



# Bachelorarbeit

Zu Erlangung des Grades eines  
Bachelor of Engineering (B. Eng)

Thema:

Einsatz von Braunkohlenflugasche als alternatives Bindemittel zur Herstellung einer Kerndichtung bei der Sanierung bestehender Hochwasserschutzanlagen – Entwicklung und Erprobung einer Labormethode zur Herstellung von Prüfkörpern unter praxisnahen Bedingungen

Erstellt von:

Qian Yifei

Geb.: 26.09.1993

-

König-Heinrich Straße 21a

06217 Merseburg

Studienrichtung:

Chemie- und Umwelttechnik

Unternehmen:

Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung

GmbH

Betrieblicher Betreuer:

Herr Dipl.- Ing. Bernd Müller

Betreuer Hochschule:

Herr Prof. Dr.- Ing D. Heinz

Herr M. Eng. F. Steininger

## **Selbständigkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Merseburg 24.10.2016

.....

Qian Yifei

## Danksagung

Zuerst möchte ich an diese Stelle allen danken, die diese Bachelorarbeit "Einsatz von Braunkohlenflugasche als alternatives Bindemittel zur Herstellung einer Kerndichtung bei der Sanierung bestehender Hochwasserschutzanlagen – Entwicklung und Erprobung einer Labormethode zur Herstellung von Prüfkörpern unter praxisnahen Bedingungen" durch Ihre fachliche und persönliche Unterstützung begleitet und zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Ich danke meinem Betreuer an der Hochschule Merseburg Herr Prof.Dr.-Ing.Dietmar Heinz und auch Herr M.Eng.Felix Steininger für die zahlreichen Konsultationen und die entgegengebrachte Unterstützung.

Vielen Dank auch an meinen Betreuer am MUEG -- Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH, Herr Dipl.-Ing Bernd Müller, für eine sehr gute Betreuung und seine wesentliche Hilfe bei der praktischen Durchführung dieser Arbeit.

Ich möchte mich auch bei Frau Jäschka, Herr Wilczek, Herr Schmitz, Herr Richter für die nützliche Anregungen und Vorschläge.

Vielen Dank auch an meine Kollegin Frau Hägebarth für die Hilfe bei der Erstellung meiner Arbeit.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre Unterstützung und ihre Verständnis während meines gesamten Studiums.

---

---

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1. Einleitung und Aufgabenstellung	9
2. Theoretische Grundlagen	11
2.1 Hochwasserschutz	11
2.2 Deiche	11
2.3 Anforderungen an Deichkörpersysteme	12
2.4 von der Rohbraunkohle zur Braunkohlenfilterasche	13
2.5 Verwertungsmöglichkeiten von BFA	14
2.6 Charakteristiken von Asche	15
2.6.1 chemische Zusammensetzung von BFA	15
2.6.2 mineralogische Zusammensetzung und besondere Eigenschaften der mitteldeutschen BFA	15
2.7 Ettringit	16
2.8 Reaktionsverhalten	16
2.9 Zement	17
2.10 Bifament	17
3. Der Versuchsdeich und die Bodenqualität	19
3.1 Das Deichbauwerk	19
3.2 Bodenqualität	19
3.2.1 Bodenart	19
3.2.1.1 Äquivalentdurchmesser	20
3.2.1.2 Korngrößenverteilung	20
3.2.1.3 Ermittlung der Korngrößenverteilung nach DIN18123	21
3.2.1.4 Nichtbindige Böden und bindige Böden	22
3.3 Bestimmung einiger wichtigen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Boden	23
3.3.1 Wassergehalt	23
3.3.2 Frostempfindlichkeit	24
3.3.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	24
3.3.4 Glühverlust nach DIN 18128	26
4. Untersuchungsmethode	27
4.1 Untersuchungen von Kerndichtungen an der Pilotanlagen Hochwasser- deich am Standort Beuna im Zuge des Rückbaues des Deichsystems	27
4.1.1 Doppelkernrohre	27
4.1.2 Beschreibung der Probenahme der Bohrkerne	28

---

4.1.3 Beschreibung der gewonnen Proben	30
4.1.4 Auswertung der Probenahme	31
4.1.5 Untersuchungen der Röntgendiffraktometrie(XRD) und Rasterelektrodenmikroskop(REM)	32
4.2 Untersuchungsmethode von Deichmaterialien	34
4.2.1 Siebanalyse nach DIN 66165	34
4.2.2 Proctordichteversuch nach DIN 18127	35
4.2.2.1 Proctordichte	36
4.2.2.2 Verdichtung	36
4.2.2.3 modifizierte Proctordichte	36
4.2.2.4 optimaler Wassergehalt	36
4.2.2.5 Verdichtungsgrad	37
4.2.2.6 Ergebnis	37
4.3 Untersuchung der repräsentativen Prüfkörper	
4.3.1 Schritte der Versuch zur Herstellung der repräsentativen PK	38
4.3.2 Versuchsdurchführung	38
4.3.3 Rezepturen von Herstellung der PK	39
4.3.4 Bestimmung der Durchlässigkeit in der Triaxialzelle bei Konstantem hydranlischen Gefälle nach DIN 13130-1	40
4.3.4.1 Untersuchungsmethode	40
4.3.4.2 Anordnung	41
4.3.4.3 Bestimmung der Durchlässigkeit	42
4.4 Ermittlung von Volumenvergrößerung--Messschieber	42
5.Auswertung	
5.1 Auswertung der 2 verschiedene Böden	44
5.2 Auswertung der Boden-Suspension-Gemisch	45
5.3 Auswertung der genommene PK	45
5.4 Auswertung der Wasserdurchlässigkeit	46
5.5 Auswertung der Mengeüberschuss und Volumenvergrößerung	47
6.Fazit	48
7.Fehlerbetrachtung	49
Literaturverzeichnis	50
Anhang	52

---

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 3-Zonen Deich	12
Abbildung 2: Funktionsschema Kraftwerk-Schkopau	13
Abbildung 3: Beispiel von Körnungslinien	21
Abbildung 4: Wasserdurchlässigkeit basierend auf der Kornverteilung	25
Abbildung 5: Doppelkernrohr	28
Abbildung 6: Trockensiebmaschine	34
Abbildung 7: Proctordichtelinien	36
Abbildung 8: Versuch in der Triaxialzelle mit statische Belastung	41
Abbildung 9: glänzende PK	41
Abbildung 10: Boden-Suspension-Gemisch	45
Abbildung 11: genommene PK	45
Abbildung 12: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von PK	46

---

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Material der Kerndichtungen und ihre Mischungsverhältnisse	19
Tabelle 2: Größenordnungen von Wassergehalt im Boden	23
Tabelle 3: Frostepfindlichkeit von Böden	24
Tabelle 4: Grundwasserfließgeschwindigkeiten in grundwasserleitenden und -stauenden Schichten	25
Tabelle 5: Durchlässigkeit von Lockergestein nach DIN 18130	25
Tabelle 6: Klassifizierung von Böden mit organischen Anteilen nach DIN EN ISO 14688-2	36
Tabelle 7: Beschreibung der Probenahme der Bohrkerne in HF2, HF3, HF4	37
Tabelle 8: Schritte der Versuch zur Herstellung der repräsentativen PK	39
Tabelle 9: Rezepturen von Herstellung der PK	40

## Abkürzungsverzeichnis

BFA	Braunkohlenfilteraschen
bzw.	beziehungsweise
di	Innendurchmesser
da	Außendurchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
HF	Hydrologisches Fenster
IFN	Forschungs- und Technologiezentrum GmbH
k <sub>f</sub> - Wert	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
LAGA	Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAU	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
MIBRAG	Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH
MPA	Labor für Materialprüfung und Analyse GmbH
Ma %	Massenprozent
MUEG	Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH
PK	Prüfkörper
U&W	Umwelttechnik und Wasserbau GmbH

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH entwickelte neue Verfahren, die es ermöglichen mit Kraftwerksreststoffen neue Baustoff und Sanierungsprodukte für den Bergbau herzustellen. Mittels neu entwickelter Verfahren ist es der MUEG gelungen, die Kraftwerksreststoffe kostengünstig und umweltverträglich zu verwerten. Durch Anwendung verschiedener Verfahren ist die behandelte Filterasche als Basis- und Flankenabdichtung in der Bergbausanierung einsetzbar. Wird die Filterasche entsprechend des MUEG-Verfahrens aufbereitet und eingebracht, erreicht das Sanierungsmaterial eine Druckfestigkeit von  $10\text{N/mm}^2$  und eine Durchlässigkeit von  $10^{-9}$  m/sec. Das Material besitzt betonähnliche Eigenschaften, welche auch einen Einsatz im Straßen- und Wegebau gestatten.[1]

Die primären Projektpartner sind die Hochschule Merseburg und die MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH, in dessen langjähriger Kooperation die zugrunde liegenden wissenschaftlichen Arbeiten angefertigt wurden [Tischvorlage zur Projektberatung am 26,04,2016 ]. In dieser Projekt soll ein alternatives Dichtungssystem für den Deichbau und hauptsächlich für die Deichsanierung an Fließgewässern entwickelt und getestet werden. In dem alternativen Dichtungssystem soll bei der Braunkohleverbrennung anfallende Filterasche (BFA) als alternatives Bindemittel anstelle von Zement eingesetzt werden. Der Einsatz von BFA als Bindemittel ist aufgrund der hydraulischen Eigenschaften der BFA geeignet, da die Asche in Verbindung mit Wasser aushärtet. Um die Eigenschaften eines solchen Dichtungssystems in der Praxis zu testen, wurde auf dem Betriebsgelände der MUEG am Standort Beuna ein Versuchsdeich errichtet. Die fachliche und behördliche Begleitung des Projekts erfolgte über den Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, sowie dem Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt.

Bei der Durchführung von vier Einstauversuchen, die verschiedene Hochwassersituationen simulieren sollten, wurden die Dichtungssysteme unter Lastbedingungen auf Ihre Tauglichkeit geprüft. Über die ganze Dauer der

Einstauversuche wurden Messdaten von Messeinrichtungen und Sonden aufgenommen, die anschließend ausgewertet wurden.

Nun müssen die Untersuchung von Kerndichtungen an der Pilotanlage Hochwasserdeich am Standort Beuna im Zuge des Rückbaues des Deichsystems durchgeführt werden, um zu überprüfen wie sich die verschiedenen Dichtungssysteme durch Lastbedingungen hinsichtlich Ihrer mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften möglicherweise positiv oder negativ verändert haben. Dazu sollen die Freilegung der Dichtungsabschnitte und Untersuchung der Qualität der Dichtung auf Homogenität, Festigkeit, Durchlässigkeit sowie Beständigkeit durchgeführt werden.

Bei der Sanierung bestehender Hochwasserschutzanlagen hängt die anzuwendende Rezeptur von der Beschaffenheit des vorgefundenen Deichmaterials ab. Es ist zu untersuchen, in welchem Maße die Bindemittelrezeptur an die Schwankungen der Bodenqualität angepasst werden muss. Die Aufgabe von meiner Kommilitonin Saskia Hägebarth ist die Ermittlung von Abhängigkeiten zwischen der Qualität einer Kerndichtung und dem Wasser/Bindemittel-Verhältnis unter Verwendung von BFA, Bifament und Gemischen aus BFA/Bifament.

Die Herstellung von Prüfkörpern aus natürlichen Deichmaterial von Bad Dürrenberg mit der Rezepturentwicklung von Frau Hägebarth ist derzeit eine wichtige Aufgabe. Folgende Schwerpunkte sind sehr wichtig in dieser Arbeit durchzuführen:

- Beschreibung der verwendeten Untersuchungsmethode
- Herstellung von Prüfkörpern (verschiedene Bodenarten, Braunkohlenflugasche und Bindemittelgemisch) sowie Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit
- Ermittlung der Dichte der Mischung aus Boden und Bindemittelgemisch sowie Berechnung des Mengenüberschusses
- Ermittlung des Quellverhaltes des eingebauten Gemisches aus Boden und Bindemittelgemisch (Analyse der Volumenvergrößerung)
- Klassifizierung geeigneter Bodenarten für die Errichtung von Deichbauwerken

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Hochwasserschutz

In unregelmäßigen Zeitabständen führen außergewöhnliche Witterungsereignisse zu Hochwasser. Diese gehören- wie die Jahres- zeiten- zu den ständig wiederkehrenden Naturereignissen; Hochwasser sind ein Bestandteil des Naturhaushaltes. Viele Arten und Lebensgemeinschaften haben sich nicht nur an das Hochwassergeschehen angepasst, sondern brauchen die regelmäßige Überflutung zur Erhaltung ihrer Lebensräume. Der Mensch hingegen kann sich mit seinem Lebensumfeld nicht immer an die Dynamik eines Hochwassers anpassen. Das Wissen über das Hochwasser zusammen mit der richtigen Vorsorge kann helfen, die Schäden, die ihm durch Hochwasser entstehen können, gering zu halten. [2]Eine Maßnahme ist es Hochwasserschutzanlagen zu errichten wie bspw. Schöpfwerke, Polder, Freischleusen, Wehre oder eines der ältesten Bauwerke zum Schutz vor Hochwasser, die Errichtung von Deichen.[2]

### 2.2 Deiche

Deiche sind aus Bodenmaterial(Erdbaustoff) bestehende, zeitweilig eingestaubte Dämme an Fließgewässern. Bei längerem, anhaltendem Hochwasser, wie es Z.B an größeren Flüssen im Flachland vorkommen kann, sind die hydraulischen wie bei einem Dauerstau zu berücksichtigen.

Das nachfolgende Kapitel konzentriert sich auf die allgemein gültigen Grundlagen für den Bau von Hochwasserschutzdeichen an Fließgewässern und erläutert die Möglichkeiten von Dichtungssysteme im Deichbau. Dabei werden die grundlegenden Richtlinien der DIN 19712: 2013-01(Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern) sowie die Empfehlungen der DWA-M-507-1(Deiche am Fließgewässern) und DWA-M-512-1(Dichtungssysteme im Wasserbau) mit einbezogen und berücksichtigt. Der BHW(Bemessungshochwasserstandes) gibt den höchsten Wasserstand an der sich aus dem Bemessungshochwasserabfluss an der betreffenden Stelle ergibt. Zu empfehlen ist auch die Berechnung des

notwendigen Freiboards (Abstand zwischen Wasserstand und Deichkrone) wodurch auf weitere Abmaße des zukünftigen Deichs geschlossen werden kann.

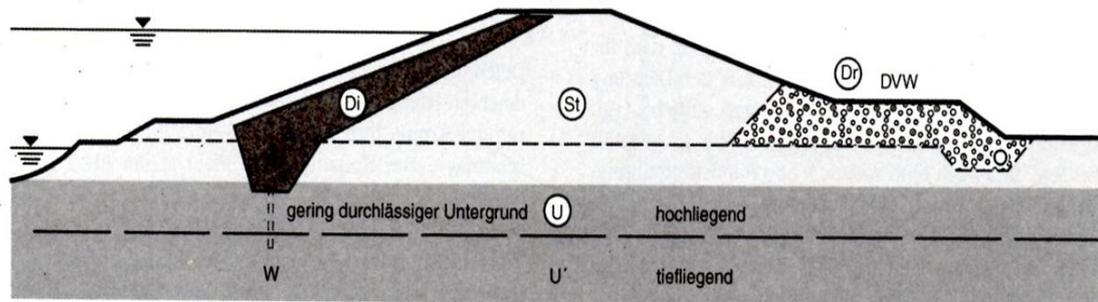


Abbildung 1: 3-Zonen-Deich

## 2.3 Anforderungen an Deichkörpersysteme

Deichkörpersysteme benötigen ausreichende Dichtheit durch geringe Durchlässigkeit. Die Wirksamkeit einer konvektiv durchströmten Dichtung im gesättigten Zustand kann an der Zeiteinheit durchtretenden Wassermenge bei einem gegebenen hydraulischen Gefälle beurteilt werden. Diese wird bei ansonsten gleichen Randbedingungen durch den Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtungsmaterials und die Schichtdicke der Dichtung bestimmt. Beständigkeit (Langzeitwirksamkeit) ist eine wichtige Anforderung an Deichkörpersysteme. Dichtungen dürfen während der geplanten Gebrauchsdauer ihre Eigenschaften nicht in einer für ihre Funktionsfähigkeit negativen Weise verändern (Alterungsbeständigkeit). Teile der Dichtung, die Frost-Tau-Wechseln, Trocken-Nass-Zyklen und anderen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, müssen einen ausreichenden Widerstand dagegen besitzen oder entsprechend geschützt sein (Witterungsbeständigkeit). Dichtungen dürfen durch biologische Einflüsse (u.a. Wurzeln, Tiere) nicht geschädigt werden. Bei Bedarf im konkreten Anwendungsfall muss auch eine Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen gegeben sein. Erosionssicherheit, Festigkeit, Systemsicherheit usw. sind auch einige Anforderungen an Deichkörpersysteme. [3]

## 2.4 Von der Rohbraunkohle zur Braunkohlenfilteraschen

Bei der Stromerzeugung mit Hilfe der Braunkohle in Kraftwerken entstehen neben elektrischer Energie, Wärme und CO<sub>2</sub> auch andere Nebenprodukte: Gips und Prozesswasser aus der Rauchgasentschwefelung(REA), Nassaschen und Filteraschen(BFA).

Im Kohlenkraftwerk Schkopau werden täglich bis zu 20.000 Tonnen Braunkohle zur Energiegewinnung verfeuert. Die bei der Verbrennung der Kohle hauptsächlich anfallenden verwertbaren Reststoffe sind Grobmasche, Filterasche und Gips. Grobe, feste und unbrennbare verwertbare Verbrennungsrückstände werden als Grobmasche bezeichnet. Die Filterasche(auch BFA) wird von den Elektrofiltern zu fast 100% aufgefangen. Dabei handelt es sich um kleine leichte Partikel, die in verschiedenen Korngrößen anfallen und als Mischasche gelagert werden. Hauptsächlich finden diese Mischaschen Einsatz bei der Rekultivierung von Tagebaugebieten und in der Bauindustrie. Der allfallende Gips wird gewaschen, getrocknet und der Bauindustrie zur Verfügung gestellt.

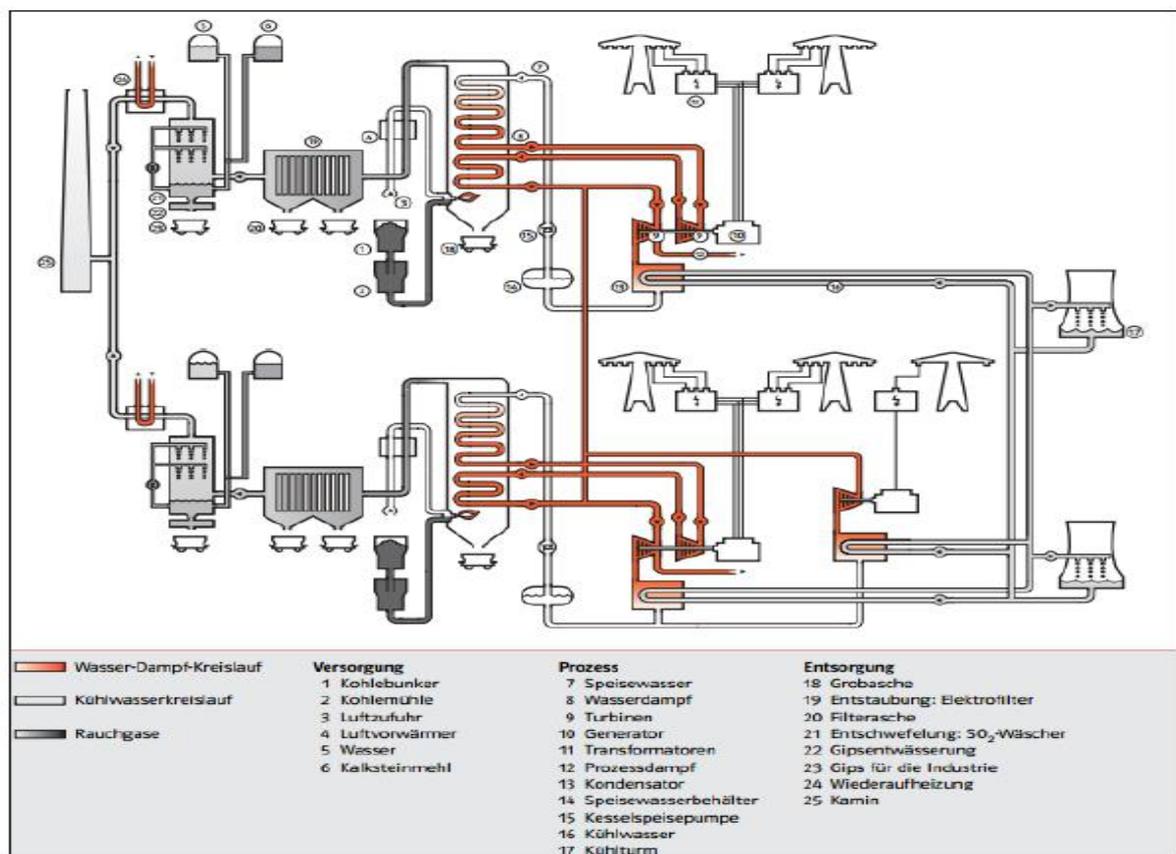


Abbildung 2: Funktionsschema Kraftwerk-Schkopau

## 2.5 Verwertungsmöglichkeiten von BFA

Bereits in den 50er Jahren begann die Verwendung der BFA als Bestandteil eines Mörtelbinders (Fortunit), zusammen mit Trass und latent hydraulischer Hochofenschlacke [Lenz 1989]. Wegen schwankender Aschezusammensetzungen wurde diese Verwertung jedoch wieder eingestellt. Außerdem wurden dort Versuche zur Gewinnung von Aluminiumoxid mittels alkalisch - hydrothermalem Aufschluß durchgeführt [Keil 1983].

BFA wird im Deponiebau für alternative Oberflächenabdichtungen genutzt um die eindringende Sickerwassermenge zu verringern oder als Basisabdichtung zur Kapselung von Schadstoffen. Auch im Wegebau und der Untergrundverbesserung für Autobahntrassen und Bahndämmen findet die BFA ihr Einsatzmöglichkeiten. Im Bereich der Bindemittel sind eine Vielzahl von Anwendungen denkbar, bei denen BFA -haltige Produkte auf Grund der besonderen bindemitteltechnischen Eigenschaften der BFA herkömmlichen Zementbindern überlegen sind:

- Quellverhalten von BFA-Bindern
- Hohe Wasserundurchlässigkeit auf Grund hoher Lagerungsdichte infolge vorwiegend runder Partikel
- Verbesserung der Sulfatbeständigkeit durch Selbstheilungseffekt auf Grund der Nachhydratation bei erneutem Wasser- oder Sulfatzutritt

Die Mitteldeutsche Braunkohlen GmbH (MIBRAG) dient dem E.ON Kraftwerk in Schkopau als Kohlelieferant und vermittelt die MUEG für die Entsorgung der anfallenden Reststoffe. Die MUEG ist eine Tochterfirma, welche zu gleichen Anteilen der MIBRAG und Remondis SE & Co. KG unterstellt ist.

Die durch die MUEG zu entsorgende BFA wird zu 60% für die Verfüllung des Tagebaurestlochs in Lochau verwendet. Hierbei sind wie schon erwähnt, die besonders betonähnlichen Eigenschaften genauso wie die hohe Festigkeit von großem Nutzen. Die bei der Hydratation zustande kommende große Volumenvergrößerung wirkt der langzeitigen Verfestigung entgegen. Folglich wird die mitteldeutsche BFA Vorbehandelt durch eine chemische Umwandlung (Freikalk reagiert zu Kalkhydrat).

## 2.6 Charakteristiken von Asche

### 2.6.1 Chemische Zusammensetzung von BFA

Die Haupt- und Nebenbestandteile der BFA werden im wesentlichen von der chemische Zusammensetzung definiert. Aus chemische Sicht besteht die BFA sowohl aus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}_3$  als auch aus  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  und  $\text{SO}_3$ .

*CaO (15-56 Ma-%), SiO<sub>2</sub> (12-60 Ma-%), MgO (1-5 Ma-%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-10 Ma-%), AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2-25 Ma-%), Na<sub>2</sub>O (0,1-0,2 Ma-%), SO<sub>3</sub> (5-17Ma-%)*

Diese Bestandteile machen im Normalfall 97% bis 99% der BFA aus. Durch das Auftreten starker Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung (Elementkonzentrationen), kann die BFA ebenfalls in  $\text{SiO}_2$ -reiche,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -betonte, eisen-, kalk-, und Sulfatreiche Aschen unterteilt werden. Diese Unterschiede entstehen durch unterschiedliche Gehalt an anorganischen Bestandteilen in der BFA, sowie durch die Reinheit der verwendeten Kohle bezüglich ihrer mitgeführten Fremdstoffe.[4]

### 2.6.2 Mineralogische Zusammensetzung und besondere Eigenschaften der mitteldeutschen BFA

Braunkohlenfilterasche kann in verschiedene Partikelarten unterteilen. Sie ist ein sehr feinkörniges, lockeres und heterogenes Produkt. Eisenoxide(kugelige opak), Restkohle und Koks(unregelmäßige opak), Quarz, unregelmäßige Glaskörner, sowie homogene und inhomogene Glaskugeln gehören zur diesen Partikelarten. Inhomogene Glaskugeln bestehen aus Kohlenmineralrelikten oder durch bei der Verbrennung entstandenen Neubildungen.

Aus mineralogische Sicht besteht die BFA sowohl aus Kristallinen als auch aus amorphen Festkörpern. Die unterschiedlichen Mineralphasen der BFA lassen sich in Haupt- und Nebenphasen unterteilen. Zu den Hauptphasen lassen sich Freikalk, Anhydrit, Quarz und die Glasphasen einordnen.

Yeelimit, Gehlinit und Periklas werden in den Nebenphasen gefunden. Als amorphe Bestandteile werden erstarrte Schmelzphasen bestehend aus  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}_3$  und  $\text{MgO}$  bezeichnet.

Das potentielle Erhärungsvermögen bei Kontakt mit Wasser ist ein sehr wichtiger Charakter für BFA. Auf Grundlage dieses Erhärungspotentials lassen sich die Komponenten der Asche, ähnlich einem Zuschlags- Bindemittelsystem(Beton), in hydraulische bzw. latent hydraulisch reaktive und inerte Bestandteile unterscheiden. Die Stoffe die bei Kontakt mit Wasser hydratisieren werden als hydraulisch reaktiv bezeichnet und bestimmen somit das verarbeitungstechnische Verhalten der Asche. Latent hydraulische Materialien benötigen zur Hydratation hingegen einen alkalischen oder sulfatischen Anreger(Z.B  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$ , Anhydrit, Gips). Inerte Stoffe verbleiben im Grundzustand und nehmen nicht bzw. nur im geringen Maße an der Reaktion teil(Z.B Quarz).[5]

## 2.7 Ettringit

Ettringit ist ein selten vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der wasserhaltigen Sulfate mit fremden Anionen. Es kristallisiert im trigonalen Kristallsystem mit der chemischen Zusammensetzung  **$\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3] \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$**  und entwickelt meist gut ausgeprägte, prismatische oder nadelige, pseudohexagonale Kristalle, die von gelblicher bis fast ins grünliche spielender Farbe, aber auch sehr weiß sein können.

## 2.8 Reaktionsverhalten

Bei der Herstellung der Aschesuspension für die Herstellung von Kerndichtungen im Deichbau erfolgt eine Zugabe von Wasser. Bei dieser Zugabe ist eine Hydratation sowie eine Hydrolyse von Freikalk und Anhydrit die Folge. Es laufen komplexe Reaktionen ab bei den sich Edukte aus neuen Mineralphasen bilden. Ein Produkt ist die Phasenneubildung des Ettringits. Diese Neubildung ist hauptsächlich dafür verantwortlich dem Gefüge eine gewisse Stabilität zu geben. Dabei laufen die Reaktionen unter einer großen Volumenzunahme und Energieabgabe in Form von Wärme ab.

## 2.9 Zement

Zement ist ein wesentlicher Bestandteil von Beton. Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von Zement sind Kalkstein, Ton und Mergel. Zement ist ein anorganischer und nichtmetallischer Baustoff. Aufgrund seiner Eigenschaften wird er in Zementwerken als Baustoff hergestellt und zum Anfertigen von Bauteilen und Bauwerken verwendet. Innerhalb der Baustoffe zählt Zement zu den Bindemitteln. Er erhärtet durch die chemische Reaktion mit Wasser und bleibt danach fest. Zur Herstellung von Baustoffen wie Beton und Mörtel werden dem Zement sogenanntes Zugabewasser und andere Stoffe als Zuschlagstoffe beigemischt. Aufgrund der hohen Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton ist Zement weltweit eines der wichtigsten Bindemittel.[6]

## 2.10 Bifament

Durch die Bifa GmbH wird am Standort Halle /Lochau auf Grundlage der BFA des Kraftwerkes Schkopau in einem mehrstufigen Verfahren das Produkt Bifament hergestellt. Hierfür sind aufeinander abgestimmte Misch- und Homogenisierungsprozesse sowie die Reduzierung des Freikalkgehaltes in einer speziellen Behandlungsanlage notwendig. Abschließend wird das Produkt allein oder gemeinsam mit anderen Stoffen in einem vollautomatischen Mahlprozess mechanisch aufbereitet. An verschiedenen Prozessschnittstellen ist die Zugabe weiterer, pulverförmiger oder auch stückiger Stoffe möglich um so ein den gewünschten Produkteigenschaften entsprechendes Bindemittel herzustellen. Bifament besitzt in seiner Oxidzusammensetzung Ähnlichkeiten mit einem Calcium-Sulfo - Aluminazement(CSA- Zement). Aus der Zusammensetzung dieser Asche ergeben sich daher viele Möglichkeiten für die Entwicklung anwendungsgerechter und umweltorientierter Bindemittel.[7]

Braunkohlenflugasche besitzt nicht nur hervorragende puzzolanische oder latent-hydraulische Eigenschaften, sondern auch ein enormes Potential zur Verbesserung

---

der betriebseigenen Energie- und Kohlenstoffdioxid- Bilanz, denn es ist bedingt durch den Herstellungsprozess frei von Kohlenstoffdioxid- Fracht.

## 3. Der Versuchsdeich und die Bodenqualität

### 3.1 Das Deichbauwerk

Der Versuchsdeich befindet sich auf dem Gelände des Tagebaurestlochs der Firma MUEG GmbH am Standort Beuna.

In der Mitte der vier Deichseiten befindet sich ein flutbares Becken mit einem maximalen Fassungsvermögen von 200 m<sup>3</sup>. In drei der vier Deichseiten befinden sich Kerndichtungen, die nach dem Bodenvermörtelungsverfahren eingebohrt wurden (HF2- HF4). Um einen Vergleich zu gängigen Dichtungssystem im Deichbau herstellen zu können, wurde HF1 besteht nur aus dem grundlegenden Deichmaterial Sand/ Kies verbaut und keine Kerndichtung beinhaltet und somit als Referenzseite dient, wurde im HF4 ein Gemisch aus Wasser und Zement im Verhältnis 1,5:1 verbaut.

**Tabelle 1: Material der Kerndichtungen und ihre Mischungsverhältnisse**

	Material	Mischungsverhältnis
Fenster 1	Kies / Sand	-----
Fenster 2	Kies / Sand	H <sub>2</sub> O / Asche 1 : 1
Fenster 3	Kies / Sand / Betonrecyklat	H <sub>2</sub> O / Asche 1,3 :1
Fenster 4	Kies / Sand / Ziegelrecyklat	H <sub>2</sub> O / Zement 1,5 :1

### 3.2 Bodenqualität

#### 3.2.1 Bodenart

Die Bodenart beschreibt die Zusammensetzung des Bodens bezüglich der Hauptbodenarten, die ihrerseits auf der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bodensubstanz beruhen. Ohne weitere Angaben bezieht sich die Bodenartenangaben auf die Feinbodenart mit einem Äquivalentdurchmesser der Körner von kleiner zwei Millimeter. Der Grobboden oftmals als Bodenkelett bezeichnet, das heißt alle Mineral- oder Gesteinsbruchstücke mit einem Durchmesser über zwei Millimeter, werden nicht berücksichtigt, deren Anteil wird nur als Zusatzinformation angegeben. Beträgt der Anteil des Bodenskeletts mehr

als 75% des Gesamtbodens, so wird die Kornfraktion des Bodenskeletts anstelle der Bodenart angegeben. Solche Böden werden daher auch als Skelettböden bezeichnet. Hierbei unterscheidet man von 2 bis 63mm zwischen Kies und Grus und von 63 bis 200mm, also innerhalb der Steine, zwischen Geröll und Schutt, je nachdem, ob es sich um abgerundete oder kantige Körner handelt.

#### Unterscheidung in Hauptbodenarten

*Sand (Abk.: S), mit einem Durchmesser von 0,063mm bis 2mm*

*Schluff (Abk.: U), mit einem Durchmesser von 0,002mm bis 0,063mm*

*Ton (Abk.: T), mit einem Durchmesser kleiner 2  $\mu$ m*

*Lehm (Abk.: L), als ein Gemisch von Sand, Schluff und Ton mit etwa gleichen Anteils*

#### **3.2.1.1 Äquivalentdurchmesser**

Die Äquivalentdurchmesser ist ein Maß für die Größe eines unregelmäßig geformten Partikels wie beispielweise eines Sandkorns. Er berechnet sich aus dem Vergleich einer Eigenschaft des unregelmäßigen Teilchens mit einer Eigenschaft eines regelmäßig geformten Teilchens. Je nach Auswahl der zum Vergleich herangezogenen Eigenschaft unterscheidet man verschiedene Äquivalentdurchmesser. So ist Z.B. eine Einteilung in geometrische und physikalische Äquivalentdurchmesser möglich. Der Äquivalentdurchmesser ist eine wichtige Größe in der mechanische Verfahrenstechnik.[8]

#### **3.2.1.2 Korngrößenverteilung**

Korngrößenverteilung, also eine Häufigkeitsverteilung in Form eines Balken- oder Liniendiagramms. Gegen den klassierten Äquivalentdurchmesser(Abszisse) wird der prozentuale Anteil(Gewichtprozent) der Körner aufgetragen.

In Produktionsprozessen, bei denen es bei den Rohstoffen oder beim Produkt auf definierte Korngrößen ankommt, sind Korngrößenanalyse und

Korngrößenverteilung ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätskontrolle. In der Sedimentologie und Bodenkunde ist die Korngrößenverteilung ein sehr wichtiges Merkmal zur Charakterisierung von Böden und Sedimenten. Sie dient deren Klassifikation und ist eigenschaftsbestimmend, beispielweise bei Wasserdurchlässigkeit, Verdichtungspotential, Tragverhalten oder Frostepfindlichkeit.

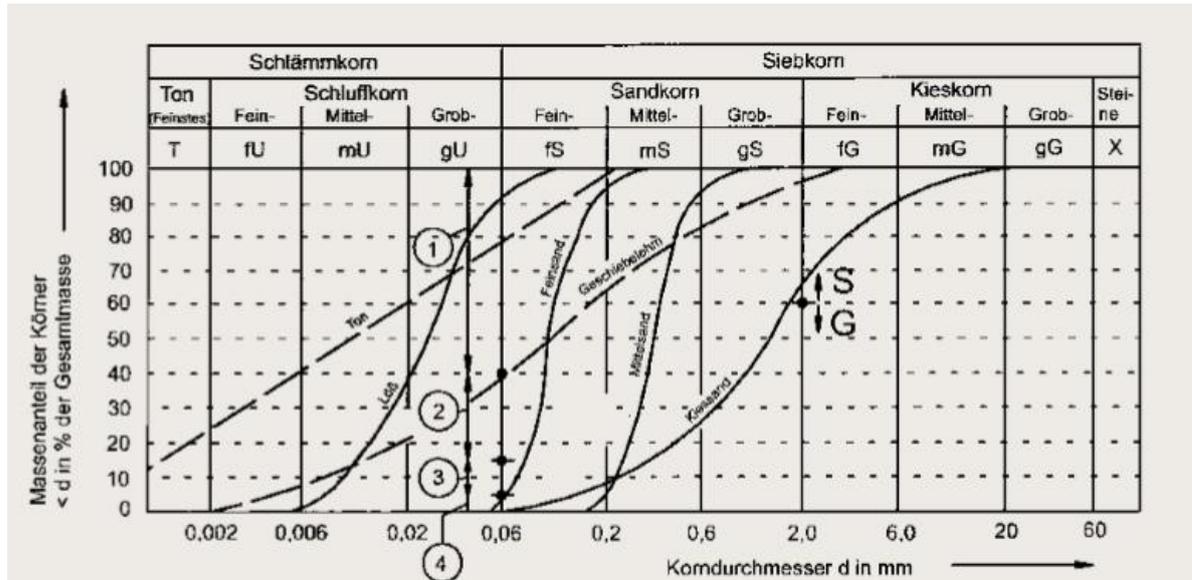


Abbildung 3: Beispiel von Körnungslinien

- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123
- Vereinheitliche Darstellung des Korngrößenbandes eines Materials
- Darstellung in einem halblogarithmischen Diagramm, Y- Achse in %

### 3.2.1.3 Ermittlung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123

Mit Hilfe einer Sieb- bzw. einer Schlämmanalyse werden die Massenanteile von Kornfraktionen des Bodens ermittelt und als Kornverteilungskurve dargestellt. Die Korngrößenverteilung ist eine Grundlage, um Boden zu klassifizieren und dessen bodenmechanischen Eigenschaften abzuschätzen, z.B.:

- Verdichtungsfähigkeit
- Frostepfindlichkeit
- Wasserdurchlässigkeit
- Filterstabilität

Die Korngrößenverteilung wird durch Siebanalyse bei Korngrößen von 63 - 0,063 mm, durch Sedimentation bei Korndurchmessern kleiner als 0,125 mm oder als kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalyse bei gemischtkörnigen Böden ermittelt. Bei der Siebanalyse wird die getrocknete Probe durch einen Siebsatz mit abgestuften Maschenweiten gerüttelt und die Rückstände auf den einzelnen Sieben gewogen, in Prozent zur Gesamtmasse umgerechnet, und aufsummiert als Körnungslinie gezeichnet. Bei der Sedimentations- bzw. Schlämmanalyse werden die Korngrößen durch ihre unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten in Wasser bestimmt. Die Bodenprobe wird zu einer Suspension aufgerührt. Die Dichte der Suspension wird in festgelegten Zeitabständen mit einem Aräometer gemessen.[9]

#### **3.2.1.4 Nichtbindige Böden und bindige Böden**

Nichtbindige Böden: Sand, Kies, Steine und ihre Mischungengehören gehören zu nichtbindige Böden . Die einzelnen Körner sind hier nicht miteinander verkittet. Die Belastbarkeit dieser Böden wächst mit der Korngröße, der Lagerungsdichte und mit der Tiefe, in der die Schicht liegt. Ein gemischtkörniger Boden mit weniger als 5 bis 15% Bestandteilen unter 0,063mm wird im Sinne der DIN 1054 als nichtbindiger Boden bezeichnet, wenn die Feinkorn-Massenanteile das Verhalten des Boden nicht bestimmen. Frostschäden sind bei nichtbindigen Böden i.d.R. nicht zu erwarten, da die Volumenänderungen des Wassers durch die Luftporenräume im Korngefüge aufgenommen werden kann.

Bindige Böden: Das sind Tone, Schluffe und Lehme. Ihr Korngerüst ist durch Ton mehr oder weniger verkittet. Die Tragfähigkeit bindiger Böden sinkt mit zunehmender Feuchtigkeit. Bindige Böden sind, falls sie nicht tief genug liegen, besonders frostgefährdet. Sind in einem Bodengemisch mehr als 15% bis 40% Bestandteile unter 0,063mm Korngröße enthalten, liegt ein bindiger Boden vor, weil ab etwa dieser Grenze angenommen werden muss, dass der Feinanteil nicht mehr nur die Hohlräume der gröbereren Körnung ausfüllt, sondern sich bereits an der Lastübertragung beteiligt. Zu den bindigen Böden zählen im Sinne dieser Norm auch die gemischtkörnigen Böden, wenn die Feinkorn-Massenanteile das Verhalten

des Bodens bestimmen. Bindige Böden sind frostgefährdet, da das Wasser innerhalb der Poren des Korngefüges gefriert und es somit zu Hebungen des Bauwerks kommt.[10]

### 3.3 Bestimmung einiger wichtigen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Boden

#### 3.3.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt einer Bodenprobe kann nach DIN18 121 bestimmt werden und wird als Verhältnis des Masseverlustes beim Trocknen  $m_w$  bezogen auf die verbleibende Trockenmasse  $m_d$  nach folgender Gleichung und Tabelle ermittelt:

$$W = \frac{m_w}{m_d}$$

Aber der Wassergehalt ist keine Bodenkenngrößen, sondern dient zur Zustandsbeschreibung und zur vergleichenden Bewertung, sowie als Hilfswert zur Bestimmung der Konsistenz.

Die natürlichen Wassergehalte schwanken in weiten Grenzen; Größenordnungen sind ungefähr:

**Tabelle 2: Größenordnung von Wassergehalt im Boden**

Erdfeuchter Sand	$W = 2 \text{ -- } 10\%$
Schluff	$W = 20 \text{ -- } 30\%$
Ton	$W = 20 \text{ -- } 60\%$
Organische Böden	$W = 50 \text{ -- } 1000\%$

### 3.3.2 Frostempfindlichkeit

*(Bewertung der Frostempfindlichkeit nach Bodenklassifikation)*

Bindige und nichtbindige Böden zeigen unterschiedliches Frostverhalten. Dieses ist abhängig von dem Hohlraumgehalt, der Korngrößenverteilung sowie dem Wassergehalt des Bodens. Böden werden hinsichtlich ihrer Frostempfindlichkeit in drei Klassen unterschieden.

**Tabelle 3: Frostempfindlichkeit von Böden**

Klasse	Frostempfindlichkeit	Bodenarten	Zeichen
F1	keine	Nichtbindiger Boden wie Sand und Kies	GW;GI;GE;SW; SI;SE
F2	Gering bis mittel	Gemischtkörnige Böden wie Gemische aus Schluff, Lehm, Kies, Sand, stark plastische Tone	TA;OT;OH;OK; ST;GT;SU;GU
F3	hoch	Bindiger Boden wie leicht plastischer Ton und Schluff	TL;TM;UL;UM; UA;OU;ST <sup>*</sup> ;GT <sup>*</sup> ;SU <sup>*</sup> ;GU <sup>*</sup>

Bei gemischtkörnigen Böden, insbesondere aber bei bindigen Böden ist der Wassergehalt recht hoch. Durch Witterungseinflüsse im Winter wie z.B. Frost kann das Wasser in diesen Böden gefrieren. Die in diesen Böden enthaltenen kleinen Kapillaren sorgen dafür, dass Wasser aus der Tiefe bis an die Frostgrenze hochgedrückt wird und dort gefriert. Dadurch bilden sich aus den mit Wasser gefüllten Hohlräumen Eislinsen, eine Volumenvergrößerung tritt auf, der Boden kann sich etwas anheben. Beim Auftauen werden diese von der Oberfläche her wieder weich, sind aber mit Wasser gesättigt. Die Folge davon ist ein teilweises oder komplettes Versagen der Tragfähigkeit. Bindige Böden sind immer frostfreien Tiefen gegründet werden. Die Klasse F1 kann als Baustoff für Frostschutzschichten verwendet werden, aber soll noch einige Körnungsbedingungen erfüllen.[11]

### 3.3.3 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit – $k$ [m/s] basierend auf der Kornverteilung

**Tabelle 4: Grundwasserfließgeschwindigkeiten in grundwasserleitenden und –stauenden Schichten**

Aquifer	$K_f$ – Wert (m/s)	Grundwasserfließgeschwindigkeit(m/s)
Kiese	$10^{-1} – 10^{-2}$	0,1 – 0,01
Grober Sand	$10^{-3}$	0,001
Mittelkörniger Sand	$10^{-3} – 10^{-4}$	0,001 – 0,0001
Feiner Sand	$10^{-4} – 10^{-5}$	0,0001 – 0,00001
Schluffiger Sand	$10^{-5} – 10^{-7}$	0,00001 – 0,0000001
<b>Aquiclude</b>		
Toniger Schluff	$10^{-6} – 10^{-9}$	0,000001 – 0,000000001
Ton	$< 10^{-9}$	0,000000001

**Tabelle 5: Durchlässigkeit von Lockergesteinen nach DIN 18130**

Durchlässigkeit	Fließgeschwindigkeit (m/s)
Stark durchlässig	$> 10^{-4}$
Durchlässig	$10^{-4} – 10^{-6}$
Gering durchlässig	$10^{-6} – 10^{-8}$
Sehr gering durchlässig	$< 10^{-8}$

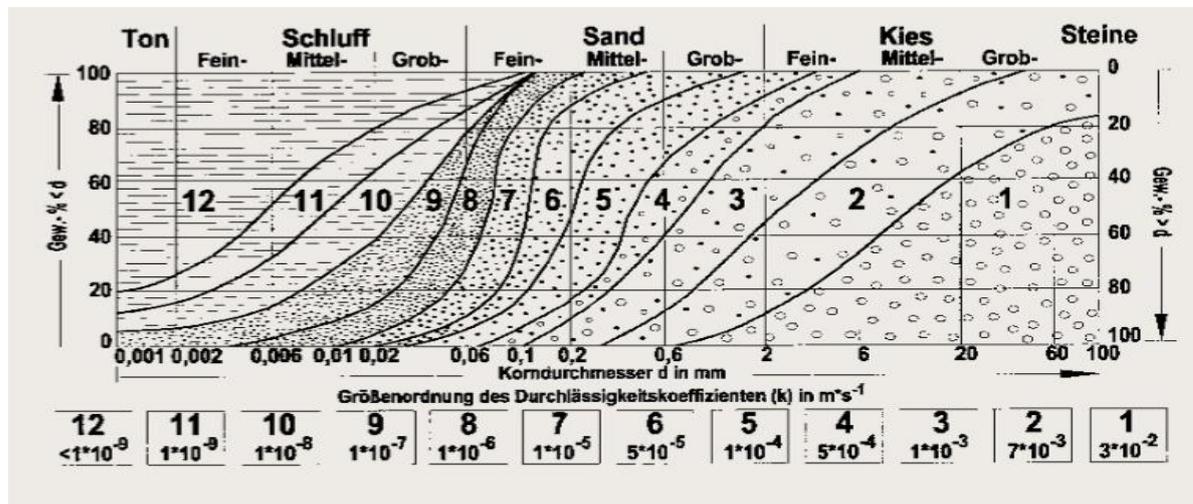


Abbildung 4: Wasserdurchlässigkeit –  $k$ [m/s] basierend auf der Kornverteilung

### 3.3.4 Glühverlust nach DIN 18 128

Die organischen Anteile von Böden werden durch ihren Glühverlust bestimmt, dessen Versuchsdurchführung in DIN 18 128 genormt ist. I.d.R. Neigen Böden mit organischen Anteilen(Pflanzenreste usw.) dazu, ihr Volumen unter Last stark zu verkleinern(Setzungen). Sie können auch am Geruch(faulig) bzw. Häufig an einer dunklen Färbung erkannt werden. Der Glühverlust  $V_{gl}$  ist nach folgende Gleichung definiert:

$$V_{gl} = \frac{m_d - m_g}{m_d}$$

$M_g$ : verglühte Masse

$M_d$ : Trockemasse

Die Klassifizierung von Böden mit organischen Anteilen erfolgt nach DIN EN ISO 14688-2. Der Glühverlust kann allerdings noch weiter unterschieden werden in organischen und anorganischen Kohlenstoff. Diese Gehalte werden als TOC(Total Organic Carbon) und TIC(Total Inorganic Carbon) bezeichnet und finden hauptsächlich bei der Abschätzung von Gefährdungspotential in umweltrelevanten Fragenstellungen ihren Einsatz.[12]

**Tabelle 3: Klassifizierung von Böden mit organischen Anteilen nach DIN EN ISO 14688-2**

Boden	Organische Anteil % der Trockenmasse( $\leq 2\text{mm}$ )
Schwach organisch	2 bis 6
Mittel organisch	6 bis 20
Stark organisch	> 20

## **4. Untersuchungsmethode**

### **4.1 Untersuchungen von Kerndichtungen an der Pilotanlage Hochwasserdeiche am Standort Beuna im Zuge des Rückbaues des Deichsystems**

Es gibt die Notwendigkeit, dass die Prüfkörper der einzelnen Dichtungen entnehmen, um die Effekt der Einstauversuche und die Beständigkeit im Hinblick auf die bauphysikalischen und mineralogischen Eigenschaften des Dichtungssystems zu prüfen.

- Freilegung der Kerndichtung HF3 landseitig durch Fa. MUEG GmbH
- Horizontale Kernbohrungen HF3 durch Fa. DIBS(Diamant-, Bohr- und Sägetechnik e.K.) als Subunternehmen der IMF GmbH(Institut für Materialprüfung und Forschung)
- Vertikale Kernbohrungen mit Doppelkernrohr mit Raupenbohrgerät an allen Dichtwänden des Pilotdeichs durch Fa. DIBS

#### **4.1.1 Doppelkernrohre**

Doppelkernrohre sind für eine bestmögliche Probengewinnung hervorragend geeignet. Doppelkernrohre verhindern weitestgehend den Einfluss von Bohrspülung und Reibung auf den Bohrkern. Die hohen Anforderungen zum Gewinn einer ungestörten Kernprobe werden damit erfüllt. Der Kernrohrkopf mit dem Anschluss an das Bohrgestänge ist so konstruiert, dass ein äußeres Rohr und ein inneres Rohr aufgeschraubt werden können. Eine Kugellagerung verhindert, dass die zum Bohren nötige Rotation von Außenkernrohr und Bohrkrone auf den Kern verschleißreibend übertragen wird. Die Spülung strömt zwischen Innen- und Außenrohr und tritt erst im Kronenbereich aus. Das Kernfangring in einer Kernfanghülse, die mittels einer Aufsteckhülse ins Innenrohr eingesteckt ist. Steckverbindungen erlauben geringere Wandstärken in den Rohren, und damit auch relativ dünnlippige Bohrkronen mit den Vorteilen von geringem Flächenandruck und niedriger Kronenkosten.

Aber Bohren mit Doppelkernrohr hat auch Nachteil, dass mit zunehmender Tiefe der Zeit- und Kraftaufwand für die Bohrmannschaften enorm zunimmt.[13]

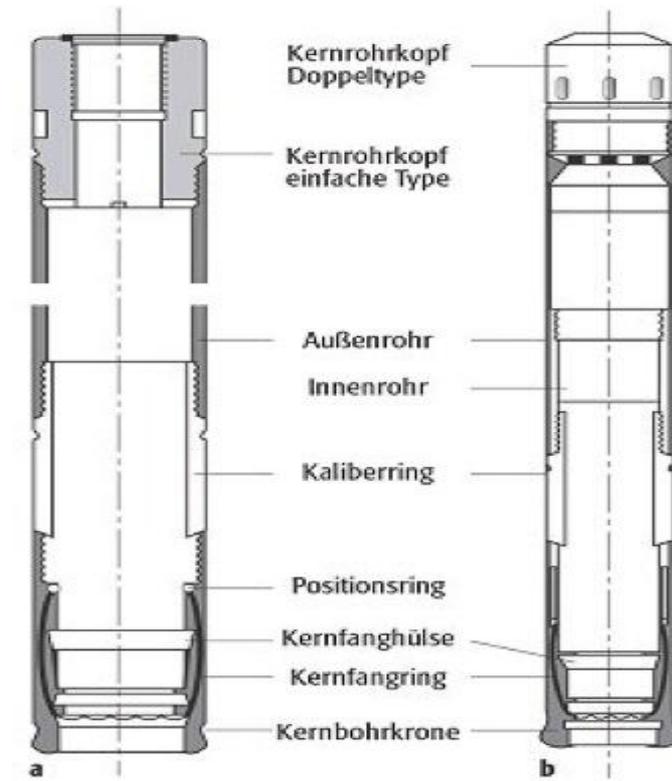


Abbildung 5: Doppelkernrohr

#### 4.1.2 Beschreibung der Probenahme der Bohrkern in HF2, HF3, HF4

Probenahme der Bohrkern in HF3 erfolgt im Horizontalbohrverfahren. In HF2, HF4 wurden die Bohrkern vertikal entnommen (Bohrverfahren mittels eines Doppelkernbohrers mit Kernfangring und Luftspülung/ Wasserspülung). Bohrkern von HF2 erwiesen sich als nicht vollständig verwertbar. Bohrkern von HF4 erwiesen sich als verwertbar. Zum Schluss wurden die Dichtungswände für geologische Kartierung freigelegt.

**Tabelle 7: Beschreibung der Probenahme der Bohrkern in HF2, HF3, HF4**

	Probenahme des Dichtungsabschnittes HF3	Probenahme des Dichtungsabschnittes HF2	Probenahme des Dichtungsabschnittes HF4
<b>Zeit</b>	09.12.2015	15.03.2016	16.03.2016
<b>Verfahren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Horizontalbohrverfahren</li> <li>➤ Handbohrgerät mit einer Diamantbohrkrone zum Einsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vertikale Probenahme</li> <li>➤ Bohrverfahren mittels eines Doppelkernrohrs mit Kernfangring und Luftspülung / Wasserspülung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vertikale Probenahme</li> <li>➤ Bohrverfahren mittels eines Doppelkernrohrs mit Kernfangring und Luftspülung</li> </ul>
<b>Ergebnisse</b>	Analyse der Proben durch MPA-Labor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrkern zeichnet sich nicht als erfolgreich aus</li> <li>• Analyse durch MPA-Labor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrkern erwiesen sich als verwertbar</li> <li>• Analyse der Proben durch MPA-Labor</li> </ul>

### 4.1.3 Beschreibung der gewonnenen Proben

<b>Lage der Entnahmestelle</b>	<b>Beispiel als bildliche Darstellung</b>
Ober Dichtungsabschnitt von HF3 (unterschiede Größe und Form, grobkörnige Bodenmaterial)	
Mittlerer Dichtungsabschnitt von HF3 (unterschiede Größe und Form, grobkörnige Bodenmaterial)	
Unterer Dichtungsabschnitt von HF3 (unterschiede Größe und Form, grobkörnige Bodenmaterial)	

<p>Proben von HF2 (erst 0-- 1,5m kleine, lockere Bodenproben; 1,5--3m feste ,schlammige Probenstück )</p>	
<p>Proben von HF4 (feste, graue Probenstück)</p>	

#### 4.1.4 Auswertung der Probenahme

Im HF2 zeichnete sich das Verfahren mittels Doppelkernrohr nicht als erfolgreich aus. Die Bohrkern erwießen sich als nicht vollständig verwertbar. Damals gab es viele Vermutung. Nach die Analyse kommt die zwei haupte Ursachen zu: 1. Problem von Verfahren. 2. Beschaffenheit der Kerndichtung. Aufgrund der Luftspülung sollte erzielt werden, dass das Bohrklein an die Oberfläche gefördert wird. Aber durch diesen Prozess wurde eine hohe Wärmeentwicklung durch Reibung entstanden. Durch die zunehmende Feuchtigkeit in dem tiefergelegenen Schichten setzen sich das Bohrklein im Bohrloch fest. Aus diese beide Ursachen reichte eine reine Luftspülung nicht mehr aus und es wurde auf eine Wasserspülung umgestellt. Die Absicht dieser Umstellung ist es, dass die Probe zusätzlich mit

Wasser gemischt wurde und verfestigte sich zu Bohrkernen. Aber es gab Problem wieder. Durch die starken Krafteinwirkungen des Bohrers auf die Dichtung wurde diese im Bereich der Bohrung zerstört und somit konnten keine fest zusammenhängenden Bohrprobe entnommen werden. Aber der Verfahren mit Wasserspülung war nicht unserer ursprüngliche Wunsch und hierdurch kam es zu Veränderung der Proben. So es ist nicht gut für die Auswertung.

Im HF4 wurde gleiches Verfahren benutzt aber nur mit Luftspülung. Die Bohrkern erwiesen sich als verwertbar.

#### **4.1.5 Untersuchungen der Röntgendiffraktometrie (XRD) und Rasterelektrodenmikroskop (REM) Röntgendiffraktion(XRD)**

Neben der chemischen Analyse hat sich die Röntgendiffraktion mit einer modernen Auswertungssoftware einen wichtigen Platz in der Festkörperanalytik erkämpft. Während chemische Methoden i.R. Nur die Elementgehalte quantifizieren, können mit der XRD-Methode Aussagen zum mineralogischen Bestand abgeleitet werden. So können mit dieser Methode im vorliegenden Fall Calciumoxid, sulfat, sulfathydrat, carbonat und hydroxid nachgewiesen werden.[14]

##### **Ergebnis:**

Durch REM sind Phasenneubildung, Ettringitnadeln und Eingeschlossene Partikel gut zu erkennen. HF4 sieht kompakter aus als HF2 und HF3.

Durch XRD kommt diese Ergebnisse zu: Bestandteil der Proben von HF2 (oben) und HF2(unter) sind ähnlich. Mineralphasen des Deichmaterials spiegeln sich in Dichtung wieder(Quarz, Calcit, Muskovit, Albit). Ausbildung von Ettringit bestätigt nochmals. Alle Proben sind bei erkennbaren Phasenbestandteile des Grundmaterials identisch. Die Bestandteile der Phasenneubildung zeigen Unterschiede zwischen aschen- und zementgebundenen Dichtwänden auf. Die Neubildungen von Aschegebunden sind Ettringit, Riebeckit und Klinochlor. Die Neubildungen von Zementgebunden sind geringe Ettringit, CSH- Phasen und

Riebeckit. Die Grundmaterial von Aschegebunden und Zementgebunden sind Quarz, Calcit, Dolomit und Gehlenit.

Für den Aspekt bautechnisch und mineralogisch zu beschreiben:

- Aschegebunden: Nadelförmige Phasenneubildungen deutlich zu erkennen, poröses Gefüge, Einschluss von Grundmaterial
- Zementgebunden: gelförmige Neubildungen überwiegen, weniger Porenräume als bei aschegebundenen Dichtung, Einschluss von Grundmaterial

Die Dichtwände liegen in folgenden Zustand nach Versuchsablauf vor: Die Wände sind fest. Die Suspension bindet Deichmaterial in allen Bereichen ein. Es gibt Festigkeitsunterschiede zwischen asche- und zementgebundenen Dichtungen. Es gibt kein Wasseraustritt bei Freilegung.

Die weitere Ergebnisse stehen in Projektarbeit von Studentin Saskia Hägebarth.

## 4.2 Untersuchungsmethode von Deichmaterialien

### 4.2.1 Siebanalyse nach DIN 66165

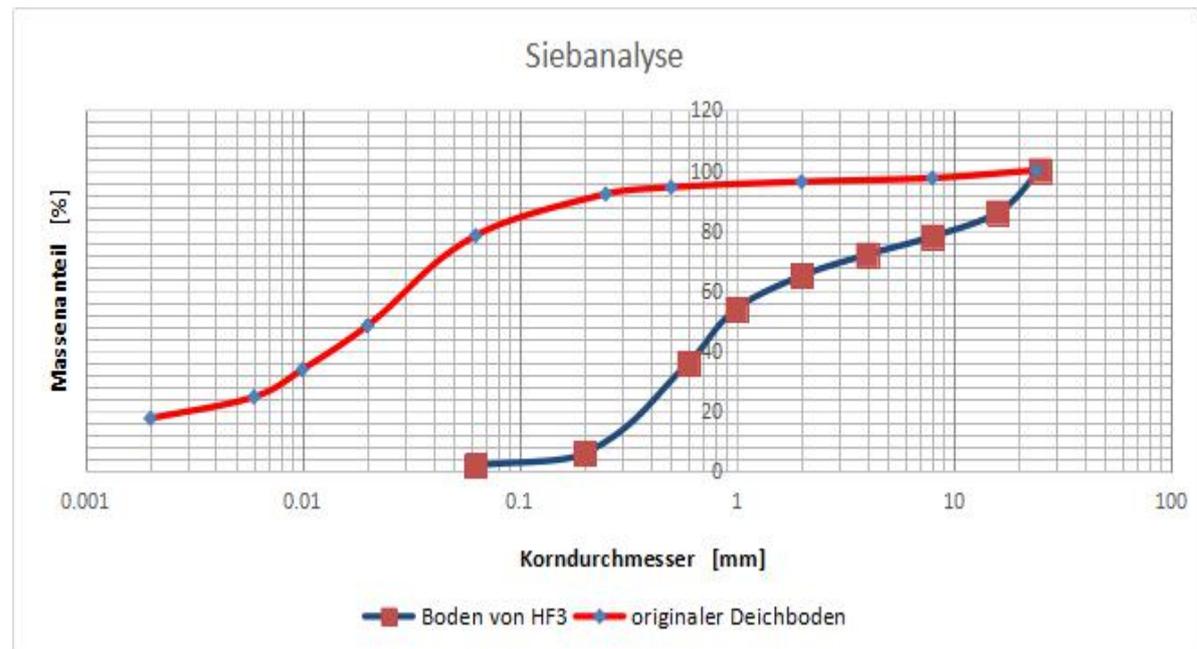
Die Siebanalyse ist ein Verfahren zur Ermittlung der Korngrößenverteilung von Schüttgütern. Sie ist ein wichtiges Verfahren bei der Qualitätssicherung und wird in der Deutschen Norm DIN 66165 beschrieben. Das gebräuchlichste Verfahren der Siebanalyse ist die Trockensiebung mit einem Siebturm, der auf einer Siebmaschine befestigt wird. Für schwierige Siebgüter, die zur Agglomeration neigen, und feineres Siebgut werden auch die Nasssiebung und Luftstrahlsiebung angewandt.

Bei der Siebung mit einem Siebturm werden mehrere Prüfsiebe (auch Analysensiebe genannt) übereinander angeordnet und auf eine Siebmaschine gespannt. Die Prüfsiebe bestehen jeweils aus einem Siebboden und dem Siebrahmen. Die Maschenweiten der einzelnen Prüfsiebe sind von oben nach unten absteigend. Bei der Durchführung der Siebanalyse wird die zu analysierende Probe auf dem größten Prüfsieb aufgegeben und für eine vorgegebene Zeit einer definierten Bewegung ausgesetzt – wie diese genau aussieht, ist vom gewählten Siebverfahren abhängig. Durch das Auswiegen der Rückstände auf den einzelnen Prüfsieben wird anschließend die Korngrößenverteilung der Probe ermittelt.[15]



Abbildung 6: Trockensiebmaschine

## Sieblinien von 2 Böden



Bodenklassifikation nach DIN 4022-1

Boden von HF3 → S,u\* → Sandstein(schwach schluffig)

originaler Deichboden → U,s,t → Schluffstein

#### 4.2.2 Proctordichteversuch nach DIN 18127

Der Proctorversuch stellt die Beziehung zwischen Verdichtungsarbeit, Wassergehalt und Trockendichte her. Zweck des Proctorversuchs ist es, die Trockendichte eines Bodens nach Verdichtung unter festgelegten Versuchsbedingungen als Funktion des Wassergehalts festzustellen. Der Versuch dient der Abschätzung der auf Baustellen erreichbaren Dichte des Bodens und liefert eine Bezugsgröße für die Beurteilung der im Baugrund vorhandenen oder auf Baustellen erreichten Dichte des Bodens. Das Ergebnis wird grafisch in Form einer Kurve dargestellt. Die grafische Beziehung zwischen Wassergehalt und Trockendichte wird als Proctorkurve bezeichnet. Das Maximum dieser Kurve charakterisiert die Proctordichte sowie den zugehörigen zu Verdichtungszwecken optimalen Wassergehalt des untersuchten Bodens.[16]

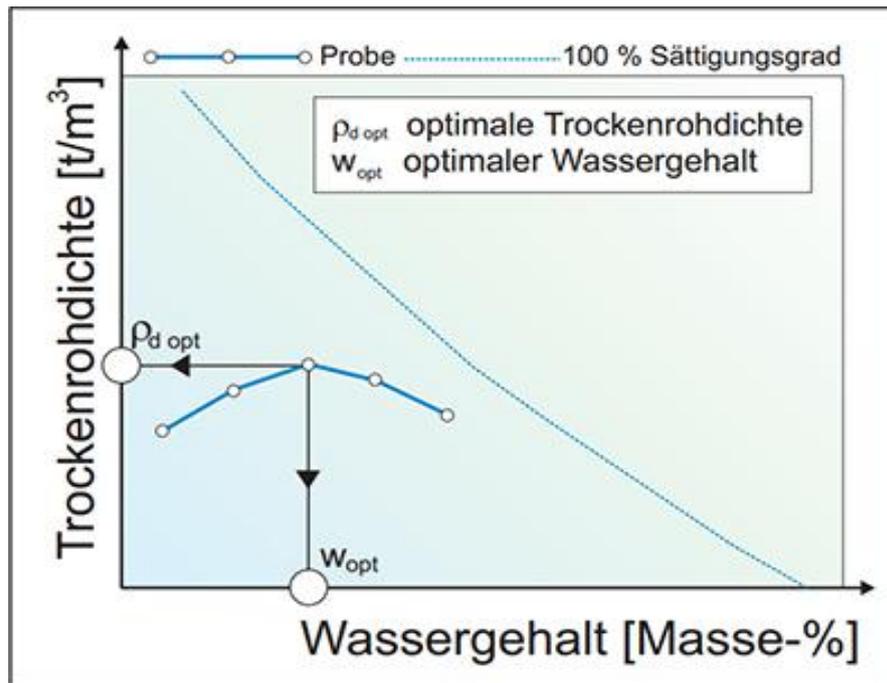


Abbildung 7: Proctordichtelinie

#### 4.2.2.1 Proctordichte

Die Proctordichte ist die maximale Trockendichte  $\rho_d$ , die ein Boden bei einer definierten Verdichtungsarbeit und verschiedenen Wassergehalten erreichen kann.

#### 4.2.2.2 Verdichtung

Verdichtung bedeutet, Erhöhung der Trockendichte (Verringerung des Porenanteils) des Bodens durch mechanische Einwirkungen.

#### 4.2.2.3 modifizierte Proctordichte mod $\rho_{Pr}$

Die modifizierte Proctordichte ist die größte, mit einer volumenbezogenen Verdichtungsarbeit von  $W \approx 2.7 \text{ MNm/m}^3$  erreichbare Trockendichte.

#### 4.2.2.4 optimaler Wassergehalt $W_{pr}$

Die optimale Wassergehalt ist, bei dem eine maximale Verdichtung eines bindige Bodens möglich ist, bzw. zur modifizierten Proctordichte zugehörige Wassergehalt. Der optimale Wassergehalt wird im Proctorversuch ermittelt.

#### 4.2.2.5 Verdichtungsgrad $D_{pr}$

Der Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$D_{pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{pr}} \cdot 100 \%$$

Verdichtungsgrad ist gleich die Trockendichte des Bodens durch die Proctordichte

#### 4.2.2.6 Ergebnis

Die Proctordichte von HF3 ist gleich 1,96 g/cm<sup>3</sup>. Der optimale Wassergehalt von HF3 ist gleich 10%. Die Proctordichte von originalem Boden ist gleich 1,52 g/cm<sup>3</sup>. Der optimale Wassergehalt von HF3 ist gleich 12%. Das Ziel von Untesuchung der Proctordichte und dem Wassergehaltes der beide Böden: zur Ermittlung wie viel Boden braucht ein PK zu herstellen.

## 4.3 Untersuchung der repräsentativen Prüfkörper

### 4.3.1 Schritte der Versuch zur Herstellung der repräsentativen Prüfkörper

**Tabelle 8: Schritte der Versuch zur Herstellung der repräsentativen Prüfkörper**

Erstes Schritt	Simulation der Einbaubedingung
Zweites Schritt	Herstellung einer Hohlform im Deichmaterial <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Hülse einbauen, entnehmen</li> <li>➤ Unter Verwendung der Proctordichte, die Masse Boden (HF3, originaler Boden) für PK errechnen</li> </ul>
Drittes Schritt	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ BM und Wassermenge nach 12 Rezeptur errechnen</li> <li>➤ Suspension herstellen (Wasser+BM )</li> <li>➤ Mischung herstellen (Suspension+Boden)</li> <li>➤ Mischung in Hohlform erfüllen</li> </ul>
Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Proctordichte bei optimalen Wassergehalt</li> <li>➤ Dichte des Suspension und PK</li> <li>➤ Ermittlung der Restmenge Gemisch</li> <li>➤ Ermittlung der Volumenvergrößerung</li> </ul>

### 4.3.2 Versuchsdurchführung

- 1) Boden in Mörtelkisten setzen (Proctordichtebestimmung, opt.Wassergehalt)
- 2) Bestimmung der Suspensionsdichte, Absetzbarkeit und Druckfestigkeit
- 3) Herstellung des Bindemittelsuspension-Bodengemisch (1\*2\*12)
- 4) Herstellung von Prüfkörper (in Mörtelkisten einsetzen)
- 5) Ermittlung der Gemischdichte
- 6) Berechnung des Mengenüberschusses
- 7) Ermittlung des Quellverhaltes des eingebauten Gemisches aus Boden und Bindemittelgemisch (Volumenvergrößerung)
- 8) Nach 28 Tagen (PK verfestigen sich) Wasserdurchlässigkeit untersuchen

- 9) Klassifizierung geeigneter Bodenarten für die Errichtung von Deichbauwerken
- 10) Bestimmung der Suspensionsdichte, Absetzbarkeit und Druckfestigkeit
- 11) Herstellung des Bindemittelsuspension-Bodengemisch (1\*2\*12)
- 12) Herstellung von Prüfkörper (in Mörtelkisten einsetzen)
- 13) Ermittlung der Gemischdichte
- 14) Berechnung des Mengenüberschusses
- 15) Ermittlung des Quellverhaltes des eingebauten Gemisches aus Boden und Bindemittelgemisch (Volumenvergrößerung)
- 16) Nach 28 Tagen (PK verfestigen sich) Wasserdurchlässigkeit untersuchen
- 17) Klassifizierung geeigneter Bodenarten für die Errichtung von Deichbauwerken

### 4.3.3 Rezepturen von Herstellung der PK

**Tabelle 9: Rezepturen von Herstellung der PK**

Probe. Nr	BM	W/BM	Susp.Dichte	$V_{\text{susp}}/V_{\text{Boden}}$	BM/BO
1	BFA	1	1,47	0,35	14%
2	BFA	0,85	1,51		16%
3	BFA	0,7	1,6		18%
4	BFA/Zement	1	1,48		14%
5	BFA/Zement	0,85	1,52		16%
6	BFA/Zement	0,7	1,60		18%
7	Bifa/Zement	1	1,48		14%
8	Bifa/Zement	0,85	1,52		16%
9	Bifa/Zement	0,7	1,58		18%
10	Bifament	1	1,44		14%
11	Bifament	0,85	1,5		14,5%
12	Bifament	0,7	1,55		18%

Nach obigen Rezepturen wurden entsprechende PK hergestellt.

12 Rezepturen; Jede Rezeptur 2 Prüfkörpern; 1 Boden

$12 * 2 * 1 = 24$  PK

Das bedeutet, insgesamt 24 PK wurden hergestellt.

MUEG-Test und Eignungs-Test-TBR entsprechend, das Volumen-Verhältnis zwischen Boden und Suspension bleibt immer gleich. Wenn das Verhältnis zwischen Wasser und BM verändert, verändert auch das Verhältnis zwischen BM und Boden. Wenn mehr Wasser als BM, dann weniger BM in Boden. Wenn das Verhältnis zwischen W/BM steigt ab, das bedeutet weniger Wassermenge, und dann steigt das Verhältnis zwischen BM/Boden an.

#### **4.3.4 Bestimmung der Durchlässigkeit in der Triaxialzelle bei konstantem hydraulischen Gefälle nach DIN 13130-1 eines Boden-Suspensionsgemisches**

Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts mit Laborversuchsmethode von Bodenproben nach DIN-18130-1. Diese Norm gilt für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Böden (Lockergestein) durch Laborversuche. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist aus dem allgemeinen Fließgesetz von DARCY abgeleitet. Er wird aus dem Quotienten der Filtergeschwindigkeit  $V$  und des hydraulischen Gefälles  $i$  bei laminarer Durchströmung des wassergesättigten Bodens gebildet.

Die MUEG mbH verwendet zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes eine Apparatur auf der Basis der Triaxialzelle. Für jede Prüfung sind zwei Prüfkörper zu verwenden. Das Prüfergebnis ist der Mittelwert aus den zwei Einzelprüfungen.[17]

##### **4.3.4.1 Untersuchungsmethode**

--Untersuchung in der Triaxialzelle

Die Versuche eignen sich für alle Bodenarten mit Durchlässigkeitsbeiwerten  $k < 10^{-5}$  m/s. Hier wird den Versuch mit isotroper statischer Belastung benutzt.

#### 4.3.4.2 Anordnung

Der Versuch wird mit einer Anordnung für konstantes hydraulisches Gefälle durchgeführt. Es wird ein Versuchsgerät verwendet, dessen Maße auf das vorhandene Größtkorn abgestimmt sind und das die Erzeugung eines konstanten Wasserdrucks in der Triaxialzelle ermöglicht. Der Probekörper wird von einer Gummihülle umschlossen sowie unten und oben durch je einen Filterstein begrenzt. Diese Filtersteine müssen ausreichend durchlässig sein, d.h. ihr Durchlässigkeitsbeiwert muss mindestens um eine Zehnerpotenz über desjenigen des Probekörpers liegen. Das Probenkopfstück sowie der Sockel müssen für eine gleichmäßige Durchströmung des Probekörpers sowie zur Entlüftung eine spiralförmige Rille haben. An das Versuchsgerät wird ein Druckerzeuger angeschlossen, der mit entlüftetem Wasser beschickt wird und dieses unter konstantem Druck an den Probekörper abgibt. Der Probekörper wird von unten nach oben durchströmt. Die Gummihülle steht dabei unter einem konstanten Zelldruck, der größer ist als der Oberwasserdruck. Der Zelldruck muss so groß sein, dass die effektiven Spannungen im Eingangsbereich der Bodenprobe beim Durchströmen einen ausreichenden Abstand vom Grenzzustand behalten.

Die Wassermenge, die den Probekörper durchströmt, wird mit Hilfe des Messzylinders gemessen.[18]



**Abbildung 8:** Versuch in der Triaxialzelle  
mit isotroper statische Belastung



**Abbildung 9:** glänzende PK

#### 4.3.4.3 Bestimmung der Durchlässigkeit

Die in die Probe einfließende Wassermenge wird mit der Bürette, die ausfließende Wassermenge mit dem Messzylinder gemessen. Der Oberwasserdruck wird mit einem Überdruckmessgerät in der Zuleitung der Triaxialzelle gemessen. Sind die zu- und abfließenden Wassermenge in der Zeiteinheit gleich, wird der Durchlässigkeitsbeiwert aus dem Durchfluss und dem hydraulischen Gefälle bestimmt.

#### 4.4 Ermittlung von Volumenvergrößerung -- Messschieber

Ermittlung des Quellverhaltes des eingebauten Gemisches aus Boden und Bindemittelgemisch wurde durch Volumenvergrößerung durchgeführt. Mit Messschieber wurden die Veränderung von PK gemessen (Unterschied zwischen der Höhe und der Durchmesser ).

Der Messschieber(auch Kaliber oder Schieblehre) ist ein Längen-Messgerät. In Österreich wird teilweise noch immer die Bezeichnung Schublehre gebraucht.

Auf einer Stange mit in der Regel zwei Messschenkeln lässt sich ein Schieber bewegen, der ebenfalls Messschenkel trägt. Für Außen- oder Innenmessung wird je eins der Messschenkelpaare an einen Körper von außen beziehungsweise an die Wände eines Hohlraums von innen angelegt. Am Schieber befindet sich meistens noch eine Messstange, die z. B. Zur Tiefenmessung von nicht durchgehenden Bohrungen verwendet wird.

Vorteile des Messschiebers gegenüber anderen Längen-Messeinrichtungen sind:

- Relativ hohe Messgenauigkeit
- Einfach und schnell zu bedienen
- Robustes und preiswertes Taschen-Messgerät

Nachteile sind:

- Die Messunsicherheit ist größer als die Auflösung der Anzeige
- Die Wiederholgenauigkeit ist schlechter als bei einem Messgerät mit konstanter Messkraft.

---

Die für Deutschland fachlich richtige Bezeichnung für das beschriebene Messwerkzeug ist in DIN 862 geregelt und lautet Messschieber.[19]

## 5. Auswertung

### 5.1 Auswertung der 2 verschiedene Böden

<p><u>Probekennung:</u> originaler Deichboden von Bad Dürrenberg</p> <p><u>Entnahmetiefe:</u> Handscharf, <math>\approx 1</math> m</p> <p><u>Ansprache/Bezeichnung des Materials:</u> locker, feucht, viele Zweig(Wurzel) darin</p>	
<p><u>Probekennung:</u> Einsatzboden von HF3 Pilotdeich</p> <p><u>Entnahmetiefe:</u> Handscharf, <math>\approx 0\text{--}3</math> m</p> <p><u>Ansprache/Bezeichnung des Materials:</u> locker, feucht, viele große Steine darin</p>	

Trockensiebanalyse wurden in MUEG-Labor durchgeführt. Aber Schlammanalyse (Methode zur Bestimmung von Kornfraktionen  $< 0,125$ mm) und Konbinierte Sieb-Schlämmanalyse (bei gemischtkörnigen Böden) können nicht in MUEG-Labor durchführen werden. Dann wurden die Bodenprobe zu einer fachlichen Labor (CDM Smith Consult GmbH) weitergeschickt. Das avisierte Untersuchungszeitraum ist ca. 1 Woche einhalten zu können.

## 5.2 Auswertung der Boden-Sus. Gemisch



Abbildung 10: *Boden-Suspension-Gemisch*

Daoben links ist Gemisch von Boden HF3, rechts ist Gemisch von originalem Boden. Das Gemisch links sieht flussig aus, rechts sieht ein bisschen fest aus. Diese Zustand kann direkt die Eigenschaften von PK beeinflussen.

## 5.3 Auswertung der genommene PK



Abbildung 11: *genommene PK*

Die ausgenommene PK verfügen über gute Festigkeit und Homogenität. Die Ganzheit von PK sind fest, aber der Rand von PK sind ein bisschen locker. Die Dichte von PK bleibt zwischen 1,75 -- 1,95 g/cm<sup>3</sup>.

## 5.4 Auswertung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert

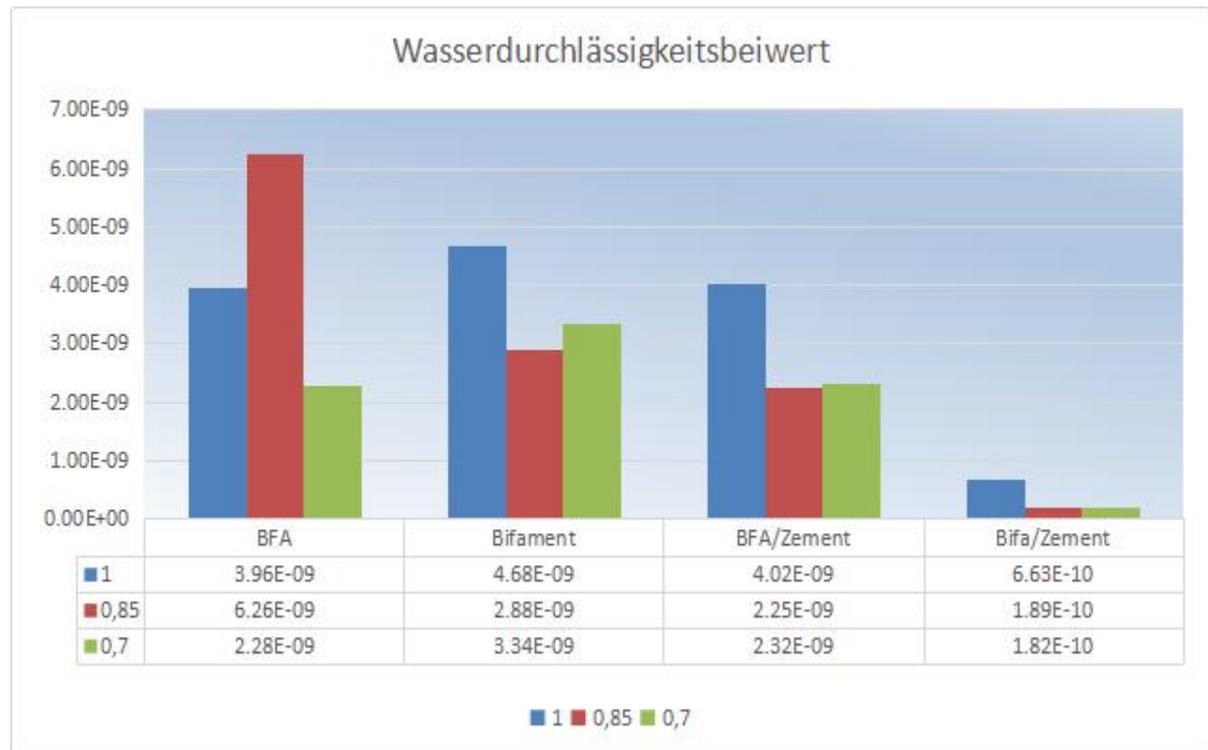


Abbildung 12: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von PK

### gleiche BM; verschiedene Böden

$$K_f \text{ originaler Boden} < K_f \text{ Boden von HF3}$$

### gleicher Boden; verschiedene BM

$$K_f \text{ Bifament/Ze} < K_f \text{ BFA/Ze} < K_f \text{ Bifa} < K_f \text{ BFA}$$

$$10^{-10} \text{ ----- } 10^{-9}$$

### gl. Boden; gl. BM; vers. BM -Verhältnisse

$$K_f 0,7 < K_f 0,85 < K_f 1$$

- PK mit originalem Boden geringer als Boden aus HF3
- PK mit BM Bifament geringer als BFA
- PK mit Zement-Gemisch geringer als rein Bifament oder BFA

---

## **5.5 Auswertung der Mengeüberschuss und Volumenvergrößerung**

Mit dem Messung der Höhe und Durchmesser hat die geringe Veränderung des Volumens der PK. Die Volumenvergrößerung von PK(mit originale Boden) beträgt 2% -- 3%, von PK(mit Boden HF3) beträgt 0,5% -- 2%.

Die Mengeüberschuss von PK(mit originale Boden) beträgt 10% -- 15%, von PK(mit Boden HF3) beträgt 10% -- 15%. Es gibt keinen offenbaren Unterschied.

## 6. Fazit

Es stellt eine weitere Möglichkeit zur Verwertung von Industrieabfällen dar. Nach den abgeschlossenen Untersuchungen stellt die Verwendung von mitteldeutscher Braunkohlenfilterasche für die Sanierung von Deichbauwerken eine weitere Möglichkeit dar. Nach der Untersuchungen von Kerndichtungen an der Pilotanlage Hochwasserdeiche am Standort Beuna im Zuge des Rückbaues des Deichsystems, die Analyseergebnisse zeigen, dass die verwendeten Suspensionen ein festes, gut durchmischtes Gefüge gebildet haben, welche die Anforderungen die an eine Dichtung im Deichbau gestellt werden erfüllen.

Nach der Entwicklung und Erprobung einer Labormethode zur Herstellung von Prüfkörpern unter praxisnahen Bedingungen bewiesen es, die ausgenommene PK verfügen über gute Festigkeit und Homogenität. Die Dichte von PK bleibt zwischen  $1,75 \text{ -- } 1,95 \text{ g/cm}^3$ . Die Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von Prüfkörpern haben die Anforderung an Deich gut bewiesen,  $K_f$  - Wert sind immer kleiner als  $10^{-8}$ . PK mit originalem Boden sind besser als Boden aus HF3. PK mit BM Bifament sind besser als BFA. PK mit Zement-Gemisch sind besser als rein Bifament oder BFA.

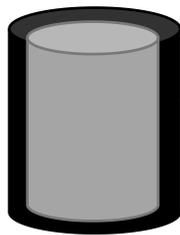
Weil die Böden immer verschieden sind, es ist schwer zu sagen, welche Typ von Böden ist der beste. Aber durch die Untersuchung von der anzuwendende Rezeptur von der Baschaffenheit des vorgefundenen Deichmaterials, der eingesetzte Boden von Pilotdeich Beuna und originaler Boden von Bad Dürrenberg sind beide geeignet für die Errichtung von Deichbauwerken.

Nach der Untersuchung von Optimierung des Wasser-Bindemittel-Verhältnis der Dichtungssuspension von Frau Hägebarth, BFA erreicht Mindestfestigkeit von  $1\text{N/mm}^2$ ; stabiles Verhalten der BFA bietet Sicherheit; Beste Ergebnisse liefert BFA/Zement

Zusammenfassend möchte ich sagen, nach heutigem Ergebnisstand können Deichbauwerke mit Kerndichtungen aus mitteldeutschen Braunkohleaschen saniert werden, jedoch wären weitere Optimierungen von Vorteil.

## 7. Fehlerbetrachtung

Die Herstellung von Prüfkörper wurden die Wand von Rohre vernachlässigt. Nach der Rechnung wurden die Fehler bewiesen. Die Dicke der Wand ist gleich 3,5 mm. Die Volumen von der Wand ist 129 cm<sup>3</sup>. Dieser Fehler wurde stimmt die Auswertung beeinflusst. Deshalb die nächste zwei mal Herstellung von Prüfkörper zusätzliche Boden zusetzen werden müssen.



$$V_D = 1045 \text{ cm}^3$$

$$V_d = 916 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{unterschied}} = 129 \text{ cm}^3 \text{ schwarzer Bereich}$$

$$V_{\text{unterschied}} / V_D = 12.3 \%$$

Das bedeutet, in der nächste Herstellung von Prüfkörper müssen zusätzlich Masse von Boden zusetzen werden, um die Fehler zu vermeiden und eine gute Auswertung zu haben.

Die Herstellung einer Hohlform von PK waren ein bisschen ungenau. Die Horizontalebene von Hohlform waren 3mm -- 10mm höher als Hälse. Deshalb gaben es nicht bestimmter Mengeüberschuss. Die Masse von Asche und Boden-Suspension-Mischung an dem Messzylinderwand und Eimerwand ist auch eine Ursache.

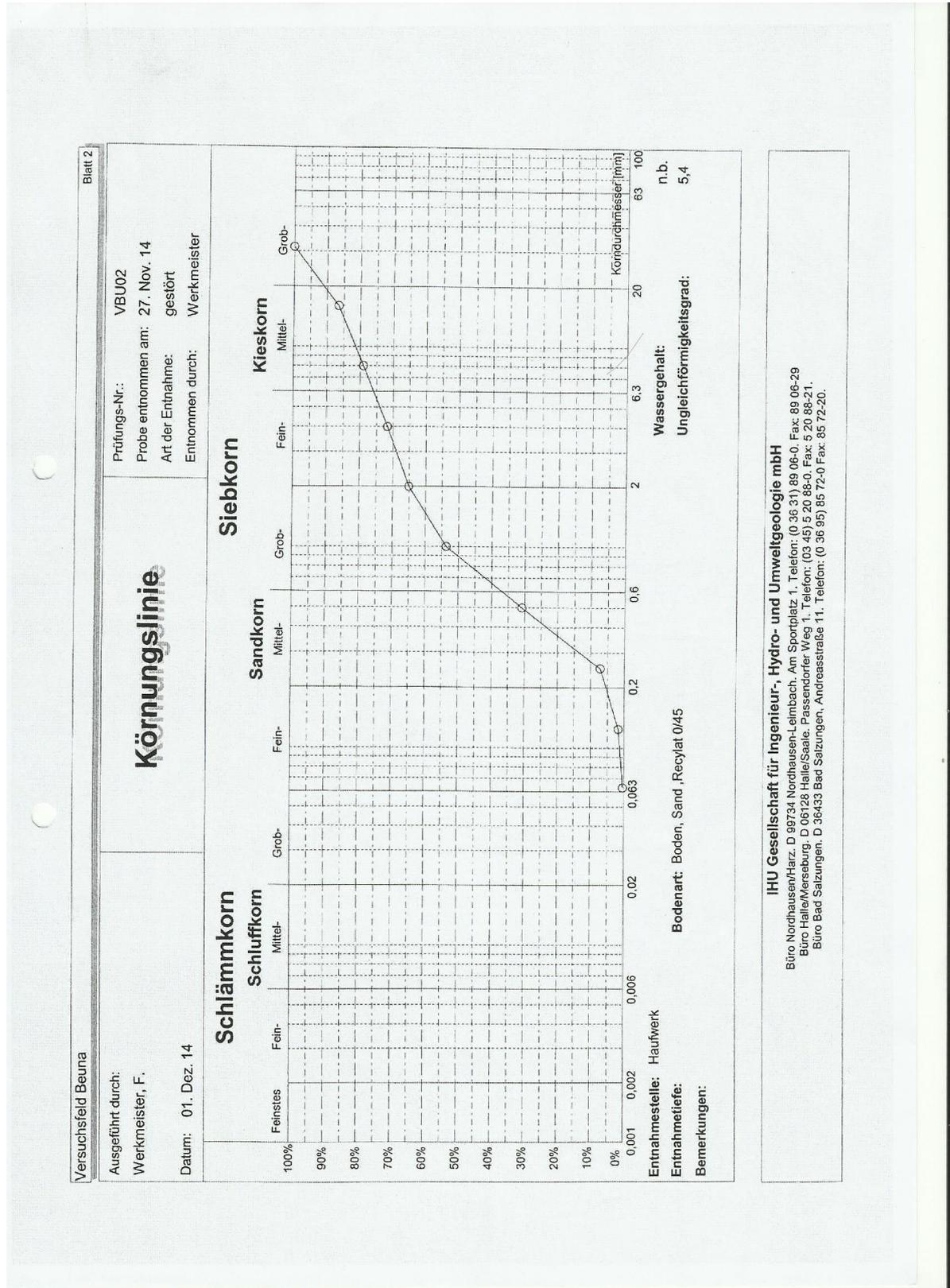
## Literaturverzeichnis

- [1] <http://mueg.de/unternehmen/aufgabenundziele/>
- [2] Hochwasserschutzfibel  
Objektschutz und bauliche Versorge  
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [3] Merkblatt DWA-M 512-1 Dichtungssysteme im Wasserbau; Teil 1:  
Erdbauwerk
- [4] Bachelorarbeit von BA-Weinhold
- [5] SCHEITER,P.;BAMBAUER,H.;WERNER,M.;PÖHL,K  
Chemische- Mineralogische Zusammensetzung von  
Braukohlenflugasche  
Essen 1995
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Zement>
- [7] <http://cafista.de/content/bifament>
- [8] Laborversuch-Ermittlung von Bodenkenngößen  
Dirk Augner  
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
- [9] Laborversuch-Ermittlung von Bodenkenngößen  
Dirk Augner  
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
- [10] Laborversuch-Ermittlung von Bodenkenngößen  
Dirk Augner  
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
- [11] Erd- und Grundbautechnische Aspekte beim Bau von Logistikhallen  
Dip.- Ing.R.Biehl
- [12] Laborversuch-Ermittlung von Bodenkenngößen  
Dirk Augner

- 
- Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
- [13] Bohrkerngewinnung zur Erkundung von Baugrund und Rohstoff
- Martin Happel
- Comdrill Bohrausrüstungen GmbH
- [14] mpa- LABOR für Materialprüfung und analyse GmbH
- WWW.MPALABOR.DE
- [15] Institut für Verfahrenstechnik und Biotechnologie
- Labor Partikeltechnologie
- Prof.Dr.-Ing.W.F.Hess
- Dipl.-Ing.L.Tretbar
- [16] DIN 18127 Proctorversuch; Ausgabedatum: 2012-09
- [17] DIN18130-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben;
- Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Teil 1:
- Laborversuch
- [18] DIN18130-1 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben;
- Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Teil 1:
- Laborversuch
- [19] <https://de.wikipedia.org/wiki/Messschraube>

# Anhang

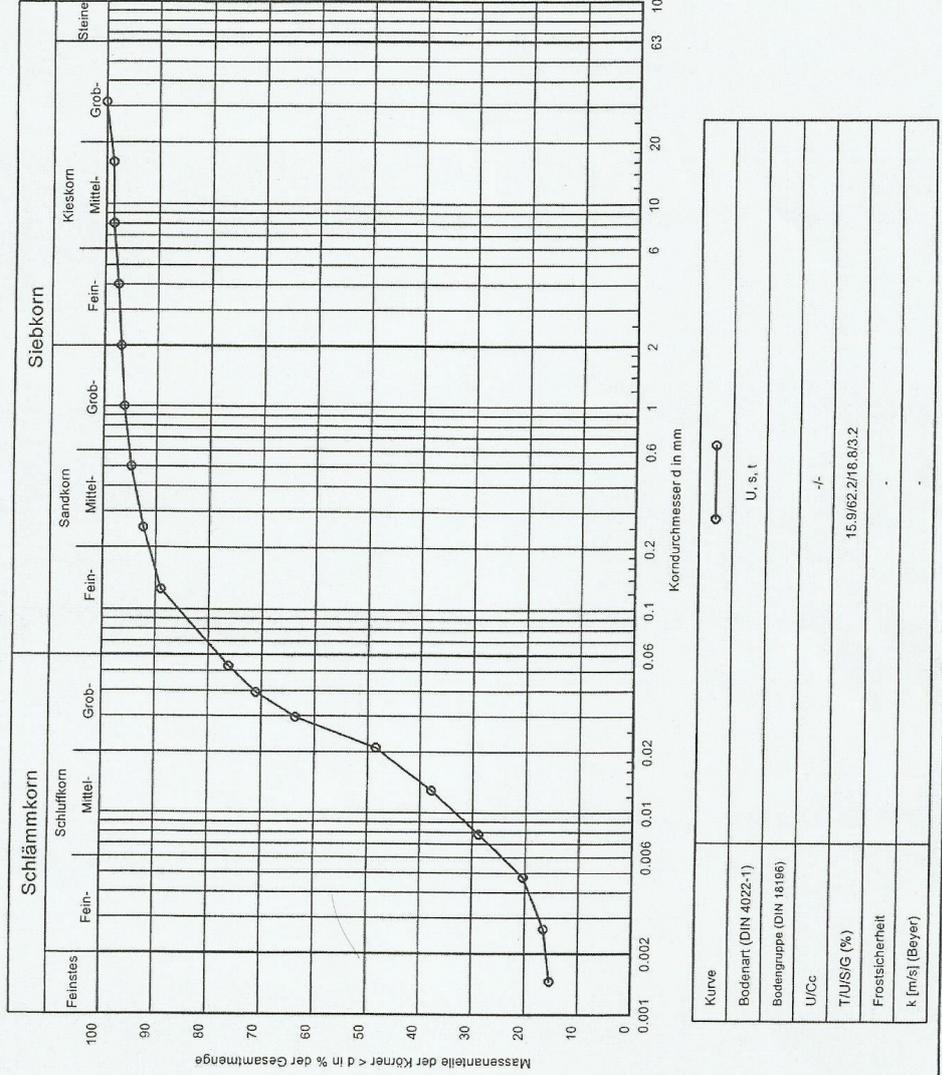
## Bodenanalyse von HF3



### Bodenanalyse von originalem Boden

Entnahmestelle: <b>1608 01BP DKYQ</b>	Tiefe: <b>Baggergut, Deichbaumaterial</b>	Entnahmedatum: <b>01.08.2016</b>	Bodenart: <b>U, s, t</b>
Prüfdatum: <b>09-2016</b>	Prüfbericht Nr.: <b>kvs_01A</b>	Labornummer: <b>36221</b>	erstellt (Kürzel): <b>klu</b>

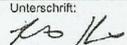
Bemerkungen: **Sanierungsabschnitt nahe Kirchfährendorf, Saale Westseite**



Kürve	U, s, t
Bodenart (DIN 4022-1)	-/-
Bodengruppe (DIN 18196)	15.9/62.2/18.8/3.2
U/Cc	
T/US/G (%)	
Frosticherheit	
k [m/s] (Beyer)	

Auftraggeber: <b>Hochschule Merseburg Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg</b>	<p>CDM Smith Consult GmbH Neue Bergstraße 13 64665 Alsbach</p>
Projekt: <b>Deichsanierung Kirchfährendorf</b>	
<b>Körnungslinie nach DIN 18 123 - 7</b>	
Projekt Nr.: <b>103904</b>	Bericht Nr.: Anlage Nr.:
geprüft (Kürzel): <b>kir</b>	Unterschrift: 



Daten der Probe	Labor Nr.		36221					
	Probe Nr.		1608 01BP DKYQ					
	Entnahmetiefe (m)		Baggergut					
	gest. (g) / ungest.(u)		g					
	Entnahmedatum		01.08.2016					
	Bodenart		U, s, t					
	Bodengruppe		-					
Konsistenzen	Wassergehalt	w	%					
	Flie遝grenze	w <sub>L</sub>	%					
	Ausrollgrenze	w <sub>P</sub>	%					
	Schrumpfgrenze	w <sub>S</sub>	%					
	Plastizität	I <sub>p</sub>	%					
	Konsistenz	I <sub>c</sub>	-					
Kennziffern	Feuchtdichte	ρ	t/m <sup>3</sup>					
	Trockendichte	ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>					
	Korndichte	ρ <sub>s</sub>	t/m <sup>3</sup>					
	Porenanteil	n	-					
	Porenzahl	e	-					
	Sättigungszahl	S <sub>r</sub>	-					
	Luftporenraum	n <sub>a</sub>	-					
Scherfestigkeit	Rahmenscherversuch							
	schnell	φ <sub>u</sub>	Grad					
	abgeschert	c <sub>u</sub>	kN/m <sup>2</sup>					
	langsam	φ' <sup>i</sup>	Grad					
	abgeschert	c' <sup>i</sup>	kN/m <sup>2</sup>					
	Triaxialversuch							
	UU/CU	Reibungsw.	φ <sub>u</sub>	Grad				
		Kohäsion	c <sub>u</sub>	kN/m <sup>2</sup>				
	D	Reibungsw.	φ' <sup>i</sup>	Grad				
		Kohäsion	c' <sup>i</sup>	kN/m <sup>2</sup>				
Sonstige Kennwerte	Einaxiale Druckfestigkeit			q <sub>u</sub>	N/mm <sup>2</sup>			
	Proctordichte			ρ <sub>Pr</sub>	t/m <sup>3</sup>			
	Opt. Wassergehalt bei ρ <sub>pr</sub>			w <sub>Pr</sub>	%			
	Verdichtungsgrad			D <sub>Pr</sub>	%			
	Glühverlust			V <sub>gl</sub>	-			
	Kalkgehalt			V <sub>ca</sub>	-			
	Calcitanteil			-	-			
	T / U / S / G				%	16/62/19/3		
	Ungleichförmigkeitsz.			U	-	-		
	Wasseraufnahmefähigkeit			-	-			
	Durchlässigk.(DIN 18130)			k <sub>10</sub>	m/s			
	Versuchsdurchführung							
	Dichteste Lagerung			max ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>			
	Lockerste Lagerung			min ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>			
	Trockendichte EP			ρ <sub>Pr</sub> <sup>w</sup>	t/m <sup>3</sup>			
Wassergehalt EP			w <sub>Pr</sub> <sup>w</sup>	-				
Verdichtungsgrad EP			D <sub>Pr</sub>	%				
Auftraggeber: Hochschule Merseburg				 CDM Smith Consult GmbH Neue Bergstraße 13 64665 Alsbach				
Projekt: Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg								
Projekt: Deichsanierung Kirchköhrendorf				Projekt-Nr.: 103904 Bericht Nr.: Anlage-Nr.:				
Zusammenstellung der Versuchsergebnisse				geprüft (Kürzel): kir Unterschrift: 				

## Protokoll von Prüfkörpern

### Test-Nr 1

Bindemittel:	BFA
Wasser/Bindemittel [ $g_{\text{Wasser}}/g_{\text{BM}}$ ]	1
Sus.-Dichte [ $g/cm^3$ ]	1,47
Sus.-Menge [ $l_{\text{sus}}/l_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $g_{\text{Bindemittel}}/g_{\text{Boden}}$ ]	16%

### Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		22,08,2016	22,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1886	1854
Volumen [ $cm^3$ ]		982	901
Rohdichte [ $g/cm^3$ ]	in Mittel	1,98	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$3,96 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$3,96 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	305	
V-Vergrößerung [%]		2,2%	

### Test-Nr 2

Bindemittel:	BFA
Wasser/Bindemittel [ $g_{\text{Wasser}}/g_{\text{BM}}$ ]	0,85
Sus.-Dichte [ $g/cm^3$ ]	1,51
Sus.-Menge [ $l_{\text{sus}}/l_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $g_{\text{Bindemittel}}/g_{\text{Boden}}$ ]	16%

### Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		04,08,2016	04,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1974	1953
Volumen [ $cm^3$ ]		1104	1089
Rohdichte [ $g/cm^3$ ]	in Mittel	1,79	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$6,26 \cdot 10^{-9}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$
	in Mittel	$9,08 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	289	
V-Vergrößerung [%]		2,6%	

**Test-Nr 3**

Bindemittel:	BFA
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,7
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,60
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	18%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		04,08,2016	04,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		2205	2184
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1134	1207
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,87	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$2,28 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$
	in Mittel	$2,84 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	258	
V-Vergrößerung [%]	2,1%		

**Test-Nr 4**

Bindemittel:	BFA/Zement
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	1
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,48
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	14%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		08,08,2016	08,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		2034	1979
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1174	1026
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,83	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$4,02 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$4,02 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	384	
V-Vergrößerung [%]	2,7%		

**Test-Nr 5**

Bindemittel:	BFA/Zement
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,85
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,52
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	16%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		08,08,2016	08,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1995	2176
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1147	1195
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,78	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$2,25 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$2,25 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	353	
V-Vergrößerung [%]	2,5%		

**Test-Nr 6**

Bindemittel:	BFA/Zement
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,7
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,60
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	18%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		12,08,2016	12,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1974	2105
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1023	1196
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,85	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$2,32 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$2,32 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	293	
V-Vergrößerung [%]	2,8%		

**Test-Nr 7**

Bindemittel:	Bifament/Zement
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	1
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,48
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	14%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		12,08,2016	12,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		2103	2195
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1147	1243
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,79	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$6,63 \cdot 10^{-10}$	-----
	in Mittel	$6,63 \cdot 10^{-10}$	
Überschuss [g]	in Mittel	337	
V-Vergrößerung [%]	2,5%		

**Test-Nr 8**

Bindemittel:	Bifament/Zement
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,85
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,52
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	16%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		15,08,2016	15,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1946	1963
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1032	1076
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,85	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$1,89 \cdot 10^{-10}$	-----
	in Mittel	$1,89 \cdot 10^{-10}$	
Überschuss [g]	in Mittel	274	
V-Vergrößerung [%]	2,3%		

**Test-Nr 9**

Bindemittel:	Bifament/Zement
Wasser/Bindemittel [ $g_{\text{Wasser}}/g_{\text{BM}}$ ]	0,7
Sus.-Dichte [ $g/cm^3$ ]	1,58
Sus.-Menge [ $l_{\text{sus}}/l_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $g_{\text{Bindemittel}}/g_{\text{Boden}}$ ]	18%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		15,08,2016	15,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		2074	2179
Volumen [ $cm^3$ ]		1153	1284
Rohdichte [ $g/cm^3$ ]	in Mittel	1,75	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$1,82 \cdot 10^{-10}$	-----
	in Mittel	$1,82 \cdot 10^{-10}$	
Überschuss [g]	in Mittel	367	
V-Vergrößerung [%]		2,6%	

**Test-Nr 10**

Bindemittel:	Bifament
Wasser/Bindemittel [ $g_{\text{Wasser}}/g_{\text{BM}}$ ]	1
Sus.-Dichte [ $g/cm^3$ ]	1,44
Sus.-Menge [ $l_{\text{sus}}/l_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $g_{\text{Bindemittel}}/g_{\text{Boden}}$ ]	14%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		18,08,2016	18,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1993	2169
Volumen [ $cm^3$ ]		1037	1194
Rohdichte [ $g/cm^3$ ]	in Mittel	1,87	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$4,68 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$4,68 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	275	
V-Vergrößerung [%]		2,1%	

**Test-Nr 11**

Bindemittel:	Bifament
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,85
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,50
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	16%

**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		22,08,2016	22,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		2013	1937
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		1139	1017
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,84	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$2,88 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$2,88 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	338	
V-Vergrößerung [%]	2,3%		

**Test-Nr 12**

Bindemittel:	Bifament
Wasser/Bindemittel [ $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{g}_{\text{BM}}$ ]	0,7
Sus.-Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,55
Sus.-Menge [ $\text{l}_{\text{Sus}}/\text{l}_{\text{Boden}}$ ]	0,35
Bindemittel/Boden [ $\text{g}_{\text{Bindemittel}}/\text{g}_{\text{Boden}}$ ]	18%

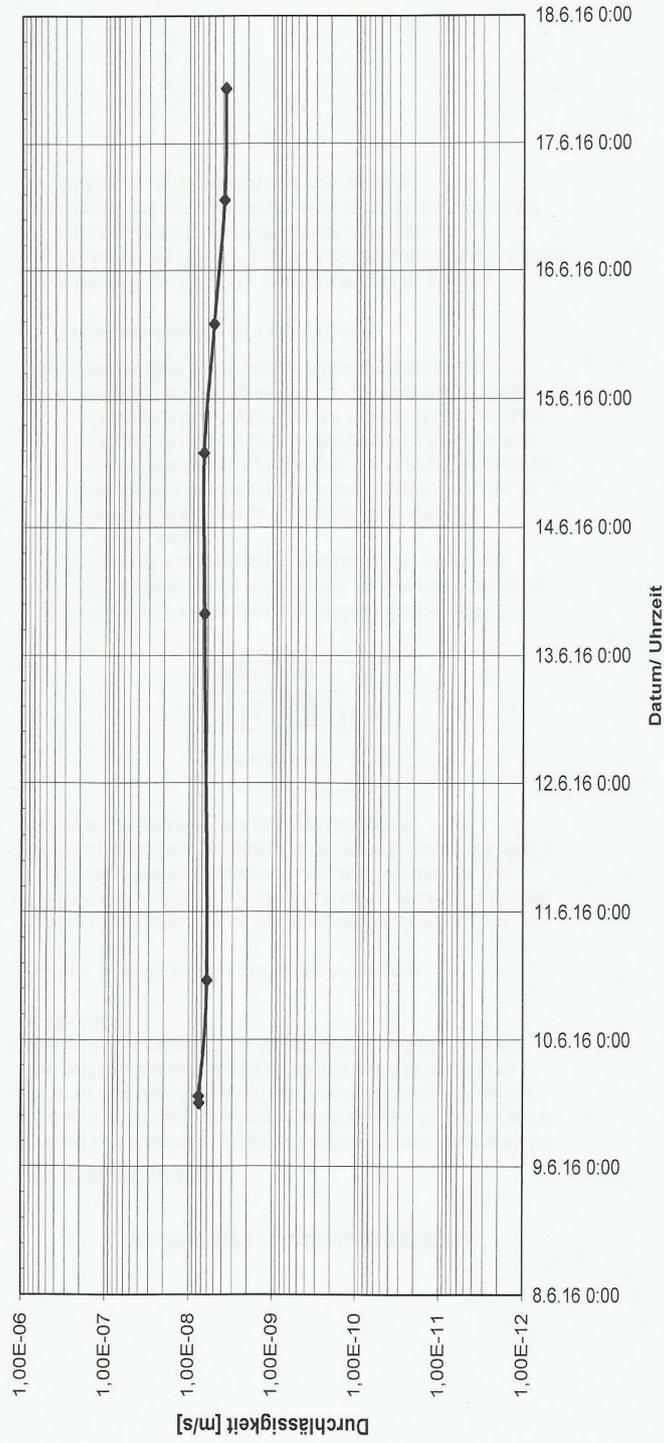
**Prüfung der Rohdichte und Wasserdurchlässigkeit von Zylindern eines Boden - Suspensionsgemisches**

Probenkennzeichnung		PK 1	PK 2
Prüfdatum		18,08,2016	18,08,2016
Prüfalter (Tagen)		28	28
Masse [g]		1946	2195
Volumen [ $\text{cm}^3$ ]		996	1293
Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	in Mittel	1,82	
Wasserdurchlässigkeit [m/s]	einzel	$3,34 \cdot 10^{-9}$	-----
	in Mittel	$3,34 \cdot 10^{-9}$	
Überschuss [g]	in Mittel	287	
V-Vergrößerung [%]	2,2%		



### Bestimmung der Durchlässigkeit bei konstantem hydraulischen Gefälle

Probenbezeichnung: Versuch 1



17.06.2016

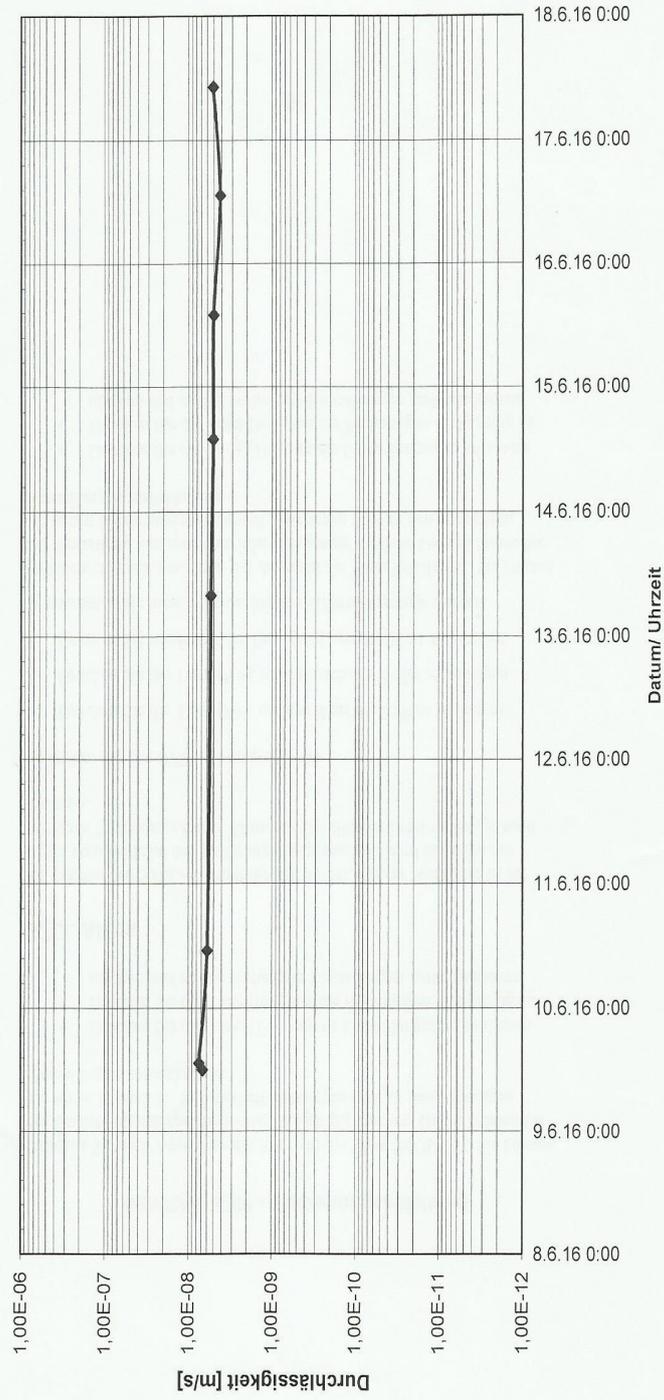
Seite 2 von 2

Erstellt von: M.Wilczek



### Bestimmung der Durchlässigkeit bei konstantem hydraulischen Gefälle

Probenbezeichnung: Versuch 2



17.06.2016

Seite 2 von 2

Erstellt von: M.Wilczek

### Ergebnisse der Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit von Suspension

Bindemittel	Probe	Verhältnis W/BM	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
BFA	1	1	1,42	1,8
	2	0,85	1,09	1,5
	3	0,7	1,26	2,4
Bifament	4	1	0,59	1,4
	5	0,85	0,69	1,8
	6	0,7	1,01	3,4
BFA/Zement	7	1	1,81	8,7
	8	0,85	3,06	9,8
	9	0,7	1,96	13,3
Bifament/Zement	10	1	1,98	10,2
	11	0,85	3,16	11,4
	12	0,7	2,31	14,7