrund der Einschränkung durch Netzbetreiber und Kabelhersteller, in einem Korngrößenbereich von >0 bis max. 16 mm.

## Bodenaushube

Die drei hier verwendeten Bodenaushube (BDA) stammen alle aus Leitungsbaumaßnahmen in Kassel. Der BDA I und der BDA II stammen aus Sanierungsmaßnahmen aus dem Stadtgebiet und enthalten auch Gesteinskörnungen aus Gebäudeabbruch (sogenannte „substanzielle Substratinhomogenitäten“ wie z. B. Ziegel). Der Bodenaushub III stammt aus einer Neubaumaßnahme eines zukünftigen Gewerbegebietes am Stadtrand. Obwohl auf dem Gelände ein Gewerbegebiet neu entsteht, enthält der Boden Mörtelbruchstücke, die auf eine frühere urbane Nutzung hinweisen. Zur Beginn des 20. Jahrhunderts befanden sich in diesem Gebiet Wohn- und Arbeitslager für 20.000 Menschen, was die Mörtelreste im Boden erklären könnten [Sol05].

<b>BDA I</b>	FES = Friedrich-Ebert Straße, Kassel
<b>BDA II</b>	HHS = Heinrich-Heine Straße, Kassel
<b>BDA III</b>	Langes Feld = Wilhelmine Reichert Straße, Kassel

## Bindemittel

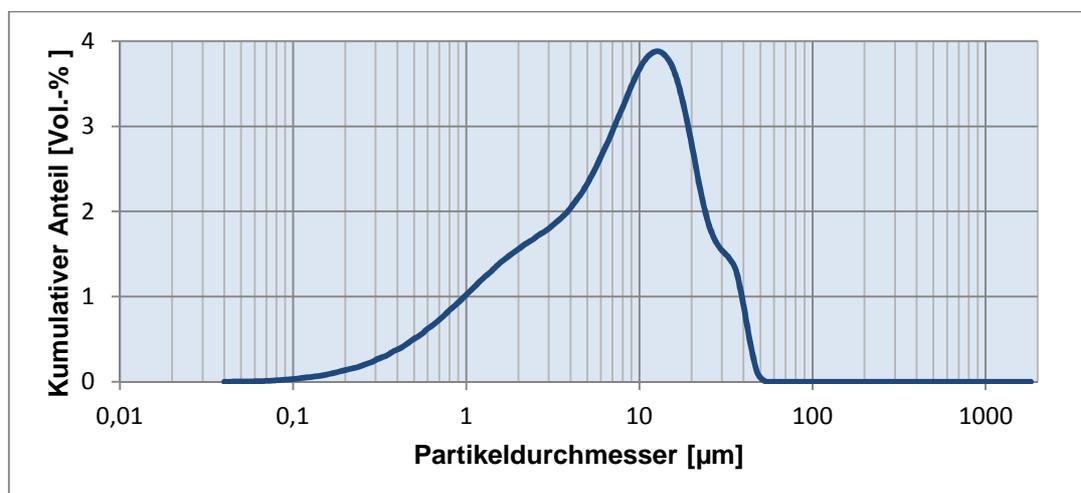
Der hier verwendete Zement ist ein „CEM II/A-LL 42,5 N“, welcher, wie alle Normalzemente, in der DIN EN 197-1:2004-08 genormt ist. Es ist ein Portlandkalksteinzement (CEM II) mit 6 - 20 M.-% (A) Kalkstein (LL), welcher eine Festigkeit von 42,5 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen erreicht und über eine übliche Anfangsfestigkeit (N) verfügt.

## Wasser

Das Zugabewasser ist Trinkwasser und hat stets eine Temperatur zwischen 15 – 25 °C.

## Gesteinsmehl

Das vorliegende Kalksteinmehl ist güteüberwacht nach DIN EN 12620 der Firma Deuna Zement GmbH wird im Flüssigboden als Füller eingesetzt, um den teilweise fehlenden Mehlkorngelalt der Gesteinskörnungen bei der Sieblinienoptimierung auszugleichen. Mit Partikelgrößen zwischen 0,0001 mm und 0,06 mm (**Abb. 11**) liegt das hier verwendete Kalksteinmehl im Korngrößenbereich vom Mehlkorn mit Korngrößen < 0,125 mm (125 µm).



**Abbildung 11:** Korngrößenverteilung des Kalksteinmehles von Deuna

## 2.2 Untersuchung der Gesteinskörnungen und Bodenaushube

### 2.2.1 Röntgenographische Phasenanalyse

Zur genauen Charakterisierung werden die Gesteinskörnungen und Bodenaushube einer röntgenographischen Phasenanalyse unterzogen. Bei den güteüberwachten und genormten Ausgangsstoffen (Zement, Kalksteinmehl) ist dies nicht notwendig.

Bei den folgenden definierten Sanden und Kiesen handelt sich um quarzhaltige Sande bzw. Kiese, die aber auch Anteile an Grauwackeschiefer, Kieselschiefer, Sandsteine und magmatische Gesteine enthalten:

**Sand 0/1** Neben Quarz beinhaltet der Sand Schicht- (Muskovit, Illit), Gerüst- (Phillipsit, Orthoklas), Ketten- und Bandsilikate (Augit) aber auch Carbonate (Dolomit) (**Abb. 49**).

**Sand 0/1 ungewaschen (n.g.)** Neben Quarz beinhaltet der Sand Schicht- (Illit, Muskovit) und Gerüstsilikate (Orthoklas, Phillipsit, Mikroklin) (**Abb. 50**).

**Sand 0/2** Neben Quarz beinhaltet der Sand Schicht- (Muskovit) und Gerüstsilikate (Phillipsit, Orthoklas, Albit) sowie Spuren von Almandin, was aus einem metamorphen Gestein stammen muss (**Abb. 51**).

**Sand 0/4** (Mauersand): Neben Quarz beinhaltet der Sand Schicht- (Muskovit, Kaolinit, Illit, Klinochlor, Phlogopit) und Gerüstsilikate (Phillipsit, Albit) (**Abb. 52**).

Da die Kornfraktionen der Kiese 2/8 (**Abb. 24**) und 8/16 (**Abb. 26**) von den o.g. Sanden abgeseibt wurden, sind die enthaltenen Minerale vergleichbar. Aufgrund des fehlenden Feinkorn- und Sandanteils, der unterschiedlichen Materialität der einzelnen Körnern und der durch den Probenhalter begrenzten Probenmenge (ca. 1 cm<sup>2</sup>) war eine röntgenographische Phasenanalyse (XRD) nicht sinnvoll und wurde auch nicht durchgeführt. Weitere Gesteinskörnungen sind der Kies 1/3 und der Kalk 0/8:

**Kies 1/3** Es handelt sich hierbei um einen Porphyrkies, der neben Quarz und Calcit auch Schicht- (Muskovit) und Gerüstsilikate (Albit, Sanidin, K-Feldspat Mikroklin) beinhaltet (**Abb. 53**).

**Kalk 0/8** (Kalkvorsiebung): Es handelt sich hierbei um eine gebrochene Kalksteinschüttung, die neben Calcit auch Quarz beinhaltet. Ferner sind Spuren von Schichtsilikaten (Klinochlor, Muskovit), Gips sowie Klinoklas vorhanden. (**Abb. 54**).

Der reine Kalkstein hat, wie zu erwarten, als Hauptbestandteil Calcit und als Nebenbestandteil Quarzit. Ferner konnten Spuren von Silikaten wie Muskovit und Orthoklas festgestellt werden (**Abb. 55**).

**BDA I** Neben Quarz beinhaltet der Bodenaushub I hohe Anteile an Tonmineralen der Schicht- (Nontronit, Illit, Muskovit, Pragonit, Talk), Ketten- und Bandsilikate (Kanoit, Diopsid) sowie Gerüstsilikate (Orthoklas, Albit) und Calcit. Insbesondere der Talc ist sogar als Klumpen im Aushub deutlich mit dem bloßen Auge auszumachen (**Abb. 56**).

**BDA II** Neben Quarz beinhaltet der Bodenaushub II hohe Anteile an Tonmineralen der Schicht- (Muskovit) sowie Gerüstsilikate (Albit, Mikroklin, Sanidin, Anorthoklas) und Calcit (**Abb. 57**).

**BDA III** Neben Quarz beinhaltet der Bodenaushub III hohe Anteile an Tonmineralen der Schicht- (Chlorit, Klinochlor, Kaolinit, Muskovit), Ketten- und Bandsilikate (Scawtit) sowie Gerüstsilikate (Albit) und Calcit (**Abb. 58**).

### 2.2.2 LAGA M20 - Auswertung und Beurteilung

Die drei vorliegenden Bodenaushube (Korngrößenverteilung **Kapitel 2.2.8**) können bodenspezifisch nicht eindeutig zugeordnet werden, da sie als Gemische vorliegen. Anhaltspunkte für eine Schadstoffbelastung liegen nicht vor obwohl insbesondere die Stadtböden I und II anthropogenen Veränderungen ausgesetzt waren und mineralische Fremdbestandteile beinhalten. Nach LAGA M20:2004 (Teil II, 1.2 Bodenmaterial) werden sie dementsprechend mit dem Mindestprogramm (**Tabelle 7**) für die Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen untersucht. Da die Böden Gemische verschiedener Bodenarten von Kies bis Ton sind, muss bei den Feststoffuntersuchungen der Zuordnungswerte Z0 (uneingeschränkter Einbau) die Bodenart Lehm/Schluff verwendet werden.

Die sensorische Prüfung nach Aussehen und Geruch wurde nach Anlieferung der Böden durchgeführt. Keine der Böden wies besondere Auffälligkeiten auf, die auf eine erhöhte Schadstoffkonzentration hinwiesen. Die TOC-Werte (gesamter organischer Kohlenstoff) beschreiben die organischen Bestandteile des Bodens und wurden mittels ISO 10694:1995 separat untersucht und in **Kapitel 2.2.6** ausführlich beschrieben.

**BDA I:** Die Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen und der Einordnung in die jeweilige Einbauklasse nach LAGA M20 des Bodenaushubs I aus der Friedrich-Ebert-Straße in Kassel sind in **Tabelle 8** zusammengefasst. Nach den Feststoffuntersuchungen zu urteilen wird der Boden in die „Einbauklasse Z1 - Eingeschränkter offener Einbau“ eingeteilt. Nach Durchführung der Eluatuntersuchungen konnte die Einbauklasse auf „Z0 – Uneingeschränkter Einbau“ hochgestuft werden.

**BDA II:** Die Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen und der Einordnung in die jeweilige Einbauklasse nach LAGA M20 des Bodenaushubs II aus der Heinrich-Heine-Straße in Kassel sind in **Tabelle 9** zusammengefasst. Nach den Feststoffuntersuchungen zu urteilen wird der Boden in die „Einbauklasse Z0 - Uneingeschränkter Einbau“ eingeteilt. Die Eluatuntersuchungen bestätigten diese Einordnung.

**BDAIII:** Die Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen und der Einordnung in die jeweilige Einbauklasse nach LAGA M20 des Bodenaushubs III aus dem Baugebiet Langes Feld, Wilhelmine-Reichert Straße in Kassel sind in **Tabelle 10** zusammengefasst. Nach den Feststoffuntersuchungen zu urteilen wird der Boden in die „Einbauklasse Z0 - Uneingeschränkter Einbau“ eingeteilt. Die Eluatuntersuchungen bestätigten diese Einordnung.

**Tabelle 7: LAGA M20 Untersuchungsprogramm und Grenzwerte**

	Feststoffuntersuchungen [in mg/kg]				Eluatuntersuchungen					
	Mindestuntersuchungsprogramm	Z0 (Lehm/Schluff)	Z1	Z2	Mindestuntersuchungsprogramm	Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	
Kohlenwasserstoffe	x	100	300	1000						
EOX	x	1	3	10						
PAK	x	3	3	30						
TOC [Masse-%]	x	0,5	1,5	5						
Korngrößenverteilung	x	siehe Kapitel 2.2.8								
Arsen	x	15	45	150	x	14	14	20	60	µg/l
Blei	x	70	210	700	x	40	40	80	200	
Cadmium	x	1	3	10	x	1,5	1,5	3	6	
Chrom (gesamt)	x	60	180	600	x	12,5	12,5	25	60	
Kupfer	x	40	120	400	x	20	20	60	100	
Nickel	x	50	150	500	x	15	15	20	70	
Quecksilber	x	0,5	1,5	5	x	< 0,5	< 0,5	1	2	
Zink	x	150	450	1500	x	150	150	200	600	
Chlorid					x	30	30	50	100	
Sulfat					x	20	20	50	200	
pH-Wert					x	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	6 - 12	5,5 - 12	---
elektrische Leitfähigkeit					x	250	250	1500	2000	µS/cm
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)	x	Auffälligkeiten?								

**Tabelle 8: LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs I**

	BDAI			
	Feststoff [mg/kg]	Einordnung Einbauklassen	Eluat[mg/l]	Einordnung Einbauklassen
Kohlenwasserstoffe	<50	Z0		
EOX	<1	Z0		
PAK	n.b.*	Z0		
TOC	siehe Kapitel 2.2.6			
Korngrößenverteilung	siehe Kapitel 2.2.8			
Arsen	6,8	Z0	<0,005	Z0
Blei	6	Z0	<0,005	Z0
Cadmium	<0,2	Z0	<0,0005	Z0
Chrom (gesamt)	78	Z1	<0,005	Z0
Kupfer	25	Z0	<0,005	Z0
Nickel	150	Z1	<0,005	Z0
Quecksilber	<0,05	Z0	<0,0002	Z0
Zink	67,6	Z0	<0,05	Z0
Chlorid			21	Z0
Sulfat			6,7	Z0
pH-Wert [-]			8,38	Z0
elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]			123	Z0
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)	keine Auffälligkeiten			

\* nicht bestimmbar

**Tabelle 9:** LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs II

	BDaII			
	Feststoff [mg/kg]	Einordnung Einbauklassen	Eluat[mg/l]	Einordnung Einbauklassen
Kohlenwasserstoffe	<50	Z0		
EOX	<1	Z0		
PAK	0,13	Z0		
TOC	siehe Kapitel 2.2.6			
Korngrößenverteilung	siehe Kapitel 2.2.8			
Arsen	4	Z0	<0,005	Z0
Blei	19	Z0	0,009	Z0
Cadmium	<0,2	Z0	<0,0005	Z0
Chrom (gesamt)	16	Z0	<0,005	Z0
Kupfer	9	Z0	<0,005	Z0
Nickel	16	Z0	<0,005	Z0
Quecksilber	<0,05	Z0	<0,0002	Z0
Zink	28,2	Z0	<0,05	Z0
Chlorid			3,2	Z0
Sulfat			5,6	Z0
pH-Wert [-]			8,89	Z0
elektrische Leitfähigkeit [ $\mu$ S/cm]			88	Z0
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)			keine Auffälligkeiten	

**Tabelle 10:** LAGA M20 Untersuchungen und Einordnung des BDAs III

	BDaIII			
	Feststoff [mg/kg]	Einordnung Einbauklassen	Eluat[mg/l]	Einordnung Einbauklassen
Kohlenwasserstoffe	<50	Z0		
EOX	<1	Z0		
PAK	n.b.*	Z0		
TOC	siehe Kapitel 2.2.6			
Korngrößenverteilung	siehe Kapitel 2.2.8			
Arsen	5,2	Z0	<0,005	Z0
Blei	9	Z0	<0,005	Z0
Cadmium	<0,2	Z0	<0,0005	Z0
Chrom (gesamt)	25	Z0	<0,005	Z0
Kupfer	8,1	Z0	<0,005	Z0
Nickel	15	Z0	<0,005	Z0
Quecksilber	<0,05	Z0	<0,0002	Z0
Zink	28,4	Z0	<0,05	Z0
Chlorid			3,2	Z0
Sulfat			13	Z0
pH-Wert [-]			8,47	Z0
elektrische Leitfähigkeit [ $\mu$ S/cm]			97	Z0
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)			keine Auffälligkeiten	

\* nicht bestimmbar

### 2.2.3 Dichtebestimmung (Rohdichte, Reindichte, Schüttdichte)

Die in diesem Projekt verwendeten Gesteinskörnungen und Bodenaushube weisen die in **Tabelle 11** dargestellten Dichten auf. Die Reindichte wurde gemäß DIN 66137-2:2004 mittels Heliumpyknometer „Multiplpyknometer“ von „Quantachrome Instruments“ bestimmt. Die

Rohdichte wurde an den mechanisch verdichteten und die Schüttdichte an den locker gelagerten Gesteinskörnungen und Bodenaushube mittels Masse in Kombination mit dem eingenommenen Volumen im Messzylinder bestimmt:

**Tabelle 11:** Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte der Gesteinskörnungen und Bodenaushube

	Reindichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Sand 0/1 n.g.	2625,3	1513,7	1078,8
Sand 0/1	2653,4	1418,6	1386,7
Sand 0/2	2635,4	1626,8	1579,5
Sand 0/4	2654,2	1860,8	1445,1
Kies 1/3	2630,9	1340,9	1289,2
Kies 2/8	2633,1	1494,2	1389,7
Kies 8/16	2625,2	1527,1	1301,3
Kalk 0/8	2728,1	1873,7	1200,0
BDA I	2534,8	1821,2	1258,3
BDA II	2669,9	1671,0	1057,9
BDA III	2656,2	1769,4	1219,1

## 2.2.4 Photometrische Salzanalyse

Flüssigboden ist, ähnlich wie Beton, ein Baustoff aus Zement (Bindemittel), Wasser und Gesteinskörnung. Aus diesem Grunde kommt zur Beurteilung des Gefährdungspotentials der unten aufgeführten Salze Gesteinskörnungsnormen für Beton wie z.B. die DIN EN 12620:2013 oder die DIN 4226-100:2002 zum Einsatz. Da aber Flüssigböden in Böden eingebaut und nach H-ZFSV:2012 auch mit Bodenaushuben hergestellt wird, ist bei der Beurteilung ebenfalls die LAGA M20:2003 (**Kapitel 2.2.2**) zu Rate zu ziehen.

Die groben Körnungen Kies 2/8 und 8/16 wurden aufgrund der nicht vorhandenen Fein- und Sandanteile sowie der doppelten Waschung nicht photometrisch untersucht. Leicht lösliche Salzgehalte wurden dabei schon im Vorfeld ausgewaschen.

### Chloridgehalt:

Die Beeinträchtigung durch Chloride ist im Zusammenhang mit Flüssigböden von untergeordneter Bedeutung, da diese den Baustoff, aufgrund des frostfreien Einbaus und dem geringen Zementsteingehalt, direkt nicht schädigen. Lediglich bei der Einbettung von korrosionsgefährdeten Materialien wie Stahl könnten hohe Chloridgehalte eine Rolle spielen [Sta01].

Chloride kommen in Gesteinskörnungen oft in Form von Natrium- und Kaliumsalzen vor und deren Menge ist überwiegend von der Herkunft der jeweiligen Gesteinskörnung abhängig. Bei binnenländisch geförderten Gesteinskörnungen ist in der Regel mit niedrigen Mengen an wasserlöslichen Chlorid-Ionen-Anteilen zu rechnen (DIN EN 126020:2013). Dies bestätigen die hier durchgeführten Untersuchungen, bei denen der Chloridgehalt zwischen 0,008 und 0 M.-% beträgt. Lediglich der Chloridgehalt des Kalkes 0/8 liegt mehr als doppelt so hoch. Mit einem Wert von 0,018 M.-% liegt dieser aber auch unter dem Grenzwert von 0,04 M.-% der DIN 4226-100:2002 und mit < 9 mg/l unter dem Z0-Grenzwert von 30 mg/l der LAGA M20:2003 (**Tabelle 12**).

**Tabelle 12:** Chloridgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse)

Probe	Messwert (ppm oder mg/l)	M.-% Cl-
Sand 0/1	0	0,000
Sand 0/1 gew.	2	0,004
Sand 0/2	0	0,000
Sand 0/4	1	0,002
Kies 1/3	4	0,008
Kalk 0/8	9	0,018
BDA I	4	0,008
BDA II	0	0,000
BDA III	2	0,004

**Sulfatgehalt:**

Die Beeinträchtigung durch Sulfate in Gegenwart von Wasser ist im Zusammenhang mit Flüssigböden nur bei unnatürlich hohen Sulfatmengen in Kombination mit erhöhtem Zementgehalt von Bedeutung. Sulfatreiben kann also aufgrund des geringen Zementsteingehaltes in Flüssigböden nur begrenzt auftreten [Sta01]. Trotzdem muss nach H-ZFSV:2012 die Eignung von sulfathaltigen Böden nachgewiesen werden.

Mit Werten kleiner 0,2 M.-% (**Tabelle 13**) liegen die hier gemessenen Sulfatgehalte unter den RC-Grenzwerten der niedrigsten Kategorie SS<sub>0,2</sub> (DIN EN 126020:2013). Mit Werten < 13 mg/l liegen alle Werte unter dem Z0-Grenzwert von 20 mg/l der LAGA M20:2003. Lediglich der Kalk 0/8 überschreitet diesen Wert deutlich um 46 mg/l. Eine Zuordnung in die Klasse Z2 ist die Folge. Da der Kalk 0/8 aber nur anteilig dem Flüssigboden hinzu gegeben wird, ist eine schädigende Beeinträchtigung des Bodens nicht zu erwarten. Genaue Ergebnisse werden die LAGA Untersuchungen in **Kapitel 4.8** zeigen.

**Tabelle 13:** Sulfatgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse)

Probe	Messwert (ppm oder mg/l)	M.-% Sulfat
Sand 0/1	2	0,004
Sand 0/1 gew.	3	0,006
Sand 0/2	3	0,006
Sand 0/4	6	0,012
Kies 1/3	5	0,010
Kalk 0/8	66	0,132
BDA I	2	0,004
BDA II	13	0,026
BDA III	3	0,006

**Nitratgehalt:**

Beim Einsatz von nitrathaltiger Gesteinskörnung im Flüssigboden sind keine Schädigungen der natürlichen Bodenfunktionen zu erwarten, weshalb die LAGA M20:2003 auch keine Grenzwerte angibt. Aus betontechnischer Sicht, kann es prinzipiell bei nitrathaltiger Gesteinskörnung zu lösendem und treibendem Angriff des Zementsteins kommen. Jedoch

ist dieser Schadensmechanismus sogar beim Beton von untergeordneter Rolle [Sta01], so dass es keinen Grenzwert für Nitratgehalte in der Gesteinskörnung gibt. Im Zusammenhang mit dem Zugabewasser liegt jedoch eine Nitrat-Höchstgrenze von 500 mg/l vor (DIN EN 1008:2002), die von den hier gemessenen Werten  $\leq 4,1$  mg/l (**Tabelle 14**) nicht annähernd erreicht wird.

**Tabelle 14:** Nitratgehalt der Gesteinskörnungen (Photometrische Salzanalyse)

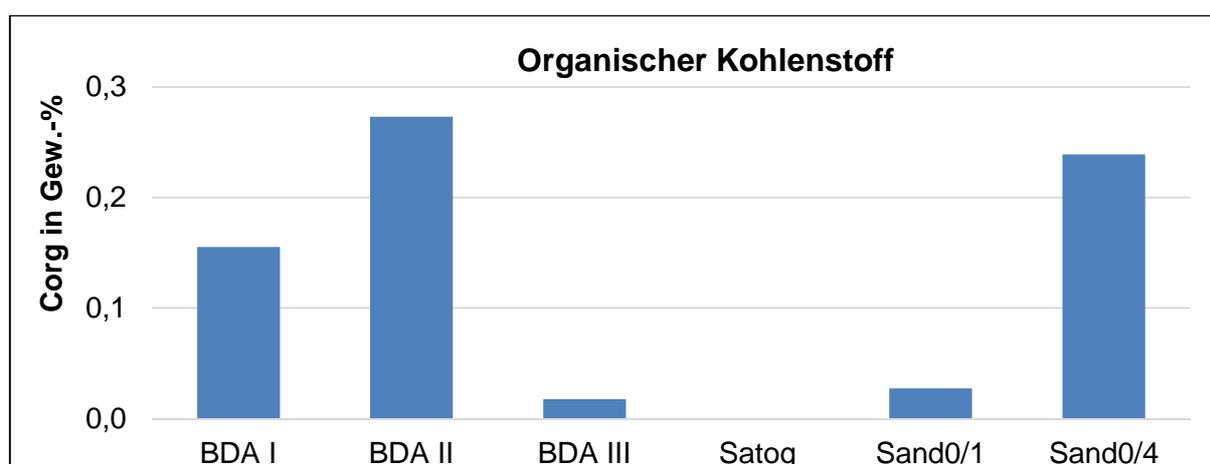
Probe	Messwert (ppm oder mg/l)	M.-% Nitrat
Sand 0/1	1,4	0,012
Sand 0/1 gew.	4,1	0,036
Sand 0/2	2,2	0,019
Sand 0/4	1,5	0,013
Kies 1/3	0,9	0,008
Kalk 0/8	2,8	0,025
BDA I	0,2	0,002
BDA II	0,3	0,003
BDA III	0,4	0,004

### 2.2.5. Organischer Kohlenstoff

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde nach der Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs (ISO 10694:1995) und des carbonatischen Kohlenstoffs (nach EN ISO 10693:1995) rechnerisch nach folgender Formel bestimmt:

$$C_{org} = C_{tot} - (0,12 \times CaCO_3)$$

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff sind bei allen Substraten vergleichsweise gering (**Abb. 12**). Bei den Substraten BDA III, Satog und Sand 0/1 sind die Kohlenstoffkonzentrationen am geringsten, während sie in den Bodenaushuben BDA I und BDA II, sowie im Sand 0/4 auf Grund der höheren Tongehalte etwas höher liegen.



**Abbildung 12:** Gehalte an organischem Kohlenstoff der Referenzbaustoffe und urbanen Bodenaushuben

## 2.2.6 Kornformanalyse

Da gemäß DIN EN ISO 14688:2011 die Kornformanalyse nur an Teilchen mit einem Durchmesser von mind. 4 mm erfolgen kann, werden die Ausgangsstoffe lediglich augenscheinlich, ggf. unter Zuhilfenahme einer Lupe, überprüft. Wie aus **Tabelle 15** deutlich wird, handelt es sich überwiegend um gemischtkörnige Sande und Bodenaushube:

**Tabelle 15:** Kornformanalyse (augenscheinlich) in Anlehnung an DIN EN ISO 14688:2011

	Rundung	Oberfläche	Form
Sand 0/1 n.g.	scharfkantig bis gerundet	überwiegend rau	kubisch, flach
Sand 0/1	kantig bis gut gerundet	überwiegend glatt	überwiegend kubisch
Sand 0/2	scharfkantig bis gut gerundet	rau bis glatt	kubisch, flach, länglich
Sand 0/4	scharfkantig bis stark gerundet	überwiegend glatt	kubisch, flach, länglich
Kies 1/3	scharfkantig bis kantig	glatt	kubisch, flach, länglich
Kies 2/8	scharfkantig bis gut gerundet	überwiegend glatt	kubisch, flach, länglich
Kies 8/16	kantig bis gut gerundet	überwiegend glatt	kubisch, flach, länglich
Kalk 0/8	scharfkantig bis kantig	überwiegend glatt	flach, länglich
BDA I	kantig bis gerundet	rau bis glatt	kubisch, flach, länglich
BDA II	überwiegend scharfkantig	rau bis glatt	kubisch, flach
BDA III	scharfkantig bis stark gerundet	rau	kubisch, flach

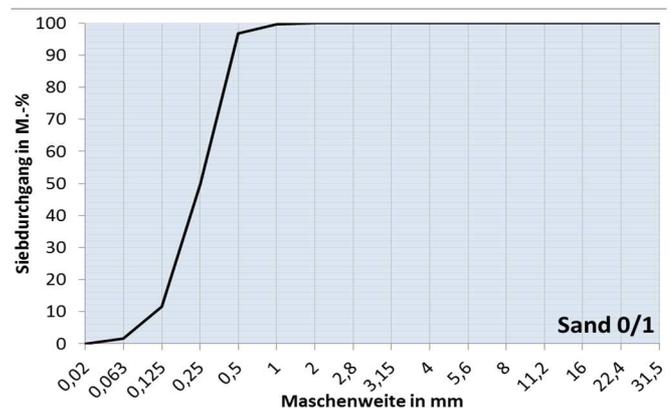
## 2.2.7 Bestimmung der Korngrößenverteilung und Feinanteile

### Gesteinskörnungen

**Sand 0/1:** Der vorliegende Sand ist nach DIN EN 13043 und 13139 gewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Wabern - Uttershausen der Firma Kimm. Obwohl das Größtkorn 1 mm beträgt, sind nur 3,3 M.% größer als 0,5 mm. 85,1 M.-% der Gesteinskörnung bestehen aus den Korngrößen 0,125 – 0,5 mm und 11,6 M.-% und kann hier als Mehlkorn (<0,125 mm [Mac06]) bezeichnet werden (**Abb. 13 und Abb. 14**).



**Abbildung 13:** Gesteinskörnung Sand 0/1

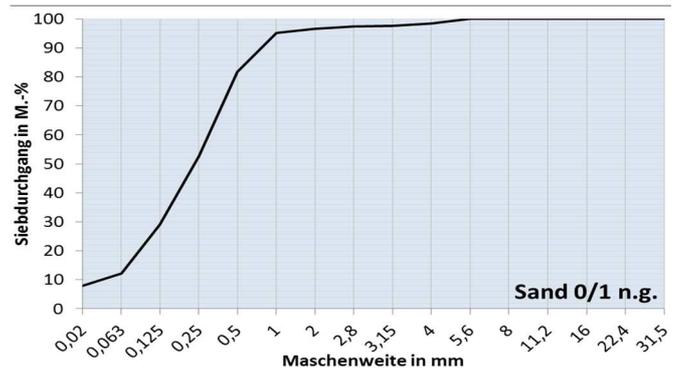


**Abbildung 14:** Sieblinie Sand 0/1

**Sand 0/1 ungewaschen:** Der vorliegende Sand ist nach DIN EN 12620 und 13242 nicht gewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Erfurt-Kühnhausen der Firma Kimm. Da der Sand nicht gewaschen ist, hat er einen vergleichsweise höheren Mehlkorngehalt (<0,125 mm) mit 29,1 M.-%. Neben 4,9 M.-% Überkorn besteht der Sand zu 23 M.-% aus der Korngruppen 0,125 – 0,5 mm und sogar zu 42,4 M.-% aus der Korngruppe 0,5 – 1 mm (**Abb. 15 und Abb. 16**).



**Abbildung 15:** Gesteinskörnung Sand 0/1 n.g.

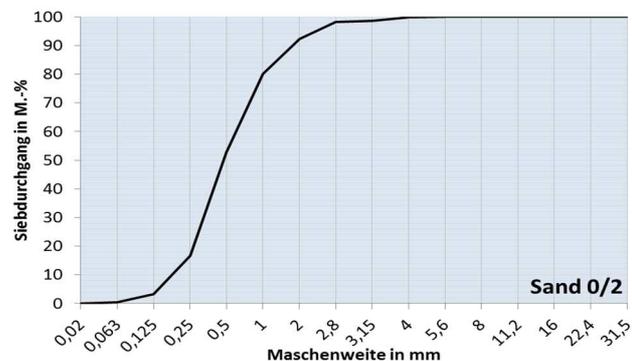


**Abbildung 16:** Sieblinie Sand 0/1 n.g.

**Sand 0/2:** Der Sand ist nach DIN EN 12620 und 13242 doppelt gewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Wabern - Uttershausen der Firma Kimm. Bei einem Größtkorn von 2 mm, enthält er 7,7 M.-% Überkörner, was jedoch nach DIN EN 12620 unbedenklich ist. 89 M.-% der Gesteinskörnung bestehen aus den Korngößen 0,125 – 2 mm und nur 3,3 M.-% und kann hier dem Mehlkorn (<0,125 mm) angerechnet werden (**Abb. 17 und Abb. 18**).



**Abbildung 17:** Gesteinskörnung Sand 0/2 (nur grob Material und komplett)

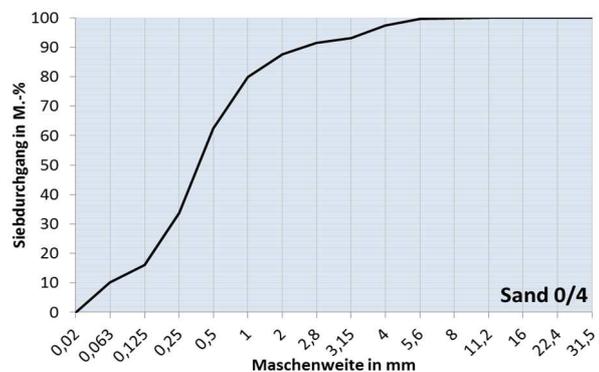


**Abbildung 18:** Sieblinie Sand 0/2

**Sand 0/4 (Mauersand):** Der Sand ist nach DIN EN 12620 und 13242 ungewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Wabern - Uttershausen der Firma Kimm. Obwohl er ungewaschen hergestellt wurde, enthält er nur 16 M.-% Mehlkornanteil (<0,125 mm). Neben 2,7 M.-% Überkorn besteht der Sand 0/4 zu 63,9 M.-% aus den Korngruppen 0,125 – 1 mm und nur zu 17,4 M.-% aus den Korngruppen 2 – 4 mm (**Abb. 19 und Abb. 20**).



**Abbildung 19:** Gesteinskörnung Sand 0/4 (komplett und nur grobes Material)

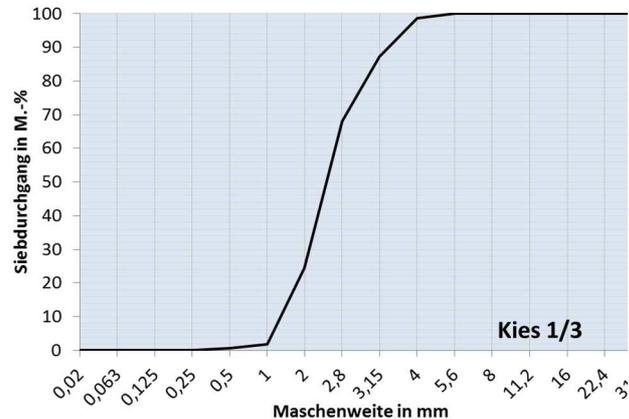


**Abbildung 20:** Sieblinie Sand 0/4

**Kies 1/3:** Der vorliegende gebrochene Kies ist nach TL Gestein, DIN EN 12620 und 13242 doppelt gewaschen, Alkali-überwacht und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Erfurt-Kühnhausen der Firma Kimm. Da der Kies gewaschen ist und auf 1 bis 3 mm abgesiebt wurde, enthält er keinen Mehlkornanteil ( $< 0,125$  mm). Neben 12,8 M.-% Überkorn besteht der Kies zu 85,4 M.-% aus der Korngruppen 1 – 3,15 mm und enthält 1,8 M.-% Unterkorn (**Abb. 21 und Abb. 22**).



**Abbildung 21:** Gesteinskörnung Kies 1/3

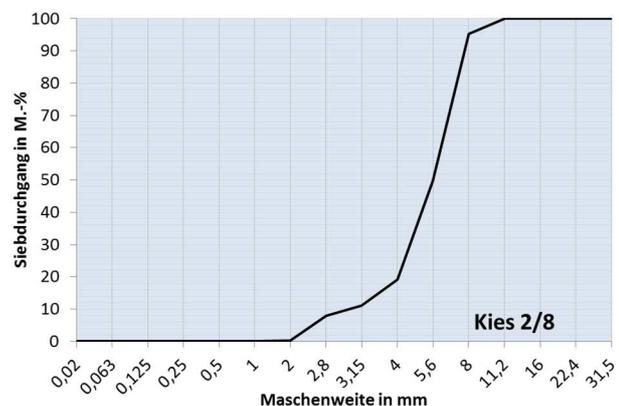


**Abbildung 22:** Sieblinie Kies 1/3

**Kies 2/8:** Der vorliegende Kies ist nach DIN EN 12620 und 13242 doppelt gewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Wabern - Uttershausen der Firma Kimm. Da der Kies gewaschen ist und auf 2 bis 8 mm abgesiebt wurde, enthält er keinen Mehlkornanteil ( $< 0,125$  mm). Neben 4,7 M.-% Überkorn besteht der Kies zu 76,1 M.-% aus den Korngruppen 4 – 8 mm und nur zu 18,9 M.-% aus den Korngruppen 2 – 4 mm (**Abb. 23 und Abb. 24**).



**Abbildung 23:** Gesteinskörnung Kies 2/8



**Abbildung 24:** Sieblinie Kies 2/8

**Kies 8/16:** Der vorliegende Kies ist nach DIN EN 12620 und 13242 doppelt gewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Wabern - Uttershausen der Firma Kimm. Da der Kies gewaschen ist und auf 8 bis 16 mm abgesiebt wurde, enthält er keinen Mehlkornanteil ( $< 0,125$  mm). Neben 8,3 M.-% Überkorn besteht der Kies zu 82,6 M.-% aus den Korngruppen 8 – 16 mm und zu 9,1 M.-% aus Unterkorn (**Abb. 25 und Abb. 26**).



Abbildung 25: Gesteinskörnung Kies 8/16

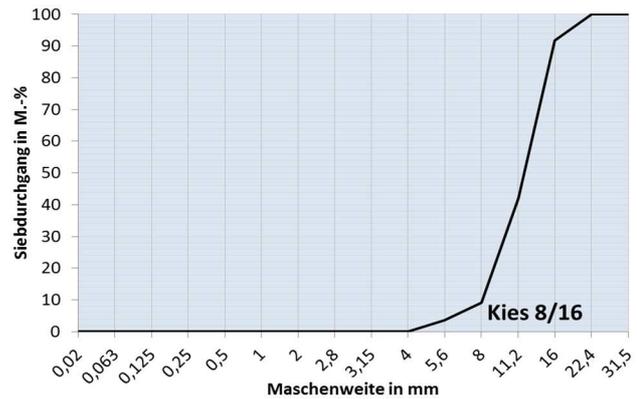


Abbildung 26: Sieblinie Kies 8/16

**Kalk 0/8** (Kalkvorsiebung): Der vorliegende, gebrochene Kalk ist ungewaschen und kommt aus dem Sand- und Kieswerk Bad Berka-Tannroda der Firma Kimm. Da der Kies ungewaschen ist enthält er mit 23,6 M.-% einen hohen Mehlkornanteil (< 0,125 mm). Neben 6,2 M.-% Überkorn besteht der Kalk, bei einer breitgestuften Sieblinie, zu 70,2 M.-% aus den Korngruppen 0,125 – 8 mm (**Abb. 27 und Abb. 28**).



Abbildung 27: Kalk 0/8 (komplett und nur grobes Material)



Abbildung 28: Sieblinie Kalk 0/8

## Bodenaushub

Die vorliegenden Bodenaushube wiesen im trockenen Zustand eine deutliche Klumpenbildung auf. Folglich musste bei den Bodenaushuben eine Nasssiebung durchgeführt werden. Vor der eigentlichen Siebung mussten alle drei Proben 24 h in Wasser gelagert werden, damit sich alle festen Agglomerate lösen. Da hier mit einem Größtkorn  $\leq 16$  mm gearbeitet wird, werden alle größeren Körnungen als Überkorn bezeichnet.

**BDA I:** Der vorliegende Bodenaushub aus der Friedrich-Ebert-Straße in Kassel ist ein anthropogener, inhomogener Bodenaushub, welcher einige feste Ton- und Lehmklumpen enthält. Da der BDA I ungewaschen ist enthält er mit 22,9 M.-% einen hohen Mehlkornanteil (< 0,125 mm). Neben 3,4 M.-% Überkorn besteht der Bodenaushub, bei einer breitgestuften Sieblinie, zu 73,7 M.-% aus den Korngruppen 0,125 – 16 mm (**Abb. 29 und Abb. 30**).



Abbildung 29: BDA I

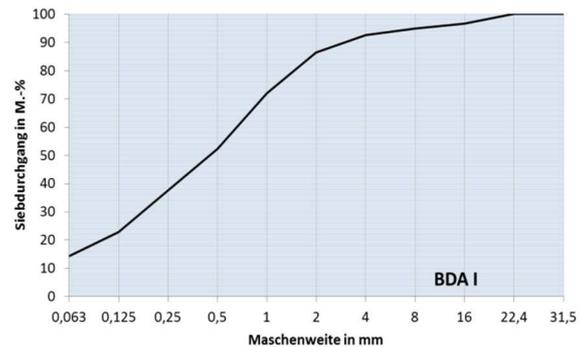


Abbildung 30: Sieblinie BDA I

**BDA II:** Der vorliegende Bodenaushub aus der Heinrich-Heine-Straße in Kassel ist ein anthropogener Bodenaushub, welcher kaum Gebäudeabbruch enthält. Der BDA II ist ungewaschen und enthält mit 80 M.-% einen extrem hohen Mehlkornanteil (< 0,125 mm). Ferner besteht er aus einer breitgestuften aber sehr feinkörnigen und sandigen Sieblinie und enthält nur 20 M.-% der Korngruppen 0,125 – 16 mm (**Abb. 31 und Abb. 32**).



Abbildung 31: BDA II

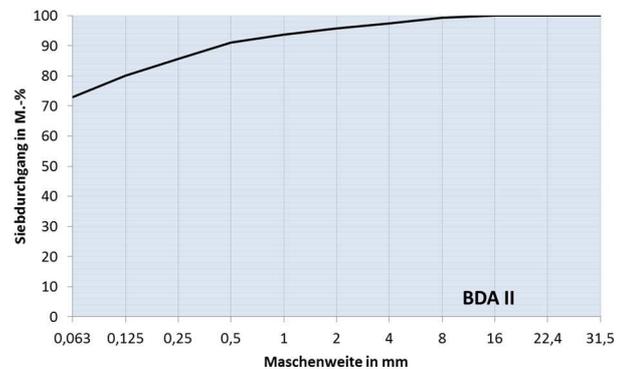


Abbildung 32: Sieblinie BDA II

**BDA III:** Der vorliegende Bodenaushub aus dem zukünftigen Gewerbegebiet Langes Feld in Kassel ist ein breitgestufter Bodenaushub, welcher anthropogen geprägt ist und vereinzelt Gebäudeabbruch (Mörtelreste) und feste Lehmklumpen enthält. Der ungewaschene und unbehandelte BDA III enthält mit 50,3 M.-% einen sehr hohen Mehlkornanteil (< 0,125 mm). Neben 11,7 M.-% Überkorn besteht der Bodenaushub nur zu 38 M.-% aus den Korngruppen 0,125 – 16 mm (**Abb. 33 und Abb. 34**).



Abbildung 33: BDA III

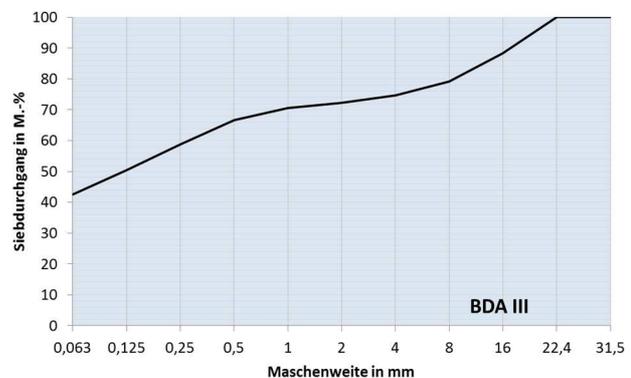


Abbildung 34: Sieblinie BDA III

## 2.2.8 Packungsdichteberechnung

Ein Flüssigboden mit einem hohen Durchwurzelungswiderstand muss ein dichtes Gefüge (hohe Packungsdichte) und eine geringe Porosität aufweisen. Da Poren auch aufgrund des hohen Wassergehaltes aber nicht auszuschließen sind, sollten die vorhandenen Poren möglichst klein sein. Je kleiner der Porendurchmesser ist, desto fester wird das Wasser in den Feinporen und als Absorptionswasser an den Oberflächen der Mineralkörner gehalten und desto schlechter ist die Wasserversorgung der Pflanzen [BKA05]. Folglich sind Grobporen zu vermeiden und Feinporen vor Mittelporen zu bevorzugen.

Um diese Ziele zu erreichen wurde eine Sieblinienoptimierung durchgeführt, die in Anlehnung an gängige Optimierungsverfahren aus der Betontechnologie erfolgte. Mit der sogenannten FULLER-Formel und der Variation des Exponenten ( $n$ ) sowie dem Größtkorn ( $D$ ) konnten verschiedene Sieblinien für FB berechnet werden.

Im ersten Schritt wurden Flüssigböden mit den Exponenten von 0,1 bis 0,9 und mit dem Größtkorn 4, 8 und 16 berechnet (**Abb. 35**). Da für das Projekt Bodenaushube und die Gesteinskörnungen der Firma Kimm verwendet wurden und diese nicht mit den gewünschten FULLER-Sieblinien übereinstimmen, wurden zwei Hüllkurven mit  $n + 0,05$  und  $n - 0,05$  berechnet. Zwischen diesen beiden sollte dann die Zielsieblinie liegen.



**Abbildung 35:** Flüssigböden, optimiert mit verschiedenen Fuller-Exponenten [Den14]

## 2.3 Erstellung von Rezepturen

Im Vorfeld der Rezepturermittlungen wurden auf labortechnischer Ebene verschiedene packungsdichteoptimierte Flüssigböden, mit und ohne Bodenaushub hergestellt und bezgl. Druckfestigkeit, Dichte, Permeabilität und Porosität überprüft. Diese Voruntersuchungen waren laut Antragstellung nicht Bestandteil dieses Projektes, dienen aber der Eingrenzung und Abschätzung relevanter Kenngrößen und zuvor rechnerisch ermittelter Sieblinien (**Kapitel 2.2.9**).

Die Ergebnisse dieser Vorversuche zeigten, dass der Bindemittelgehalt bei packungsdichteoptimierten Flüssigböden auf  $50 \text{ kg/m}^3$  beschränkt werden sollte, damit sich Festigkeiten im Bereich der mittleren Wiederaushubfähigkeit einstellen. Weichen die Werte im Folgenden jedoch davon ab, wird der Bindemittelgehalt nicht erneut bei einzelnen Mischungen angepasst. Somit ist eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Mischungen gegeben. Konventionelle, nicht optimierte Flüssigböden (A-Mischung) gleicher Wiederaushubfähigkeitsklasse benötigen  $70 \text{ kg/m}^3$  Bindemittel. Je dichter die Kornmatrix gepackt ist, also je höher die Packungsdichte und die Korn-zu-Korn Berührung bzw. Reibung ist, desto mehr Kräfte können auch über das Korngerüst aufgenommen und abgeleitet werden.

Des Weiteren zeigte sich, dass bei gemischtkörnigen Böden und Gesteinskörnungen mit abwechslungsreicher Kornform ein Fuller-Exponent (**Kapitel 2.2.9**) von 0,35 die höchsten Packungsdichten aufwies. Folglich wurden alle im Arbeitspaket (AP) 3 und 4 untersuchten Flüssigbodensieblinien mit diesem Exponenten berechnet.

Um die in diesem Projekt ermittelten Ergebnisse einordnen zu können, wird zum Vergleich ein konventioneller Flüssigboden (A-Mischung) und ein packungsdichteoptimierter Flüssigboden (GK16-F0,35) ohne Bodenaushub bei ausschließlicher Verwendung von definierten Gesteinskörnungen hergestellt und untersucht.

Legende zur Probenbezeichnung:

<b>GK16 / GK8 / GK4</b>	<b>F0,35</b>	<b>BDA I / BDA II / BDA III</b>	<b>(16%) – (75%)</b>
Größtkorn (GK) 16, 8 oder 4 mm	Optimiert mit dem Fuller-Exponenten $n = 0,35$ <b>(Kapitel 2.2.9)</b>	Bodenaushub (BDA) I, II oder III <b>(Kapitel 2.1)</b>	Bodenaushubgehalt in M.-%

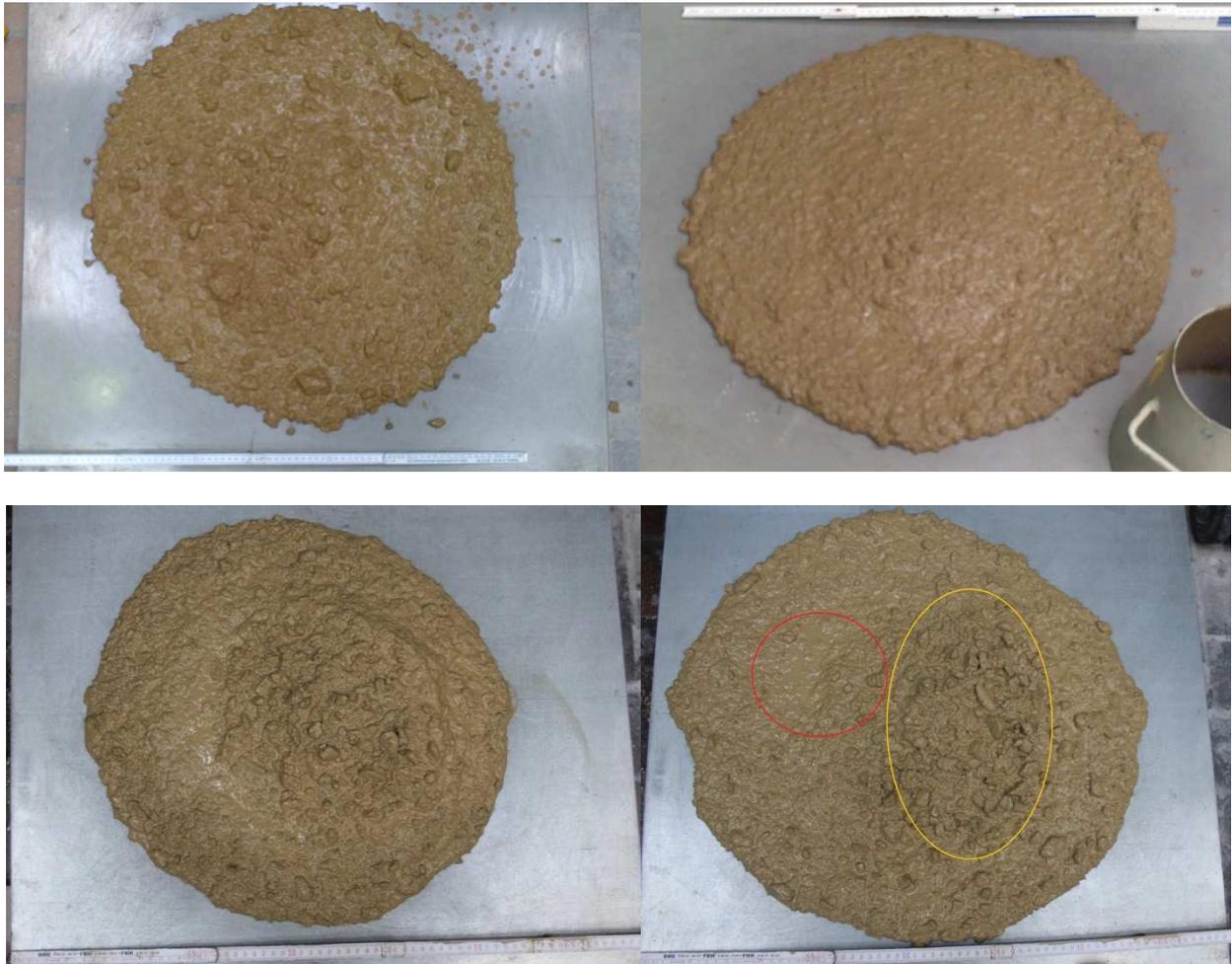
**Tabelle 16:** Rezepturauswahl für weitere Prüfungen in ungebundenen und abgebundenen Zustand (AP3 und AP4)

Probenbezeichnung	Angaben in kg/m <sup>3</sup>														w/f-Wert	w/z-Wert	Wassergehalt [%]	gesamt [kg]
	CEM II/A-LL 42,5 N	Sand 0/1 Traßdorf	Sand 0-2a	Sand 0-4	Kalk 0-8	Kies 1/3	Kies 2-8	Kies 8-16	BDA I	BDA II	BDA III	KSM	KSG	Wasser				
GK16-F0,35-BDAI (30%)	50	27,6		38,0	185,0	146,4	260,8	291,9	447,9			104,8		447,6	0,3	9,0	22%	2000
GK16-F0,35-BDAI (53%)	50					47,6	385,8	243,5	814,5			53,6		404,5	0,3	8,1	20%	2000
GK16-F0,35-BDAII (16%)	50		213,4	205,0	134,4	194,9	299,0	362,9		268,8				272	0,2	5,4	14%	2000
GK16-F0,35-BDAIII (33%)	50		314,5		8,3	228,4	332,7	223,4			546,2		1,7	295	0,2	5,9	15%	2000
GK8-F0,35-BDAI (60%)	50					167,8	322,2		902,4			111,6		446	0,3	8,9	22%	2000
GK8-F0,35-BDAII (20%)	50		278,9	320,1		288,8	404,3			330,0		28,1		300	0,2	6,0	15%	2000
GK8-F0,35-BDAIII (30%)	50		180,1	308,1		331,8	238,6				474,0	47,4		370	0,2	7,4	19%	2000
GK4-F0,35-BDAI (75%)	50			54,6		177,5			1023,8			109,2		585	0,4	11,7	29%	2000
GK4-F0,35-BDAII (15%)	50	6,6	168,3	646,3		422,3				242,3		129,2		335	0,2	6,7	17%	2000
GK4-F0,35-BDA III (30%)	50	262,1	413,6			309,1					454,5	75,8		435	0,3	8,7	22%	2000
A-Mischung	70		90,12	1459										381,3	0,2	5,4	19%	2000
GK16-F0,35	50		83,88	453	268,4	100,7	302	335,5				134,2		271,9	0,2	5,4	14%	2000

### 3. Prüfung im nicht abgebundenen Zustand und Herstellung von Probekörpern

#### 3.1 Augenscheinliche Prüfung auf Mischungsstabilität

In **Abb. 36** sind beispielhaft vier verschiedene Ziehmaße dargestellt, an denen die Mischungsstabilität deutlich abzulesen ist. So zeigen die Ziehmaße in **Abb. 36 oben** eine homogene Mischungsstabilität und werden als stabile Suspensionen, die Ziehmaße in **Abb. 36 unten** dagegen mit deutlicher Entmischung als inhomogene Suspensionen eingestuft.



**Abbildung 36:** Vier beispielhafte Ziehmaße von Flüssigböden. Stabile Suspensionen (oben), instabile Suspensionen (unten)

Stabile Suspensionen „tragen“ auch die groben Gesteinskörner und weisen keine Entmischung auf. Bereiche mit hohem Anteil an groben Körnern (**Abb. 3.1: unten rechts, gelber Kreis**) und Bereiche mit überwiegend feinen Bestandteilen oder Wasserabsonderungen (**Abb. 3.1 unten rechts, roter Kreis**) weisen auf inhomogene Suspensionen hin. Inhomogene Suspension sind als Flüssigböden ungeeignet und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet: Alle hier dargestellten Flüssigböden entsprechen stabilen Suspensionen!

### 3.2 Ziehmaß, Setzfließmaß, Rohdichte, Luftporen

Alle Flüssigböden werden gemäß [FGS12] auf ein Ziehmaß von 50 bis 70 cm eingestellt und entsprechen, wie in **Kapitel 3.1** beschrieben, ausschließlich stabilen Suspensionen. Dazu wurde gemäß DIN 12350-5:2009 der Prüfrichter des Ausbreitmaßes und nicht der des Setzfließmaßes nach DIN EN 12350-8:2010 gewählt. Im Vergleich zum Ausbreitmaß wird wie beim Setzfließmaß das Material weder verdichtet noch geschockt. Da der Ausbreittisch für die Ziehmaße von bis zu 70 cm zu klein ist, wird der Prüftisch des Setzfließmaßes verwendet.

Die Luftporengehalte der Flüssigböden liegen alle zwischen 2 und 6 V.-%, abhängig von der Konsistenz. Je flüssiger ein Boden ist, desto besser ist die Entlüftung, die zur Reduktion von Poren durch eingeschlossene Luft führt. Eine Abhängigkeit vom Größtkorn ist dabei nicht ersichtlich. Die Luftporen werden im abgebundenen Flüssigboden als Grobporen abgebildet und sind in **Kapitel 4.4** dargestellt.

Die Frischrohddichten der verschiedenen Flüssigböden sind in **Tabelle 17** dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Bodenaushube und -gehalte sowie verschiedenen zugesetzten Kiesen und Sanden können hier keine verwertbaren Aussagen bezüglich des zu erwartenden Porenraumes oder der Gefügedichte des Baustoffes getroffen werden. Es ist lediglich abgebildet, ob Partikel hoher oder niedriger Dichte verwendet wurden.

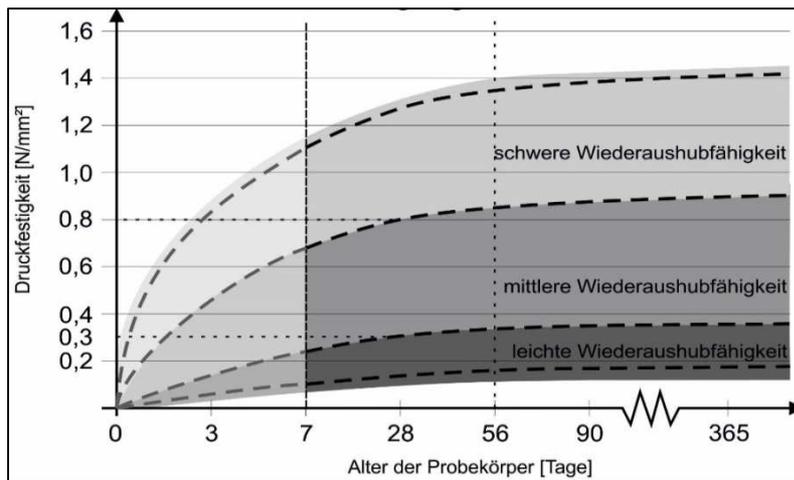
**Tabelle 17:** Frischrohddichte der verschiedenen Flüssigböden

Probenbezeichnung	Frischrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]
GK16-F0,35-BDAI (30%)	1998,3
GK16-F0,35-BDAI (53%)	2001,9
GK16-F0,35-BDAII (16%)	2331,2
GK16-F0,35-BDAIII (33%)	2101,4
GK8-F0,35-BDAI (60%)	1954,2
GK8-F0,35-BDAII (20%)	2144,7
GK8-F0,35-BDAIII (30%)	2107,5
GK4-F0,35-BDAI (75%)	1932,4
GK4-F0,35-BDAII (15%)	2111,0
GK4-F0,35-BDA III (30%)	2022,3
A-Mischung	2059,8
GK16-F0,35	2202,0

## 4. Prüfungen im abgebundenen Zustand

### 4.1 Druckfestigkeitsprüfung

Nach dem Hinweisblatt H ZFSV [FGS12] kann zur Bewertung der Lösbarkeit oder Wiederaushubfähigkeit des Flüssigbodens die Druckfestigkeit bei einem Probenalter von 28 Tagen herangezogen werden. Diese sollte bei einer leichten Wiederaushubfähigkeit < 0,3 N/mm<sup>2</sup>, bei einer mittleren Wiederaushubfähigkeit 0,3 – 0,8 N/mm<sup>2</sup> und bei einer schweren Wiederaushubfähigkeit > 0,8 N/mm<sup>2</sup> betragen (**Abb. 37**). Alternativ kann auch der CBR-Wert verwendet werden (**Kapitel 4.3**)



**Abbildung 37:** Verfestigungsverlauf gemäß H ZFSV:2012 [FGS12]

Zur besseren Vergleichbarkeit und weil die Festigkeitsentwicklung in diesem Projekt nicht die erste Priorität hatte, wurden nicht alle Flüssigböden auf die gleiche Wiederaushubfähigkeitsklasse eingestellt. Vielmehr sollte gezeigt werden, welchen Einfluss die Packungsdichteoptimierung oder die Verwendung der einzelnen Bodenaushube hat, ohne den Bindemittelgehalt zu verändern. Bis auf die A-Mischung, welche aus Standardmischungen der Firma Kimm generiert wurde, weisen alle hier entwickelten Flüssigböden einen Bindemittelgehalt von  $50 \text{ kg/m}^3$  auf. Auffällig ist, dass bis auf drei Flüssigböden (GK16-F0,35-BDAI (30% und 53%) sowie GK16-F0,35-BDAI (60%)), welche mit dem BDA I hergestellt wurden, alle der mittleren Wiederaushubfähigkeitsklasse entsprechen und mit 0,55 bis  $0,72 \text{ N/mm}^2$  nach 28 d vergleichsweise ähnliche Druckfestigkeiten aufweisen. Warum die drei Flüssigböden aus BDA I Druckfestigkeiten von über  $1 \text{ N/mm}^2$  und der GK4-F0,35-BDAI (75%) mit  $0,55 \text{ N/mm}^2$  sogar den geringsten aller gemessenen Druckfestigkeiten nach 28 d aufweisen, kann bisher nicht geklärt werden (**Tabelle 18**).

**Tabelle 18:** Druckfestigkeiten der Flüssigböden

Probenbezeichnung	Druckfestigkeit in $\text{N/mm}^2$			
	2d	7d	28d	56d
GK16-F0,35-BDAI (30%)	0,68	0,92	1,26	1,68
GK16-F0,35-BDAI (53%)	0,84	1,14	1,53	1,87
GK16-F0,35-BDAII (16%)	0,48	0,54	0,71	0,67
GK16-F0,35-BDAIII (33%)	0,51	0,69	0,67	0,68
GK8-F0,35-BDAI (60%)	0,67	0,84	1,09	1,24
GK8-F0,35-BDAII (20%)	0,38	0,51	0,70	0,84
GK8-F0,35-BDAIII (30%)	0,48	0,56	0,72	0,97
GK4-F0,35-BDAI (75%)	0,40	0,46	0,55	0,60
GK4-F0,35-BDAII (15%)	0,38	0,50	0,66	0,76
GK4-F0,35-BDA III (30%)	0,34	0,43	0,61	0,74
A-Mischung	0,23	0,36	0,56	0,62
GK16-F0,35	0,25	0,55	0,63	0,71

Es wurde erwartet, dass mit zunehmender Packungsdichte (**Kapitel 4.4**) auch die Festigkeiten zunehmen. Dies konnte hier nicht festgestellt werden. Es konnte lediglich gezeigt werden, dass im Vergleich zur A-Mischung (70 kg Zement/m<sup>3</sup>, keine Packungsdichteoptimierung) die Packungsdichteoptimierung an sich den Bindemittelgehalt um 20 kg/m<sup>3</sup> reduzieren konnte ohne, dass die Festigkeiten reduziert wurden. Durch die höhere Packungsdichte konnte die Korn-zu-Kornreibung erhöht werden, sodass mehr Kräfte über das Korngerüst abgeleitet werden können. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht ist ein reduzierter Bindemittelgehalt ein Vorteil.

## 4.2 Prüfung auf Schwinden und Quellen

Die Volumenänderungen der Flüssigböden konnten nicht, wie erwartet direkt nach der Herstellung geprüft werden. Mit dem BAM-Setzdehnungsmesser (**Abb. 38 - links**) war eine Messung erst nach 2 Tagen möglich, da zur Befestigung der Messzapfen der Probekörper abgebunden und die Oberfläche angetrocknet sein sollte. Wurden die Messzapfen zu früh aufgeklebt, hielten sie nicht dauerhaft oder wackelten. Die Schwindrinne ist nur für Flüssigböden mit geringem Größtkorn (idealerweise < 4mm) geeignet. Da sich allerdings im Laufe des Projektes herausstellte, dass Flüssigböden mit einem hohen Größtkorn für eine hohe Packungsdichte besser geeignet sind, ist dieses Prüfverfahren nicht zu empfehlen. Im Laufe des Projektes hat sich herausgestellt, dass sich der CBR-Topf durch minimale Modifikationen für sämtliche Flüssigböden am besten eignet. Hier kann die Messung schon 2 Stunden nach der Herstellung durchgeführt werden.



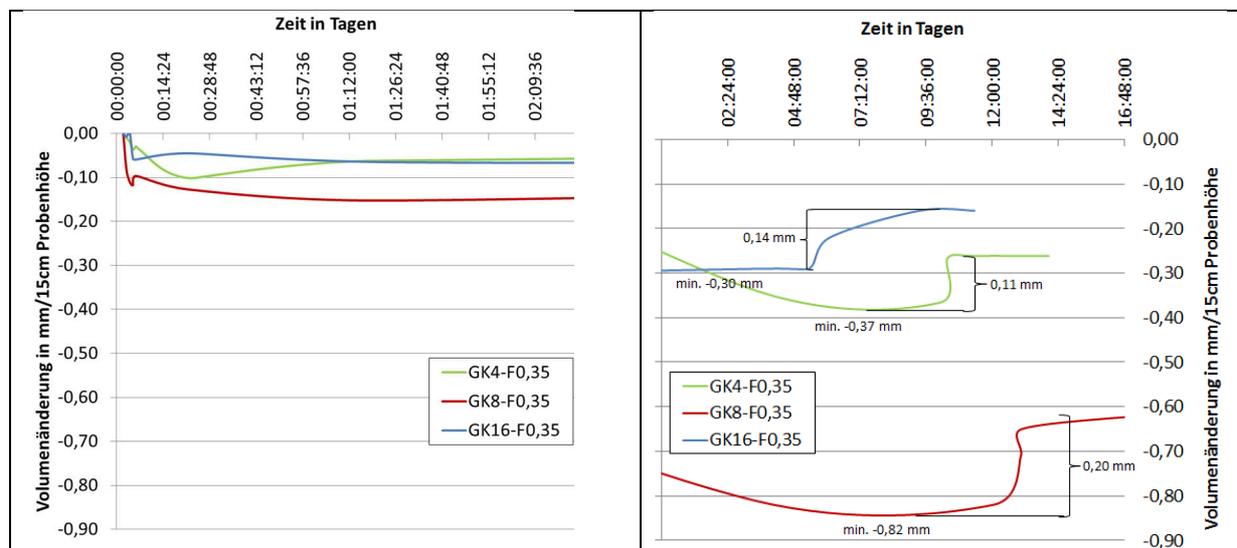
**Abbildung 38:** BAM-Setzdehnungsmesser (links), CBR-Topf nach dem Befüllen und vor der Prüfung (mitte), CBR-Topf während der Prüfung und ohne Folie (rechts)

Bei den ersten Schwellmaß- bzw. Schwinduntersuchungen in Anlehnung an DIN EN 13286-47:2012 konnte keine Volumenänderung gemessen werden, da der Flüssigboden an den Wandungen des Topfes festklebte und keine spannungsfreien Bewegungen vollziehen konnte. Demzufolge wurde, wie in **Abb. 38 -mitte** dargestellt, der Topf vor der Befüllung mit einer Folie ausgekleidet, die dann nach 2 Stunden entfernt werden konnte. Somit entstand ein Ringspalt, der dem Flüssigboden im Topf die Möglichkeit zum Quellen und Schwinden gibt. Ein früheres Ziehen der Folie war nicht möglich, ohne dass der Flüssigboden den Ringspalt wieder verschloss oder das Gefüge beeinflusst wurde. Ferner musste dafür

gesorgt werden, dass vor dem Ziehen der Folie das Überschusswasser auf der Probenoberfläche mit einer Pipette entfernt wird, damit das Wasser die Messung nicht beeinflusst.

Das Schwind- und Quellverhalten wurde am Beispiel der Flüssigböden mit BDA III ermittelt, da diese Proben alle mit ca. 30 M.-% ähnliche Bodenaushubgehalte aufweisen und so vergleichbar sind.

In der ersten Woche wurden die Flüssigböden bei Normklima gelagert (Schwinden), in der zweiten Woche bei 40°C im Trockenschrank getrocknet (Schwinden) und in der dritten Woche im Wasserbad gelagert (Quellen). Die Volumenänderungen (Schwind- und Quellwerte) sind in **Abb. 39** dargestellt. Die Probenkörper schwinden in den ersten 2 Tagen um weniger als 0,16 %, nach einer Woche liegen die Probenkörper mit einem 4er und 16er Größtkorn immer noch unter 0,32 %. Lediglich der Flüssigboden mit einem 8er Größtkorn weist mit 0,66 % ein fast doppelt so hohes Schwinden auf. Eine ähnliche Entwicklung kann beim Quellen beobachtet werden. So zeigt der Flüssigboden mit einem 8er Größtkorn hier mit 0,16 % einen wesentlich höheren Quellwert als der 4er mit 0,09 % und der 16er mit 0,11 %.



**Abbildung 39:** Durchschnittliches Schwinden und Quellen bei unterschiedlichem Größtkorn (4, 8, 16 mm), Schwinden in den ersten 2 d (links), minimaler Schwindwert und Quellen (rechts)

### 4.3 Bestimmung der Tragfähigkeit, Frostbeständigkeit, Volumenstabilität

Die Volumenstabilität wurde in Anlehnung an ZTV-E StB 09:2009 an drei ausgewählten Flüssigböden bestimmt und kann dem **Kapitel 4.2** entnommen werden.

Im Arbeitskreis FGSV-5.3.2 [FGS12] wird die Thematik der Frostbeständigkeit aktuell diskutiert. Nach aktuellem Stand sind alle Flüssigböden als frostempfindlich einzustufen und nur im frostfreien Bereich zu verwenden.

Auch wenn die Wiederaushubfähigkeit mit der Druckfestigkeit ausreichend bestimmt wird, soll am Beispiel des Flüssigbodens GK16-F0,35-BDAIII (33%) auch der CBR-Wert nach TP BF-StB B 7.1 (**Abb. 40**) bestimmt werden, welche nach H ZFSV [FGS12] ebenfalls herangezogen werden kann.

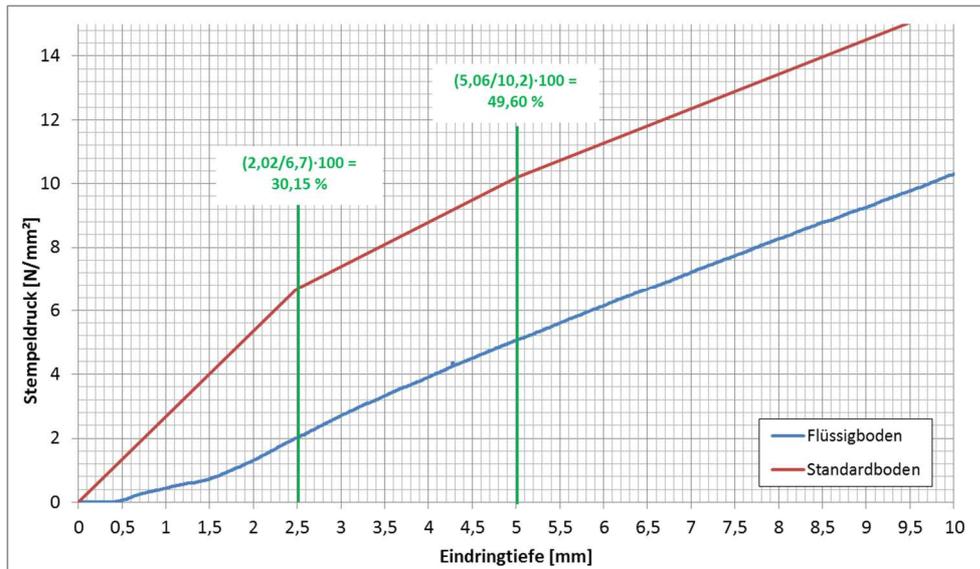
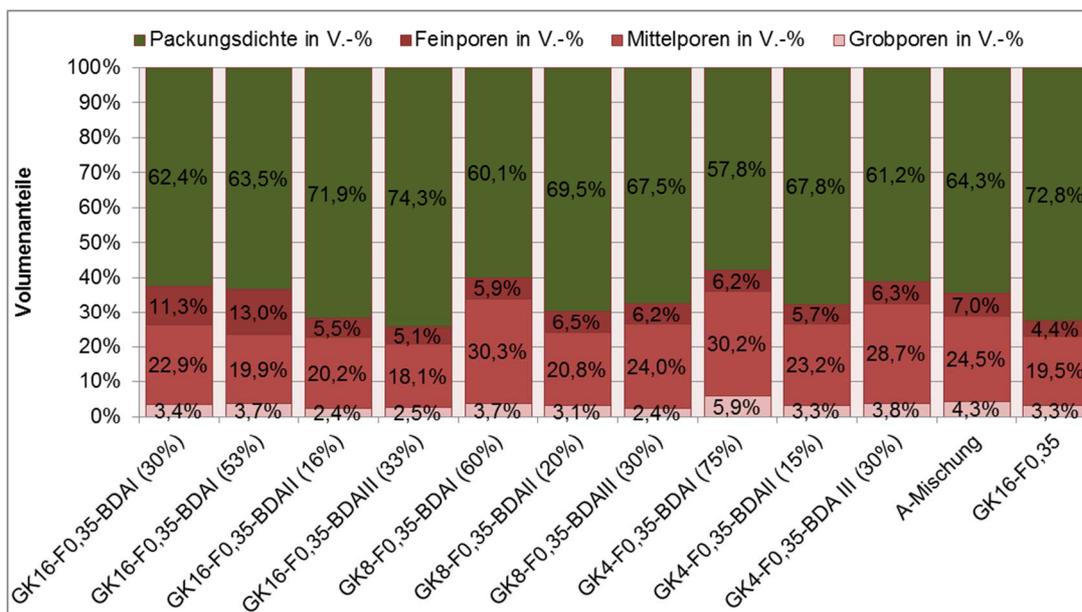


Abbildung 40: CBR-Wert nach TP BF-StB B 7.1

Nach TP BF-StB B 7.1 wird beim CBR-Wert der größere der beiden berechneten Werte: CBR<sub>2,5</sub> und CBR<sub>5,0</sub>. Somit gilt der Wert CBR<sub>5,0</sub> als CBR<sub>0</sub> = 49,60 % und entspricht nach H ZFSV [FGS12] einer mittleren Wiederaushubfähigkeit. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis der Druckfestigkeit in Kapitel 4.1.

#### 4.4 Charakterisierung des Porenraumes mittels MIP, Dichtebestimmung

Ziel dieses Projektes ist es, einen Flüssigboden mit erhöhtem Durchwurzelungsschutz zu entwickeln. Der entscheidende Parameter ist dabei das Porenvolumen des Flüssigbodens, welches geringer ausfallen sollte, als der umgebende Boden (Kapitel 1.3). Wurzeln nehmen im Boden den Weg des geringsten Widerstandes und erschließen Bereiche, die am nachgiebigsten sind [Stu04]. Abb. 41 zeigt die Volumenanteile der Feststoffe (grün) sowie der Poren (rot) der verschiedenen Flüssigböden.



**Abbildung 41:** Volumenanteile von Feststoffen (grün) und Poren (Rot) der Flüssigböden

Wie aus **Kapitel 1.3** ersichtlich, ist ein Flüssigboden als Wurzelschutz geeignet, wenn er eine Porosität von < 30 V.-% bei den hier untersuchten Böden aufweist. In **Tabelle 19** sind demnach die Porositäten und Dichten der Flüssigböden dargestellt. Geeignet sind neben dem Flüssigboden GK16-F0,35 ohne Bodenaushub lediglich die Flüssigböden GK16-F0,35-BDAII und –BDAII.

**Tabelle 19:** Reindichte, Rohdichte, Porosität der untersuchten Flüssigböden

Probenbezeichnung	Reindichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosität [V.-%]
GK16-F0,35-BDAI (30%)	2605,6	1626,9	38%
GK16-F0,35-BDAI (53%)	2592,2	1645,4	37%
GK16-F0,35-BDAII (16%)	2635,7	1896,0	28%
GK16-F0,35-BDAIII (33%)	2633,8	1957,5	26%
GK8-F0,35-BDAI (60%)	2597,5	1561,6	40%
GK8-F0,35-BDAII (20%)	2638,5	1834,2	30%
GK8-F0,35-BDAIII (30%)	2634,6	1777,2	33%
GK4-F0,35-BDAI (75%)	2537,4	1466,8	42%
GK4-F0,35-BDAII (15%)	2632,4	1784,7	32%
GK4-F0,35-BDA III (30%)	2646,4	1619,0	39%
A-Mischung	2607,6	1677,0	36%
GK16-F0,35	2623,9	1909,8	27%

Die Ergebnisse zeigen ganz deutlich eine Abhängigkeit vom Größtkorn. So kann mit steigendem Größtkorn ein geringeres Porenvolumen und somit eine steigende Packungsdichte erreicht werden. Der Gehalt an Bodenaushub ist dabei von geringerer Bedeutung. Warum auch hier die Flüssigböden aus Bodenaushub I im Vergleich zu den anderen Mischungen so auffällig abweichende Werte aufweisen, kann an den unterschiedlichen quellfähigen Tonmineralien liegen (**Kapitel 1.11**). Weitere Untersuchungen müssten diese Auffälligkeiten klären. Ferner müsste dann überprüft werden, ob eine weitere Erhöhung des Größtkorns noch höhere Packungsdichten ermöglicht.

#### 4.5 Bestimmung der abrasiven Eigenschaften mittels Böhmischeibe

Wie auch schon in **Kapitel 1.6** beschrieben, wurde beispielhaft an einem ausgewählten Flüssigboden (GK4-F0,35-BDAIII (30%)) die abrasiven Eigenschaften überprüft. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Flüssigboden, keine sichtbaren abrasiven Schädigungen an der Oberfläche des Mantelrohres hinterlassen hat (**Abb. 42**). Wie auch schon beim Satog in Ansätzen festzustellen war, haben sich die tonhaltigen Bestandteile auf der Oberfläche abgelagert und eine Art Schutzschicht gebildet. Somit kann durch den Einsatz von Flüssigboden als Bettungsmaterial gegenüber anderen Verfüllbaustoffen eine Beschädigung des eingebetteten Mediums ausgeschlossen werden (**Kapitel 1.6**).



**Abbildung 42:** Probekörper mit Mantelrohr nach der Prüfung (Schleifmittel Flüssigboden GK4-F0,35-BDAIII (30%))

## 4.6 Wasserhaushalt

### 4.6.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

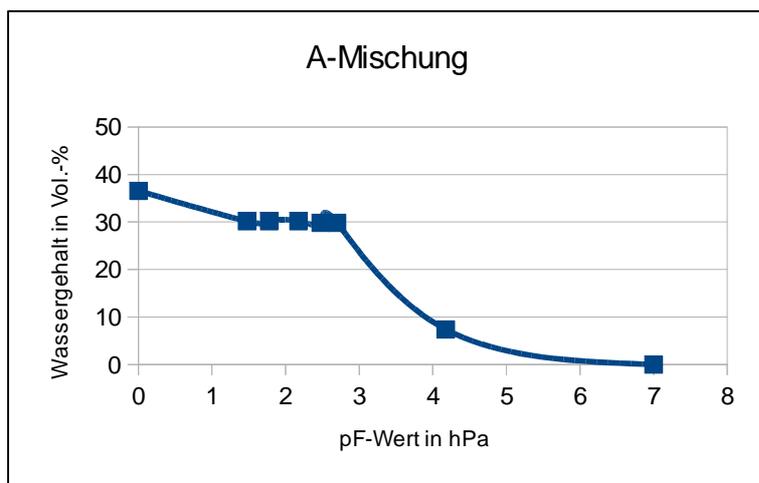
Eine geringe Wasserleitfähigkeit ist für die Erreichung eines eingeschränkten Wurzelwachstums von essentieller Bedeutung. Die im Vergleich zum umgebenden Wurzelraum günstigere Luft- und Wasserversorgung in schlecht verdichteten Leitungsgräben stellt bei der Verwendung konventioneller Verfüllsubstrate den Hauptanreiz für die Baumwurzeln dar, diese Bereiche zu erschließen. Für die in der zweiten Projektphase vorgesehenen Vegetationsversuche wurden drei geeignete Flüssigboden-Rezepturen zur genaueren Charakterisierung ausgewählt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung nach DIN 19683-9:2012 sind in **Tabelle 20** dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Flüssigbodenrezepturen erkennbar. Die höchsten Werte wurden bei der A-Mischung gemessen. Dies liegt darin begründet, dass die A-Mischung zu einem Großteil aus dem Referenzbaustoff Sand 0/4 besteht, welcher ebenfalls die höchsten Leitfähigkeits-Werte aufweist (**Kapitel 1.7.2**). Die Optimierung der Flüssigbodenrezeptur durch steigenden Skelettanteil in GK16-F0,35 führt zu einer starken Reduktion der Leitfähigkeit, welche durch die Zugabe von Bodenaushub in GK16-F0,35-BDAI (53%) wieder leicht ansteigt, ebenso wie die Porosität desselben. Analog zu den wurzelwachstumshemmenden Eigenschaften in Bezug auf das Nährstoffbindungsvermögen der Flüssigböden (**Kapitel 4.7**) kann auch bei der Wasserleitfähigkeit festgehalten werden, dass die Packungsdichteoptimierung positive Auswirkungen auf die Wasserleitfähigkeitseigenschaften (niedrige Wasserleitfähigkeiten) der Flüssigböden hat.

**Tabelle 20:** Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_F$ -Wert) der Flüssigböden ( $N = 6$ , Standardabweichung in Klammern).

Probenbezeichnung	GPV	$\text{cm s}^{-1}$	$\text{cm d}^{-1}$
A-Mischung	36,6%	0,000145 ( $\pm 0,000121$ )	12,54 ( $\pm 10,41$ )
GK16-F0,35	28,4%	0,000008 ( $\pm 0,000001$ )	0,72 ( $\pm 0,10$ )
GK16-F0,35-BDAI (53%)	37,5%	0,000011 ( $\pm 0,000003$ )	0,94 ( $\pm 0,29$ )

#### 4.6.2 Matrixpotential-/Wassergehaltskurve (pF-Kurve)

Im Vergleich zu den in **Kapitel 1.7.3** gemessenen Werten zeigen die pF-Kurven der Flüssigböden ein deutlich anderes Bild. Der waagerechte Verlauf der Kurve der A-Mischung bei hohen Matrixpotentialen ist charakteristisch für das Fehlen von Sekundärporen (**Abb. 43**), da keine Poren bis zu einem pF-Wert von 2,7 (entspricht -500 hPa) entwässert werden. Erst bei pF 4,2 ist ein großer Teil der Poren geleert. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den hohen Leitfähigkeiten, die im vorangegangenen Kapitel für der A-Mischung beschrieben wurden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Existenz von präferenziellen Fließwegen, z. B. durch Randablösungen der Probe vom Stechzylinder, für die hohen Werte der A-Mischung verantwortlich war. Das Gesamtporenvolumen (GPV) ist bei der A-Mischung mit 36,6 % von allen Flüssigböden am größten, während der optimierte GK16-F0,35 mit 28,4 % das geringste GPV aufweist und GK16-F0,35-BDAI (53%) wegen der Zugabe des Bodenaushubs mit 37,5 % wieder ein größeres GPV besitzt. Die Kurve von GK16-F0,35 (**Abb. 44**) verläuft zwar niedriger, aber ähnlich wie bei der A-Mischung sehr waagerecht bis pF 2,7. GK16-F0,35-BDAI (53%) (**Abb. 45**) zeigt den steilsten Abfall im Bereich bis pF 1,8, was bedeutet, dass er im Vergleich zur A-Mischung und GK16-F0,35 einen deutlich höheren Anteil an Sekundärporen aufweist und eine vergleichsweise hohe Luftkapazität besitzt. Der Gehalt an Totwasser (Wasser in Poren kleiner 0,2  $\mu\text{m}$ , bzw. stärker gebunden als pF 4,2) ist bei GK16-F0,35-BDAI (53%) mit 11,8 % am höchsten, während die A-Mischung und GK16-F0,35 mit 7,4 %, bzw. 5,8 % deutlich niedrigere Werte aufweisen.



**Abbildung 43:** pF-Kurve des Flüssigbodens A-Mischung

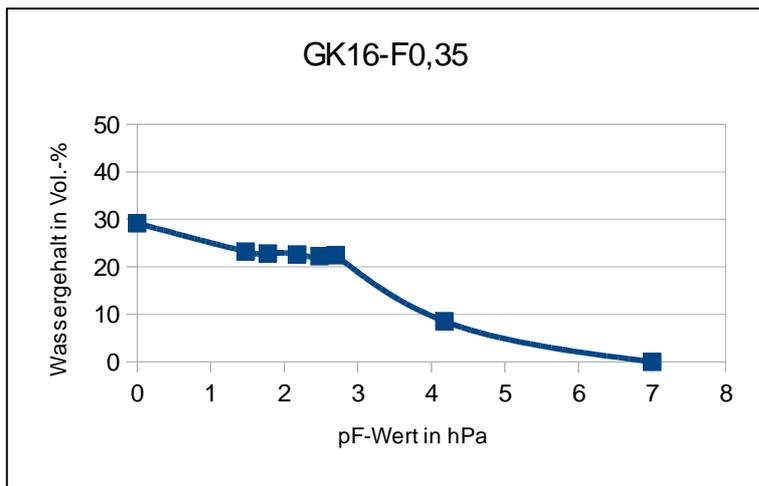


Abbildung 44: pF-Kurve des Flüssigbodens GK16-F0,35

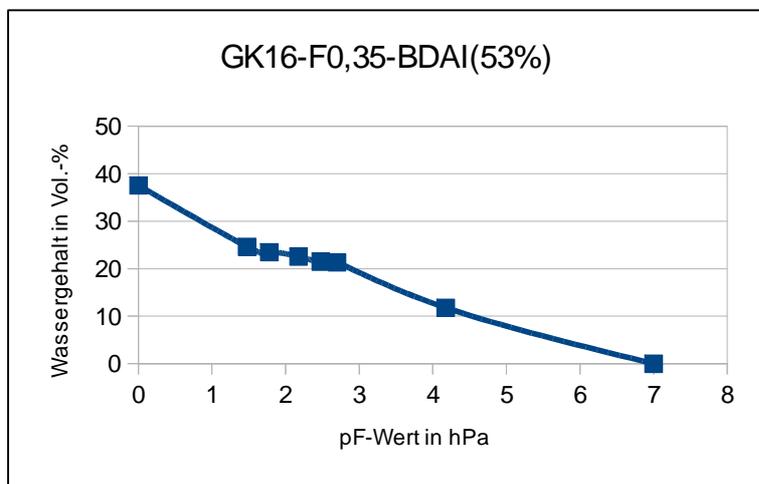
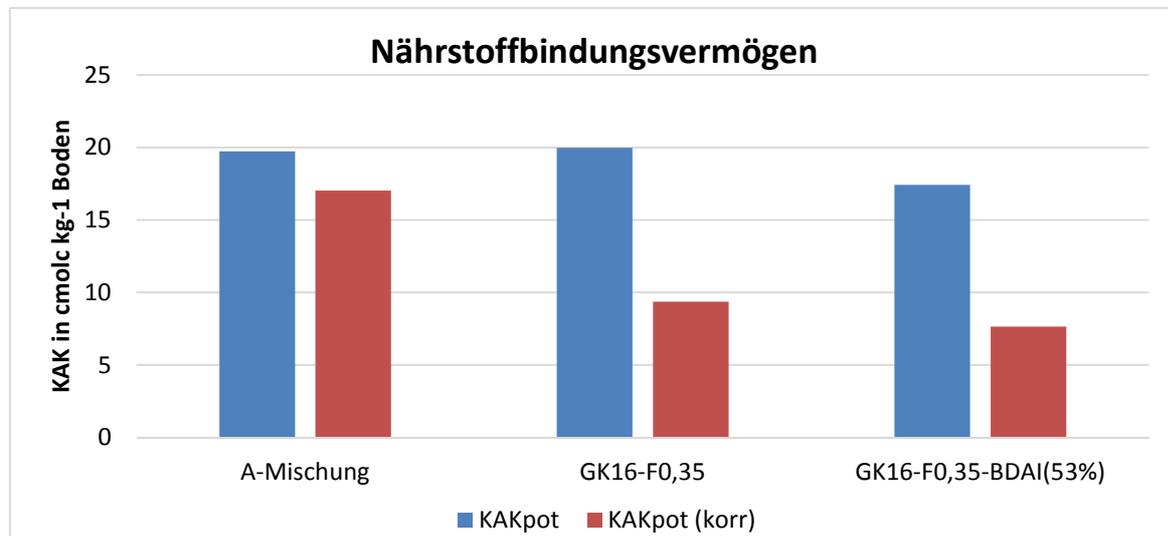


Abbildung 45: pF-Kurve des Flüssigbodens GK16-F0,35-BDAI (53%)

#### 4.7 Nährstoffanalyse (KAK)

Neben den physikalischen Eigenschaften, wie einem für das Wurzelwachstum ungünstigen Wasser- und Gashaushalt, ist das Ziel der Entwicklung der Flüssigböden auch die Schaffung ungünstiger chemischer Eigenschaften wie des Nährstoffbindungsvermögens. Dieses wird in der Bodenkunde nach DIN ISO 13536:1997 durch die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschrieben. Die KAK entspricht der Summe aller permanenten und variablen negativen Ladungen im Boden, welche die Pflanzennährstoffe reversibel aufnehmen können. Alle drei Flüssigboden-Rezepturen weisen ähnlich hohe Werte für die KAK auf. Diese Werte sind zwar recht hoch und vergleichbar mit mitteleuropäischen Böden [Blu10], jedoch führt die Zugabe von Grobboden größer >2 mm (Kies und Grus) zu einer deutlichen Reduktion dieses Wertes, wie aus **Abb. 46** ersichtlich wird. Die anfänglichen Werte von 17 bis 20  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  werden vor allem bei GK16-F0,35 und GK16-F0,35-BDAI (53%) durch die sehr hohen Anteile an Grobboden wieder auf ein Niveau herabgesetzt, welches z. T. noch unter den Werten der Bodenaushube liegt. Zusammenfassend kann für die drei Flüssigböden daher festgehalten werden, dass der gewünschte Effekt eines reduzierten Nährstoffbindungsvermögens mit steigendem Skelettgehalt erzielt werden kann. Ein weiteres Maß für die Bodenfruchtbarkeit ist die Basensättigung (BS). Diese beschreibt den Anteil, den

die Kationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  im Vergleich zu  $\text{Al}^{3+}$  und  $\text{H}^+$  an der gesamten Kationenaustauschkapazität haben. BS-Werte von > 80 % gelten als Indikator für eine hohe Fruchtbarkeit. Dieser Wert liegt für alle Flüssigböden bei 100 %, was vor allem an den hohen Kalkgehalten liegt.



**Abbildung 46:** Potentielle Kationenaustauschkapazität (blau) und um den Skelettgehalt korrigierte Kationenaustauschkapazität (rot) der Flüssigböden

#### 4.8 LAGA M20 Auswertung und Beurteilung

Die vorliegenden Flüssigböden aus Bodenaushub (GK16-F0,35-BDAI(53%)) und ohne Bodenaushub (GK16-F0,35) werden dem gleichen Untersuchungsprogramm wie in **Kapitel 2.2.2** unterzogen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in **Tabelle 21** (FB ohne Bodenaushub) und **Tabelle 22** (FB mit Bodenaushub) aufgeführt.

Da über die Korngrößenverteilung **Kapitel 2.3 und 2.2.9** keine Einteilung in Bodenklassen vorgenommen werden kann, da Flüssigböden in abgebundener Form vorliegen, werden die gleichen Zuordnungswerte wie in **Kapitel 2.2.2** verwendet.

Die sensorische Prüfung nach Aussehen und Geruch, die jeweils bei der Herstellung und beim Entschalen der Probekörper durchgeführt wurde, zeigte keine Auffälligkeiten. Da allerdings auch alle Ausgangsstoffe gründlich analysiert wurden (**Kapitel 1**), konnte eine Schadstoffbeeinträchtigung des daraus hergestellten Flüssigbodens ausgeschlossen werden.

Die TOC-Werte (gesamter organischer Kohlenstoff) beschreiben die organischen Bestandteile des Bodens und wurden in **Kapitel 4.7** ausführlich beschrieben.

#### Flüssigböden ohne Bodenaushub

Nach den Feststoffuntersuchungen zu urteilen wird der Boden in die „Einbauklasse Z0 - Uneingeschränkter Einbau“ eingeteilt. Nach Durchführung der Eluatuntersuchungen musste die Einbauklasse auf „Z2 – eingeschränktem Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen“ korrigiert werden (**Tabelle 21**).

**Tabelle 21:** LAGA M20 Untersuchungen des FBs ohne Bodenaushub (GK16-F0,35)

	GK16-F0,35			
	Feststoff [mg/kg]	Einordnung Einbauklassen	Eluat [mg/l]	Einordnung Einbauklassen
Kohlenwasserstoffe	55	Z0		
EOX	<1	Z0		
PAK	n.b.*	Z0		
TOC	siehe Kapitel 4.7			
Korngrößenverteilung	siehe Kapitel 2.2.9 / 2.3			
Arsen	5,4	Z0	<0,005	Z0
Blei	7	Z0	<0,005	Z0
Cadmium	<0,2	Z0	<0,0005	Z0
Chrom (gesamt)	10	Z0	0,03	Z0
Kupfer	14	Z0	<0,005	Z0
Nickel	9,6	Z0	<0,005	Z0
Quecksilber	<0,05	Z0	<0,0002	Z0
Zink	19,8	Z0	<0,05	Z0
Chlorid			1,6	Z0
Sulfat			71	Z2
pH-Wert [-]			10,8	Z1.2
elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]			346	Z1.2
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)	keine Auffälligkeiten			

### Flüssigboden mit Bodenaushub

Nach den Feststoffuntersuchungen zu urteilen wird der Boden in die „Einbauklasse Z1 - eingeschränkter offener Einbau“ eingeteilt. Die Eluatuntersuchungen korrigieren diese Einordnung minimal von Z1 auf Z.1.2 (**Tabelle 22**).

**Tabelle 22:** LAGA M20 Untersuchungen des FBs mit Bodenaushub (GK16-F0,35-BDAI (53%))

	GK16-F0,35-BDA I (53%)			
	Feststoff [mg/kg]	Einordnung Einbauklassen	Eluat[mg/l]	Einordnung Einbauklassen
Kohlenwasserstoffe	<50	Z0		
EOX	<1	Z0		
PAK	n.b.*	Z0		
TOC	siehe Kapitel 4.7			
Korngrößenverteilung	siehe Kapitel 2.2.9 / 2.3			
Arsen	5	Z0	0,007	Z0
Blei	5	Z0	0,023	Z0
Cadmium	<0,2	Z0	<0,0005	Z0
Chrom (gesamt)	61	Z1	0,032	Z0
Kupfer	20	Z0	0,006	Z0
Nickel	88	Z1	<0,005	Z0
Quecksilber	<0,05	Z0	<0,0002	Z0
Zink	47,4	Z0	<0,05	Z0
Chlorid			2	Z0
Sulfat			41	Z1.2
pH-Wert [-]			11	Z1.2
elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]			402	Z.1.2
Sensorische Prüfung (Aussehen und Geruch)	keine Auffälligkeiten			

\* nicht bestimmbar

Im Vergleich zum reinen Bodenaushub (**Tabelle 2.2b**) hat der daraus hergestellte Flüssigboden in **Tabelle 22** beim Feststoff geringere Konzentrationen (z. B. beim Chrom-, Nickel-, Zink-, Chlorid-, Arsen- und Bleigehalt) da durch den Bindemittelanteil einige Substanzen immobilisiert werden. Im Gegenzug erhöht dieser Bindemittelgehalt aber auch den pH-Wert und den Sulfatgehalt und lässt folglich die elektrische Leitfähigkeit ansteigen.

#### 4.9 Bestimmung des pH-Wertes

Zusätzlich zu den wurzelhemmenden physikalischen Eigenschaften der Flüssigböden ist ihr hoher pH-Wert eine erwünschte chemische Eigenschaft, welche das Wurzelwachstum u. A. durch reduzierte Nährstoffverfügbarkeit weiter beeinträchtigt [Sch11][Blu10]. Die pH-Werte der Flüssigböden wurden nach DIN ISO 10390 gemessen und liegen alle samt im alkalischen Bereich (**Tabelle 23**). Die A-Mischung und GK16-F0,35 sind extrem alkalisch und weisen die höchsten pH-Werte um 11,5 auf. GK16-F0,35-BDAI (53%) ist mit einem pH-Wert um 9,5 nur stark alkalisch, was mit der Zugabe des Bodenaushubs begründet werden kann. Da die urbanen Böden sowie die Referenzbaustoffe alle samt Werte im neutralen bis schwach oder mäßig alkalischen Bereich aufweisen, kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz aller drei Flüssigböden ein gehemmtes Wurzelwachstum im Vergleich zu den Referenzbaustoffen erreicht werden würde. Weil aber in den humiden Mittelbreiten eine natürliche Tendenz zur Bodenversauerung besteht, muss weiter davon ausgegangen werden, dass die durch den hohen pH-Wert gehemmte Nährstoffverfügbarkeit für die Wurzeln in GK16-F0,35-BDAI (53%) am schnellsten abgebaut und dieser somit schneller als die A-Mischung und GK16-F0,35 wieder als attraktiver Wurzelraum für Baumwurzeln zur Verfügung stehen wird.

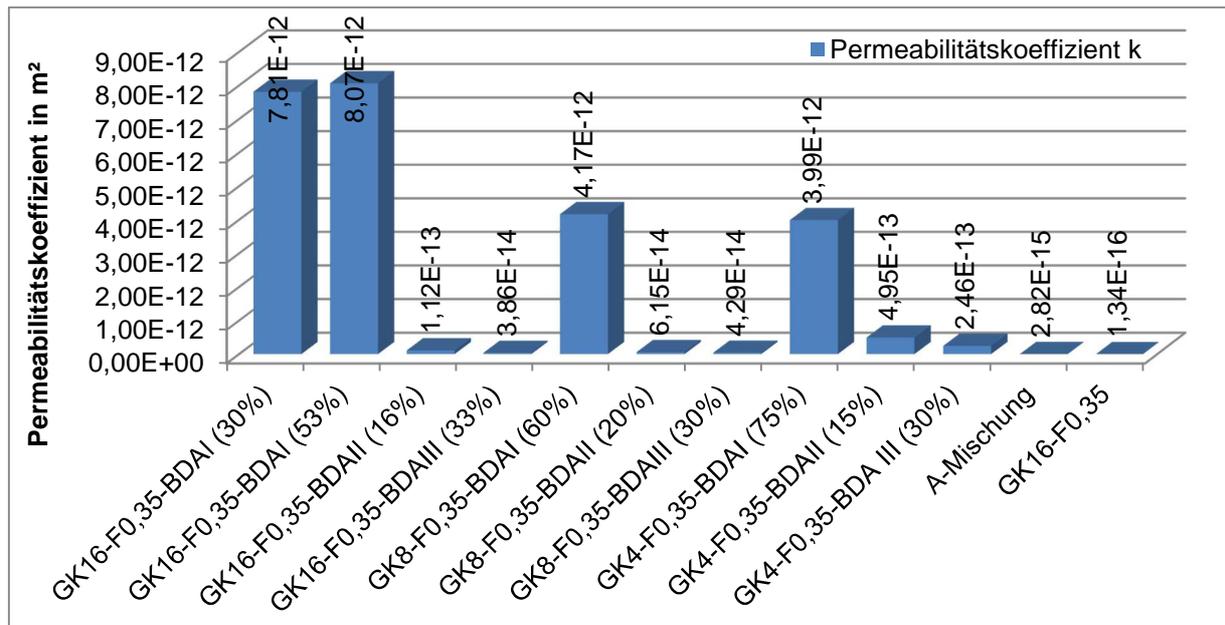
**Tabelle 23:** pH-Werte (H<sub>2</sub>O und CaCl<sub>2</sub>) der Flüssigböden

Name	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )
A-Mischung	11,48	11,33
GK16-F0,35	11,59	11,47
GK16-F0,35-BDAI (53%)	9,86	9,46

#### 4.10 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit, Gasdiffusionsmessungen

Die Gaspermeabilität der Flüssigböden wird, wie in **Kapitel 1.9** beschrieben, mit der Cembraumethode in Anlehnung an [Kol89] und H ZFSV-563:2012 bestimmt.

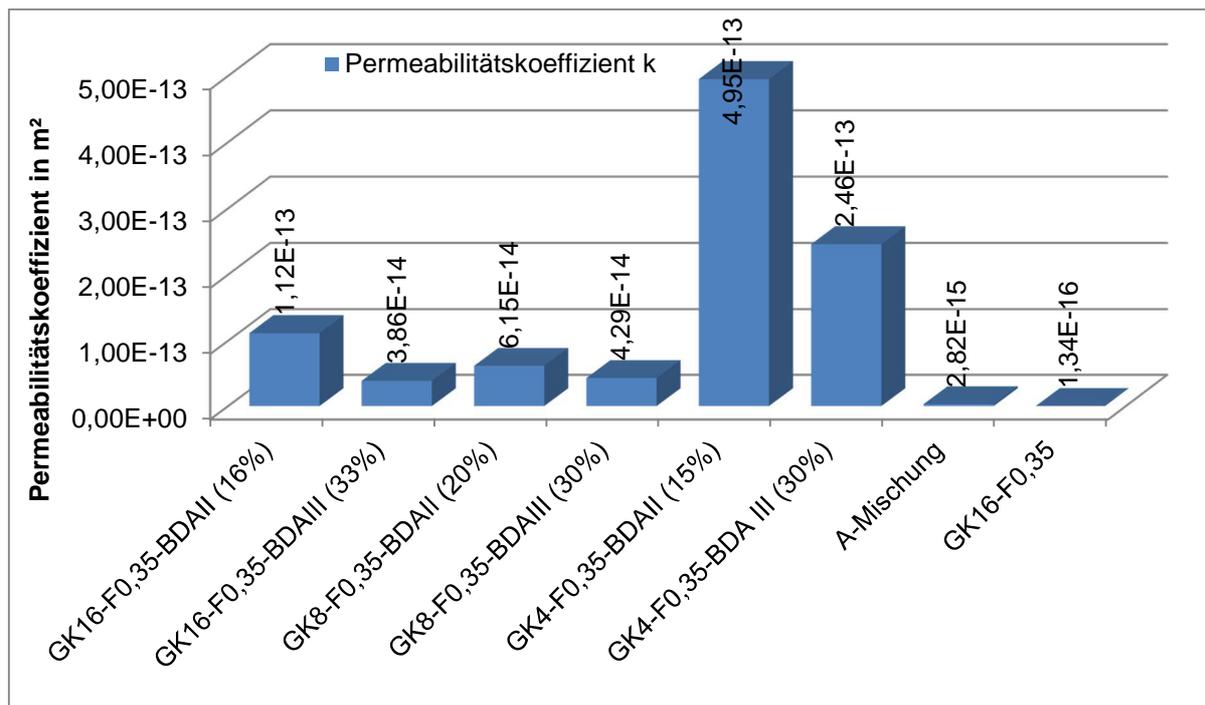
Wie **Abb. 47** zeigt, weisen die Flüssigböden aus BDA I mit Abstand die höchsten Permeabilitäten aller Referenzbaustoffe auf. Ähnlich auffällige Werte zeigen aber auch schon die Werte der Porosität / des Porenvolumens in **Kapitel 4.4**. Auffällig ist dabei allerdings, dass zwar die Flüssigböden GK16-F0,35-BDAI die höchste Gasdurchlässigkeit aufweisen, aber nach **Abb. 48** die Flüssigböden GK8- F0,35-BDAI und GK4- F0,35-BDAI mit  $\geq 40$  V.-% das größte Porenvolumen besitzen. Wie auch in **Kapitel 4.1, 4.4** und **4.10** sind die Werte der aus BDA I hergestellten Flüssigböden ungewöhnlich und eventuell auf die Quellfähigkeit der Tonminerale zurückzuführen. Weitere Untersuchungen dazu wären in einem Folgeprojekt notwendig, um dies genauer zu beleuchten.



**Abbildung 47:** Gaspermeabilität der Flüssigböden

Blendet man die Mischungen aus BDA I aus, ist aus **Abb. 48** ersichtlich, dass die Flüssigböden ohne Bodenaushub (A-Mischung und GK16-F0,35) die geringsten Gasdurchlässigkeiten aufweisen. Ein Grund könnte der deutlich geringere Gehalt an quellfähigen Tonen sein.

Besonders deutlich stechen dabei die vergleichsweise hohen Werte der Flüssigböden mit dem Größtkorn 4 heraus. Aufgrund des hohen Porenvolumens (**Kapitel 4.4**) waren zwar höhere Permeabilitäten zu erwarten, allerdings weichen diese deutlich von den Werten der anderen Flüssigböden ab. Die Werte der Gaspermeabilität bei den Flüssigböden mit einem Größtkorn 16 und 8 weichen nur minimal voneinander ab. Zu erwarten war, dass die Mischungen mit einem 8er Größtkorn durchlässiger sind als die mit dem 16er Größtkorn, da einerseits mit sinkendem Größtkorn die Menge an Zugabewasser und somit die Kapillarporen steigen und andererseits sich der Weg durch den Probekörper verkürzt (die Wege um die einzelne Kornstruktur). Dies kann bisher nicht belegt werden und müsste mit weiteren Untersuchungen vertieft werden.



**Abbildung 48:** Gaspermeabilität der Flüssigböden (Auswahl)

## 5 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Erste Ergebnisse dieses Projektes wurden sowohl in einer Fachzeitschrift (3R - Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme) als auch auf einer bodenkundlichen Tagung in Wien veröffentlicht. Eine weitere Verbreitung der Vorhabensergebnisse erfolgte bei den IKT-Praxistagen 2015 vor Fachpublikum oder bei der universitären Lehre. Gesetz dem Fall, dass die ehemaligen Projektbearbeiter hierfür noch verfügbar sind, sollen auch die ersten Erkenntnisse der Strukturanalyse mittels Computertomographie (siehe Anhang) noch veröffentlicht werden.

Simon, J, Felde, V, Middendorf, B & Peth, S 2015, 'Flüssigböden/ZFSV mit hohem Durchwurzelungswiderstand', 3R - Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme, 12/2015, S. 92-95.

Simon, J, Felde, V, Peth, S, Middendorf, B & Kimm-Friedenberg, S 2015, 'Protecting tree roots and subterranean infrastructure in urban areas by developing self-compacting flowable fills with root growth impeding properties', EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Copernicus GmbH (Copernicus Publications), Wien, Österreich, S. ID 9172.

<http://www.ikt.de/allgemein/ikt-praxistage-2015-download-der-vortraege/>

## Fazit

Ein Verfüllbaustoff sollte künftig mehr können, als nur unter unbedrängten Verhältnissen ein Rohr zu ummanteln. Er muss in urbanen Böden unter widrigen und beengten Bedingungen jegliche Rohr- und Kabelmaterialien dauerhaft und homogen betten und diese vor von außen einwirkenden Kräften (z. B. Baumwurzeln) schützen, aber auch flexibel auf Veränderung durch neue Vernetzungen und Anschlüsse reagieren können, d. h. es muss eine gute Wiederaushubfähigkeit gegeben sein. Die hier gewonnenen Ergebnisse zeigen im Labormaßstab einerseits, dass mit den aktuell bestehenden Verfüllbaustoffen kein dauerhafter Wurzelschutz gewährleistet ist und andererseits, dass mit den optimierten Flüssigböden aber ein erhöhter Durchwurzelungswiderstand erreicht werden kann.

Da urbane Böden oftmals hochgradig verdichtet sind, treffen Baumwurzeln auf maximal verdichtete Böden (> 30 V.-%), die aber aufgrund der unterschiedlichen Tonmineralen und organischen Bestandteile auch wechselnden Quellungs- und Schrumpfungsvorgängen ausgesetzt sind. Da Wurzeln immer den Weg des geringsten Widerstandes wählen, versuchen sie sich Räume mit höherem Porenvolumen und besserem Gasaustausch zu erschließen [Stu04]. Die oft unzureichend verdichteten Leitungsgräben stellen günstige Lebensbedingungen für die Pflanzenwurzel dar. Lediglich mit einer breit gestuften Sieblinie bei optimalen Verdichtungsgraden könnte im Labor theoretisch ein erhöhter Durchwurzelungswiderstand geschaffen werden. Dieser ist allerdings in der Praxis nicht realisierbar, da dort maximale Lasten und geringe Schichthöhen kaum erreichbar sind, sowie Behinderungen durch die Leitungen selbst eine homogene Verdichtung verhindern. Auch konventionelle Flüssigböden können mit Porositäten um 35 V.-% keinen konsequenten Durchwurzelungsschutz gewährleisten. Dies wäre lediglich bei Umgebungsböden mit dauerhaften deutlich höheren Porositäten möglich. Ein sicherer und dauerhafter Wurzelschutz des Leitungsgrabens ist dann gewährleistet, wenn das Bettungsmaterial eine deutlich geringere Porosität aufweist als der umgebende Boden. Auch wenn dieser (je nach Zusammensetzung) unterschiedliche Verdichtungsgrade aufweist, sollten Verfüllbaustoffe eine Porosität von < 30 V.-% dauerhaft gewährleisten (**Kapitel 1.3**). Wie in **Kapitel 4.4** deutlich geworden ist, ist dies durch Flüssigböden mit entsprechender Packungsdichteoptimierung (breite, gute abgestimmte Sieblinie, maximales Größtkorn und minimaler Gehalt quellfähigen Tonen) durchaus möglich. Die damit erreichte hohe Packungsdichte erhöht aber nicht nur den Durchwurzelungswiderstand, sondern reduziert auch die Wasserleitfähigkeit (**Kapitel 4.6.1**) sowie den Gasaustausch im Boden (**Kapitel 4.10**) durch einen geringen Gehalt an Sekundärporen und eine geringe Luftkapazität (**Kapitel 4.6.2**). Damit wurden weitere für die Baumwurzeln unattraktive Umgebungsbedingungen geschaffen, die dem Wurzeleinwuchs in den Leitungsgräben entgegenwirken, somit möglichen Konflikten zwischen Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur entgegenwirken und eine Koexistenz ermöglichen. Um diese labortechnischen Untersuchungen und Ergebnisse auch für die Praxis belegen zu können, sind für die Zukunft großtechnische Erprobungsversuche notwendig. Denkbar sind hier zum einen Trogversuche im Gewächshaus unter definierten und konstanten abiotischen Bedingungen (Klima, Bewässerung, Düngung etc.). Des Weiteren wären Dauerhaftigkeitsversuche unter realen Bedingungen sinnvoll, bei denen der hier entwickelte Flüssigboden unter praxisrelevanten Umständen getestet wird. Ein Synergieeffekt wäre erzielbar, wenn die Versuchsreihe, betreut vom IKT in Gelsenkirchen und gefördert von der DBU (AZ 28019), mit einbezogen würde. Dort werden verschiedene Verfüllbaustoffe im Umfeld von Großbäumen am Standort Osnabrück getestet.

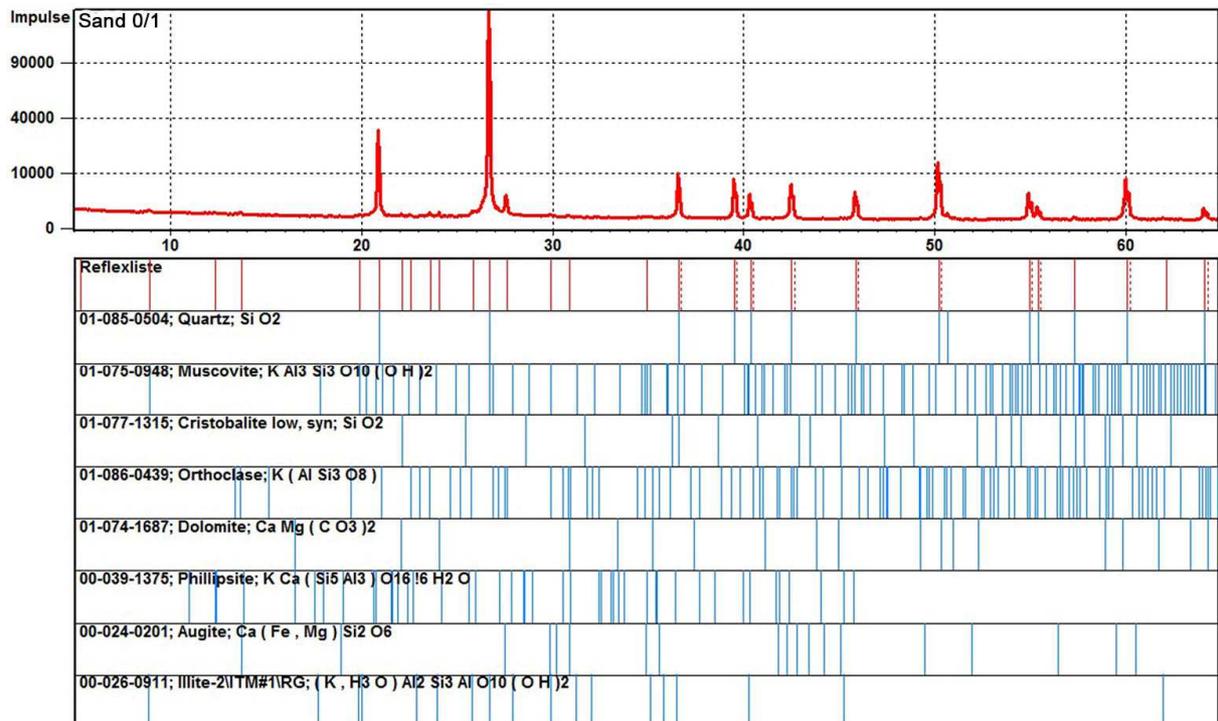
## Literaturverzeichnis

- [BEN06] BENGOUGH A.G., BRANSBY, M.F., HANS, J., MCKENNA, S.J., ROBERTS, T.J., VALENTINE, T.A.: *Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell*. Journal of Experimental Botany 57-2, S.437-447. 2006
- [BKA05] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE UND NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (Hrsg.): „*Bodenkundliche Kartieranleitung*“. Hannover: 5. Auflage, 2005.
- [Blu10] BLUME, Hans-Peter et al.: „*Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde*.“ 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2010.
- [Den14] DENKE, Kai: „*Thermisch leitfähige Flüssigböden / ZFSV für die Einbettung von Erdkabeln – Optimierung der granulometrischen Eigenschaften*.“ Bachelorarbeit. Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, Universität Kassel, 2014.
- [FGS12] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN E.V.: „*H ZFSV - Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau*.“ FGSV-Nr. 563. W1. Köln, 2012.
- [Har14] BACHMANN, JÖRG; HORN, RAINER; PETH, STEPHAN: „*Hartge und Horn. Einführung in die Bodenphysik*.“ 4. Vollständig überarbeitete Auflage, Schweitzbart, 2014
- [IKT01] INSTITUT FÜR UNTERIRDISCHE INFRASTRUKTUR: „*Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanälen und -leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung*“ Auftraggeber: Gelsenkanal, Gelsenkirchen. Forschungsprojekt; Gelsenkirchen, März 2001
- [Kol89] KOLLEK, J. J.: „*The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation*.“ 1989.
- [Mac06] MACHT, Jürgen; NISCHER, Peter: „*Weiche Betone – kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung*.“ Beton + Zement 01/2006, S. 24 -29. 2006
- [Pie13] PIERRET ALAIN; GONKHAMDEE, SANTIMAITREE; JOURDAN, CHRISTOPHE; MAEGHT, JEAN-LUC: „*IJ\_Rhizo: an open-source software to measure scanned images of root samples*.“ Plant Soil. 373. (2013)
- [Sch11] SCHUBERT, SVEN: „*Pflanzenernährung, Grundwissen Bachelor, 2.*“ korrigierte Auflage, UTB. Stuttgart, 2011
- [Sol05] BÜRO SOLLMANN: Lamm, E.; Sollmann, A.: „*Machbarkeitsstudie Gewerbestandort 'Langes Feld' in Kassel – Niederzwehren*“. Fachbeitrag. 01/2005.
- [Sta01] STARK, Jochen; WICHT, Bernd: „*Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff*“. Birkhäuser Verlag, Basel, 2001.
- [Stu04] STÜTZEL, Thomas; BOSSELER, Bert; BENNERSCHIEDT, Christoph; SCHMIEDENER, Heiko: „*Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle*.“ Abschlussbericht.

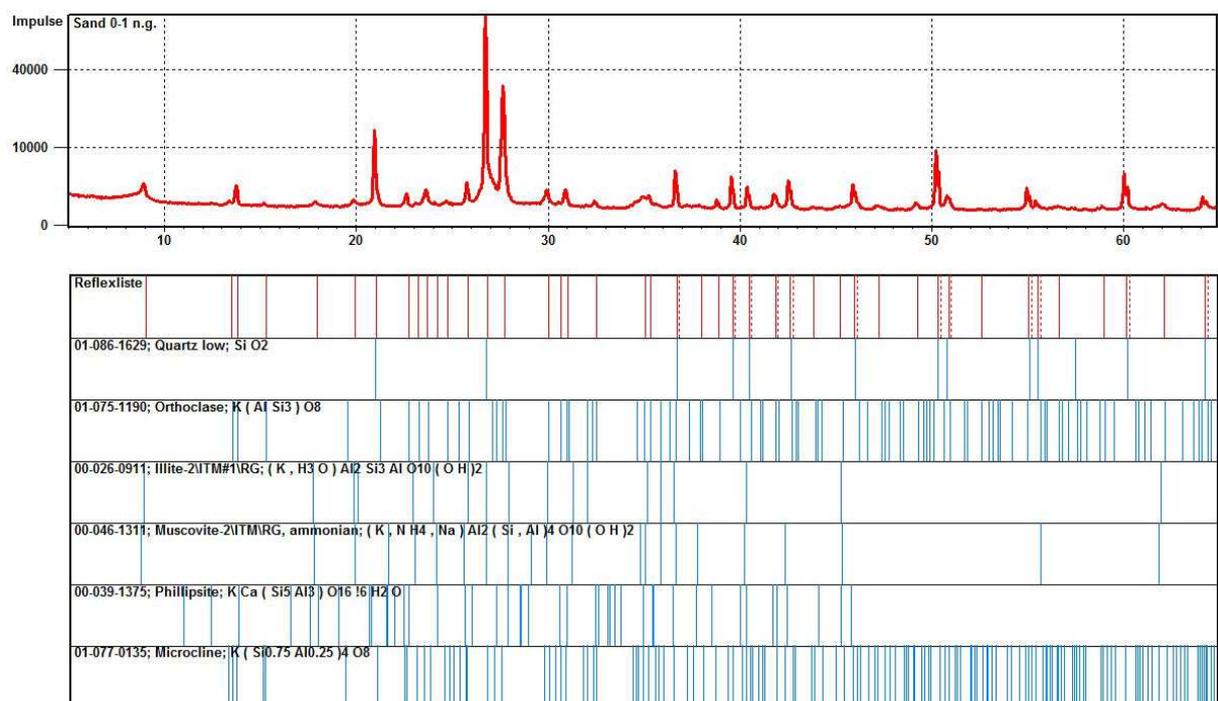
Auftraggeber: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW. Gelsenkirchen, 2004.

## Anhang

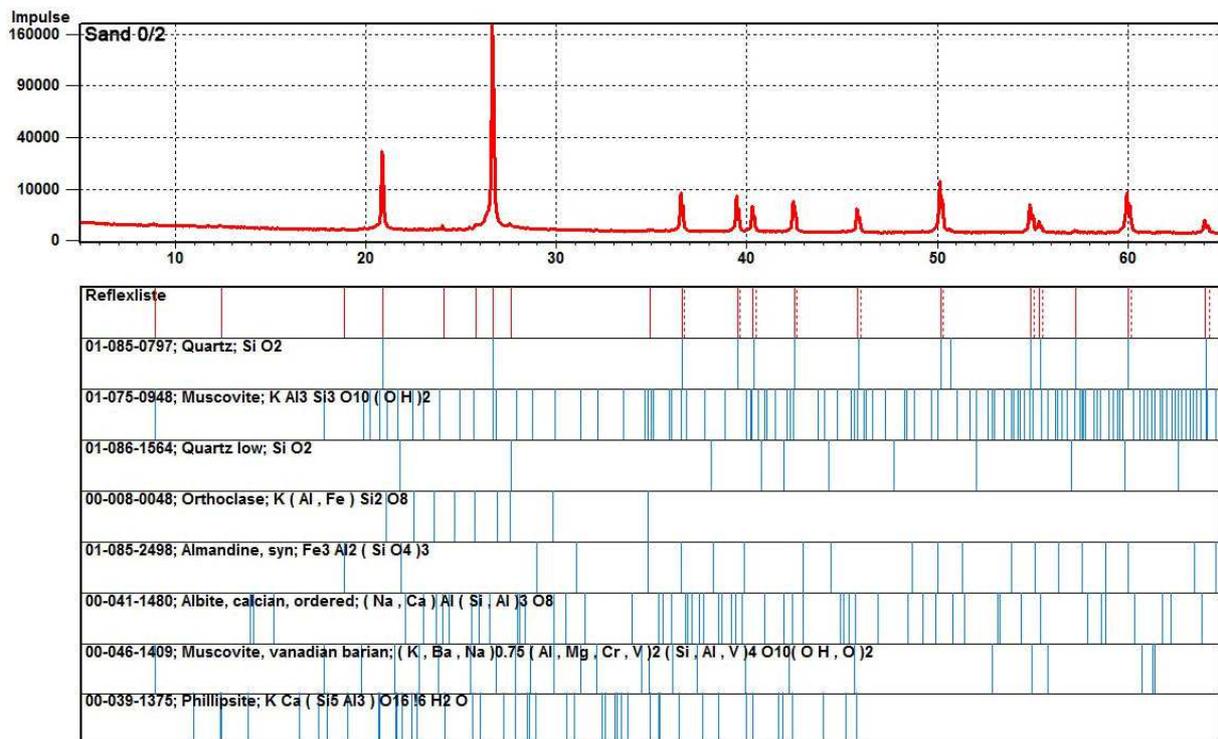
### Anhang A: Röntgenographische Phasenanalyse



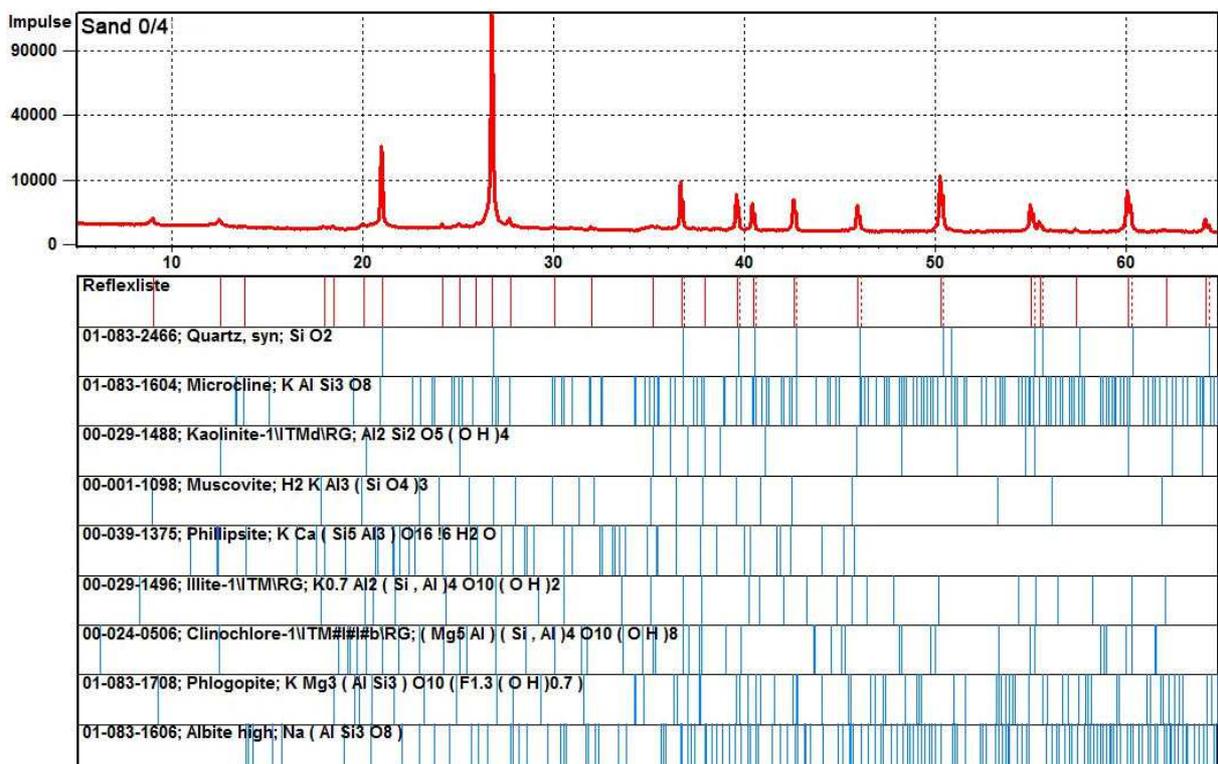
**Abbildung 49:** Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/1



**Abbildung 50:** Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/1 n.g.



**Abbildung 51:** Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/2



**Abbildung 52:** Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Sand 0/4

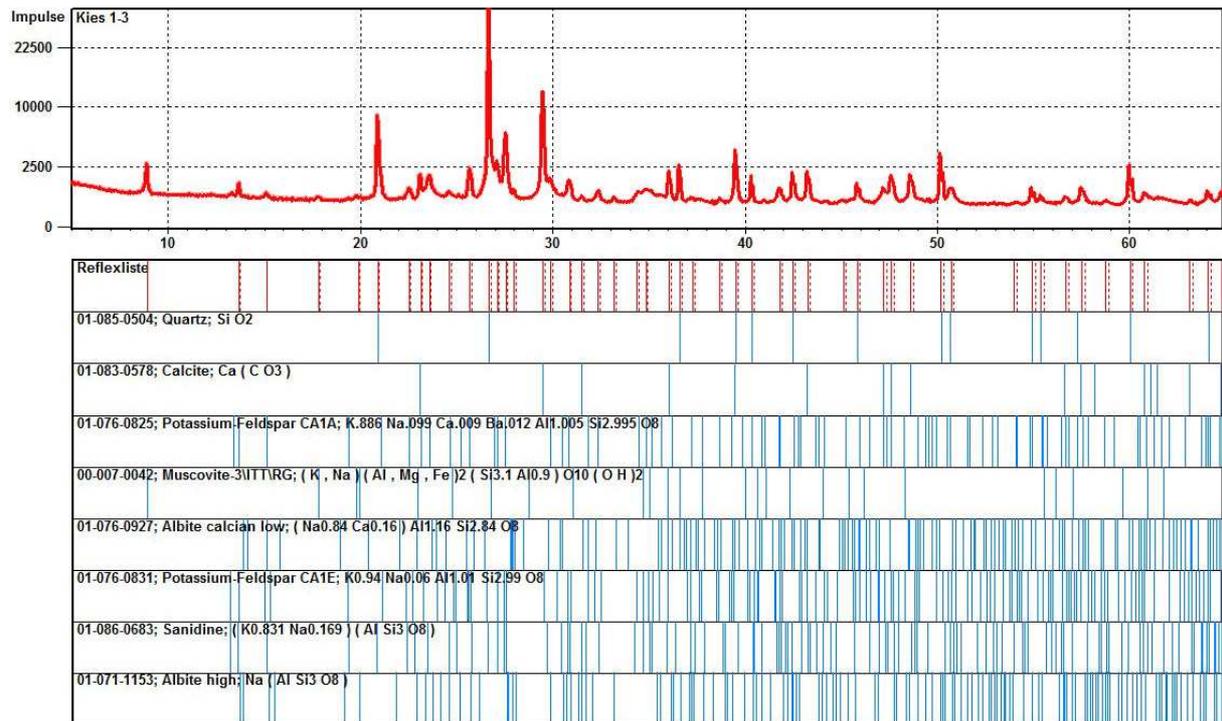


Abbildung 53: Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Kies 1/3

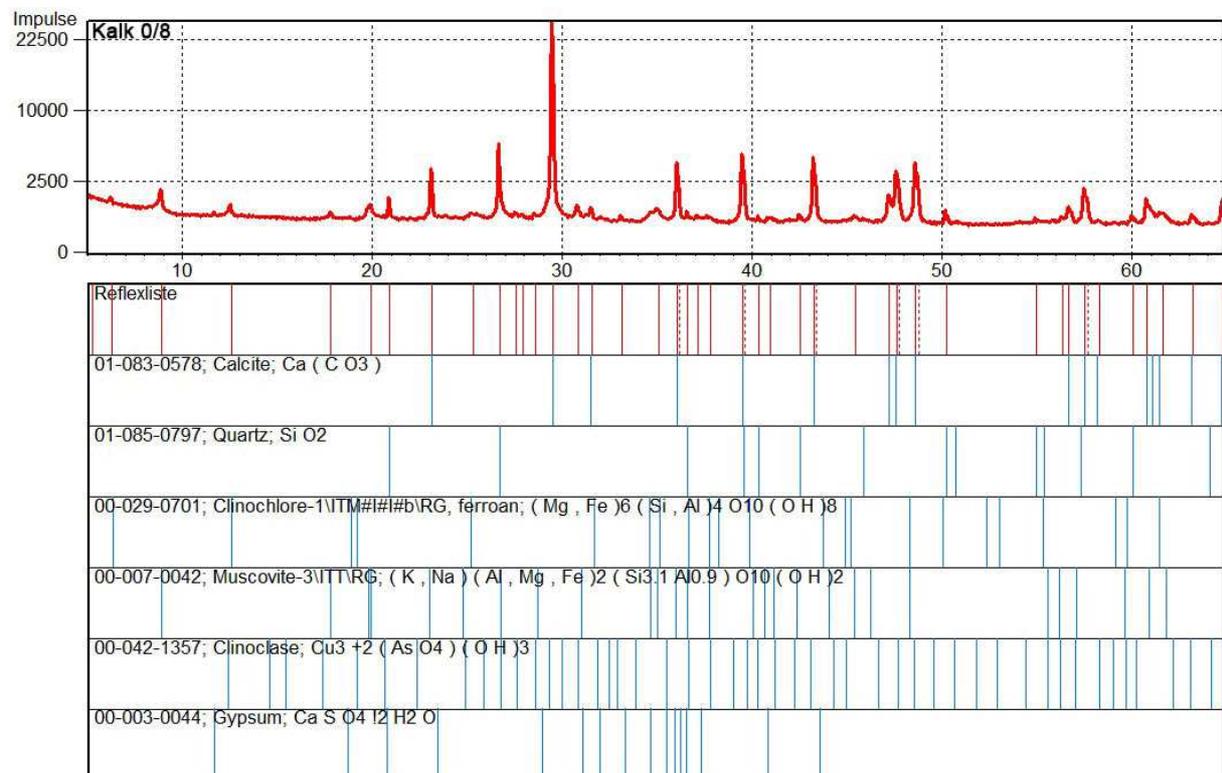
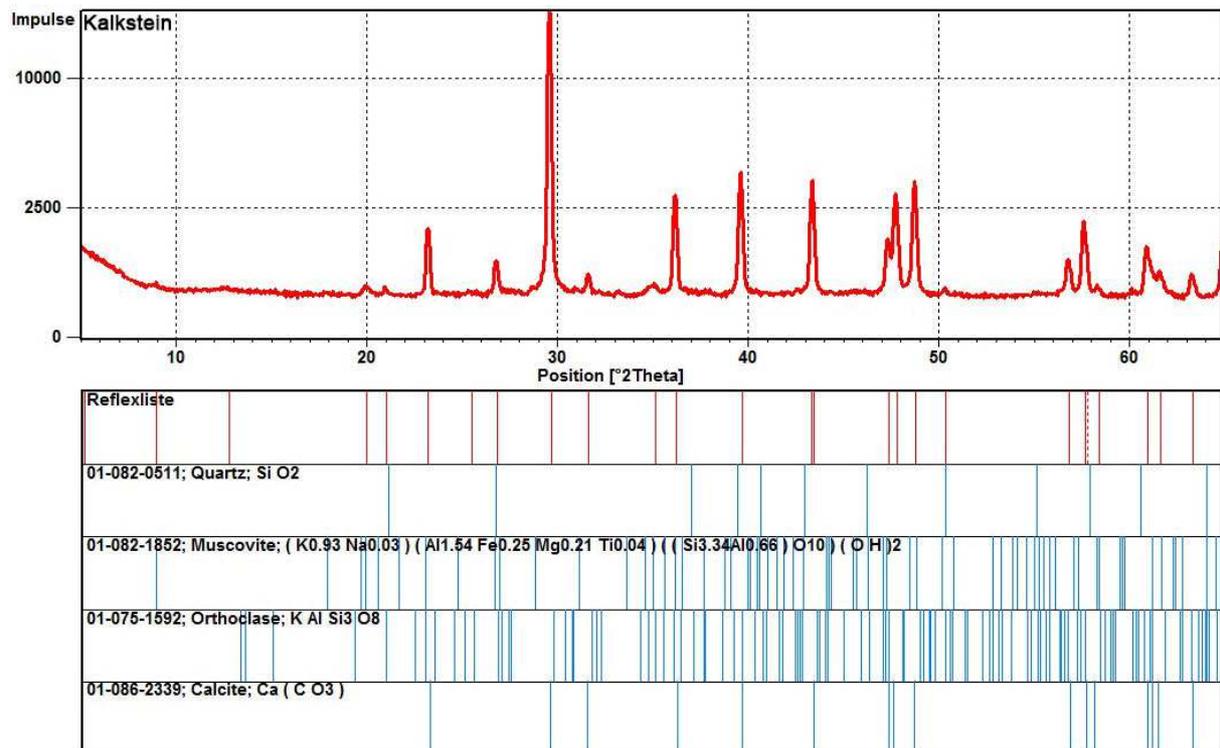
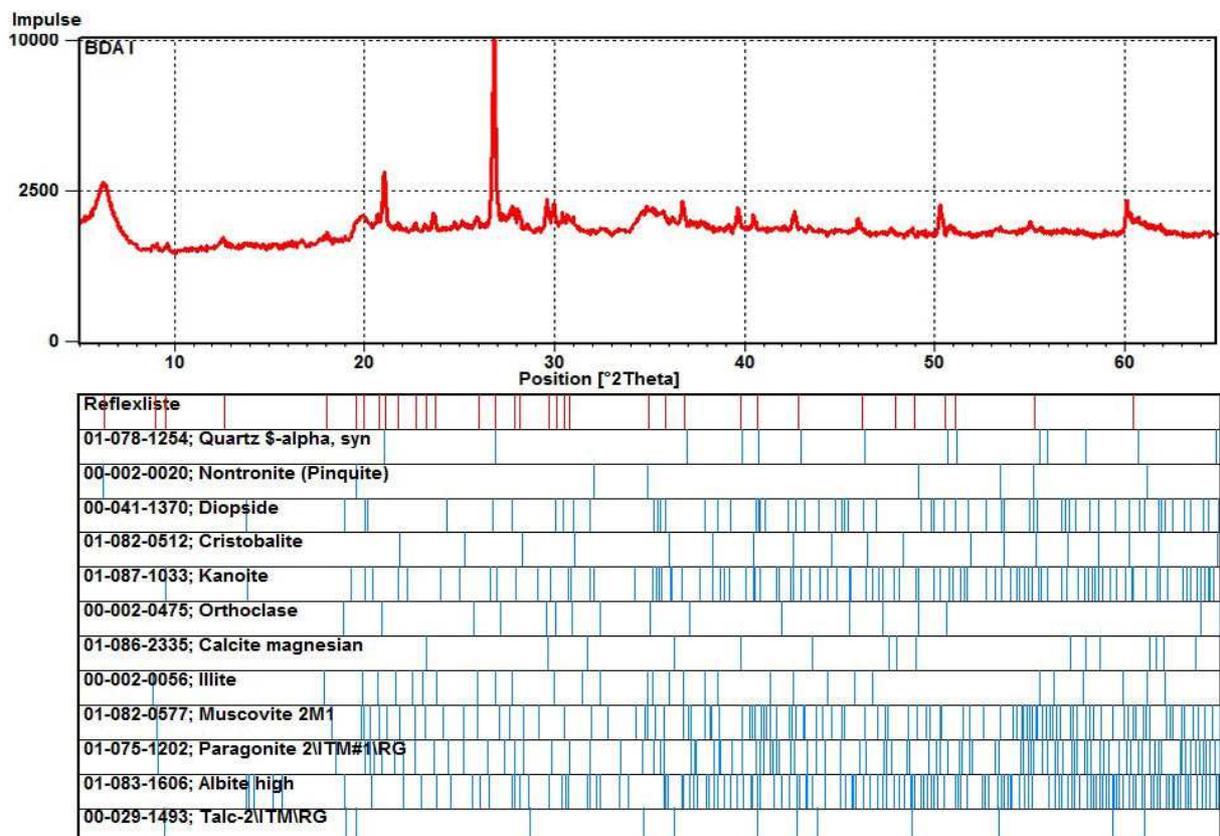


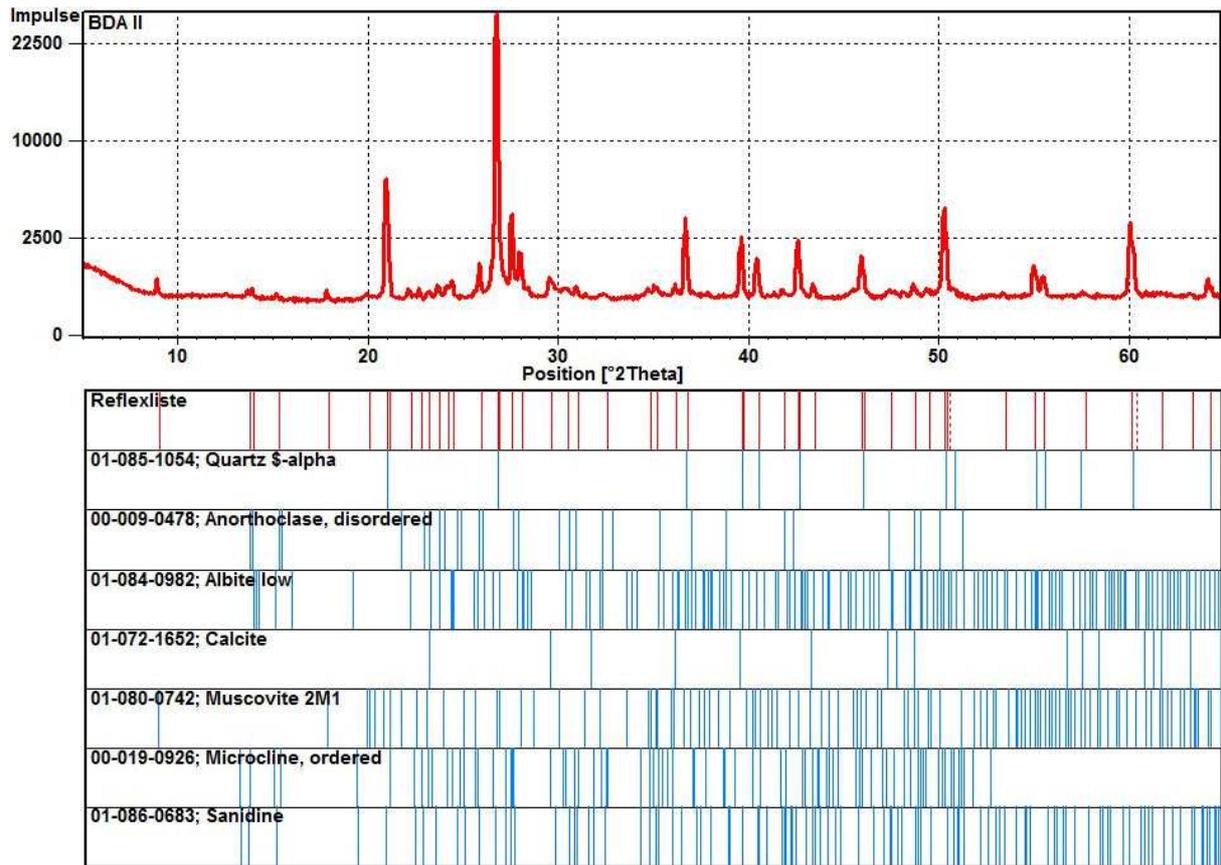
Abbildung 54: Röntgenographische Phasenanalyse der Gesteinskörnung Kalk 0/8



**Abbildung 55:** Röntgenographische Phasenanalyse des Kalksteins der Gesteinskörnung Kalk 0/8



**Abbildung 56:** Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes I (BDA I)



**Abbildung 57:** Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes II (BDA II)

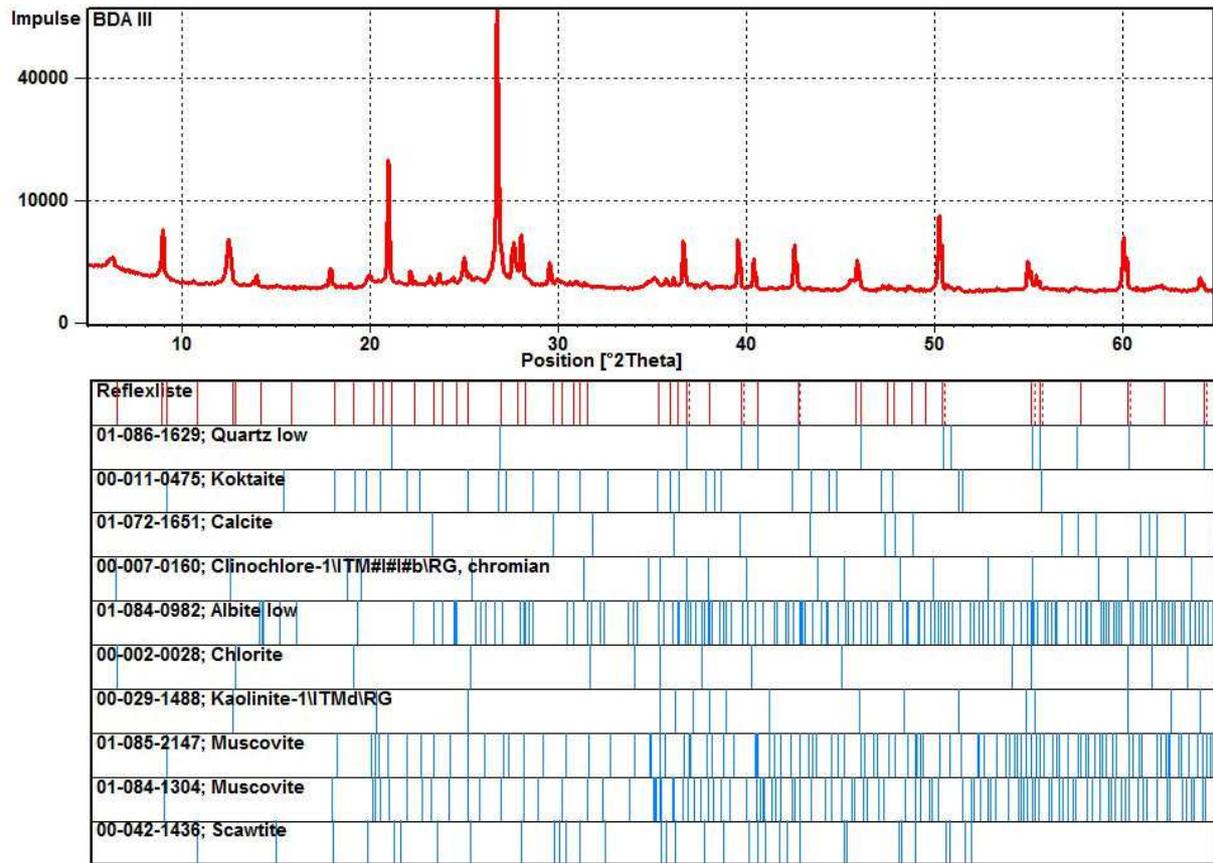


Abbildung 58: Röntgenographische Phasenanalyse des Bodenaushubes III (BDA III)

## Abweichungen vom Antrag

Obwohl laut Antrag nicht vorgesehen, wurden doch schon erste Vorversuche gestartet, um Erfahrungen mit Gefäßersuchen (**Abb. 59**) für die zweite Projektphase zu erhalten. Diese werden nachfolgend beschrieben. Außerdem wurden erste Messungen im Computertomographen durchgeführt, welche zur Aufklärung der 3D-Struktur verschiedener Flüssigböden genutzt werden sollten. Diese können nun nicht ausgewertet werden. Als weitere Abweichung von den im Antrag geplanten Untersuchungen muss genannt werden, dass die Gasdiffusionsmessungen nicht wie genannt durchgeführt werden konnten. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die benötigte Anlage in den ersten Projektmonaten wegen eines Defekts nicht einsatzbereit war. Nachdem die Flüssigboden-Proben zu Ende des Projekts auf das richtige Matrixpotential eingestellt wurden, gab es einen Wasserschaden im Physik-Labor des Fachgebiets Bodenkunde, sodass eine Messung erneut unmöglich gemacht wurde.

### Pflanzversuche (Vorversuche):

Erste Vorversuche mit Kaffeepflanzen (*Coffea arabica*, **Abb. 59**) als Vorbereitung für die zweite Projektphase im Gewächshaus des Fachgebietes Bodenkunde zeigten, dass die Pflanzenwurzeln weder nach knapp 16 Wochen, noch nach 32 Wochen Wachstum in der Lage waren, in den sie im Pflanzkübel umgebenden Flüssigboden (A-Mischung) einzudringen. Das deutlich sichtbare radiale Wachstum (**Abb. 60**) an der Wurzelspitze ist ein klarer Indikator für einen erhöhten Eindringwiderstand des Flüssigbodens [Ben06], wie es z. B. auch bei verdichteten Ackerböden beobachtet werden kann.

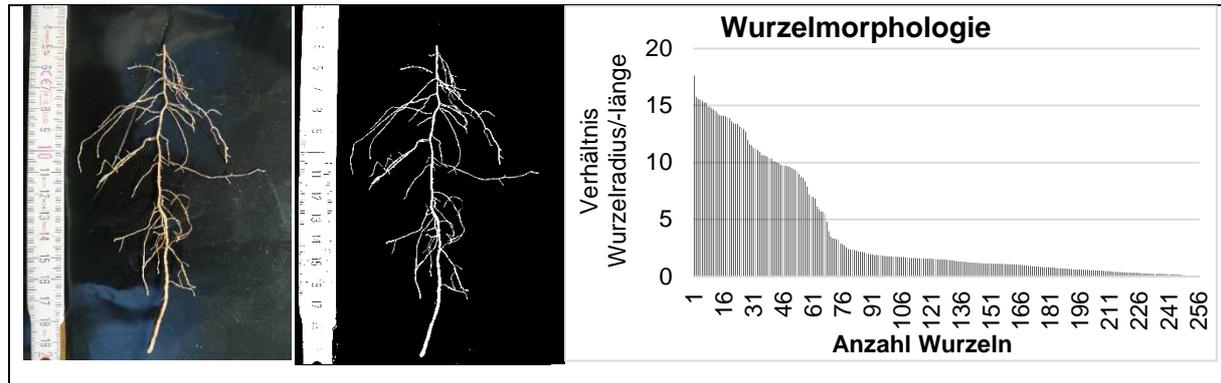


**Abbildung 59:** (links) Pflanzversuche (Vorversuche) an Kaffeepflanzen (Flüssigboden außen, Lösslehm innen) (rechts) Sichtbarer Blumentopf-Effekt nach dem Aufbrechen des Flüssigbodens nach 32 Wochen.

### Wurzelanalyse

Zur quantitativen Analyse der Wurzelmorphologie wurde nach dem Wurzelwaschen der Kaffeepflanzen ein digitales Foto aufgenommen, welches nach der Bildsegmentierung mittels der Software *IJ\_Rhizo* [Pie13] genutzt wurde, um morphologische Parameter wie Wurzellänge und -radius zu analysieren. Ein hohes Verhältnis von Wurzelradius zu -länge deutet sekundäres Dickenwachstum der Wurzel aufgrund eines hohen Eindringwiderstandes an. Diese vielversprechenden Ergebnisse bestätigen die

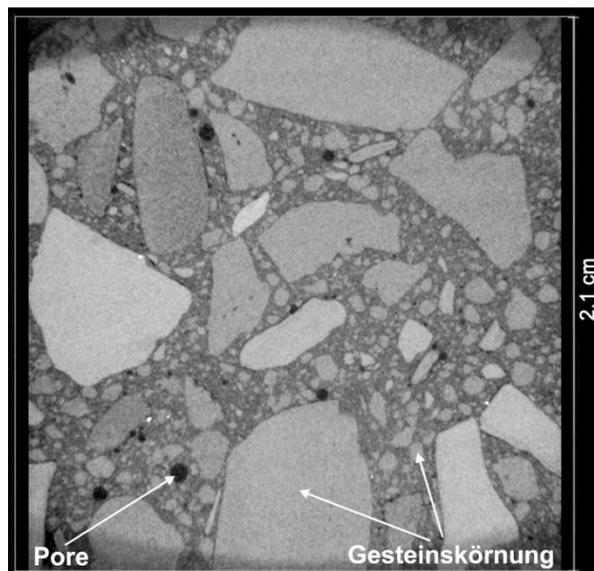
Sinnhaftigkeit großtechnischer Versuche mit Großbäumen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Unterirdische Infrastruktur, IKT.



**Abbildung 60:** Original (links) und segmentiertes Bild (mitte) einer Coffea arabica Wurzel aus den Vorversuchen zur bildanalytischen Auswertung der Wurzelmorphologie mittels IJ\_Rhizo und erste Ergebnisse der Wurzelgeometrie in Form des Verhältnisses von Wurzeldurchmesser zu Wurzelradius (rechts)

### μCT-Untersuchungen

Beispielhaft wurden an Flüssigböden erste μCT-Untersuchungen durchgeführt, um die Kornmatrix sowie die Porenstruktur aufzuzeigen. In **Abbildung 61** ist dazu der Flüssigboden GK16-F0,35 dargestellt.



**Abbildung 61:** μ CT-Abbildung des Flüssigbodengefüges GK16-F0,35

Die **Abb. 61** zeigt deutlich die homogene und relativ dichte Kornmatrix und die vereinzelten runden Luftporen (Groporen), die oft behindert durch die Körnung im Flüssigboden nicht aufsteigen und entweichen konnten. Die Fein- und Mittelporen sind in dieser Aufnahme nicht dargestellt. Um verlässliche und deutliche Darstellungen zu erhalten, muss die Probengröße von hier  $\varnothing \approx 10$  cm weiter reduziert werden. Dies gilt es im Folgenden durchzuführen, damit eine zuverlässige Darstellung der Porenstruktur (auch in 3D) vorliegt, anhand derer man Transportvorgänge besser ablesen und erklären kann.