

Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes von Klärschlammkompost

Paula Penckert

Beiträge zu Abfallwirtschaft / Altlasten

Band 110

Dissertation

Beiträge zu Abfallwirtschaft / Altlasten

Scientific series of the Institute of Waste Management and Circular Economy
Technische Universität Dresden

Vol. 110 Dissertation

**Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes
von Klärschlammkompost**

Publisher **Eigenverlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V.**

Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V.

Pratzschwitzer Straße 15

01796 Pirna

Deutschland

Print **reprogress GmbH**

Chemnitzer Straße 46b

01187 Dresden

Deutschland

© All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means without the prior written permission of the publisher, nor be otherwise circulated in any form of binding or cover other than that in which it is published and without a similar condition being imposed on the subsequent purchaser.

Dissertation

**Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes
von Klärschlammkompost**

Paula Penckert

Editor

Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack

Beiträge zu Abfallwirtschaft / Altlasten

Scientific series of the Institute of Waste Management and Circular Economy
Technische Universität Dresden

Vol. 110

ISBN 978-3-947923-03-8

2021

Erste Ausgabe

Technische Universität Dresden

Fakultät Umweltwissenschaften

Thema der Dissertation:

Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes von Klärschlammkompost

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr. -Ing.)

Vorgelegt von:

Frau Paula Penckert

Geburtsdatum: 22.07.1991

Geburtsort: Dresden

Gutachter	Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack, Technische Universität Dresden/Fakultät Umweltwissenschaften/Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Lale Andreas, Luleå University of Technology/Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering/ Division Geosciences and Environmental Engineering, Schweden
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke, Technische Universität Braunschweig/Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften/Leichtweiß-Institut für Wasserbau/Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Datum der Abgabe: 05. März 2020

Tag der Verteidigung: 06. November 2020

Übereinstimmungserklärung

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes von Klärschlammkompost“

wird hiermit bestätigt.

Åsa (Schweden), den 28.02.2020

.....

Unterschrift (Paula Penckert)

Abstract

Durch die Novellierung der AbfKlärV im Jahr 2017 wurde die bodenbezogene Nutzung von Klärschlamm stark eingeschränkt. Dadurch rückt dessen thermische Verwertung zunehmend in den Vordergrund, wobei durch eine Mitverbrennung Nährstoffe verloren gehen. Diese Arbeit betrachtet alternative Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung, wie den Einsatz als Rekultivierungsmaterial auf Deponien in Form von Komposten. In die Arbeit fließt die Betrachtung von Pilzkultursubstraten als weiterer Zuschlagstoff ein, da diese aufgrund von Hygienisierungsvorschriften ebenfalls meist thermisch verwertet werden und auch hier wichtige Nährstoffe verloren gehen. Weiterhin wird untersucht, ob Deponieflächen generell für den Anbau von Bewuchs geeignet sind und insbesondere, ob auf derartig rekultivierten Flächen Rohstoffgewinnung aus Energiepflanzen möglich ist. Dafür wurden verschiedene Materialmischungen hergestellt und in Pflanzversuchen unter Laborbedingungen sowie im Freiland und in geotechnischen Versuchen auf ihre Eignung überprüft. Es wird gezeigt, dass Deponien ein Flächenpotential darstellen und diese auch für Bewuchs geeignet sind. Auch eignen sich die hergestellten Materialmischungen grundsätzlich als Rekultivierungsmaterial. Diese müssen aber in zukünftigen Versuchen in Hinsicht auf die Einhaltung von Grenzwerten und bspw. deren Wasserdurchlässigkeiten weiter angepasst werden, bevor die Mischungen produktiv im großen Maßstab einsetzbar sind.

Schlagwörter: Klärschlamm, Stoffliche Verwertung, Rekultivierung, Deponieersatzbaustoffe, Kurzumtriebsplantagen, KUP

Due to the amendment of the German sewage sludge regulation the soil-related usage of sewage sludge is restricted. Thereby, thermal treatment is increasingly coming to the fore, with nutrients being lost through co-incineration. This thesis considers alternative treatments, e.g. material recycling in form of composts as reclamation materials for landfills. It considers mushroom substrates as a further additive, since due to hygiene regulations these are commonly incinerated and therefore important nutrients are also lost. Furthermore, it is examined whether landfills are suitable for crop cultivation, in particular, for energy crops. Different material mixtures were produced, and their suitability was tested in plant trials under laboratory conditions as well as in field trials and, also in geotechnical tests. It is shown that landfills represent potential areas for energy crop plantation. The material mixtures produced are also basically suitable as recultivation material. However, they will have to be adjusted further in future experiments with regard to compliance of statutory thresholds and, for example, their permeability, before these mixtures can be used productively.

Keywords: sewage sludge, recycling, reclamation, alternative building materials, short-rotation coppices

Danksagung

Mein Dank geht an...

Prof. Dr. -Ing. habil. Christina Dornack, Dr. -Ing. Axel Zentner, Ines Friederich, Martin Penckert, Silvio Gesellmann, Anne Geißler, Roman Maletz, Cornelia Heinz, Jacqueline Rohde, Martina Bannack, Dr. -Ing. Christoph Wunsch, Dr.rer.nat. Katrin Gebauer, Dr. Jörg Andersch, Claudyn Kieszun, Marc Lincke, Natalie Rangno, René Rüger, Marie Geißler und Lutz Hohlfeld.

Gewidmet allen starken Frauen

„Feminist: a person who believes in the social, political and economic equality of the sexes.“

Chiamamanda Ngozi Adichie

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Zielstellung	3
2	STAND DES WISSENS	4
2.1	Klärschlamm	4
2.1.1	Gesetzliche Anforderungen	5
2.1.1.1	Klärschlammverordnung (AbfKlärV)	6
2.1.1.2	Abfalleigenschaft von Klärschlammkompost	7
2.1.2	Verwertungsmöglichkeiten	9
2.1.2.1	Thermische Verwertung	11
2.1.2.2	Phosphorrückgewinnung	12
2.1.2.3	Stoffliche Verwertung - Rekultivierungsmaterial	13
2.2	Rekultivierung von Deponien	16
2.2.1	Deponiephasen	16
2.2.2	Zahl der Deponien in Deutschland und Sachsen	17
2.2.3	Oberflächenabdichtungssystem	20
2.2.4	Rekultivierungsschicht	21
2.2.4.1	Gesetzliche Vorgaben	21
2.2.4.2	Aufbau	22
2.2.4.3	Anforderungen	22
2.2.4.4	Bewirtschaftung	25
2.2.5	Deponieersatzbaustoffe	26
2.2.5.1	Gesetzliche Vorgaben	26
2.2.5.2	Materialien	27
2.2.6	Bewuchs	28
2.2.6.1	Unverholzte Biomasse	28
2.2.6.2	Verholzte Biomasse - Kurzumtriebsplantagen	28
2.2.6.3	Praxisbeispiel Deponie Wetro	30
2.2.7	Nachsorge	31
2.3	Geotechnische Materialprüfung	32
2.3.1	Zustandsgrenzen	32
2.3.2	Proctordichte	33
2.3.3	Durchlässigkeit	33
2.3.4	Scherfestigkeit	34

3	MATERIAL UND METHODEN	35
3.1	Material	35
3.1.1	Materialmischungen 2018	35
3.1.2	Materialmischungen 2019	36
3.1.3	Pappelstecklinge.....	38
3.1.4	Böden Deponie Wetro	39
3.2	Methoden.....	40
3.2.1	Kompostierung.....	40
3.2.1.1	Erster Ansatz	40
3.2.1.2	Zweiter Ansatz	41
3.2.1.3	Dritter Ansatz	42
3.2.2	Pflanzversuche 2018	43
3.2.3	Pflanzversuche 2019	45
3.2.4	Geotechnische Materialprüfung.....	45
3.2.5	Freilandversuche Deponie Cröbern.....	45
3.2.6	Freilandversuche Deponie Wetro	46
4	ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG.....	48
4.1	Instrumente zur Datenbewertung	48
4.1.1	IBM SPSS.....	48
4.1.2	Microsoft Excel	48
4.1.3	Boniturschemata.....	48
4.2	Kompostierung	49
4.2.1	Erster Ansatz	49
4.2.2	Zweiter Ansatz	50
4.2.3	Dritter Ansatz	52
4.3	Pflanzversuche 2018	54
4.3.1	Materialmischungen	54
4.3.2	Pflanzenwachstum.....	58
4.3.2.1	Nähr- und Schadstoffe in Böden und Blattmassen	64
4.4	Pflanzversuche 2019	70
4.4.1	Materialmischungen	71
4.4.2	Pflanzenwachstum.....	74
4.4.2.1	Nähr- und Schadstoffe in Böden und Blattmassen	81

4.5	Geotechnische Materialprüfung 2018	86
4.5.1	Zustandsgrenzen	86
4.5.2	Proctordichte.....	87
4.5.3	Scherfestigkeit	88
4.5.4	Durchlässigkeit	89
4.6	Geotechnische Materialprüfung 2019	90
4.6.1	Zustandsgrenzen	90
4.6.2	Proctordichte.....	91
4.6.3	Scherfestigkeit	91
4.6.4	Durchlässigkeit	92
4.7	Freilandversuche Cröbern	92
4.8	Freilandversuche Wetro	95
4.9	Berechnung zum Klärschlammverbrauch	100
4.10	Verworfenen Ansätze	101
4.11	Fehlerbetrachtung	101
5	ZUSAMMENFASSUNG	104
6	AUSBLICK	108
7	LITERATURVERZEICHNIS	XIII
8	ANHANG	I
9	ERKLÄRUNG	XLIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung Klärschlammengen in Dtl. nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.58).....	4
Abbildung 2: Schlammanfall in einer Kläranlage nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.8).....	5
Abbildung 3: Verwertungswege für Klärschlämme ab 01.2023 nach (BORMANN ET AL. 2017, S.30).....	7
Abbildung 4: Verwertungsmöglichkeiten für Klärschlamm nach (BORMANN ET AL. 2017, S.31).....	9
Abbildung 5: Klärschlamm Entsorgung in Deutschland nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.60–61).....	10
Abbildung 6: Klärschlammverwertung (Bundesland) 2016 nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.57).....	10
Abbildung 7: Kläranlagen und Monoverbrennungsanlagen in Deutschland, Stand 2017 (EUWID 2017, S.26).....	12
Abbildung 8: Phosphor-Einsatzmengen in Deutschland nach (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL 2012, S.10).....	13
Abbildung 9: Phasen in der Kompostierung nach (KÖRNER 2008, S.6).....	14
Abbildung 10: Zeitphasen im Deponiebetrieb nach (BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2018).....	17
Abbildung 11: Betriebsstatus der sächsischen Deponien, Stand 2018 nach (GEIßLER 2019).....	19
Abbildung 12: Verdunstungsleistung & Absickerung durch Bewuchs (WATTENDORF 2001, S.2).....	23
Abbildung 13: Veränderung Bodenoberfläche durch Bodenbearbeitung (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.212).....	25
Abbildung 14: Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge nach (MÜLLER 2019).....	31
Abbildung 15: Zustandsformen (SCHMIDT ET AL. 2017, S.49).....	32
Abbildung 16: Durchlässigkeitsversuch mit Standrohr (DIN. Nr. 18130-1 1998).....	33
Abbildung 17: Schergerade (DIN. Nr. 18137-3 2002).....	34
Abbildung 18: Mischvorgänge zur Herstellung der Materialmischungen, 2018.....	35
Abbildung 19: Mischvorgänge zur Herstellung der Materialmischungen, 2019.....	37
Abbildung 20: Testfeld 1 (l. o.), 2 (r. o), 3 (l. u.),4 (r. u.) Deponie Wetro (KOSTELETZKY 2015, S.2–3).....	39
Abbildung 21: Komposter A bis D (von l. o. nach r. u.).....	41
Abbildung 22: Pflanzen-Boniturschema nach (MÜLLER 2013, S.23).....	44
Abbildung 23: Wurzel-Boniturschema (MÜLLER 2013, S.23).....	44
Abbildung 24: Lage der Testfelder Deponie Cröbern.....	46
Abbildung 25: Versuchsfelder auf der Deponie Wetro (FRIEDERICH 2015).....	47
Abbildung 26: Temperaturverlauf im Kompostinneren 1. Ansatz (Mittelwerte drei Messstellen).....	49
Abbildung 27: Temperaturverlauf im Kompostinneren 2. Ansatz.....	51
Abbildung 28: Temperaturverlauf im Kompostinneren 3. Ansatz.....	53
Abbildung 29: Pflanzen am 25.07.2018.....	58
Abbildung 30: Bonitur 29.08.18, Töpfe 11-20.....	59
Abbildung 31: Wurzelbonitur 03.09.18, Töpfe 11-20.....	60
Abbildung 32: Wurzel der Kategorie 4 und 6 (links, rechts).....	60
Abbildung 33: Sprosszahl über die Zeit, Boden AFB.....	61
Abbildung 34: Blattmasse in g TS, Mittelwerte (n=10 je Boden), 2018.....	61
Abbildung 35: Längster Spross in cm, Mittelwerte (n=10 je Boden), 2018.....	62
Abbildung 36: Korrelation zwischen Blattmasse & Sprosslänge 2018.....	64
Abbildung 37: Korrelation zwischen längstem Spross & Blattmasse 2018.....	64
Abbildung 38: Pflanzen 19.06.19 (RM08 links bis RM00 rechts).....	75
Abbildung 39: Bonitur 15.07.2019, Töpfe 11-20.....	76
Abbildung 40: Wurzelbonitur 23.07.19; Töpfe 11-20.....	76
Abbildung 41: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM05.....	77

Abbildung 42: Blattmasse in g TS, 2019 (Mittelwerte)	78
Abbildung 43: Längster Spross in cm, 2019 (Mittelwerte).....	78
Abbildung 44: Korrelation zwischen Blattmasse & Sprosszahl 2019.....	80
Abbildung 45: Korrelation zwischen längstem Spross und Blattmasse 2019.....	80
Abbildung 46: Plastizitätsbereich Boden KSK c.....	87
Abbildung 47: Plastizitätsbereich Boden RM02	90
Abbildung 48: Lage der beprobten Pflanzen Deponie Cröbern	93
Abbildung 49: Pflanze Nummer 13, Juli bis September 2019 (Fotos: R. Rüger)	94
Abbildung 50: Testfeld Deponie Cröbern 08.2019 (Foto: R. Rüger)	94
Abbildung 51: Mittlerer Höhenzuwachs 2016 bis 2019, Deponie Wetro	95
Abbildung 52: Höhenwachstum Hundsrose 2016 bis 2019, Deponie Wetro	95
Abbildung 53: Höhenwachstum Schlehe 2016 bis 2019, Deponie Wetro.....	96
Abbildung 54: Höhenwachstum Eibe 2016 bis 2019, Deponie Wetro.....	97
Abbildung 55: Höhenwachstum Esche 2016 bis 2019, Deponie Wetro	97
Abbildung 56: Höhenwachstum Kiefer 2016 bis 2019, Deponie Wetro	98
Abbildung 57: Eibe, Esche, Hundsrose, Kiefer und Schlehe (v.l.n.r.) 2019, Deponie Wetro	98
Abbildung 58: Ginsterwachstum 2019, Deponie Wetro	99
Abbildung 59: Mittlerer Dickenzuwachs 2016 bis 2019, Deponie Wetro.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gehalte an Nähr- und Schadstoffen in Klärschlamm in mg/g TS (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.494; UMWELTBUNDESAMT 2018, S.19; STATISTISCHES BUNDESAMT & DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 STATISTIK 2015, S.49).....	5
Tabelle 2: Phosphor-Gehalt in verschiedenen Abfällen nach (MONTAG ET AL. 2013, S.9)	12
Tabelle 3: Deponieanzahl nach Klassen, Deutschland Stand 2016 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019, S.58).....	17
Tabelle 4: Deponien nach Ländern, Stand 2016 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019, S.58).....	18
Tabelle 5: Sächsische Deponien in Nachsorge, Stand 2018 (FRIEDERICH 2018)	20
Tabelle 6: Durchwurzelungstiefen (BERNSDORF & LIEMEN 2009, S.3).....	23
Tabelle 7: Möglichkeiten des Anbaus von Energiepflanzen nach (FRICKE ET AL. 2005, S.53)	28
Tabelle 8: Durchlässigkeitsbeiwerte nach (DIN. Nr. 18130-1 1998; KOLYMBAS 2019, S.50).....	34
Tabelle 9: Mischverhältnisse Kompostmiete 1 bis 3, 2018	36
Tabelle 10: Mischverhältnisse Mischung 1 bis 3, 2019.....	37
Tabelle 11: Materialmischungen Pflanzversuche, 2019	38
Tabelle 12: Wassergehalt (WG), oTS und TOC, 1. Ansatz.....	50
Tabelle 13: Wassergehalt (WG), oTS, CSB, TOC, 2. Ansatz	52
Tabelle 14: C/N-Verhältnisse, 2. Ansatz.....	52
Tabelle 15: Wassergehalt (WG), oTS, CSB, TOC, 3. Ansatz	54
Tabelle 16: C/N-Verhältnisse, 3. Ansatz.....	54
Tabelle 17: Wassergehalt der Materialmischungen, 2018.....	55
Tabelle 18: oTS (%) und C/N-Verhältnis zu Beginn und Ende der Versuche, 2018	56
Tabelle 19: TOC und Klassifizierung Humusgehalt 2018 nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.112)	56
Tabelle 20: Nutzbare Feldkapazität in [mm/m], 2018	57
Tabelle 21: Einbauanalytik DepV, 2018.....	57
Tabelle 22: Kallusbildung Beginn und Ende, 2018, n=10	62
Tabelle 23: Durchschnittliche Zunahme Sprosslänge, 2018.....	63
Tabelle 24: Analysen der Bodenmischungen und Blätter 2018	67
Tabelle 25: Vgl. kritischer Schadstoffkonzentrationen im Boden nach (SCHUBERT 2006, S.212).....	70
Tabelle 26: Wassergehalt (WG) der Materialmischungen, 2019	71
Tabelle 27: oTS (%) und C/N-Verhältnisse der Materialmischungen zu Beginn und Ende, 2019.....	72
Tabelle 28: TOC- und Humusgehalt 2019 nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.112)	72
Tabelle 29: Nutzbare Feldkapazität [mm/m] 2019	73
Tabelle 30: Eingangsanalytik Materialmischungen nach DepV, 2019	74
Tabelle 31: Abgestorbene Pflanzen Versuchende 2019 (n=10 zu Beginn)	77
Tabelle 32: Kallusbildung Beginn und Ende, 2019	79
Tabelle 33: Zunahme Sprosslänge, 2019.....	79
Tabelle 34: Analyse der Böden und Blätter 2019	82
Tabelle 35: Vgl. kritischer Schadstoffkonzentrationen im Boden nach (SCHUBERT 2006, S.212).....	85
Tabelle 36: I_c der Bodenproben, 2018	87
Tabelle 37: Scherparameter, 2018	88
Tabelle 38: Durchlässigkeitsbeiwerte bei 0,2 bis 0,8 bar, 2018	89
Tabelle 39: Durchlässigkeitsbeiwerte bei 0,1 bar, 2018	89
Tabelle 40: I_c der Böden, 2019	90
Tabelle 41: Scherparameter, 2019	91

Tabelle 42: Durchlässigkeitswerte bei 0,1 bar, 2019	92
Tabelle 43: Höhenwachstum der Pflanzen Deponie Cröbern in cm	94
Tabelle 44: Dickenwachstum (Durchmesser Haupttrieb) der Pflanzen Deponie Cröbern in cm	94
Tabelle 45: Anzahl ersetzter Eiben pro Testfeld 2017, Deponie Wetro	96
Tabelle 46: Berechnung Klärschlammverbrauch Deponieabdeckung	100
Tabelle 47: Verworfenen Ansätze.....	101

Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AFB	Abraumförderbrücken-Material
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost
BF	Bodenfräse
DepV	Deponieverordnung
DüV	Düngeverordnung
DümV	Düngemittelverordnung
DünG	Düngegesetz
eLF	Elektrische Leitfähigkeit
EW	Einwohnerwerte
GDA	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
IAK	Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
lc	Konsistenzzahl
i.V.m.	in Verbindung mit
KSK	Klärschlammkompost
KSK c	Klärschlammkompost + Champignonsubstrat + AFB Material
KSK cf	Klärschlammkompost + frisches Champignonsubstrat + AFB Material
KSK kf	Klärschlammkompost + frisches Kräuterseitlingssubstrat + AFB Material
KUP	Kurzumtriebsplantage(n)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAV	Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH
l.o.	Links oben
l.u.	Links unten
MS	Mischschaufel Bagger
MVA	Müllverbrennungsanlage
nFK	Nutzbare Feldkapazität (Bereich zwischen Welkepunkt und Feldkapazität, in dem die Pflanze Wasser entnehmen kann)
oTS	Organische Trockensubstanz
RB	Regierungsbezirk
RM00	100% AFB Material
RM02	66% AFB Material + 33% Klärschlammkompost mit Pilzsubstrat
RM03	66% AFB Material + 33% Frischkompost mit Pilzsubstrat
RM05	80% AFB Material + 20% Klärschlammkompost mit Pilzsubstrat
RM08	80% AFB Material + 20% Klärschlammkompost
r.o.	Rechts oben
r.u.	Rechts unten
T1-4	Testfelder 1 bis 4
TM bzw. TS	Trockenmasse bzw. Trockensubstanz
TOC	Total organic carbon
Vol.WG	Volumetrischer Wassergehalt (Gesamtvolumen der flüssigen Phase bezogen auf das Lagerungsvolumens)

1 Einleitung

Die Arbeit entstand in einem Zeitraum, in welchem nachhaltige Ressourcennutzung zu einem zentralen gesamtgesellschaftlichen Thema wurde und auch in der Populärwissenschaft angekommen ist. (GREENPEACE MAGAZIN 2019, S.48–49) Im Lichte der allgemeinen Diskussion über den Umgang mit vorhandenen Ressourcen betrachtet diese Arbeit vier dieser Ressourcen im Besonderen. Im Zentrum steht Klärschlamm, welcher bisher zu großen Teilen Anwendung als Düngemittel auf den Feldern der Republik fand, seit Novellierung der AbfKlärV aber nun eines anderen Einsatzzweckes bedarf. Neben diesem wurden Reste aus der Speisepilzproduktion sowie Böden aus Tagebauen als weitere verwertbare Abfallstoffe betrachtet. Die vierte Ressource ist der Raum, den ungenutzte Deponieflächen bieten. Der Arbeit liegen zwei übergeordnete Fragen zugrunde: (1) *„Welche Alternative zur thermischen Verwertung gibt es heute für Klärschlamm, bei der im Klärschlamm gebundene Nährstoffe besser genutzt werden können?“*, und (2) *„Wie können rekultivierte Deponieflächen einem sinnvollen Zweck zugeführt werden?“*.

Mit der Novellierung der AbfKlärV im Jahr 2017 stellt sich die Frage, wie Klärschlämme weiterhin verwertet werden können. Die thermische Verwertung von Klärschlamm ist derzeit Mittel der Wahl. Nachteilig ist jedoch, dass die im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe derzeit nur bei der Monoverbrennung wirtschaftlich sinnvoll aus der Verbrennungsasche zurückgewonnen werden können. Hierzu fehlen jedoch in einigen Bundesländern ausreichend Anlagen. In der Mitverbrennung gehen die Nährstoffe hingegen verloren. (RAPF 2018, S.727; MONTAG ET AL. 2014, S.140) Eine direkte Verwendung der Nährstoffe, zum Beispiel in Form von Klärschlammkompost, ist auch nach der Novellierung der AbfKlärV für bestimmte Klärschlämme möglich und soll im Zuge dieser Arbeit untersucht werden. Bei der Verwertung von Reststoffen spielt auch die Abfallhierarchie des §6 KrWG eine zentrale Rolle. Demnach steht ein (Nährstoff-) Recycling von Abfallstoffen vor deren sonstiger, bspw. thermischer Verwertung. (KRWG. Fassung vom 04.04.2016)

Die Produktion von Biomasse auf rekultivierten Deponien rückt zunehmend in das Interesse von Deponiebetreibern und Forschung. Als geeignete Biomasse können beispielsweise schnell wachsende Baumarten, welche als Kurzumtriebsplantagen betrieben werden, gesehen werden. Rekultivierte Deponien können hier potenzielle Flächen bieten, ohne in Konkurrenz zu landwirtschaftlichen Flächen zu stehen. (REEG ET AL. 2009, S.147; WATTENDORF ET AL. 2010, S.4)

Als Energiepflanzenstandort benötigt ein Boden eine hohe Wasserspeicher- und Nährstoffverfügbarkeit. Magere Böden, wie Mineralböden aus Tagebauen, können durch den Einsatz von Klärschlammkompost durch Steigerung der Wasserhaltekapazität und Nährstoffverfügbarkeit aufgewertet werden. (KNORRE ET AL. 2017, S.186–193; HEINKELE ET AL. 2005, S.51–52) Auch in der Speisepilzproduktion fallen große Mengen Reststoffe an, da die Aufwuchssubstrate nicht wiederverwendet werden. Die Substrate werden derzeit meist thermisch verwertet, weisen jedoch gute Düngemittelleigenschaften auf. (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 2004, S.4–5) Denkbar ist, Klärschlammkompost mit abgetragenen Substraten aus der Speisepilzproduktion aufzuwerten. Dies wurde u.a. im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Die Arbeit beleuchtet im ersten Teil den aktuellen Wissensstand um den Abfallstoff Klärschlamm und die gängigen Möglichkeiten zu dessen Verwendung. Nach einer kurzen Betrachtung der thermischen Verwertung sowie anschließenden Überlegungen zur Phosphorrückgewinnung, wird die stoffliche Verwertung in den Vordergrund gestellt und bildet damit den Ausgangspunkt für die nachfolgenden Ausführungen. Neben Klärschlamm werden abgetragene Pilzkultursubstrate als weiterer zu verwertender Abfallstoff betrachtet. Für beide Stoffe wird insbesondere der Einsatz als Deponieersatzbaustoff fokussiert. Im Zuge dessen wird auch die Rekultivierung von Deponien betrachtet, da derartige Ersatzbaustoffe in der Rekultivierungsschicht von Deponien verwendet werden können. Diese Rekultivierungsflächen bieten ein hohes Potential als Pflanzenstandorte, welches unter Betrachtung der Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem, insbesondere die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht im weiteren Verlauf dargestellt wird. Eine zentrale Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit ist die grundsätzliche Machbarkeit der Nachnutzung von Deponien als Pflanzenstandorte zur Hebung des beschriebenen Potentials. Zu diesem Zwecke werden gängige Bewuchsformen beleuchtet, deren Kern Energiepflanzen in Kurzumtriebsplantagen bilden. Als Praxisbeispiel hierfür dient ein Freilandversuch auf der Deponie Wetro, auf der Pflanzversuche mit mehrjähriger Biomasse stattfinden.

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit beschreibt die über den aktuellen Wissensstand hinausgehenden Versuche, die eingesetzten Materialien und verwendeten Methoden. Dazu werden zuerst die hergestellten Materialmischungen analysiert und auf ihre Einsatzfähigkeit als Deponieersatzbaustoffe untersucht. In dem Zuge wird beschrieben, welche Materialien verwendet und in welchem Verhältnis diese gemischt wurden. Für die Pflanzversuche unter Laborbedingungen wurden Pappelstecklinge verwendet, welche im ersten Abschnitt klassifiziert werden.

Der methodische Abschnitt beginnt mit einer Beschreibung der durchgeführten Kompostversuche, deren Ergebnisse grundlegend für die später verwendeten Kompostmischungen waren. Darauf aufbauend werden Pflanzversuche vorgestellt, welche die Materialmischungen auf ihre Tauglichkeit als Pflanzsubstrat testeten. Es schließen sich geotechnische Materialprüfungen an, im Zuge derer die Mischungen auf ihren Einsatz in der Rekultivierungsschicht untersucht wurden. Abschließend werden die Freilandversuche auf den Deponien Cröbern und Wetro erläutert, welche für die Untersuchung der Langzeitwirkung von Bewuchs auf Deponien und den Materialmischungen angelegt wurden. Diese Langzeitversuche dauern zum aktuellen Zeitpunkt noch an und gehen über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinaus. Der Ausblick geht daher u.a. näher auf die Zukunft dieser Versuche ein.

Der Großteil der Daten (ausgenommen Deponie Wetro und Deponiekapazitäten) wurde im Rahmen eines Projektes, finanziert durch die Sächsische Aufbaubank, generiert.

1.1 Zielstellung

Die Arbeit soll den Einsatz von Klärschlamm als Deponieersatzbaustoff in der Rekultivierungsschicht betrachten und klären, ob diese Anwendungsform sowohl rechtlich als auch technisch möglich ist. Mit Hilfe von Pflanzversuchen soll überprüft werden, inwieweit sich Klärschlämme als Bodenverbesserer eignen.

Weiterhin soll untersucht werden, ob sich abgetragene Pilzsubstrate aus der Speisepilzproduktion als Zuschlagstoffe für Deponieersatzbaustoffe auf Klärschlammbasis eignen und ob diese deren pflanzenbauliche Eigenschaften, wie beispielsweise die Wasserhaltekapazität, positiv beeinflussen können.

Darüber hinaus soll die Frage beantwortet werden, ob sich nährstoff- und organikarme Böden aus Tagebauen durch die Zumischung von Kompost und anderen Substraten so aufwerten lassen, dass diese als Zuschlagstoff für Deponieersatzbaustoffe in der Rekultivierung eingesetzt werden können.

Zusätzlich soll geklärt werden, ob sich Deponieflächen für den Anbau von mehrjährigem Bewuchs eignen. Hierbei liegt der Fokus sowohl auf Kurzumtriebsplantagen als auch auf gängigen Busch- und Baumvegetationen.

2 Stand des Wissens

2.1 Klärschlamm

Der Reststoff Klärschlamm ist laut Klärschlammverordnung definiert als Abfall, welcher durch die geschlossene Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen entsteht. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) Die jährlich anfallende Menge Klärschlamm (Stand 2016) beträgt in den kommunalen Kläranlagen Deutschlands circa 1,8 Mio. t TS. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.5) Die Klärschlammengen sind in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken (Abbildung 1). Gründe für den Rückgang sind einerseits, dass industrielle Abwässer zunehmend einer Vorbehandlung unterzogen werden und die Klärschlammbehandlung in den Kläranlagen ausgebaut wurde. Andererseits wird die genauere Ermittlung der anfallenden Mengen als Grund genannt. (DÖRFELT 2004, S.1; STATISTISCHES BUNDESAMT & DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 STATISTIK 2015, S.48)

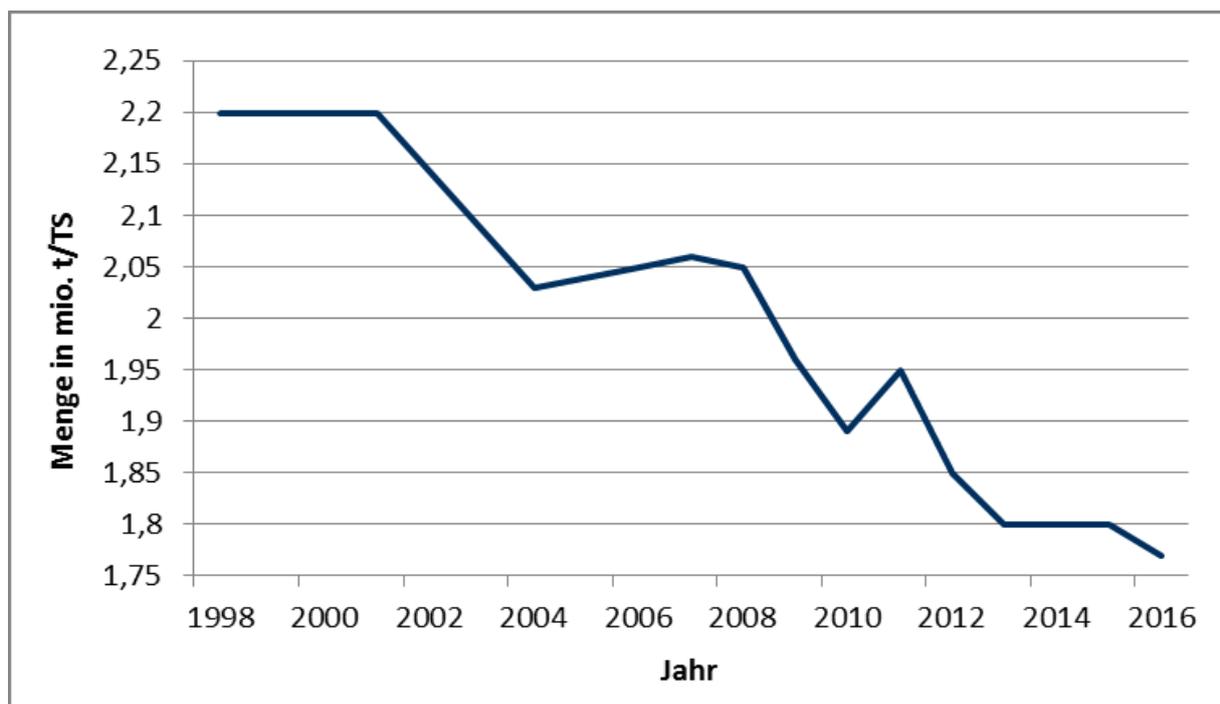


Abbildung 1: Entwicklung Klärschlammengen in Dtl. nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.58)

Klärschlamm besteht aus Wasser sowie organischen und mineralischen Stoffen, ausgenommen Rechen-, Sieb- und Sandfangrückstände. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) Klärschlamm ist darüber hinaus reich an Nährstoffen, wie zum Beispiel Phosphor und Stickstoff, enthält jedoch auch organische und anorganische Schadstoffe (PAK, PCB, Hormone, Schwermetalle), pathogene Keime und teils hohe Salzfrachten. (KACPRZAK ET AL. 2017, S.41; ALVARENGA ET AL. 2015, S.45; KNORRE ET AL. 2014, S.231–232) Nachfolgende Tabelle 1 zeigt Nährstoff- und Schadstoffgehalte von Klärschlamm.

Tabelle 1: Gehalte an Nähr- und Schadstoffen in Klärschlamm in mg/g TS (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.494; UMWELTBUNDESAMT 2018, S.19; STATISTISCHES BUNDESAMT & DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 STATISTIK 2015, S.49)

Nährstoffe	N	P	K	Mg	Ca
	35 - 50	25 - 55	2,6 - 4	5 - 9	50 - 103
Schadstoffe	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	0,046 - 0,06	0,27 - 0,38	0,02 - 0,03	0,06	0,81 - 0,95

Abbildung 2 zeigt, in welcher Behandlungsstufe im Abwasserbehandlungsprozess (Klär-)Schlamm anfällt. Der Schlamm lässt sich in folgende Kategorien einteilen: Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm, welche als Rohschlämme bezeichnet werden. Primärschlamm entsteht in der Vorklärstufe der Abwasserbehandlung und ist energiereicher als Sekundärschlamm. Sekundärschlamm fällt in der biologischen Stufe an und entsteht durch mikrobiellen Zuwachs. Nach der dritten Reinigungsstufe (Phosphatfällung) fällt Tertiärschlamm an. Tertiärschlamm fällt oft im Gemisch mit Primär- und Sekundärschlamm an, da in vielen Kläranlagen die Fällungsprozesse oft im Zusammenspiel mit einer Vorklärung oder biologischen Reinigung durchgeführt werden. (ROSENWINKEL ET AL. 2015, S.116–117; SCHREFF n.n., S.1–2)

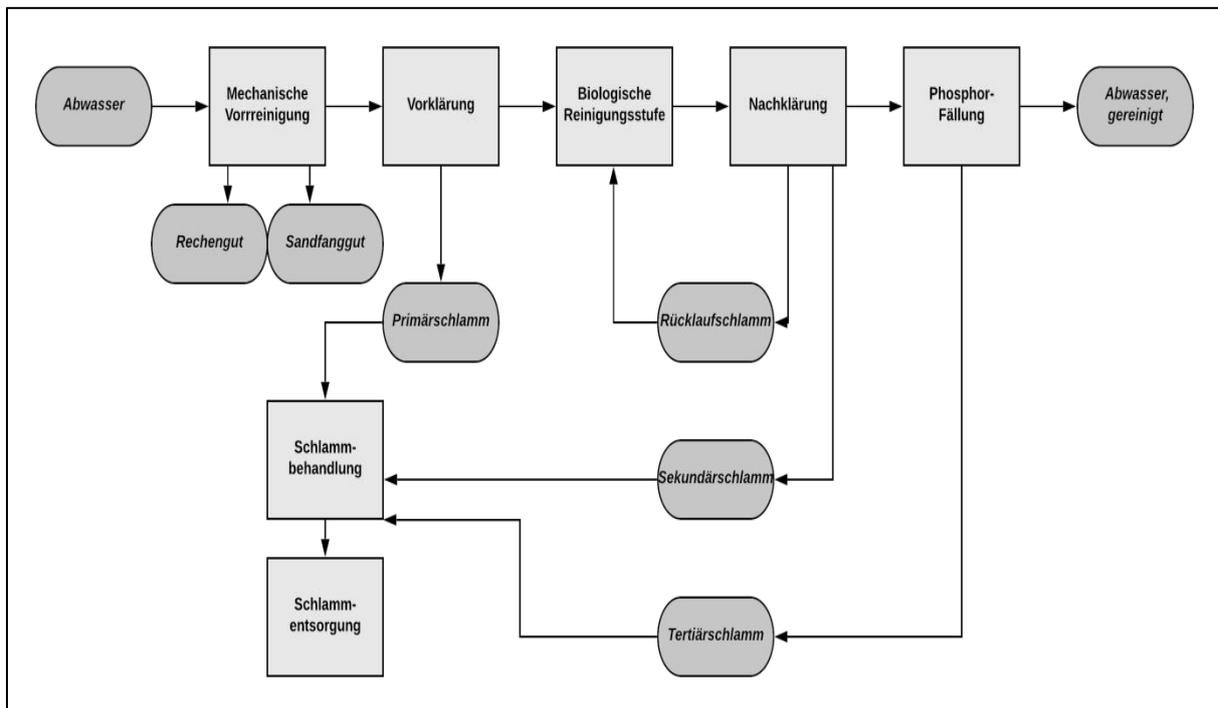


Abbildung 2: Schlammanfall in einer Kläranlage nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.8)

2.1.1 Gesetzliche Anforderungen

Bei der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendung von Klärschlamm ist vorrangig die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zu betrachten, welche nachfolgend näher beleuchtet wird. Weiterhin spielt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) bezüglich der Abfallhierarchie und der

Abfalleigenschaft eines Stoffes eine wichtige Rolle (Kapitel 2.1.1.2; Kapitel 2.1.2.3). Da der Klärschlamm als Deponieersatzbaustoff verwendet werden soll, ist ebenso die Deponieverordnung von Bedeutung, hier v.a. die vorgeschriebenen Grenzwerte für Rekultivierungsmaterialien und die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht (Kapitel 2.2.4; Kapitel 2.2.5.) Wenn Klärschlämme als Düngemittel aufgebracht werden, sind weitere Gesetze, wie das Düngegesetz und die Düngemittelverordnung zu betrachten. Da diese Verwendungsmöglichkeit im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet wird, wird auf diese Gesetze und Verordnungen nicht weiter eingegangen.

2.1.1.1 Klärschlammverordnung (AbfKlärV)

Der Anwendungsbereich der AbfKlärV ist das Ein- und Aufbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und Klärschlammkomposten zum Zweck der Verwertung auf oder in einem Boden. Eine bodenbezogene Verwertung im Sinne des Gesetzes sind die landwirtschaftliche Nutzung, der Landschaftsbau, eine Nutzung zu forstwirtschaftlichen Zwecken und eine Nutzung in Gärten. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) Mit der Novellierung der AbfKlärV im Jahr 2017 treten folgende grundlegende Änderungen in Kraft:

- 1) Der Einsatzbereich der AbfKlärV wurde auf den Landschaftsbau ausgeweitet.
- 2) Verschiedene Grenzwerte wurden verschärft (siehe Anhang 1).
- 3) Es erfolgte eine stärkere Verknüpfung mit dem Düngerecht.
- 4) Die Verordnung beendet die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen.
- 5) Die Verordnung sieht eine Phosphorrückgewinnung vor. (MIX-SPAGEL 2017, S.15–16)

Mit der novellierten AbfKlärV müssen Klärschlammherzeuger bis zum 31.12.2023 ein Konzept zur Phosphorrückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder zur sonstigen Entsorgung vorlegen. Zusätzlich muss ab 2023 der Klärschlamm auf seinen Phosphorgehalt und den Gehalt an basisch wirksamen Stoffen, welche den Phosphorgehalt beeinflussen können, untersucht werden. Im Jahr 2027 sind die o.g. Untersuchungen zu wiederholen. Ab dem 01.01.2029 dürfen Anlagenbetreiber mit einer Anlagengröße über 100.000 EW den Klärschlamm nicht mehr bodenbezogen verwerten. Ab diesem Datum tritt auch die Phosphor-Rückgewinnungspflicht in Kraft. Diese ist notwendig, wenn der Phosphorgehalt des Schlammes mindestens 20 g/kg TS beträgt. Mithilfe eines geeigneten Verfahrens muss der Phosphorgehalt um 50% gesenkt werden oder weniger als 20 g/kg TS betragen. Der Klärschlamm kann auch thermisch verwertet werden und der Phosphor aus der Asche zurückgewonnen werden. Die Rückgewinnungsquote muss mindestens 80% betragen. Für Kläranlagen bis 100.000 EW ist nach Zustimmung der Behörde auch eine bodenbezogene oder anderweitige Verwertung des Klärschlammes möglich. Eine bodenbezogene Verwertung ist allerdings nur möglich, wenn noch kein Phosphor aus dem Klärschlamm zurückgewonnen wurde. Klärschlämme aus Anlagen von mehr als 100.000 EW können einer anderweitigen

Entsorgung zugeführt werden, wenn der Phosphorgehalt unter 20 g/kg TS liegt oder keine thermische Vorbehandlung durchgeführt wird. Ab dem 01.01.2032 gelten die Fristen, welche für das Jahr 2029 beschrieben wurden, auch für Anlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 50.000 EW. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) Nach der novellierten Verordnung kann der Klärschlamm wie folgt (Abbildung 3) verwertet werden.

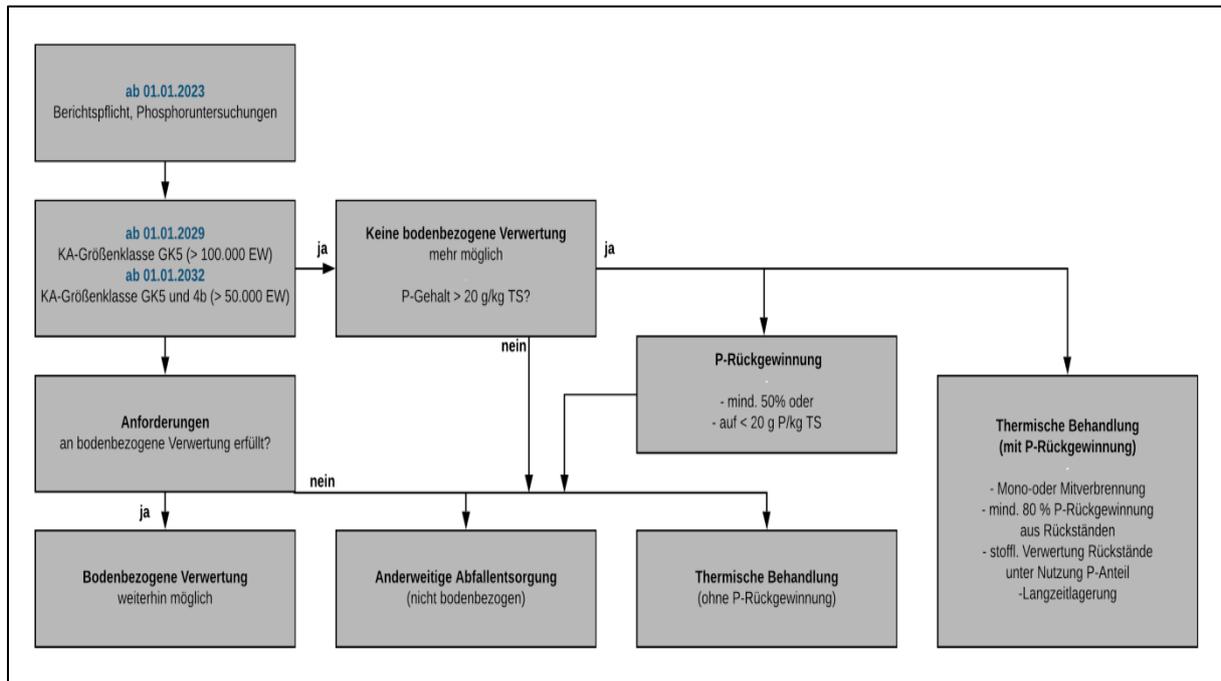


Abbildung 3: Verwertungswege für Klärschlämme ab 01.2023 nach (BORMANN ET AL. 2017, S.30)

Statistische Erhebungen haben ergeben, dass etwa 60% der in Deutschland anfallenden kommunalen Klärschlämme davon betroffen sind, dass nach der Neuordnung der AbfKlärV die bodenbezogene Verwertung für Klärschlämme aus den Anlagengrößen >100.000 EW bzw. >50.000 EW ab 2029 bzw. 2032 nicht mehr möglich ist. Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung wird die thermische Verwertung von Klärschlämmen in Kombination mit einer Phosphorrückgewinnung zunehmen und sich dieser Trend fortsetzen. (BORMANN ET AL. 2017, S.29; KIETZ 2015, S.4) In der vorliegenden Arbeit wird die Verwertung der Klärschlammrestmengen (aus Kläranlagen der Größenklasse < 50.000 EW) betrachtet, welche nicht von der Novellierung der AbfKlärV betroffen sind.

2.1.1.2 Abfalleigenschaft von Klärschlammkompost

Nach §5 I des Kreislaufwirtschaftsgesetzes endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes, nachdem dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat. Außerdem muss er folgende Beschaffenheit aufweisen: Der Stoff muss für einen bestimmten Zweck verwendet werden. Es muss einen Markt bzw. eine Nachfrage für den Stoff geben. Außerdem muss er die gesetzlichen Anforderungen und Normen erfüllen, welche für seinen Zweck bestehen.

Weiterhin darf es durch seine Verwendung nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt kommen. (KrWG. Fassung vom 04.04.2016)

Die Abfalleigenschaft von Klärschlammkompost endet nicht automatisch nach dessen Herstellung, sondern erst mit Aufbringung auf einer Fläche. Die Kompostierung als solches ist nur ein Verwertungsschritt und keine komplette Verwertung. Demnach kann die Abfalleigenschaft von Klärschlammkompost nicht mittels einer Aufbereitung bzw. Kompostierung mit weiteren Stoffen beendet werden. Ein Verwertungsverfahren ist nach §5 KrWG erst dann komplett durchlaufen, wenn sich die stofflichen Eigenschaften des Abfalls so verändert haben, dass keine Gefährdung von ihm ausgeht und die vorher vorhandenen Gefahren nicht mehr vorhanden sind. Bei der Kompostierung des Klärschlammes können auch nach dessen Kompostierung Schwermetalle oder andere Schadstoffe im Kompost enthalten sein, weswegen Klärschlammkompost nicht per se als unschädlich angesehen werden kann. So ist die Kompostierung von Klärschlamm nur eine Vorbereitung zur Verwertung. Klärschlammkompost wird wie Klärschlamm unter der Abfallschlüsselnummer 190805 eingestuft, da keine Umwandlung des Produkts, sondern nur eine Strukturänderung stattgefunden hat. (OBERVERWALTUNGSGERICHT BERLIN-BRANDENBURG 2017; BUNDESVERWALTUNGSGERICHT 2006; KrWG. Fassung vom 04.04.2016; AVV. Fassung vom 17.07.2017) Wenn der Verwertungsvorgang eines Stoffes als beendet betrachtet werden soll, muss außerdem die Substitution eines anderen Stoffes damit sichergestellt sein. (KrWG. Fassung vom 04.04.2016, §3 XXIII) Für Klärschlammkompost ist entscheidend, ob durch dessen Ausbringung Düngemittel und Bodenverbesserer vollständig ersetzt werden können. Laut Bundesverwaltungsgericht leistet dies die bloße Kompostierung nicht, da die weiterhin enthaltenen Schwermetalle und Schadstoffe gegen eine schadlose Verwertung sprechen. (BUNDESVERWALTUNGSGERICHT 2006) Für Klärschlammkompost kann eine schadlose Verwendung erst dann nachgewiesen werden, wenn der Kompost auf einem Boden eingebracht wurde, da erst dann nachgewiesen werden kann, dass das Gefährdungspotenzial nicht mehr vorhanden ist. (OBERVERWALTUNGSGERICHT BERLIN-BRANDENBURG 2017)

Bei der Vermischung von Abfallstoffen ist auch §9 des KrWG zu beachten. Demnach herrscht ein Vermischungsverbot für Abfälle zur Verwertung. Die Abfälle sind nach §7 II bis IV und nach §8 I getrennt zu halten und getrennt zu behandeln. Die Vermischung und Verdünnung mit anderen (gefährlichen) Abfällen ist verboten und nur mit Ausnahmen zulässig (§9 II). (KrWG. Fassung vom 04.04.2016)

2.1.2 Verwertungsmöglichkeiten

Abbildung 4 stellt die gängigsten Verwertungswege von Klärschlamm grafisch dar. Die einzelnen Verwertungswege werden im Verlauf der Arbeit näher betrachtet, mit Fokus auf der stofflichen Verwertung.

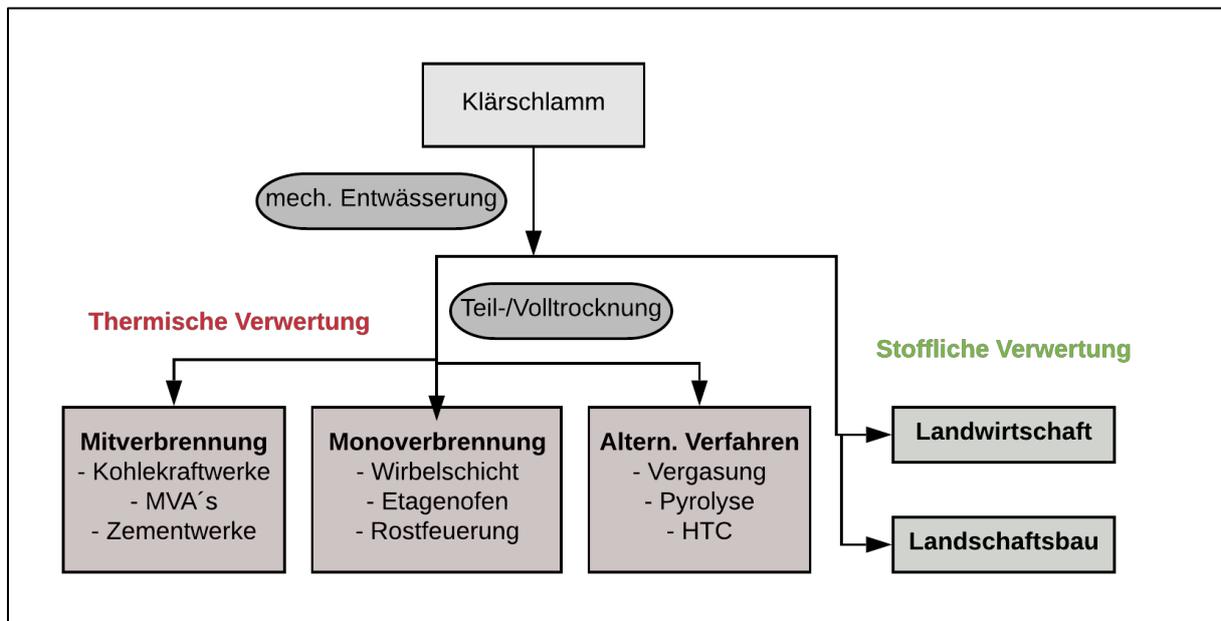


Abbildung 4: Verwertungsmöglichkeiten für Klärschlamm nach (BORMANN ET AL. 2017, S.31)

Die Abbildung 5 zeigt, wie sich die Verwertungswege für Klärschlämme in Deutschland zwischen 1998 und 2016 verändert haben. Die Klärschlamm-mengen, welche landwirtschaftlich verwertet werden, gehen in den letzten Jahren bereits leicht zurück. Der Anteil der im Landschaftsbau verwerteten Klärschlämme ist stark gesunken. Dafür steigt seit Jahren der Anteil an thermischer Verwertung. Auch in den Jahren nach 2016 wird Klärschlamm vermehrt thermisch verwertet. (DESTATIS 2018) In Deutschland unterscheidet sich die Verwertung von Klärschlamm je nach Bundesland (Abbildung 6). Speziell in Sachsen, wo die Versuche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wird der größte Anteil der Mitverbrennung zugeführt. Den zweitgrößten Teil nimmt die Verwertung im Landschaftsbau, gefolgt von der Landwirtschaft ein. In kleinen Anteilen ist die sonstige stoffliche Verwertung zu nennen, unter die bspw. die Anwendung von Kompost bei der Rekultivierung fällt.

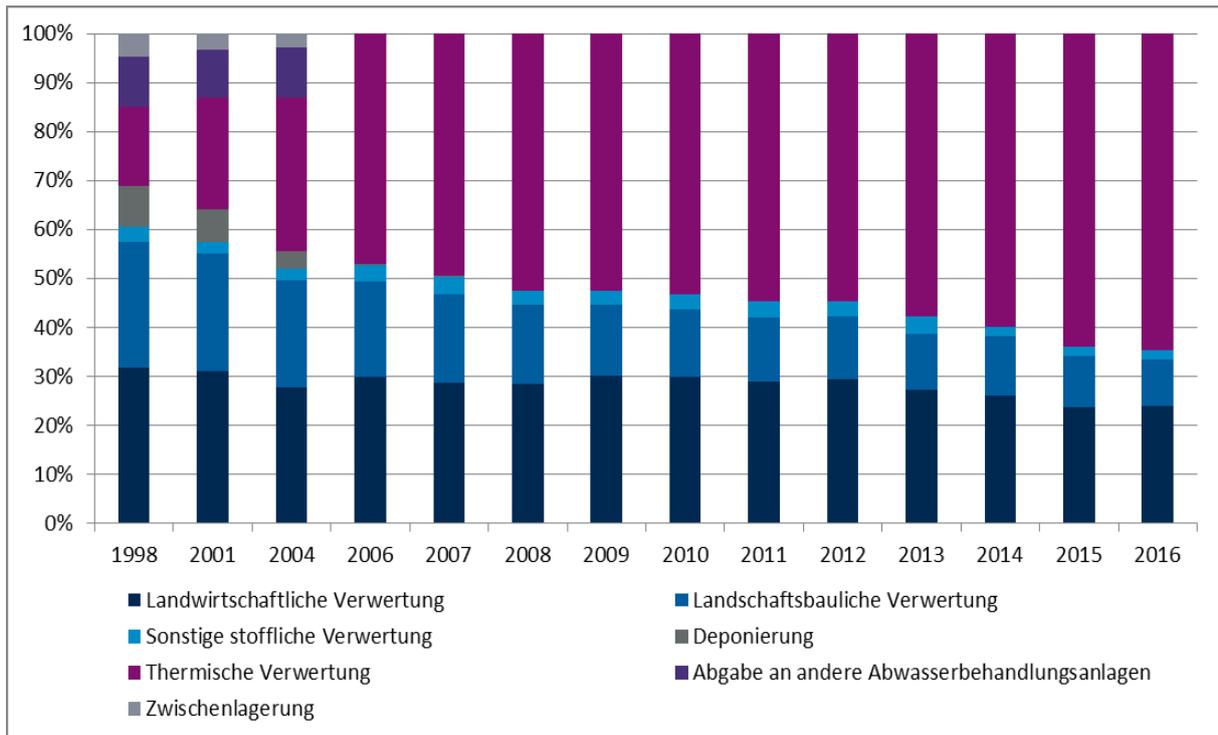


Abbildung 5: Klärschlamm entsorgung in Deutschland nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.60–61)

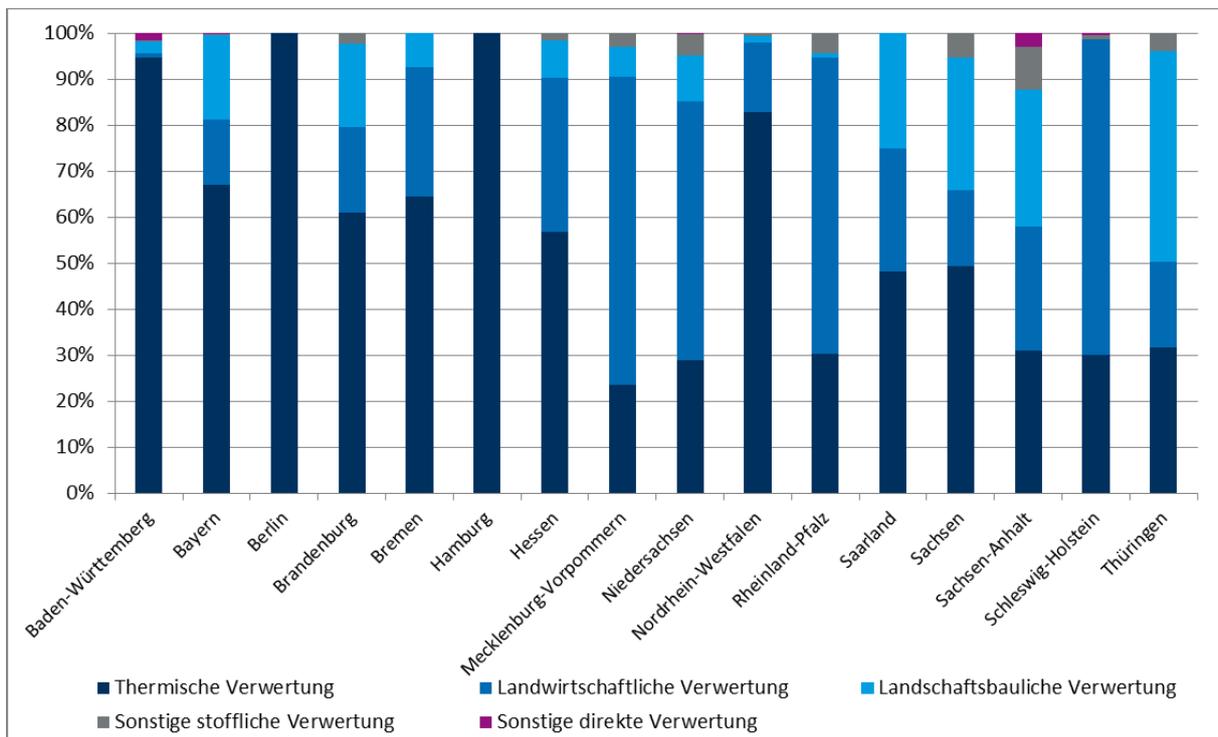


Abbildung 6: Klärschlammverwertung (Bundesland) 2016 nach (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.57)

2.1.2.1 Thermische Verwertung

Die thermische Verwertung von Klärschlämmen kann durch eine Monoverbrennung, eine Mitverbrennung oder alternative Verfahren, wie HTC-Prozesse, erfolgen. Durch die thermische Verwertung kommt es zu einer Schadstoff- und Volumenreduktion. (BORMANN ET AL. 2017, S.31) Ausschlaggebender Parameter für die thermische Verwertung von Klärschlamm ist dessen Heizwert. Der Heizwert von Klärschlamm ist abhängig vom gewählten Schlammbehandlungsverfahren. Ohne Behandlung besitzt Klärschlamm einen unteren Heizwert von 1.000 bis 2.000 kJ/kg. Ein ausgefaulter Klärschlamm mit 50% Wassergehalt besitzt Heizwerte (H_u) von 4.500 bis 5.000 kJ/kg. Der Heizwert (H_u) voll ausgefaulter, getrockneter Klärschlämme liegt zwischen 10.000 bis 12.000 kJ/kg. (GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. 2005, S.8; UMWELTBUNDESAMT 2018, S.19–32)

Im Jahr 2016 erfolgte die Entsorgung von circa 1,8 Mio. t TS Klärschlamm (Deutschland). Davon wurden etwa 2/3 thermisch verwertet. Der Rest wurde stofflich genutzt, so zum Beispiel in der Landwirtschaft ausgetragen oder kompostiert. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.56) Im Jahr 2016 wurden insgesamt circa 460.000 t TS Klärschlamm aus der öffentlichen Klärschlammbehandlung in der Monoverbrennung thermisch verwertet. Etwa 616.000 t TS wurden der Mitverbrennung zugeführt. (STATISTISCHES BUNDESAMT 2018, S.28) Abbildung 7 zeigt die Lage der Monoverbrennungsanlagen in Deutschland. Als Mitverbrenner gelten Kraftwerke, Abfallverbrennungsanlagen und Zementwerke. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.61) Der Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken nimmt stetig zu. (VDZ VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. 2009, S.10; VDZ VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. 2019, S.11) In Abfallverbrennungsanlagen werden derzeit (Stand 2018) nur 3% des Klärschlammes verbrannt. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.60) Da die Müllverbrennungsanlagen jedoch immer mehr zusätzliche Verbrennungskapazitäten besitzen, kann sich dieser Wert in den nächsten Jahren erhöhen. (MONTAG ET AL. 2014, S.160) Für die Monoverbrennung sieht die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) laut BORMANN ET AL. keine Kapazitätsengpässe. Es müssten jedoch viele Anlagen in den nächsten Jahren erneuert werden, da 42% der Anlagen älter als 30 Jahre sind. Für die Mitverbrennung sind nach Meinung von BORMANN ET AL. ausreichend Kapazitäten vorhanden. (BORMANN ET AL. 2017, S.33–34) Andere Autoren kommen jedoch zu dem Schluss, dass nach Wegfall der bodenbezogenen Verwertung Kapazitäten fehlen können. (KIETZ 2015, S.7) Die Bundesländer, welche keine Monoverbrennungsanlagen besitzen, sind: Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen. (MONTAG ET AL. 2014, S.140) Die Mitverbrennung von Klärschlamm ist ein gängiges Verfahren in Deutschland und wird im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung noch mehr in den Fokus rücken. (BORMANN ET AL. 2017, S.31–34)

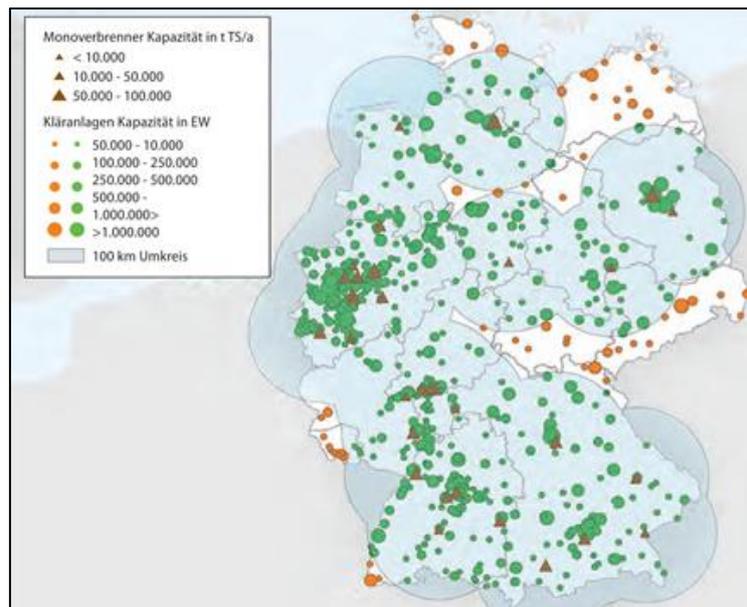


Abbildung 7: Kläranlagen und Monoverbrennungsanlagen in Deutschland, Stand 2017 (EUWID 2017, S.26)

2.1.2.2 Phosphorrückgewinnung

Der Nährstoff Phosphor ist lebensnotwendig, jedoch gehen die weltweiten Bestände zurück. Laut Expertenmeinung reichen die Reserven noch 100 bis 400 Jahre. Einige Experten meinen, dass bereits in etwa 30 Jahren die Nachfrage nach Phosphor das Angebot übersteigen kann und somit die Preise stark ansteigen werden. (SVENSKT VATTEN 2013, S.7; HEINITZ ET AL. 2013, S.9) Durch die Verknappung der Phosphorressourcen wird vermehrt über eine Rückgewinnung aus Reststoffen (Vgl. Tabelle 2) nachgedacht.

Tabelle 2: Phosphor-Gehalt in verschiedenen Abfällen nach (MONTAG ET AL. 2013, S.9)

Abfälle mit relevanten P-Gehalten	Anfallende Menge/a in 1000t	P ₂ O ₅ -Gehalt (%)	Theor. P-Potenzial (in 1000t P)
Klärschlamm (TS)	1890	4 - 7	76 - 132
davon als Asche aus der Monoverbrennung	250	6 - 10	15 - 25
Kompost (FM)	4037	0,7	27
Gärprodukte (FM)	2942	1,6 - 5,8	47 - 171
Tiermehl (TS)	400	7	28
Holzasche (TS)	210	1,5 - 4	3 - 8
Gesamtmenge P-Dünger aus Recyclingprozessen	9639	1,5 - 14	203 - 388

In Deutschland wird der Großteil des Phosphors für Düngezwecke eingesetzt (Abbildung 8).

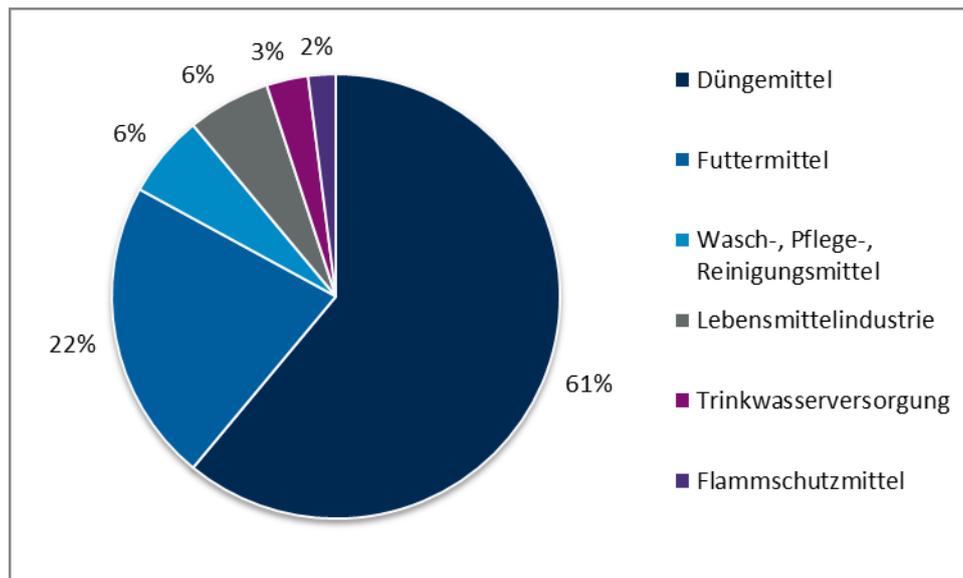


Abbildung 8: Phosphor-Einsatzmengen in Deutschland nach (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL 2012, S.10)

Klärschlamm enthält ungefähr 0,5 bis 3% Phosphor. (CARLIG ET AL. 2002, S.21; KACPRZAK ET AL. 2017, S.41) Das Phosphorrecycling aus Klärschlamm rückt zunehmend in das Interesse der Forschung. Dies liegt unter anderem an der Novellierung der AbfKlärV und der vorgeschriebenen Rückgewinnung von Phosphor. Nachteilig ist jedoch, dass die Phosphorrückgewinnung derzeit noch nicht ausreichend erforscht ist bzw. nicht im großen Maßstab durchgeführt wird. Weiterhin entstehen durch diesen Verwertungsweg höhere Kosten als bei der bodenbezogenen Verwertung. Eine weitere Möglichkeit ist die Mitverbrennung, eventuell mit einer vorgeschalteten Phosphorrückgewinnung. Generell ist die Mitverbrennung kostengünstiger als die Monoverbrennung. Zu deren Nachteil ist zu sagen, dass die Mitverbrennung (ohne vorgeschaltete Phosphorrückgewinnung) nur für Klärschlämme geeignet ist, die wenig Phosphor enthalten, da Phosphor in einer Mitverbrennung nicht wirtschaftlich aus der Asche zurückgewonnen werden kann. Außerdem liefern derzeit die vorgeschalteten Rückgewinnungsverfahren keine ausreichend hohen Rückgewinnungsraten. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.54)

2.1.2.3 Stoffliche Verwertung - Rekultivierungsmaterial

Ausgehend von der in §6 des KrWG festgelegten Abfallhierarchie steht das Recycling - hier Kompostierung von Klärschlamm und Pilzsubstraten - vor der sonstigen Verwertung, wie beispielsweise einer thermischen Verwertung. (KRWG. Fassung vom 04.04.2016) Derzeit ist die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm das kostengünstigste Verfahren. Außerdem können die enthaltenen Nährstoffe und die Organik direkt genutzt werden. Nachteilig wirken sich jedoch die Schadstoffgehalte im Klärschlamm aus. (UMWELTBUNDESAMT 2018, S.54)

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von Klärschlammkompost als Rekultivierungsmaterial betrachtet. Nach Definition in der Klärschlammverordnung entsteht Klärschlammkompost durch den aeroben Abbau organischer Substanz eines Klärschlammgemisches. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) Die nachfolgende Abbildung 9 stellt die Phasen der Kompostierung grafisch dar.

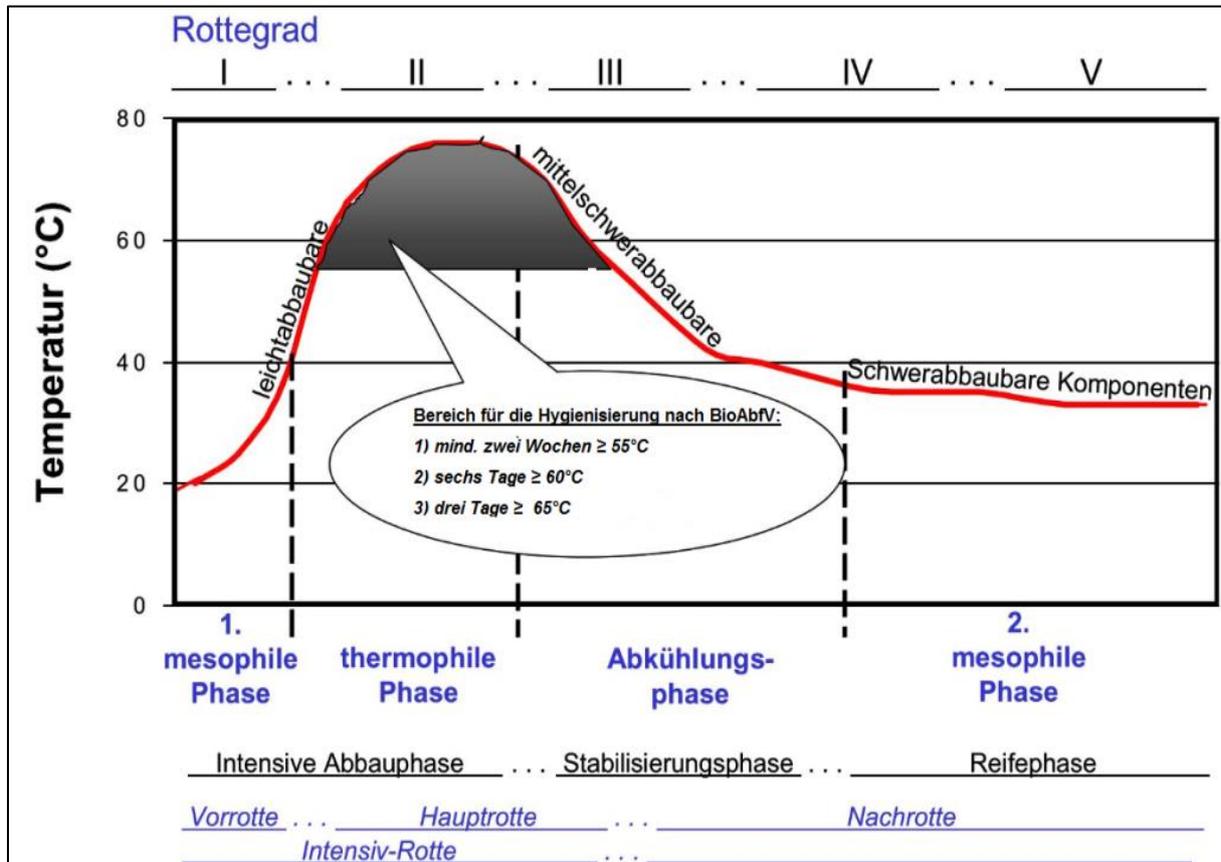


Abbildung 9: Phasen in der Kompostierung nach (KÖRNER 2008, S.6)

In der Intensivrotte wird das Rohmaterial (Rottegrad 1) noch hygienisiert und es reduziert sich stark im Volumen. Dies ist vergleichbar mit der thermophilen Phase bei der Kompostierung. Das entstehende Produkt wird als Frischkompost (Rottegrad 2 und 3) deklariert und ist vermarktungsfähig. Danach kann eine Nachrotte angeschlossen werden, welche im offenen System durchgeführt wird. Hier reift der Kompost und stabilisiert sich, sodass Rottegrad 4 bis 5 erreicht wird. Dieser Kompost wird als Fertigungskompost bezeichnet und ist hochwertiger als Frischkompost. (KÖRNER 2008, S.7) Die BioAbfV schreibt eine Hygienisierung des Kompostes vor dessen Einsatz vor. Dies wird durch hohe Temperaturen - über zwei Wochen möglichst zusammenhängend mind. 55°C, für sechs Tage 60°C oder für drei Tage 65°C - erreicht. Weiterhin darf der Kompost nur aufgebracht werden, wenn die Grenzwerte eingehalten werden. (BIOABFV. Fassung vom 04.04.2013)

KNORRE ET AL., BERNSDORF ET AL. und LIEMEN ET AL. zeigen, dass der Einsatz von Klärschlammkompost in Rekultivierungsschichten möglich ist. Sie setzen verschiedene Mischungen von Klärschlammkomposten in einer Rekultivierungsschicht ein. Die Autoren sehen den Einsatz von Klärschlammkompost geeignet dafür degradierte Flächen aufzuwerten, sowie ehemalige Halden- und Tagebauflächen landschaftlich einzugliedern. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich Klärschlammkompost als Zuschlagstoff in Rekultivierungsschichten eignet, da sich dieser positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt. Durch eine Zumischung des Klärschlammkompostes kann die Wasserhaltekapazität um bis zu 50 Vol.-% erhöht und die Nährstoffverfügbarkeit von Böden verbessert werden. Daraus resultieren höhere Biomasseerträge. Die angebaute Biomasse eignet sich darüber hinaus bspw. für eine Vergärung, da der Rohprotein- und der Rohfasergehalt gesteigert wurden. Ebenso werden die Sickerwassermengen, wie nach DepV für Rekultivierungsschichten vorgesehen, reduziert. Die Autoren konnten in ihren Versuchen zeigen, dass für fast alle Kulturen - ausgenommen Roggen - durch Anwendung von Klärschlammkompost und mit zunehmendem Gehalt (0%, 50%, 75% Zugabe) an Klärschlammkompost ein Ertragszuwachs zu verzeichnen ist. (KNORRE ET AL. 2014, S.227–231; KNORRE ET AL. 2017, S.186–189; BERNSDORF ET AL. 2009, S.3–4; LIEMEN ET AL. 2009, S.140–141)

TAUCHNITZ erforscht mittels Freiland- und Gefäßversuchen den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten unter Anwendung von Klärschlammkompost. Er gelangt zu der Schlussfolgerung, dass durch den Einsatz von Klärschlammkompost eine hohe Wasserspeicherfähigkeit und eine gute Durchwurzelbarkeit des Bodens erreicht werden kann. Dies liegt zum einen daran, dass Klärschlammkompost hohe pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte aufweist. Auch besitzt Klärschlammkompost eine hohe nutzbare Feldkapazität (hier 33 – 39 Vol.-%). Weiterhin gelangt TAUCHNITZ zu dem Schluss, dass die Vermischung von Kompost mit Boden vorteilhaft gegenüber reinen Kompostgaben ist, da Bodenmaterialien die Grobporen im Kompost schließen. Dadurch werden potenzielle Fließwege geschlossen, was sich positiv auf die Sickerwassermengen auswirkt. Außerdem steht somit mehr pflanzenverfügbares Bodenwasser zur Verfügung. (TAUCHNITZ 2006, S.3)

Ein Pflanzversuch von FAHLANDER zeigt, dass aus einer Mischung aus Klärschlammkompost und mineralischem Boden ein geeignetes Substrat für Pflanzen entsteht. Dies resultierte in einem positiven Pflanzenwachstum. Die Pflanzen nahmen trotz erhöhter Zink- und Kupfergehalte im Boden diese Schwermetalle nur in einem für das Pflanzenwachstum tolerierbaren Maß auf. (FAHLANDER 2004, S.7)

Laut HEINKELE ET AL. können sowohl Klärschlamm als auch Klärschlammkompost für die forstliche Rekultivierung genutzt werden, da diese Materialien eine ähnliche Biomasseentwicklung wie eine mineralische Düngung hervorrufen. Weiterhin wirkt sich die Gabe von Klärschlamm(-kompost) positiv auf die Bodenbiologie und die Stoffkreisläufe des Bodens aus. Die Gaben müssen jedoch an den Nährstoffbedarf der Pflanzen angepasst werden, um negative Effekte durch Überdüngung zu vermeiden. Auch bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung können Klärschlamm und Klärschlammkompost gegenüber einer herkömmlichen mineralischen Düngung Vorteile bieten. So werden zum Beispiel der Humus- und Nährstoffgehalt der Böden sowie deren Sorptions- und Wasserspeicherefähigkeit gesteigert. Auch die mikrobielle Aktivität des Bodens wird verbessert. Diese Faktoren steigern die Wachstumserträge durch eine erhöhte Bodenfruchtbarkeit. Negative Effekte, wie zu hohe Schadstoffgehalte, sind nicht zu erwarten, wenn die Grenzwerte der geltenden Verordnungen eingehalten werden. (HEINKELE ET AL. 2005, S.51–53)

Die Literaturrecherche zeigt, dass sich Klärschlammkompost als Zuschlagstoff für Rekultivierungsmaterialien eignet. In der vorliegenden Arbeit sollen die aus der Literatur gewonnenen Ergebnisse mit eigenen Materialmischungen aus Klärschlammkompost und einem zusätzlichen Zuschlagstoff (Pilzsubstrate) auf deren Eignung untersucht werden.

2.2 Rekultivierung von Deponien

Deponien bieten ein Flächenpotenzial, welches in Zeiten knapper werdender Anbauflächen - bspw. für Energiepflanzenanbau - einen wichtigen Beitrag zum Flächenrecycling leisten kann. (FRICKE ET AL. 2005, S.16) Das nachfolgende Kapitel behandelt daher die Rekultivierung von Deponieflächen. Als Rekultivierung bezeichnen HÜTTL ET AL. Maßnahmen, welche mit dem Ziel der Verbesserung der Bodeneigenschaften eingesetzt werden. Ziel ist es, die Funktionen eines Bodens, beispielsweise als Pflanzenstandort, zu gewährleisten. (HÜTTL ET AL. 2004, S.5)

2.2.1 Deponiephasen

Eine Rekultivierung gehört nach § 10 der DepV zu den Stilllegungsmaßnahmen. In der Stilllegungsphase (siehe Abbildung 10) muss der Betreiber einer Deponie die „erforderlichen Maßnahmen zur Errichtung des Oberflächenabdichtungssystems nach Anhang 1 Nummer 2 [...]“ (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) durchführen.

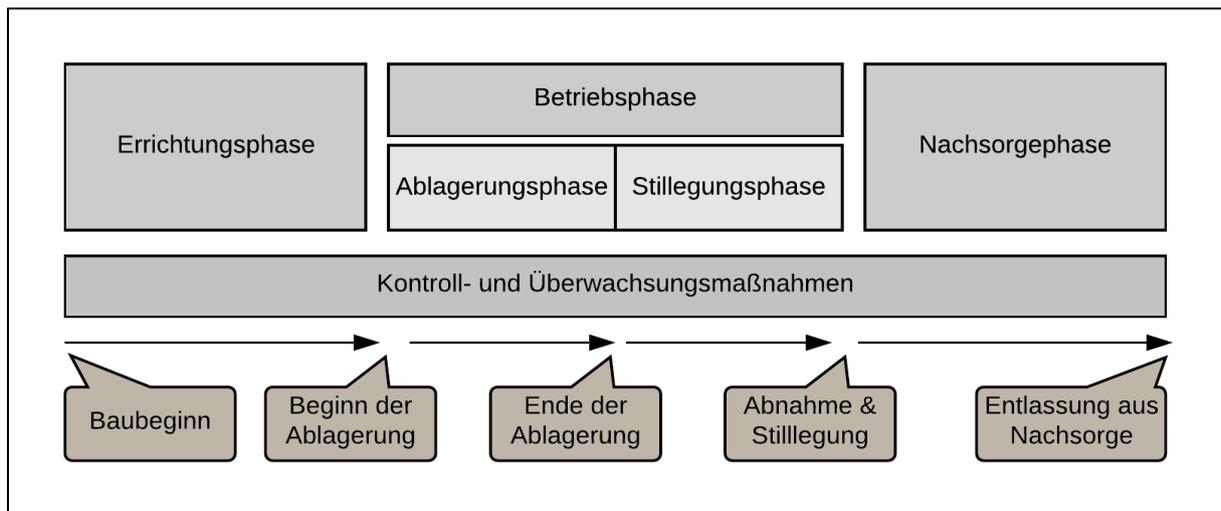


Abbildung 10: Zeitphasen im Deponiebetrieb nach (BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2018)

Um eine Deponie in die Nachsorge zu entlassen, müssen nach Anhang 5, Nr. 10 der DepV folgende Parameter abgeklungen sein: Biologische Prozesse, Umsetzungs- und Reaktionsvorgänge, Gasbildung und Setzungen. Weiterhin muss der Deponiekörper stabil und standsicher sein. Das Oberflächenwasser muss abgeleitet werden und das erfasste Sickerwasser muss den Einleitgrenzwerten entsprechen. Wichtig für die Betrachtung von Kurzumtriebsplantagen auf Deponien ist, dass für die Entlassung aus der Nachsorge sowohl das Oberflächenabdichtungssystem sowie die Rekultivierungsschicht funktionstüchtig und stabil sein müssen und ihr Zustand durch die zusätzliche Nutzung nicht negativ beeinträchtigt wird. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016)

2.2.2 Zahl der Deponien in Deutschland und Sachsen

Um das Rekultivierungspotenzial der Deponien Deutschlands zu betrachten, ist es wichtig zu wissen, wieviel Deponien und wieviel Fläche prinzipiell zur Verfügung stehen. In Deutschland gibt es (Stand 2016) 1.108 Deponien der Klassen DK 0 bis DK III. Bereits 775 Deponien sind zusätzlich in der Stilllegungsphase und könnten somit zeitnah für die Weiternutzung zur Verfügung stehen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Deponieanzahl nach Klassen, Deutschland
Stand 2016 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019, S.58)

Deponieklasse	Anzahl
DK 0	798
DK I	131
DK II	147
DK III	28
DK IV	4
Gesamt	1.108
<i>Zusätzlich in Stilllegung</i>	<i>775</i>

In den nächsten zehn Jahren werden 541 Deponien (Tabelle 4) ihren Betrieb einstellen und stehen der Rekultivierung sowie Nachnutzung zur Verfügung. Für Sachsen sind laut Statistischem Bundesamt keine Angaben über die verbleibende Betriebsdauer der Deponien vorhanden. (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019, S.58)

Tabelle 4: Deponien nach Ländern, Stand 2016 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019, S.58)

Bundesland	Anzahl	Verbleibende Betriebsdauer bis zehn Jahre	Verbleibende Betriebsdauer über elf Jahre
<i>Baden-Württemberg</i>	325	128	197
<i>Bayern</i>	395	220	175
<i>Berlin</i>	-	-	-
<i>Brandenburg</i>	15	7	8
<i>Bremen</i>	8	-	-
<i>Hamburg</i>	2	-	-
<i>Hessen</i>	35	14	21
<i>Mecklenburg-Vorpommern</i>	8	-	-
<i>Niedersachsen</i>	59	31	28
<i>Nordrhein-Westfalen</i>	137	83	54
<i>Rheinland-Pfalz</i>	42	16	26
<i>Saarland</i>	29	21	8
<i>Sachsen</i>	6	-	-
<i>Sachsen-Anhalt</i>	12	3	9
<i>Schleswig-Holstein</i>	17	10	7
<i>Thüringen</i>	18	8	10
Gesamt	1.108	541	543

* Anmerkung: Die Quelle gibt eine andere Zahlen für die im Betrieb verbleibende Gesamtzahl der Deponien an, da dort die nicht vorhandenen Werte (-) in die Gesamtzahl eingerechnet wurden.

In Sachsen gibt es (Stand 2018) drei aktive Siedlungsabfalldeponien (Cröbern, Gröbern und Kunnersdorf [DK II]), welche öffentlich-rechtlich betrieben werden. (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2018a) Weiterhin gibt es fünf privatwirtschaftlich betriebene Deponien: Wetro-Puschwitzer Feld [DK III], Grumbach [DK II], Gleina [DK 0], Soculahora [DK 0], Rothschnberg [DK I]. (Anhang 94, FRIEDERICH 2019b) Die Diskrepanz zu den in Tabelle 4 genannten sechs Deponien kommt daher, dass die Deponien Gleina und Soculahora als Inertstoffdeponie gelten und statistisch auf den Seiten der Landesdirektion Sachsen nicht erfasst werden. Daher werden diese Deponien nicht vom Statistischen Bundesamt erfasst. (LANDESDIREKTION SACHSEN 2019)

Nach Zahlen der Landesdirektion Sachsen (Direktionsbezirk Dresden) befinden sich derzeit 571 Deponien im Datenbestand. Darunter fallen 512 Altdeponien (K I bis K III). Die Zahl der Altdeponien schwankt jedoch, da teilweise Objekte den Status der Altdeponie erlangen oder wegfallen, wenn kein Deponiebetrieb nachweisbar ist. Es gibt weiterhin eine unsaubere Trennung zwischen dem Status „Altdeponie“ und „Deponie nach DepV“. Außerdem gibt es insgesamt 8 aktive Deponien nach DepV (DK 0 bis DK III). Darüber hinaus sind 16 Deponien bereits aus der Nachsorge entlassen worden. In der Nachsorge befindlich sind derzeit 412 Deponien (Altdeponien und DepV). Die Differenz von 135 Objekten (547 (571 Deponien im Datenbestand abzüglich der 8 aktiven Siedlungsabfalldeponien und 16 bereits aus der Nachsorge entlassenen Deponien) zu 412) bilden die noch nicht stillgelegten Deponien. Jedoch sind hier auch Anlagen enthalten, deren Status noch nicht abschließend geklärt bzw. einer Klasse zugeordnet werden konnte. (Anhang 95, ANDERSCH 2019) Der Betriebsstatus der Deponien ist nach Angaben der Landesdirektion Sachsen wie folgt einzuteilen.

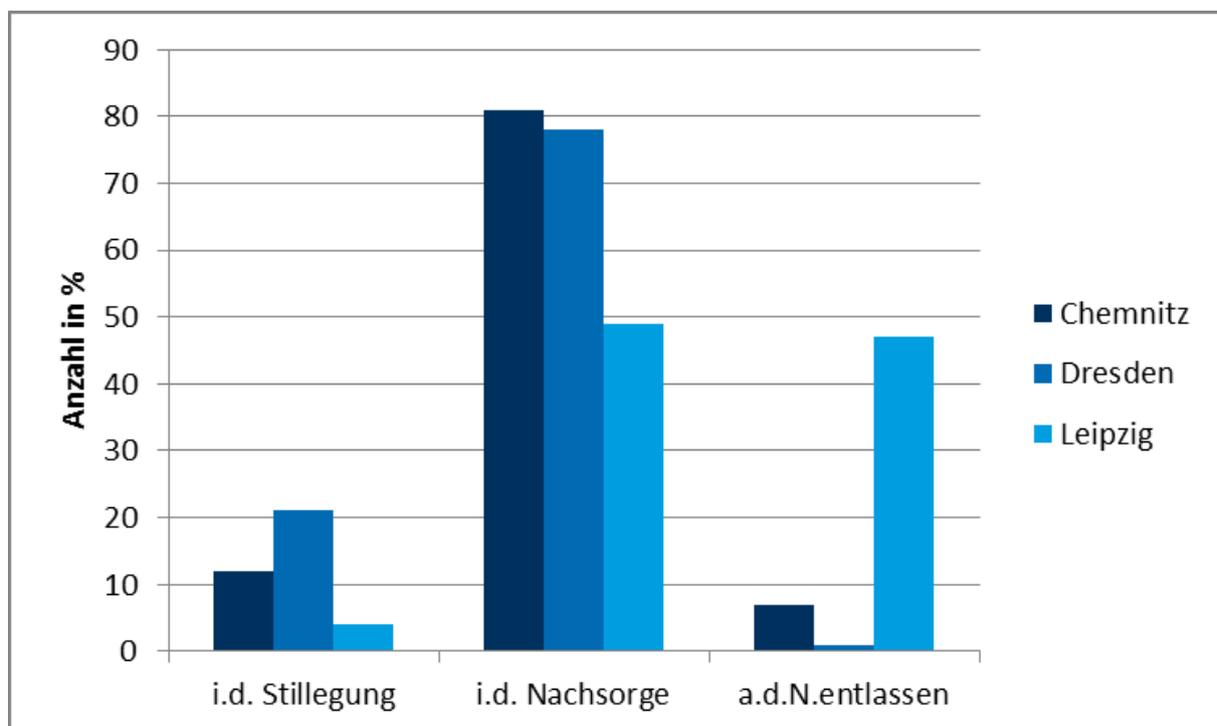


Abbildung 11: Betriebsstatus der sächsischen Deponien, Stand 2018 nach (GEIBLER 2019)

Nachstehend ist eine Liste mit Deponien (Altdeponien, Deponien nach DepV und Abfallablagerungen) dargestellt, welche sich in der Nachsorge befinden; teilweise ist noch eine Sanierung geplant. Hierunter befinden sich auch wilde Abfallablagerungen, welche nicht als Deponie klassifiziert werden. Daher kommt es zu einer höheren Zahl als die oben genannten 412 in Nachsorge befindlichen Deponien. Die Deponien sind potenziell für eine Rekultivierung geeignet. Eine Auskunft über die Fläche der Deponien zur Abschätzung für die zur Rekultivierung Verfügung stehenden Größe war nicht möglich. (FRIEDERICH 2018)

Tabelle 5: Sächsische Deponien in Nachsorge, Stand 2018 (FRIEDERICH 2018)

Stadt bzw. Landkreis	Anzahl in Nachsorge
<i>Chemnitz, Stadt</i>	8
<i>Erzgebirgskreis</i>	46
<i>Mittelsachsen</i>	84
<i>Vogtlandkreis</i>	41
<i>Zwickau</i>	49
<i>Dresden, Stadt</i>	4
<i>Bautzen</i>	139
<i>Görlitz</i>	131
<i>Meißen</i>	33
<i>Sächsische Schweiz-Osterzgebirge</i>	39
<i>Leipzig, Stadt</i>	11
<i>Leipzig</i>	36
<i>Nordsachsen</i>	55
Gesamt	676

In Dresden befinden sich laut Angaben des Umweltamtes 19 stillgelegte Deponien in städtischer Verantwortung, welche abgedeckt bzw. rekultiviert werden können (Stand 2014). Hierbei handelt es sich um eine Gesamtfläche von 1.252.210 m². Es muss jedoch beachtet werden, dass dies auf die Grundfläche der Deponie bezogen ist und nicht auf die Fläche der Rekultivierungsschicht. (LANDESHAUPTSTADT DRESDEN UMWELTAMT 2014, S.1) Bezüglich der realen Flächen, welche potenziell für die Rekultivierung zur Verfügung stehen, wurden nur wenige Zahlen gefunden. Eine Anfrage beim Statistischen Bundesamt bezüglich der Fläche von Deponien hat ergeben, dass hierzu seitens des Amtes keine Aussage getroffen werden kann. (Anhang 96, KAISER 2019) FRICKE ET AL. gehen davon aus, dass in Deutschland potenziell 100.000 ha Deponiefläche (DK II und Altablagerungen) zur Rekultivierung zur Verfügung stehen können. Die Art der Weiternutzung, bspw. Photovoltaik oder ähnliches, ist jedoch ausschlaggebend dafür, welche Deponieflächen genutzt werden können. Je nach Nutzungsart stehen eventuell weniger Flächen zur Verfügung. Werden zu den potenziell zur Verfügung stehenden Flächen (100.000 ha) noch die Flächen der Deponien der DK I addiert, ist das genannte Potenzial größer. Zum Zeitpunkt der Studie (Stand 2005) stehen potenziell 15.000 ha Deponiefläche für die Nachnutzung zur Verfügung (zwischen 1995 und 2005 bzw. 2009 bereits 380 stillgelegte Deponien DK II). (FRICKE ET AL. 2005, S. 10&115)

2.2.3 Oberflächenabdichtungssystem

Das Oberflächenabdichtungssystem dient einer Deponie als äußere Barriere, welche im Zusammenwirken mit den anderen Barrieren der Deponie langfristig die Schadstofffreisetzung aus dem Deponiekörper unterbinden soll. Einerseits soll dadurch das Eindringen von Sickerwasser in den Deponiekörper verhindert werden, was wiederum eine Auswaschung der

Schadstoffe vermindert. Andererseits ist vorgesehen, dass Schadstoffe nicht durch Wind- oder Wassererosion aus der Deponie ausgetragen werden. Aus Gründen des Umweltschutzes soll das Deponiegas nicht unkontrolliert die Deponie verlassen. Zur Wiedereingliederung in die Landschaft soll die Deponie abschließend begrünt oder anderweitig rekultiviert werden. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010a, S.1)

An das Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie werden gemäß Anhang 1 der DepV gesonderte Anforderungen aufgestellt. Grundsätzlich ist dieses nach der dort dargestellten Tabelle 2 zu errichten. Sollte die Oberfläche uneben sein, muss zusätzlich eine Ausgleichsschicht eingebaut werden. Eine technische Funktionsschicht kann als Ersatz für eine Rekultivierungsschicht eingesetzt werden, wenn dies die Folgenutzung erfordert. Laut DepV §11 ist für die Rekultivierung der Deponiebetreiber zuständig. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) Anhang 2 zeigt den vorgeschriebenen Aufbau einer Oberflächenabdichtung nach DepV. Eine Rekultivierungsschicht muss in allen Deponieklassen vorhanden sein.

2.2.4 Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht ist die oberste Komponente des Oberflächenabdichtungssystems. Deren Hauptaufgabe ist es, den Deponiekörper in die Landschaft einzugliedern. Weiterhin soll sie die anderen Abdichtungskomponenten schützen, zum Beispiel vor Austrocknung oder Durchwurzelung. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010a, S.5) Auf lange Sicht ist die die Rekultivierungsschicht im Oberflächenabdichtungssystem das wichtigste Element, da alle anderen Dichtungskomponenten über die Zeit teilweise ihre Wirkung verlieren können. Die Rekultivierungsschicht sollte daher so angelegt sein, dass sie langfristig besteht. Dies kann beispielsweise durch eine Begrünung erreicht werden. (BOTHMANN 2000, S.2) Da sich Bewuchs und Rekultivierungsschicht gegenseitig beeinflussen, sind diese immer im Verbund zu sehen. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.1)

2.2.4.1 Gesetzliche Vorgaben

Anhang 1 Nr. 2.3 (DepV) definiert die Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem von Deponien der Klasse 0 bis III. Unter Nummer 2.3.1 werden spezielle Anforderungen für Rekultivierungsschichten beschrieben. Hier wird eine Mindestdicke von 1 m vorgeschrieben. Diese orientiert sich am verwendeten Material und am geplanten Bewuchs. Weiterhin muss die Rekultivierungsschicht eine nutzbare Feldkapazität von mindestens 140 mm aufweisen. Die Schicht soll vor Wind- und Wassererosion geschützt sein und eine möglichst hohe Evapotranspirationsleistung aufweisen. Dies ist durch einen angepassten Bewuchs zu gewährleisten. Generell muss das eingesetzte Material den Grenzwerten nach Anhang 3 der DepV entsprechen. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016)

Gemäß Anhang 1 Nummer 2.1.2 der DepV legen die Bundesländer Prüfkriterien und Anforderungen an den fachgerechten Einbau und das Qualitätsmanagement im so genannten Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) fest. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) Der BQS 7-1 gilt für Rekultivierungsschichten. Der Anhang 1 des BQS 7-1 enthält Prüfkriterien für die Eignung von Materialien in der Rekultivierungsschicht. Anhang 2 enthält Empfehlungen zum Anbau von (Energie-)Pflanzen auf Deponien. (LAGA AD-HOC-AG 2016) Im Jahr 2018 wurde eine Änderung des BQS 7-1 zu Nr. 2.5 beschlossen, welche vorsieht, dass Kompost nicht als Deponieersatzbaustoff zählt, wenn dieser nur zur Bodenverbesserung und Nährstoffzufuhr in die obersten Bereiche der Rekultivierungsschicht eingemischt wird. Demnach müssen Klärschlammkomposte nicht die Grenzwerte der DepV sondern die der AbfKlärV einhalten. (BRÄCKER 2018, S.20) Wichtig ist, dass laut AbfKlärV Gemische mit Klärschlamm bzw. Klärschlammkompost bei durchwurzelbaren Bodenschichten nur maximal in den obersten 30 cm eingebracht werden dürfen. (ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017) In den hier vorgestellten, durchgeführten Versuchen wurde der Klärschlammkompost jedoch zusätzlich mit Pilzsubstrat versetzt und mit Bodenmaterial vermischt. Somit wurde ein Deponieersatzbaustoff hergestellt und nicht nur Klärschlammkompost in die Rekultivierungsschicht eingebracht.

2.2.4.2 Aufbau

Die Rekultivierungsschicht besteht meistens aus einem etwa 30 cm dicken, humushaltigen Oberboden und aus einem mindestens 70 cm dicken, organikarmen Unterboden. Gegebenenfalls kann eine dritte Schicht als zusätzlicher Filter eingebaut werden. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.4) Für den Oberboden werden oft Gemische aus natürlichen, nährstoffarmen Bodenmaterial und Kompost verwendet. (KONOLD ET AL. 2004, S.6) Der organikarme Unterboden kann aus Abraummaterial oder anderen verarmten Böden bestehen. Die Dimensionierung der Rekultivierungsschicht erfolgt nach Kriterien wie bspw. der Witterung am Standort, dem Wasserverbrauch, der Wurzeltiefe des gewählten Bewuchses sowie den Kosten. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.9) Der Aufbau der Rekultivierungsschicht sollte sich am späteren Bewuchs orientieren. Besonders im Hinblick auf die angestrebte Mächtigkeit ist es wichtig, vorzeitig zu wissen, welcher Bewuchs gepflanzt werden soll. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.4)

2.2.4.3 Anforderungen

Bewuchs: Der Boden ist vor dem Aufbringen des Bewuchses vorzubereiten. So verbessert bspw. das Einarbeiten von Kompost die Struktur des Bodens. Zeitnah nach der Bepflanzung soll eine geschlossene Vegetationsdecke etabliert sein, welche die Erosion und die Ansiedlung unerwünschter Pflanzenarten vermindert. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.8–9) Ausreichend pflanzenverfügbares Bodenwasser und Nährstoffe in den oberen Bodenschichten nehmen

den Pflanzen den Anreiz tief zu wurzeln. (WATTENDORF 2001, S.3) Tabelle 6 zeigt Wurzeltiefen ausgewählter Pflanzen. HENKEN-MELLIES ET AL. untersuchten die Häufigkeit maximaler Durchwurzelungstiefen auf Deponien. Die meisten Pflanzen bilden maximal bis 100 cm tief Wurzeln aus. Ab einer Tiefe von 200 cm nimmt die Anzahl der vorgefundenen Arten stark ab. (Anhang 3, HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.22)

Tabelle 6: Durchwurzelungstiefen (BERNSDORF & LIEMEN 2009, S.3)

Vegetation	Durchwurzelungstiefe (cm)
<i>Deutsches Weidelgras</i>	120
<i>Welsches Weidelgras</i>	80
<i>Rotklee</i>	100
<i>Birke</i>	50-150
<i>Esche</i>	20-150
<i>Schwarzpappel</i>	bis 200

Auch die Verdunstungsleistung des Bewuchses ist relevant. Der Wasserentzug der Pflanzen vermindert die Versickerung in untere Schichten und erhöht die Evapotranspiration. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.3–6) Abbildung 12 stellt die Evapotranspirationsleistung verschiedenen Bewuchses dar. Dabei weisen Gebüsch- und Waldvegetation höhere Entzugsleistungen auf als Grünland oder Getreidekulturen, benötigen jedoch mehr Zeit für ein ausgeprägtes Wachstum, nämlich zehn bis 50 Jahre. Im Gegensatz dazu benötigt Grünland nur zwei bis drei Jahre. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.2)

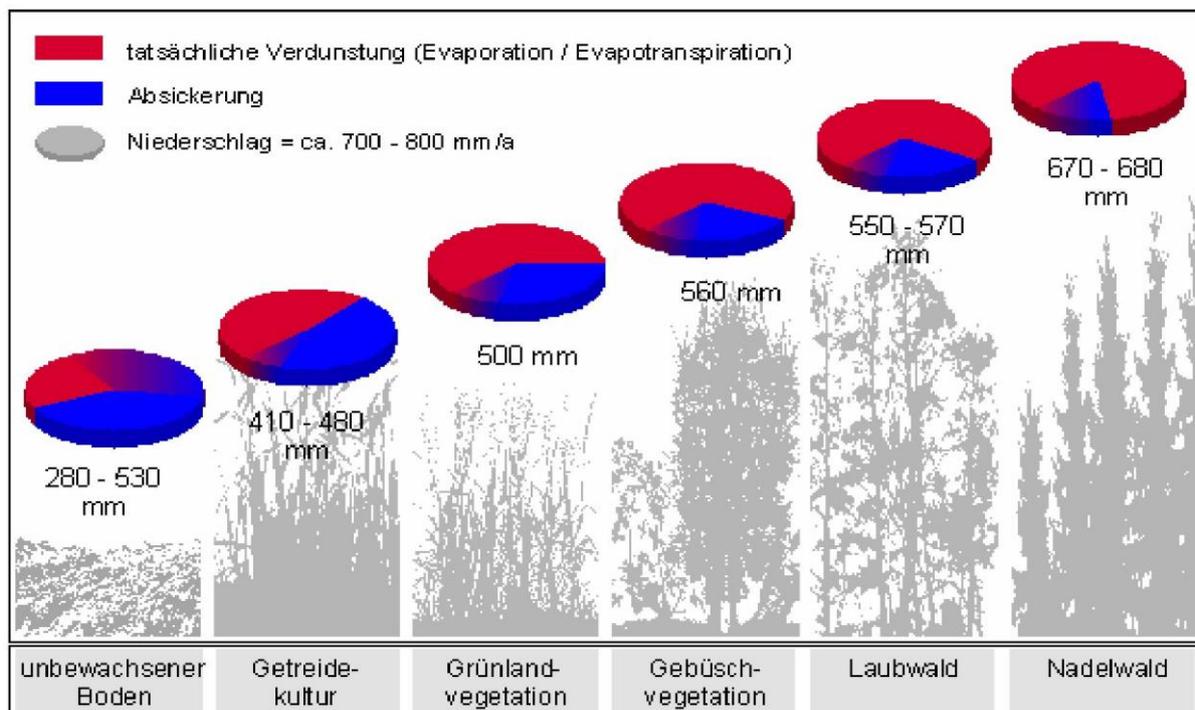


Abbildung 12: Verdunstungsleistung & Absickerung durch Bewuchs (WATTENDORF 2001, S.2)

Wahl des Bodens: Die LAGA AD-HOC-AG hat eine Orientierungshilfe zur Auswahl von Böden erstellt. Hier sind Böden der Gruppe A am vorteilhaftesten zu bewerten (Anhang 4). Ebenso müssen die Standsicherheitsanforderungen eingehalten werden. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.6) Der Einbau des Bodens sollte nach Möglichkeit locker erfolgen, um eine hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) zu erhalten. Die nFK hängt von der Wahl des Bodens, der Schichtmächtigkeit und dem Verdichtungsgrad ab. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.6)

Mächtigkeit: Zur Kalkulierung der Mindestmächtigkeit einer Rekultivierungsschicht werden das erforderliche Wasserspeichervermögen, die maximal erreichbaren Wurzeltiefen des Bewuchses und die maximale Frosteindringtiefe herangezogen. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.10) Der BQS 7-1 empfiehlt eine Mindestdicke von mehr als 1 m, um die Oberflächenabdichtung zu schützen. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.9) Bei der Ansiedlung von Tiefwurzlern muss die Rekultivierungsschicht mindestens 1,5 m mächtig sein. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.9) Nach Meinung anderer Autoren muss die Mächtigkeit mindestens 2 m betragen. Wenn Bewuchs angepflanzt wird, sollte die Mächtigkeit bis 3,5 m betragen, da erst danach keine zusätzlichen Maßnahmen zur Begrenzung des Wurzelwachstums nötig sind. (HENKEN-MELLIES 2003, S.2)

Pflanzenverfügbares Bodenwasser: Für das Pflanzenwachstum ist wichtig, dass im Boden große Anteile pflanzenverfügbares Wasser vorliegen. Hier ist es entscheidend, wieviel Wasser tatsächlich im Wurzelraum gespeichert werden kann und nicht in für die Wurzeln unerreichbare Schichten versickert. Die Porenstruktur eines Bodens beeinflusst maßgeblich die Wasserversorgung der Pflanzen. Wenn die Poren zu eng liegen, ist das Wasser durch die Kapillarkräfte zu stark gebunden und nicht pflanzenverfügbar. Sind die Poren jedoch zu weit, werden diese meist nur mit Luft gefüllt, da das Wasser sich entgegen der Schwerkraft nicht halten kann. Das meiste pflanzenverfügbare Wasser wird in engen Grobporen und Mittelporen gespeichert (Anhang 5). (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.4–5)

Verdichtung: Eine starke Verdichtung der Rekultivierungsschicht sollte vermieden werden, da sie maßgeblich Einfluss auf das Porensystem und somit auf die nutzbare Feld- und Luftkapazität hat. Dies minimiert wiederum die Anteile an pflanzenverfügbarem Wasser oder kann bei den Pflanzen zu Sauerstoffmangel führen. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.6) Die Luftkapazität sollte nach BQS 7-1 nicht unter 5 Vol.-% liegen, da sonst eine schädliche Bodenverdichtung vorliegt. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.14–15) Die DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. empfiehlt mindestens 8 Vol.-%. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.10)

2.2.4.4 Bewirtschaftung

Standort: Bei der Wahl des Standortes ist zu klären, ob die klimatischen Bedingungen am Standort zu den Anforderungen des geplanten Bewuchses passen. Auch die Hangexposition ist zu berücksichtigen, da an Kuppen und windexponierten Flächen die Gefahr für Windwurf groß ist. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.5) Die Hangneigung spielt für das Befahren, beispielsweise während der Ernte, eine entscheidende Rolle. Deponien mit Böschungen über 10 % eignen sich generell nicht zum Anbau von Energiepflanzen. Nach SPANGENBERG ET AL. ist auch die Größe des Standortes als Auswahlkriterium wichtig, da der Anbau von Energiepflanzen erst ab mehreren Hektar wirtschaftlich ist. Bereits ab 2 ha lohnt sich der Einsatz von Maschinen zur Pflanzung und Ernte. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.370–371)

Bodenbearbeitung: Beim Befahren der Deponie ist es wichtig, dass dies möglichst bodenschonend durchgeführt wird. Das Fahrzeug sollte so ausgestattet sein, dass der Druck auf den Boden möglichst gering ist. Hierzu können beispielsweise eine hohe Achsenzahl und breite Reifen beitragen. (DREWES ET AL. 2017, S.457–458) Beim Einbau des Bodens sollte eine starke Verdichtung vermieden werden (Abbildung 13). (SPANGENBERG ET AL. 2016, S.209–210). Die Ernte sollte bei Vegetationsruhe und gefrorenem Boden durchgeführt werden, da dann der Druck auf den Boden durch die Erntemaschinen geringer ist. (DREWES ET AL. 2017, S.462)

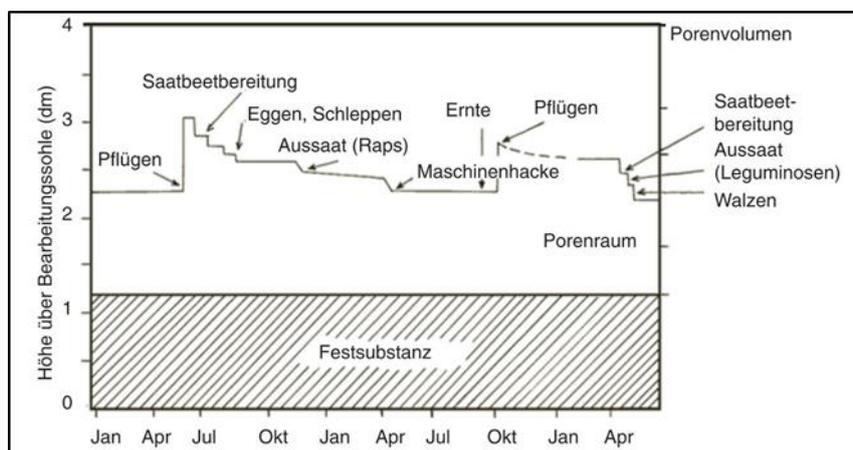


Abbildung 13: Veränderung Bodenoberfläche durch Bodenbearbeitung (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.212)

Bepflanzung: Die Bepflanzung sollte während der Vegetationsperiode durchgeführt werden. In wärmeren Regionen können schnellwachsende Gräser noch im Spätherbst ausgesät werden. Wurzelackte Pflanzen können auch in der Vegetationsruhe an frostfreien Tagen gepflanzt werden. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.9–10) In Kapitel 2.2.6 wird beschrieben, welche Pflanzen sich für den Anbau auf Deponien eignen.

Pflege: Eine Bewässerung der Rekultivierungsschicht ist wirtschaftlich nicht sinnvoll. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.371) Bei Jungpflanzen kann eine Bewässerung in niederschlagsarmen Gegenden jedoch in den ersten drei Jahren notwendig sein. (WATTENDORF ET AL. 2010, S.11) Sofern eine Düngung erfolgt, sollte diese „nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis durchgeführt werden“ (DÜV. Fassung vom 26.05.2017).

Abschluss: Wenn die Deponie nach ihrer Nutzung als Pflanzenstandort wieder zurückgeführt werden soll, muss die Rekultivierungsschicht die Anforderungen nach Anhang 1 Nummer 2.3.1 der DepV einhalten. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) Laut AG DEPONIETECHNIK ist ein Anbau von Energiepflanzen auf Deponien nur in der Nachsorgephase sinnvoll. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.1) Auch nach Meinung von SPANGENBERG ET AL. sollte die Deponie erst in der Nachsorgephase als Pflanzenstandort genutzt werden. In der Stilllegungsphase bietet sich der Anbau von Energiepflanzen nur an, wenn eingeschätzt werden kann, dass die temporäre Abdeckung mindestens zehn Jahre ihre Funktion behält. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.369)

2.2.5 Deponieersatzbaustoffe

Deponieersatzbaustoffe sind „auf oberirdischen Deponien unmittelbar einsetzbare Abfälle sowie unter Verwendung von Abfällen hergestellte Materialien“ (DEPV. Fassung vom 04.03.2016). Laut HENKEN-MELLIES ET AL. sollten zum Bau einer Rekultivierungsschicht bevorzugt Recyclingmaterialien verwendet werden, da diese im Sinne des Bodenschutzes eingesetzt werden können und zusätzlich Ressourcen schonen. (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.4) Auch andere Autoren befürworten den Einsatz von Deponieersatzbaustoffen im Sinne der Ressourcenschonung. (PALM ET AL. 2006, S.2; NILSSON ET AL. 2001, S.3) Weiterhin können dadurch die Kosten für eine Oberflächenabdichtung reduziert werden. (RÖTSCHKE ET AL. 2009, S.1)

2.2.5.1 Gesetzliche Vorgaben

Der Einsatz von Deponieersatzbaustoffen ist durch die Deponieverordnung geregelt. Dort heißt es in §1 I, dass die Verordnung „den Einsatz von Abfällen als und zur Herstellung von Deponieersatzbaustoff[en]“ (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) regelt. Teil 3 der Verordnung geht auf die Verwertung von Deponieersatzbaustoffen ein. Im §14 I wird eine wichtige Unterscheidung bezüglich der Verwendung von Abfällen als Deponieersatzbaustoff getroffen. Hier heißt es, dass als Deponieersatzbaustoffe nur mineralische Abfälle zugelassen sind. Eine Ausnahme bildet die Rekultivierungsschicht, in der auch andere Abfälle zugelassen sind. Weiterhin gibt es nach §14 II bestimmte Begrenzungen. So dürfen zum Beispiel keine asbesthaltigen Reststoffe verwendet werden. Für Deponieersatzbaustoffe gelten generell die Grenzwerte, welche in Anhang 3 Nummer 2 in Verbindung mit Nummer 1 genannt sind. Nach

§14 I dürfen Deponieersatzbaustoffe durch ihre Anwendung keine negativen Auswirkungen für das Allgemeinwohl haben. Auch die einsetzbare Menge ist so zu begrenzen, wie für die Baumaßnahmen nötig sind und dass der Deponiebetrieb nicht gestört wird. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016)

2.2.5.2 Materialien

Gängige Materialien für die Herstellung von Deponieersatzbaustoffen sind unter anderem Abraummateriale, nährstoffarme Böden, Klärschlamm, Schlacken und Verbrennungaschen. (HAASZIO & REHSE 2006, S.4; HÜTTL ET AL. 2004) Auch Klärschlämme und Klärschlammkomposte sind als Deponieersatzbaustoffe geeignet (siehe Kapitel 2.1.2.3). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen Substrate aus der Speisepilzproduktion als Zuschlagstoffe für Deponieersatzbaustoffe untersucht werden. Im Folgenden wird dieses Material daher näher beleuchtet.

Pilzkultursubstrate: In Deutschland fallen 200.000 t abgetragene Pilzsubstrate pro Jahr (Stand 2019) an. (NATALIE RANGNO 2019) Speisepilze werden auf Ballen aus Stroh oder Holzspäne gezüchtet. So wachsen Champignons in der Speisepilzproduktion meist auf Strohs substrat und Kräuterseitlinge meist auf Buchens substrat. (SCHMIDT 2009, S.48) Die Aufwuchssubstrate werden nach deren Einsatz für die erneute Produktion von Pilzen nicht mehr verwendet. Die Substrate sind jedoch für die Landwirtschaft als Dünger interessant, da sie hohe Anteile organischer Substanz enthalten. Ein Anwendungsfeld ist u.a. deren Einsatz als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft. (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 2004, S.4; KEHRES & THELEN-JÜNGLING 2011, S.1) Die Verwertung von Pilzkultursubstrat ist rechtlich genau wie die Kompostverwertung nach BioAbfV und DüMV, sowie DüV geregelt. Laut BioAbfV (§14 1b) gelten Pilzkultursubstrate als Bioabfall. (BIOABFV. Fassung vom 04.04.2013) Durch die Düngemittelverordnung muss das Pilzsubstrat jedoch vor der landwirtschaftlichen Ausbringung hygienisiert werden, wodurch das Pilzmyzel abgetötet wird. Dies kann über Dampf oder andere Verfahren geschehen, nicht jedoch über Fungizide. (DÜMV. Fassung vom 12.04.2017) Die Entsorgung bzw. Hygienisierung der Pilzsubstrate ist sowohl energetisch aufwendig als auch kostenintensiv. (NATALIE RANGNO 2019) Daher wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob sich Pilzsubstrate als Zuschlagstoffe für Deponieersatzbaustoffe eignen. In ihrem Einsatz als Deponieersatzbaustoff müssen die Pilzsubstrate nicht hygienisiert werden. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016)

Pilzkultursubstrate besitzen einen hohen Organikanteil, welcher durch Einbringen in den Boden dessen Struktur verbessern kann. So kann sich dessen Wasserspeicherfähigkeit erhöhen und sich der Boden im Frühjahr schneller erwärmen. Beides wirkt sich positiv auf das Pflanzenwachstum aus. Pilzkultursubstrate enthalten außerdem Nährstoffe wie Stickstoff, Penckert, Paula

Phosphor, Kalium oder Schwefel, welche die Fruchtbarkeit des Bodens steigern. Phosphor, Kalium und Schwefel liegen dabei nahezu vollständig in pflanzenverfügbarer Form vor. (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 2004, S.8) Die gängigsten Nähr- und Schadstoffgehalte von Pilzkultursubstraten sind in Anhang 6 dargestellt.

2.2.6 Bewuchs

Folgende Möglichkeiten zum Anbau von Biomasse auf Deponien können nach FRICKE ET AL. gesehen werden:

Tabelle 7: Möglichkeiten des Anbaus von Energiepflanzen nach (FRICKE ET AL. 2005, S.53)

Energiepflanzen	Deponiephasen			
	Betrieb	Stilllegung	Nachsorge	Folgenutzung
<i>Grünland</i>	-	x	x	x
<i>Staudenfluren</i>	-	x	x	x
<i>Land-Röhrichte</i>	-	x	x	x
<i>Schnellwachsende Gehölze</i>	-	(x)	-	x

2.2.6.1 Unverholzte Biomasse

Unverholzte Biomasse kann in einjährige oder mehrjährige (Energie-)Pflanzen unterteilt werden. SPANGENBERG ET AL. empfehlen den Anbau von einjährigen Energiepflanzen, wie Mais, Raps oder Sonnenblume auf Deponien nicht, da die Erosion dadurch kaum gemindert wird. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.371) KNORRE ET AL. empfehlen den Anbau mehrjähriger Pflanzen, wie Energiegrasmischungen, auf Deponien. (KNORRE ET AL. 2017, S.193) Eine ähnliche Empfehlung gibt auch die AG DEPONIETECHNIK. Demnach sind einjährige Energiepflanzen und Bewuchs mit kurzen Umtriebszeiten zu vermeiden, da der Erosionsschutz nicht gewährleistet ist. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.1) Nach DREWES ET AL. eignet sich unverholzte Biomasse generell nicht für den Anbau auf Deponien. Grund sind häufige Aussaat sowie Ernte und damit einhergehend die Gefahr der Erosion. (DREWES ET AL. 2017, S.457) Als Energiepflanzen mit mehrjährigem Bestand haben sich folgende Pflanzen auf Deponien durchgesetzt: Staudenpflanzen (bspw. Durchwachsene Silphie), Großgräser (bspw. Miscanthus, Szarvasigras), Luzerne, Ackergras- und Wildpflanzenmischungen. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.371; FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. FNR 2018) Auch Intensivgrünland kann auf Deponien angebaut werden und zur Energieerzeugung genutzt werden. Es eignet sich besonders für Hanglagen, da der dichte Bewuchs die Erosion mindert. (FRICKE ET AL. 2005, S.56)

2.2.6.2 Verholzte Biomasse - Kurzumtriebsplantagen

Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind Plantagen mit schnell wachsenden Baumarten, welche nach - gegenüber normalem Waldbestand - relativ kurzen Umtriebszeiten geerntet werden.

(SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2014, S.2) Die meisten Plantagen haben eine Umtriebszeit von zwei bis 15 Jahren, da sich dies in der Praxis bewährt hat. Nach einmaliger Pflanzung sind mehrere Umtriebe möglich, da die Wurzelstöcke im Boden verbleiben und erneut austreiben können. Generell liegt die Gesamtnutzungszeit von KUP bei etwa 20 bis 30 Jahren. (SPANGENBERG ET AL. 2016, S.198; MANTAU ET AL. 2010, S.89) Die Plantagen können anhand der Dauer des Umtriebes in kurz (zwei bis vier Jahre), mittellang (vier bis sieben (maximal zehn) Jahre) und lang (sieben bis 15 (maximal 20) Jahre) unterteilt werden. (LIEBHARD 2010, S.64) Typische Gehölze sind Pappel, Erle, Robinie und Weide. (LIEBHARD 2010, S.17–29; SCHIRMER 2009, S.1–2) Die Bäume werden meist mittels Steckhölzern gepflanzt. Als Steckhölzer werden Abschnitte von einjährigen Pflanzentrieben bezeichnet, welche meist 20 cm lang sind. Der gängigste Pflanzzeitpunkt ist März bis April. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.373) Generell sollten Steckhölzer mindestens einen Durchmesser von 0,8 bis 1,0 cm aufweisen, besser sind 1,5 bis 2,5 cm. Steckhölzer sollten weiterhin mindestens zwei bis drei Knospen aufweisen. (LIEBHARD 2010, S.34; SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2014, S.4; REEG ET AL. 2009, S.62) Eine Kallusbildung kann darauf hinweisen, dass das Steckholz bei der Ernte beschädigt wurde. Ein breit gefächertes Wurzelwachstum trotz Kallusbildung weist aber darauf hin, dass die Pflanze sich selbstständig regeneriert hat. (LEXIKON DER BIOLOGIE 2019) Außerdem ist ein schnelles Wurzelwachstum der Steckhölzer wichtig, damit die Pflanze schnell das Wasser im Boden erschließen kann und gut anwächst. (KRABEL ET AL. 2015, S.1289) Die Bäume in KUP müssen meist nur in den ersten beiden Jahren nach dem Anbau gepflegt werden. Die Flächen werden im Winter geerntet, da die Bäume dann entlaubt sind und einen geringen Wassergehalt von etwa 50% aufweisen. (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2009, S.20–30)

Das vorrangige Ziel beim Betreiben von KUP ist der Anbau von Holz zur Energiegewinnung. (SCHIRMER 2009, S.1; PETZOLD 2013, S.1) Ob der Betrieb einer solchen Plantage wirtschaftlich ist, hängt grundsätzlich von vier Faktoren ab: Der erfolgreichen Ansiedlung der Bäume, der Dauer der Nutzung, dem Ertrag und dem Holzpreis. Dabei sind die größten Kostenpunkte die Pflanzung, die Ernte, gegebenenfalls die Rückumwandlung der Fläche und die Trocknung der Hölzer. (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2014, S.8)

Der Anbau von KUP - im Weiteren meist Pappeln - bringt nach Meinung verschiedener Autoren Vorteile mit sich. Die Erosion von Böden kann mittels Einsatzes von KUP oder anderen Dauerkulturen vermindert werden. Weiterhin ist der Boden durch die intensive Durchwurzelung gelockert und ganzjährig bedeckt. PETZOLD und FELDWISCH schließen daraus, dass die Plantagen langfristig zu einer verbesserten Wasserqualität und höherem

Wasserspeichervermögen des Bodens beitragen. (PETZOLD 2013, S.64; FELDWISCH 2011, S.21–23) Jedoch können die Bäume in KUP tiefe Wurzeln ausbilden. Daher ist es wichtig, dass die Pflanzen nur auf Deponien mit einer erhöhten Rekultivierungsschicht angepflanzt werden. Untersuchungen konnten zeigen, dass Pappeln nach ca. drei Jahren bis zu 1,8m tief wurzeln können. Andere Gehölzvegetationen können bis 3,0 m tief wurzeln. (KRABEL ET AL. 2015, S.1290; HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.23) KUP weisen einen erhöhten Wasserverbrauch auf. Eine Niederschlagsmenge von mindestens 300 mm sollte in der Vegetationszeit gewährleistet sein. (SPANGENBERG ET AL. 2015, S.371; KRABEL ET AL. 2015, S.1289) Der hohe Wasserentzug kann einerseits positiv sein, da der Sickerwasseranfall und somit auch der Schadstoffaustrag verringert werden. Außerdem sorgt der hohe Wasserverbrauch auch für eine niedrigere Erosion, da der Oberflächenabfluss verringert wird. Dies würde sich auf Rekultivierungsschichten vorteilhaft auswirken. Negativ ist allerdings ein möglicher Rückgang der Grundwasserneubildung. Letzteres spielt auf Deponien jedoch eine untergeordnete Rolle. Hier ist eher die Austrocknung des Bodens kritisch zu betrachten. (REEG ET AL. 2009, S.188; PETZOLD 2013, S. 5&45-46)

Die Literaturrecherche zeigte, dass Pappeln für KUP geeignet sind und häufig Anwendung finden. Darüber hinaus arbeitet die Professur für Forstbotanik an der TU Dresden in ihren Pflanzversuchen bevorzugt mit Pappeln. Pappeln sind sehr anpassungsfähig an Boden und Klima. Der optimale Boden für das Wachstum von Pappeln ist ein sandiger Lehm, der eine hohe Luftkapazität hat und vom Grundwasser gespeist wird. Zu schwere Tonböden oder durch Staunässe beeinflusste Böden sind für Pappeln ungeeignet. Der pH-Wert des Bodens sollte mindestens 4,5, besser 5,5 bis 6,5 betragen. (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2009, S.5; AMTHAUER GALLARDO 2014, S.22–23)

2.2.6.3 Praxisbeispiel Deponie Wetrop

In der vorliegenden Arbeit wird u.a. der Anbau verholzter, mehrjähriger Biomasse betrachtet. Aus diesem Grund wird ein Freilandversuch für den Anbau mehrjähriger Pflanzen auf der Deponie Wetrop begleitet. Im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Referat Wertstoffwirtschaft) das Wurzelverhalten von Bäumen und Sträuchern auf einer Deponie. Dabei sollen Erkenntnisse auf den Einfluss von Tiefwurzeln auf das Oberflächenabdichtungssystem gewonnen werden. Ziel für die Anlage der Testfelder ist es, das Wurzelverhalten bei verschiedenen Böden als Langzeitversuch zu betrachten. Da in Sachsen die Waldvegetation als Folge der natürlichen Sukzession auftritt, soll diese in den Testfeldern vorab untersucht werden. Hierbei sollte die Rekultivierungsschicht möglichst pflegeleicht sein oder ganz ohne Pflege auskommen. Das heißt, dass der aufgebrauchte Boden möglichst flächendeckend flachwurzeln Pflanzen duldet und bevorzugt, sowie für Tiefwurzler eher unattraktiv ist. Die Testfelder wurden so angelegt,

dass das Wurzelwerk der Bäume die anderen Teile der Abdeckung nicht beeinflussen kann. (KOSTELETSKY 2015, S.1) Die Böden auf dem Testfeld der Deponie Wetro sind zum großen Teil nährstoffarme Böden und entsprechen damit jener Bodenklasse, welche im Rahmen dieser Arbeit aufgewertet werden sollen. Weiterhin verfolgen die Testfelder die praktische Umsetzung einer erhöhten Rekultivierungsschicht, die viele Autoren als Voraussetzung für das Anpflanzen von mehrjährigem Bewuchs auf Deponien sehen.

2.2.7 Nachsorge

Als Nachsorgephase wird der Zeitraum nach der endgültigen Stilllegung einer Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zu dem Zeitpunkt, an dem die zuständige Behörde nach § 40 Absatz 5 des KrWG den Abschluss der Nachsorge feststellt, bezeichnet. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016, §2 XXVII i.V.m. KRWG. Fassung vom 04.04.2016) Der §11 DepV regelt die Nachsorge. Der Betreiber der Deponie muss Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen durchführen. Wenn die zuständige Behörde feststellt, dass durch die Deponie keine Beeinträchtigung für das Wohl der Allgemeinheit mehr ausgeht, kann diese aus der Nachsorge entlassen werden. In Anhang 5 Nr. 10 sind verschiedene Prüfkriterien benannt, welche für die Entlassung aus der Nachsorge eingehalten werden müssen. Die Prüfkriterien betreffen u.a. Umsetzungs- und Reaktionsvorgänge, Setzungen und die Standsicherheit. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016) Derzeit werden für die Nachsorge Rücklagen für 30 Jahre gebildet. Es ist nach aktuellen Studien davon auszugehen, dass dieser Zeitraum 150 Jahre dauern kann. Für diese Zeit kann der Anbau erneuerbarer Energien eine Rücklage schaffen. (FRICKE ET AL. 2005, S.16)

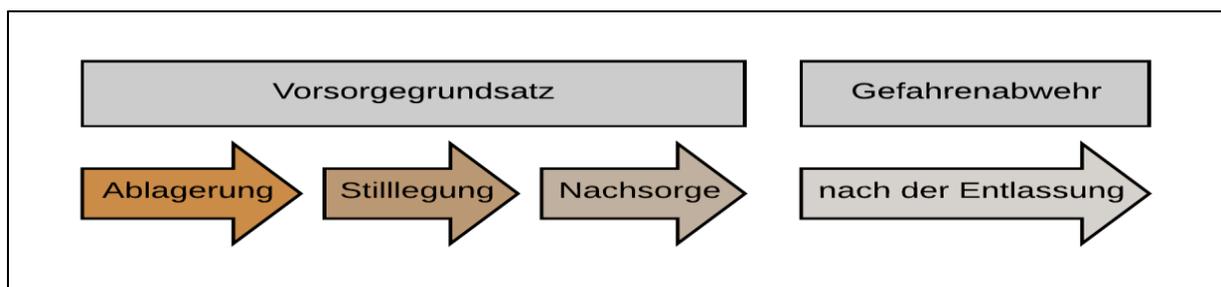


Abbildung 14: Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge nach (MÜLLER 2019)

Bei der Entlassung aus der Nachsorge handelt es sich immer um den Übergang zwischen Vorsorgegrundsatz und Gefahrenabwehr (Abbildung 14). Eine Deponie kann generell erst aus der Nachsorge entlassen werden, wenn die zu erwartenden Nebenwirkungen minimiert sind. Eine Deponie kann nicht aus der Nachsorge entlassen werden, wenn bspw. bauliche Anlagen wie Photovoltaikanlagen auf der Deponiefläche errichtet sind. Auch wenn KUP auf einer Deponie errichtet sind, kann die Deponie während des Betriebes der Plantage nicht aus der Nachsorge entlassen werden. Nach dem Entlassen aus der Nachsorge in die

Folgenutzungsphase ist der Anbau von Pflanzen auf jeden Fall möglich. (LAGA ATA AD-HOC AUSSCHUSS 2018, S.4; FRICKE ET AL. 2005, S.48–49)

2.3 Geotechnische Materialprüfung

Da die Böden nach den Anforderungen des BQS 7-1 auf ihre Eignung als Deponieersatzbaustoff untersucht werden sollten, wurden zusätzlich die geforderten geotechnische Untersuchungen durchgeführt, welche nachfolgend erläutert werden.

Im folgenden Kapitel wird ausschließlich Literatur aus dem deutschsprachigen Raum zitiert, da internationale Literatur laut Meinung des Autos keinen Mehrwert bringen würde.

2.3.1 Zustandsgrenzen

Nach DIN 18122-1 sind "die Zustandsgrenzen [...] ein Maß für die Bildsamkeit des Bodens (Plastizität) und für seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes. [...] Sie geben in Verbindung mit dem jeweiligen Wassergehalt einen Anhalt für die Zustandsform des bindigen Bodens (Konsistenz) und damit für dessen Festigkeit" (DIN. Nr. 18122-1 1997). Hierbei hängt die Konsistenz des Bodens immer vom vorliegenden Wassergehalt ab. Die Zustandsformen eines Bodens können flüssig, bindig, bildsam, halbfest und fest sein (siehe Abbildung 15). Die Übergänge zwischen den jeweiligen Zustandsformen sind als Zustands- bzw. Konsistenzgrenzen bezeichnet. Die Konsistenz eines Bodens setzt sich aus der Bestimmung der Fließgrenze (w_L), der Ausrollgrenze (w_p) und der Plastizitätszahl (i_p) zusammen. (SCHMIDT ET AL. 2017, S.47–49) In DIN 18122-1 ist der Vorgang zur Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen detailliert dargestellt. (DIN. Nr. 18122-1 1997)

	← I_p →					
Wassergehalt	w_s	w_p			w_L	
Zustandsform	fest	halbfest	steif	weich	breiig	flüssig
Konsistenzzahl	I_c	1,0	0,75	0,5	0	

Abbildung 15: Zustandsformen (SCHMIDT ET AL. 2017, S.49)

Humus beeinflusst die Konsistenzgrenzen von Böden positiv. Dadurch ist die Bearbeitung des Bodens auch bei höheren Wassergehalten noch ohne eine Schädigung des Bodengefüges möglich. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.69)

2.3.2 Proctordichte

Ein Proctorversuch soll Auskunft darüber geben, bei welchem Wassergehalt der Boden eine optimale Verdichtung erreicht. Dies ist für den Einbau des Bodens wichtig. (KUNTSCHKE 2016, S.151; SCHMIDT ET AL. 2017, S.90) Nach DIN 18127 wird unter einem Proctorversuch ein "Versuch, bei dem die Bodenprobe in einem Versuchszylinder aus Stahl mit festgelegten Abmessungen durch ein festgelegtes Fallgewicht mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit, verschiedenen Wassergehalten und nach einem festgelegten Arbeitsverfahren verdichtet wird" (DIN. Nr. 18127 2012) verstanden. Anhand der Verdichtungen wird ein Diagramm angelegt, welches den optimalen Wassergehalt zeigt.

2.3.3 Durchlässigkeit

Die Ermittlung der Durchlässigkeit eines Bodens erfolgt mittels Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit angeschlossenem Standrohr (Abbildung 16). Dieses Rohr wird von unten nach oben durchströmt. In das Rohr wird die Probe gefüllt, mit entlüftetem Wasser aufgefüllt und anschließend durchströmt. Wenn nach einer gewissen Zeit ein gleichbleibender k_f -Wert (Durchlässigkeitswert) ermittelt wird, kann der Versuch beendet werden. (DIN. Nr. 18130-1 1998)

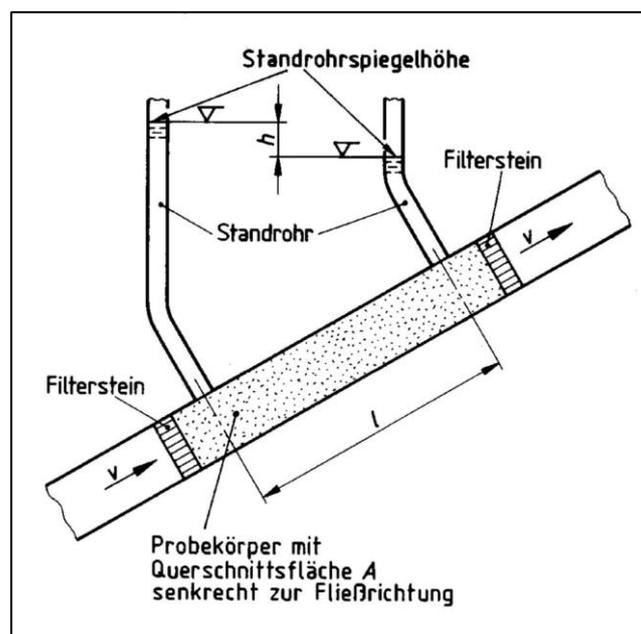


Abbildung 16: Durchlässigkeitsversuch mit Standrohr
(DIN. Nr. 18130-1 1998)

Tabelle 8 zeigt eine Einordnung der jeweiligen Durchlässigkeiten in Durchlässigkeitsbereiche und zeigt gängige k_f -Werte verschiedener Bodenarten.

Tabelle 8: Durchlässigkeitsbeiwerte nach (DIN. Nr. 18130-1 1998; KOLYMBAS 2019, S.50)

K_f [m/s]	Bereich	Bodenart
$< 10^{-8}$	Sehr schwach durchlässig	Ton, Lehm
10^{-8} bis 10^{-6}	Schwach durchlässig	Schluff, Sand (lehmig, schluffig)
$> 10^{-6}$ bis 10^{-4}	Durchlässig	Feinsand, Mittelsand
$> 10^{-4}$ bis 10^{-2}	Stark durchlässig	Grobsand, Mittelkies, Feinkies
$> 10^{-2}$	Sehr stark durchlässig	Grobkies

2.3.4 Scherfestigkeit

Unter Scherfestigkeit versteht man die "Fähigkeit eines Stoffes, Schubspannungen bzw. Zugspannungen auszuhalten, ohne [...] zu brechen [...] oder zu fließen [...]" (SCHMIDT ET AL. 2017, S.148). Diese ist sowohl von den Bodenteilchen (Art und Beschaffenheit) als auch von der Bodenstruktur und dessen Wassergehalt abhängig. (SCHMIDT ET AL. 2017, S.149) Die Scherfestigkeit wird nach DIN 18137 durch verschiedene Scherversuche bestimmt. Hierbei wird ein Boden unter Spannung gesetzt und ermittelt, wann der Boden ausschert. (DIN. Nr. 18137-1 2010) Im Rahmenschersversuch wird die Scherfestigkeit mithilfe eines Versuchsgerätes bestimmt, welches aus einem Kasten mit zwei Rahmen besteht. Die Rahmen sind übereinander gestellt und jeder Rahmen ist mit einer Bodenprobe gefüllt. Sowohl von oben (Normalkraft N) als auch von der Seite (Scherkraft T) wirkt eine Kraft auf die Rahmen. Nach einer gewissen Zeit bricht der Boden. Der Scherweg wird abgelesen und der Abschervorgang dokumentiert. (KOLYMBAS 2019, S.107–109) Abbildung 17 zeigt eine Schergerade für Böden mit einer Kohäsion gleich null (nicht bindige Böden).

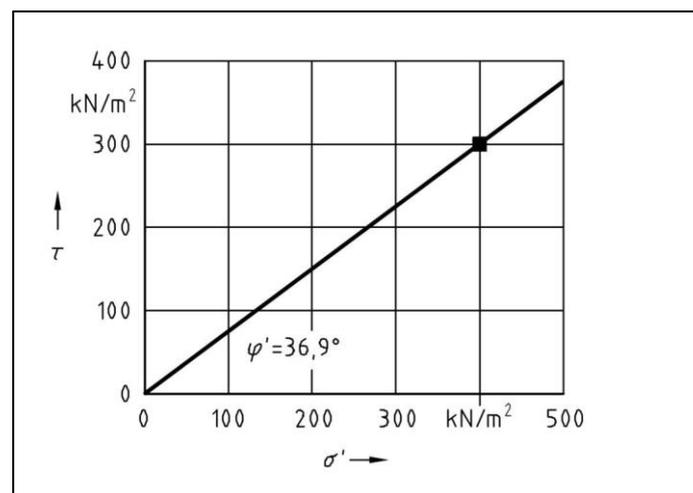


Abbildung 17: Schergerade (DIN. Nr. 18137-3 2002)

3 Material und Methoden

3.1 Material

Im Vorfeld der Pflanzversuche wurden die einzelnen Materialien (Klärschlämme, AFB-Böden, Pilzsubstrate) getestet und anschließend Vorzugsmaterialien für die nachfolgenden Versuche ausgewählt. Weiterhin wurden verschiedene Materialmischungen hergestellt, um optimale Mischungsverhältnisse zu finden. Die Ergebnisse zeigen Anhang 7 bis Anhang 11.

3.1.1 Materialmischungen 2018

Nach den Einzelanalysen der Vorzugsmaterialien wurden verschiedene Gemische hergestellt. Diese Mischungen wurden für die Pflanzversuche und weitere Analysen, bspw. die geotechnische Materialprüfung, im Zeitraum von Juli bis September 2018 verwendet. Die Materialien wurden bezüglich der in BQS 7-1, Anhang 1 gestellten geotechnischen Anforderungen und auf die geforderten Grenzwerte nach DepV, Anhang 3 untersucht. Es wurden verschiedene Mischungen nach DepV analysiert. Danach wurde entschieden, welche Mischungen sich am besten für die weiteren Versuche eignen. Es wurden insgesamt fünf Mischungen für die Pflanzversuche am IAK ausgewählt. Eine Mischung bestand aus 100% AFB-Böden und dient als Vergleichsboden. Die anderen vier Mischungen wurden im Verhältnis 2: 1 gemischt, d.h. zwei Teile AFB-Böden und ein Teil Kompost (Abbildung 18).

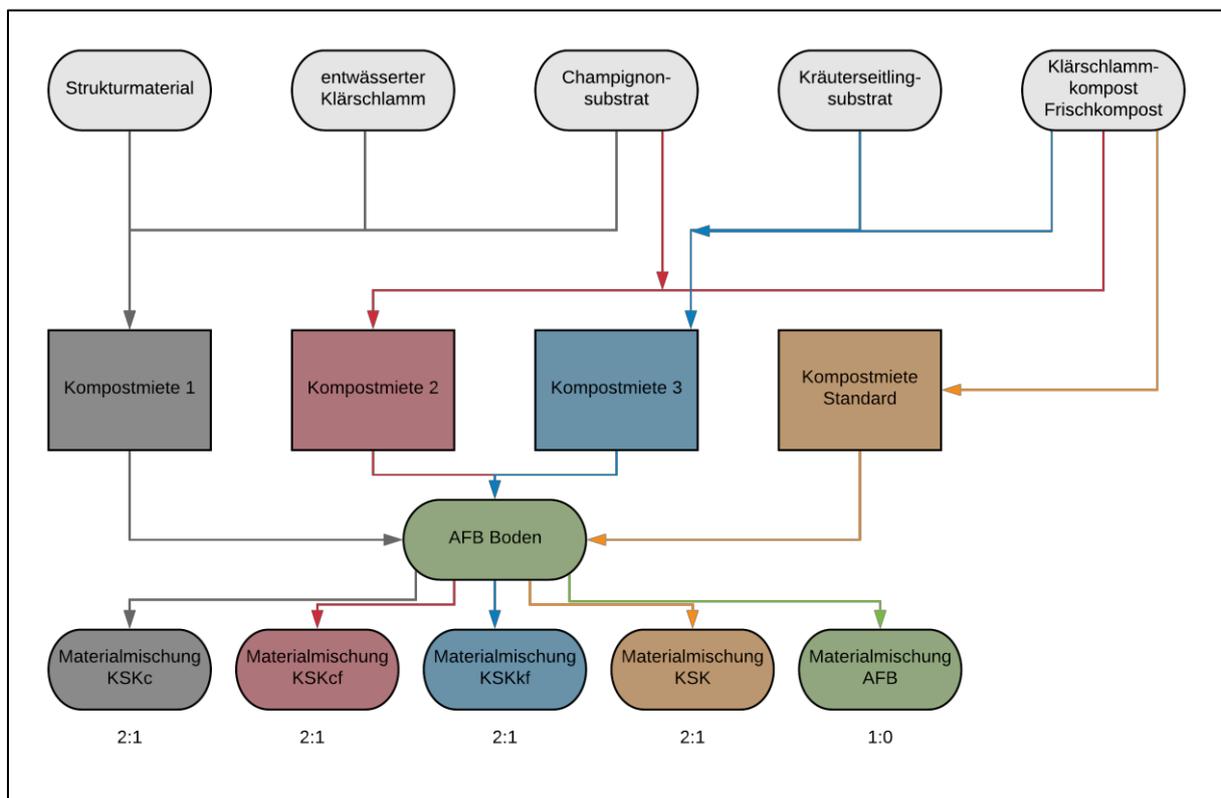


Abbildung 18: Mischvorgänge zur Herstellung der Materialmischungen, 2018

Tabelle 9 zeigt, wie die verschiedenen Kompostmieten M1 bis M3 zusammengesetzt waren. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird nur von „entwässertem Klärschlamm“ gesprochen, wobei es sich genau genommen um ausgefaulten, entwässerten Klärschlamm handelt. Dieser hält die Zuordnungswerte nach DüMV ein und kann bodenbezogen verwertet werden.

Tabelle 9: Mischverhältnisse Kompostmiete 1 bis 3, 2018

	Kompostmiete 1	Kompostmiete 2	Kompostmiete 3
<i>Entwässerter Klärschlamm</i>	20	-	-
<i>Klärschlamm-Frischkompost</i>	-	6	6
<i>Siebabfall *</i>	28	-	-
<i>Champignonsubstrat</i>	16	-	2
<i>Kräuterseitlingsubstrat</i>	-	2	-
Menge je Mischversuch (in t)	64	8	8

* Siebabfall aus dem Erdenwerk, welcher bei der Absiebung der fertigen Komposte anfällt

Nach Anlieferung des Materials am IAK wurde eine organoleptische Bodenansprache (Anhang 12) vorgenommen. Die Böden enthielten, charakterisiert nach den Grenzwerten in BQS 7-1, kaum bodenfremde Bestandteile und sind demnach generell als Rekultivierungsmaterial geeignet. (LAGA AD-HOC-AG 2016)

3.1.2 Materialmischungen 2019

Im zweiten Versuchsansatz (Zeitraum Mai bis Juli 2019) wurden ähnliche Mischungen wie im Vorjahr hergestellt, da diese sich prinzipiell als geeignet erwiesen hatten. Auch 2019 wurden die Materialien bezüglich der in BQS 7-1, Anhang 1 gestellten Anforderungen und auf die Grenzwerte nach DepV, Anhang 3 analysiert. Abbildung 19 zeigt die Vorgehensweise des Mischens. Die zweite Variante AFB-Material ist Material aus der Umgebung von Leipzig. Die erste Variante ist das gleiche Material, welches jedoch schon vor einiger Zeit auf der Deponiefläche zur Abdeckung aufgebracht und für die Versuche direkt verwendet wurde.

In Tabelle 10 können die jeweiligen Mischverhältnisse eingesehen werden. Die Kompostmischungen wurden direkt bei der LAV im großtechnischen Maßstab angesetzt und nicht am IAK im kleinen Maßstab kompostiert. Insgesamt gab es drei Kompostmischungen (M1, M2 und M3), welche aus Klärschlamm und Pilzsubstraten bestanden.

Tabelle 10: Mischverhältnisse Mischung 1 bis 3, 2019

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Entwässerter Klärschlamm	13	-	-
Klärschlamm-Frischkompost	-	6	6
Siebabfall*	18	-	-
Champignonsubstrat	12	1	2
Kräuterseitlingssubstrat	-	1,5	-
Menge je Ansatz in t	43	8,5	8

*Siebabfall aus dem Erdenwerk, welcher bei der Absiebung der fertigen Komposte anfällt

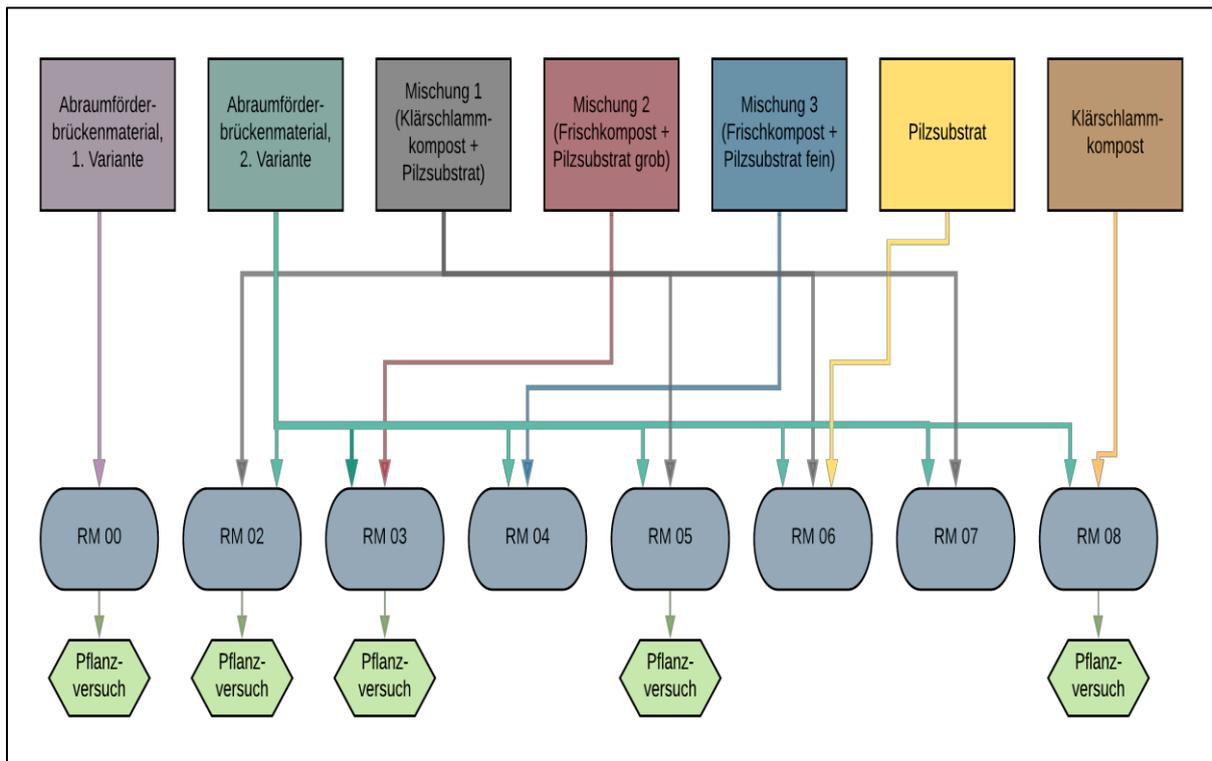


Abbildung 19: Mischvorgänge zur Herstellung der Materialmischungen, 2019

Die in Tabelle 11 unterstrichen dargestellten Mischungen wurden am IAK für die Pflanzversuche genutzt. Alle Mischungen wurden auf der Deponie eingebaut (Kapitel 3.2.5).

Tabelle 11: Materialmischungen Pflanzversuche, 2019

	<u>RM00</u>	<u>RM02</u>	<u>RM03</u>	<u>RM04</u>	<u>RM05</u>	<u>RM06</u>	<u>RM07</u>	<u>RM08</u>
Mischaggregat	-	MS	MS	MS	MS	MS	BF	BF
M1: Kompost (Klärschlamm+Pilzsubstrat)	-	33%	-	-	20%	30%	20%	-
M2: Kompost (Frischkompost+Pilzsubstrat)	-	-	33%	-	-	-	-	-
M3: Kompost (Frischkompost+Pilzsubstrat)	-	-	-	33%	-	-	-	-
Klärschlammkompost	-	-	-	-	-	-	-	20%
Pilzsubstrat	-	-	-	-	-	10%	-	-
Bodenmaterial AFB	-	66%	66%	66%	80%	60%	-	-
AFB-Material (bereits im Versuchsfeld aufgebracht)	100%	-	-	-	-	-	80%	80%

Nach Anlieferung des Materials wurde erneut eine organoleptische Bodenansprache (Anhang 13) durchgeführt. Auch die Böden im Jahr 2019 enthielten kaum bodenfremde Bestandteile (nach BQS 7-1, Anhang 1) und sind demnach für den Einsatz in Rekultivierungsschichten geeignet. (LAGA AD-HOC-AG 2016)

3.1.3 Pappelstecklinge

Die in den Versuchen verwendete Pappelsorte ist der Max 3 Hybrid. Klone der Sorte Max werden derzeit bevorzugt angebaut. (SCHIRMER 2009, S.7; SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2014, S.3) Der Hybrid Max 3 ist ein geprüfter Klon der Gattungen Balsampappel und Schwarzpappel. (BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2012, S.9) Die Pappelsteckhölzer wurden bei der Firma Lignovis bestellt und waren als 20 cm Steckhölzer klassifiziert.

Pappelstecklinge 2018: Es ist zu beachten, dass die Pappeln aufgrund der Erntezeit bereits Anfang Juni geliefert wurden. Durch Verzögerungen bei der Herstellung der Materialmischungen konnten die Pappeln erst im Juli eingepflanzt werden. Sie wurden kühl und dunkel bei 7°C gelagert. Ein erstes Auskeimen konnte größtenteils verhindert werden, sodass sich keine Wachstumsvorteile boten. Nach der Lieferung wurden die Steckhölzer vermessen (Durchmesser oben/unten) und die Knospenzahl ermittelt (Anhang 14). Die Ergebnisse der Qualitätsprüfung wiesen darauf hin, dass nahezu homogene Hölzer geliefert wurden und somit der Versuch nicht durch eine zu große Variabilität der Hölzer beeinflusst wird. Die geforderten Parameter zwecks Durchmesser und Knospenzahl bei den Steckhölzern sind erfüllt (Vgl. Kapitel 2.2.6.2). Es wurden in den Versuchen keine Hölzer verwendet, die

weniger als drei Knospen besaßen, damit nicht von vornherein mit einem Ausfall zu rechnen ist und gleiche Startbedingungen herrschen.

Pappelstecklinge 2019: Für den zweiten Durchgang der Pflanzversuche wurden die gleichen Steckhölzer wie im Vorjahr bestellt und ebenfalls klassifiziert (Anhang 15). Auch 2019 wurden keine Steckhölzer mit einer Knospenzahl niedriger als drei verwendet. Es herrschen insgesamt ähnliche Vorbedingungen wie im Jahr 2018. Die Qualitätsprüfung ergab, dass nahezu homogene Hölzer geliefert wurden. Somit ist eine Verfälschung der Ergebnisse durch zu große Variabilität der Hölzer auszuschließen. Die geforderten Parameter zwecks Durchmesser und Knospenzahl bei den Steckhölzern sind erfüllt (Vgl. Kapitel 2.2.6.2).

3.1.4 Böden Deponie Wetro

Für die Testfelder der Deponie Wetro wurden vier verschiedene Bodensubstrate verwendet: Kippenböden mit pH-Wert neutral sowie pH-Wert 3 - 4, tertiäre Böden (organogene Schluffe und Quarzsande) sowie Böden aus pflanzenfreundlichem Substrat (Braunkohle). (KOSTELETSKY 2015, S.1) Die Böden auf dem Testfeld der Deponie Wetro waren zum großen Teil nährstoffarme Böden und entsprechen damit jener Bodenklasse, welche im Rahmen dieser Arbeit aufgewertet werden sollen. Die vier Testfelder weisen jeweils einen unterschiedlichen Aufbau auf (Abbildung 20).

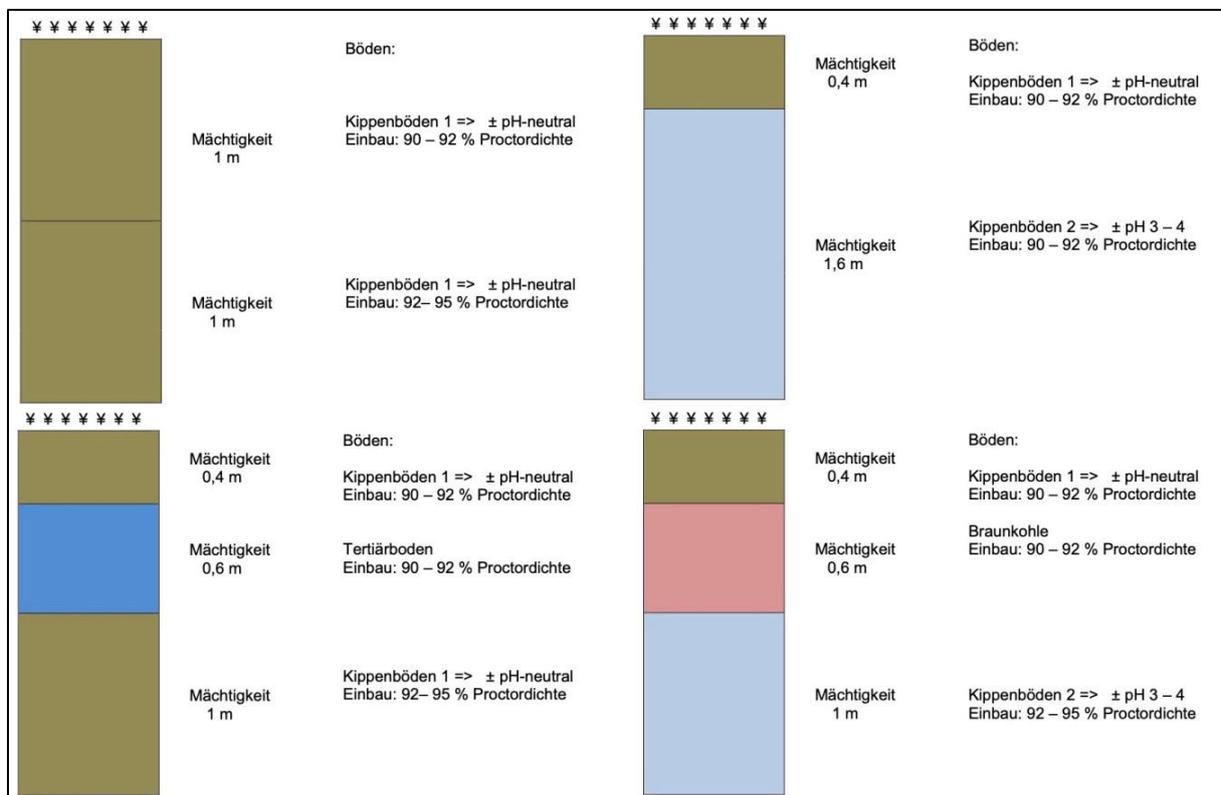


Abbildung 20: Testfeld 1 (l. o.), 2 (r. o.), 3 (l. u.), 4 (r. u.) Deponie Wetro (KOSTELETSKY 2015, S.2–3)

3.2 Methoden

3.2.1 Kompostierung

Es werden im Folgenden nur die Kompostierungsversuche vorgestellt, welche am IAK durchgeführt wurden. Die restlichen Kompostierungen erfolgten großtechnisch bei der LAV. Zur Herstellung eines geeigneten Rekultivierungsmaterials war als erster Schritt die Kompostierung von Klärschlamm und Pilzsubstraten nötig. Die Mischungsverhältnisse wurden jeweils immer auf Basis der Ergebnisse des vorhergehenden Versuches angepasst. In einem zweiten Schritt wurden die hergestellten Komposte mit anderen Zuschlagstoffen so gemischt, dass das Material als Pflanzsubstrat dienen konnte.

3.2.1.1 Erster Ansatz

Der erste Kompostierungsversuch fand vom 17.08.2017 bis 16.10.2017 am IAK statt. Betrachtet wurde einerseits die Kompostierung von (Klärschlamm-)Frischkompost mit Strukturmaterial und Pilzsubstraten. Andererseits sollte getestet werden, ob das Pilzsubstrat herkömmliches Strukturmaterial ersetzen kann. Daher wurde auch die Kompostierung von entwässertem Klärschlamm ohne Strukturmaterial und nur mit Pilzsubstrat untersucht. Mit Ausnahme der Kontrollgruppe wurde bei jedem Kompost entweder Champignonssubstrat oder Kräuterseitlingssubstrat beigemischt. Es wurden insgesamt vier Materialmischungen hergestellt. Die Mischungen waren die folgenden:

Variante A: Entwässerter Klärschlamm und Champignonssubstrat

Variante B: Frischkompost mit Strukturmaterial und Champignonssubstrat

Variante C: Frischkompost mit Strukturmaterial und Kräuterseitlingssubstrat

Variante D: Frischkompost mit Strukturmaterial (Kontrollgruppe)

Die Versuche wurden für insgesamt 61 Tage durchgeführt. Die Komposte wurden in allen Varianten dreimal, nämlich am siebten, 18. und 39. Tag umgesetzt. Gemessen wurden Wassergehalt, organische Trockensubstanz (oTS) und chemischer Sauerstoffbedarf (CSB).



Abbildung 21: Komposter A bis D (von l. o. nach r. u.)

Die Außentemperaturen lagen im Versuchszeitraum zwischen 12°C und 30°C. Dabei waren sie im August mit 18°C bis 30°C etwas wärmer und ab Anfang September mit 12°C bis 14°C kälter (siehe Anhang 16). (WETTERONLINE 2017)

Der erste Ansatz diente dazu, zu testen, wie sich die Materialien während der Kompostierung verhalten und ob sie generell geeignet sind. Daraus aufbauend wurden die großtechnischen Mischungen bei der LAV angesetzt, um die Kompostierung der Materialien ebenfalls im großen Maßstab zu testen. Aus den Ergebnissen wurden anschließend die Mischungen der nachfolgenden Ansätze hergestellt.

3.2.1.2 Zweiter Ansatz

Der zweite Kompostiersversuch fand vom 17.02.2018 bis 09.04.2018 am IAK statt. Mit den Erkenntnissen aus der ersten Versuchsreihe wurden zwei neue Mischungen hergestellt, um zu testen, ob sich Siebabbfall als Ersatz für das Strukturmaterial im Kompostierungsprozess eignet. Folgende Mischungen wurden angefertigt und anschließend kompostiert.

Variante E: Entwässerter Klärschlamm, Siebabbfall und Champignonsubstrat

Variante F: Entwässerter Klärschlamm, Strukturmaterial und Champignonsubstrat

Die Versuche wurden insgesamt 54 Tage durchgeführt. Gemessen wurden der Wassergehalt, die organische Trockensubstanz (oTS) und der chemischer Sauerstoffbedarf (CSB). Aufgrund der Witterungsbedingungen war das Substrat über eine lange Zeit gänzlich gefroren,

weswegen nicht umgesetzt werden konnte. Im Versuchszeitraum lagen die Außentemperaturen zwischen -8°C und 24°C . Es gab direkt nach dem Einbau im Februar einen Temperatursturz und später, nach einem Anstieg auf 18°C Anfang März, gab es erneut einen Temperatursturz mit Minusgraden. Erst nach dem Abbruch der Versuche stiegen die Temperaturen wieder gleichbleibend an (siehe Anhang 17). (WETTERONLINE 2018a)

Im zweiten Ansatz lag der Fokus auf die Beimischung von unterschiedlichem Strukturmaterial. Es sollte hierbei getestet werden, ob sich Siebabfall ebenso wie herkömmliches Strukturmaterial verwenden lässt. Da dies der Fall war, wurde in den weiteren Versuchen Siebabfall verwendet.

3.2.1.3 Dritter Ansatz

Der dritte Kompostversuch wurde sowohl großtechnisch durch die LAV Markranstädt als auch im kleintechnischen Maßstab durch das IAK durchgeführt. Aus den Ergebnissen der ersten beiden Ansätze konnte geschlussfolgert werden, welche Kompostmischung sich am besten für die Pflanzversuche eignete. Für die neuen Versuche wurde eine Mischung erstellt, in der Champignonsubstrat schon während der Kompostierung - jedoch in einem anderen Mischungsverhältnis als im ersten Ansatz - als Strukturmaterial dem Klärschlamm und Siebabfall beigemischt wurde (Variante 1, bzw. G und H). Es wurde sich für die Verwendung von Champignonsubstrat entschieden, da hier große Mengen vorhanden sind und somit ein Teil des Strukturmaterials ersetzt werden kann. Variante 1 wurde sowohl großtechnisch bei der LAV als auch begleitend an der TU Dresden kompostiert. Die Versuche am IAK liefen vom 07.05.2018 bis 13.07.2018 und es wurden die folgenden Mischungen kompostiert:

Variante G und H: Entwässerter Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat

Im Versuchszeitraum lagen die Außentemperaturen zwischen 14°C und 33°C . Bereits Ende Mai steigen die Temperaturen auf über 30°C an (siehe Anhang 18). (WETTERONLINE 2018b)

Da festgestellt wurde, dass das Pilzmyzel bei den hohen Kompostiertemperaturen abstarb, wurde ein zweiter Ansatz erstellt, bei dem das Pilzsubstrat nicht mitkompostiert, sondern dem Frischkompost nur beigemischt wurde (Variante 2). Durch die spätere Beimischung des Substrates wurde eine verbesserte Ausbreitung des Pilzmyzels im Kompost erwartet. Hierzu wurde im Anschluss an die Kompostierung (Kompost aus Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat) das Kräuterseitlingssubstrat beigemischt. Variante 2 wurde nur großtechnisch bei der LAV kompostiert. Die hergestellten Komposte wurden anschließend für den ersten Durchgang der Pflanzversuche im Jahr 2018 verwendet. Theoretisch war ein weiterer Versuch geplant, in dem Kräuterseitlingssubstrat (parallel zum Champignonsubstrat)

mit Klärschlamm und Siebabfall kompostiert werden sollte. Dieser Ansatz entfiel jedoch aus Gründen der Machbarkeit sowie Wirtschaftlichkeit. Für die großtechnische Kompostierung wären 10 t Kräuterseitlingssubstrat benötigt worden. Die Kräuterseitlingssubstrate sind jeweils in 1 kg Paketen einzeln in Plastik verschweißt und müssen händisch entpackt werden, da es keine Entpackvorrichtung gibt. Das händische Entpacken von diesen Mengen wurde als unwirtschaftlich angesehen. Der abschließende Vergleich der Substrate in den Pflanzversuchen ist trotzdem gegeben, da zuvor im ersten Ansatz im Jahr 2017 Kräuterseitling- und Champignonssubstrat im kleinen Maßstab am IAK kompostiert wurden und sich zeigte, dass zwischen den Substraten kein quantifizierbarer Unterschied bestand.

Im Jahr 2019 wurden nur großtechnische Kompostierungen bei der LAV durchgeführt und die Komposte anschließend in den Pflanzversuchen am IAK genutzt.

3.2.2 Pflanzversuche 2018

Um die Wirkung der verschiedenen Komposte zu testen, wurden diese mit AFB-Boden gemischt, um ein Substrat für die Pflanzversuche herzustellen (Kapitel 3.1.1). Am 05.07.2018 wurde das Material am IAK angeliefert, welches vorher durch eine Aufbereitungsmaschine der Silberland Maschinenteknik (die Entwicklung der Maschine war Teil des Forschungsprojektes, jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit) gemischt wurde. Folgende Mischungen wurden in den Pflanzversuchen getestet:

- 1) 20 Töpfe Klärschlammkompost, Champignonssubstrat, AFB-Material (**KSK c**)
- 2) 20 Töpfe Klärschlammkompost, Kräuterseitlingssubstrat frisch, AFB-Material (**KSK kf**)
- 3) 20 Töpfe Klärschlammkompost, Champignonssubstrat frisch, AFB-Material (**KSK cf**)
- 4) 20 Töpfe Klärschlammkompost ohne Pilze, AFB-Material (**KSK**)
- 5) 20 Töpfe AFB-Material (**AFB**)

Die Töpfe (2 Liter Rosentopf der Firma Soparco, Durchmesser 14,8 cm) wurden zuerst mit dem jeweiligen Material gefüllt (Anhang 19) und anschließend mit Pappelstecklingen bestückt. Aus Gründen der Randomisierung wurden die Töpfe zufällig verteilt gestellt (Anhang 20) und jeweils Montag, Mittwoch und Freitag die Plätze getauscht. An diesen Tagen wurden ebenso jeweils 100 ml Wasser pro Pflanze gegossen. Da mit steigendem Wasserverbrauch auch der Ertrag einer Pflanze zunimmt, wenn alle anderen Faktoren unbeeinflusst bleiben, sind bei Pflanzexperimenten gleiche Wassergaben wichtig. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.387) Die Pflanzversuche fanden bei Raumtemperatur ohne zusätzliche Beleuchtung statt. Jeweils mittwochs wurde das Pflanzenwachstums (Bonitur) aufgenommen. Hier wurden die Länge und die Anzahl der Sprosse vermessen. Das Boniturschema ist nachfolgend (Abbildung 22) dargestellt.

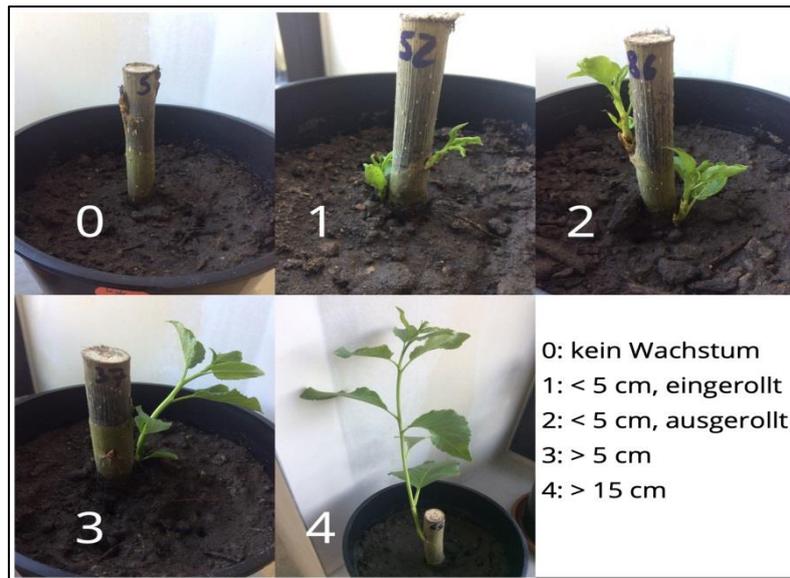


Abbildung 22: Pflanzen-Boniturschema nach (MÜLLER 2013, S.23)

Am 31.07.2018, nach 26 Tagen, fand die Ernte von jeweils der Hälfte der Pflanzen (je Materialmischung, Entnahme der Töpfe 1-10) statt. Die Pappelstecklinge wurden ausgegraben und die Sprosse vermessen. Anschließend wurde die Masse der Sprosse und Blätter bestimmt, in dem diese von den Hölzern abgetrennt wurden. Zusätzlich wurde eine Wurzelbonitur nach dem Schema in Abbildung 23 durchgeführt.

Am 03.09.2018, nach 60 Tagen, fand die Ernte der restlichen Pflanzen statt, welche wie zuvor durchgeführt wurde. (Vgl. 65 Tage Experiment bei KRABEL ET AL. 2015, S.1290)

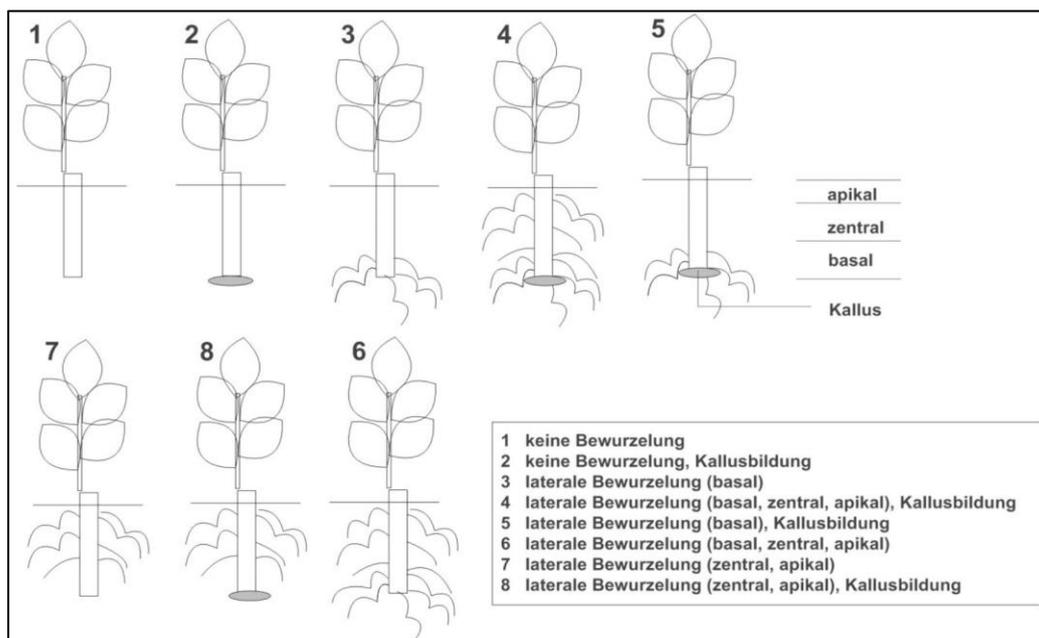


Abbildung 23: Wurzel-Boniturschema (MÜLLER 2013, S.23)

3.2.3 Pflanzversuche 2019

Der zweite Durchgang der Pflanzversuche erfolgte nach dem gleichen Ablauf wie im Vorjahr. Um die Wirkung der neuen Kompostmischungen zu testen, wurden diese mit Abraummateriale (AFB) gemischt. Mit diesen Materialmischungen wurden erneut Pflanzversuche durchgeführt (Vgl. Abbildung 19). Am 24.05.2019 wurde das Material am IAK eingebaut (Anhang 21 und Anhang 22). Es handelte sich um folgende Mischungen (Vgl. Tabelle 11):

- 1) 20 Töpfe Klärschlammkompost, Pilzsubstrat (kompostiert), AFB-Mat. (33: 66%) (**RM02**)
- 2) 20 Töpfe Frischkompost (Klärschlamm), Pilzsubstrat (frisch), AFB-Mat. (33: 66%) (**RM03**)
- 3) 20 Töpfe Klärschlammkompost, Pilzsubstrat (kompostiert), AFB-Mat. (20:80%) (**RM05**)
- 4) 20 Töpfe Klärschlammkompost ohne Pilze, AFB-Material (20:80%) (**RM08**)
- 5) 20 Töpfe AFB-Material (100%) (**RM00**)

Der Ablauf der Pflanzversuche kann unter Kapitel 3.2.2 nachgelesen werden. Die Versuchsdurchführung war gleich zum Vorjahr. Die Bonituren fanden immer montags statt. Am 19.06.2019, nach 26 Tagen, fand die Ernte von jeweils der Hälfte der Pflanzen (je Mischung, Entnahme Töpfe 1-10) statt. Am 23.07.2019, nach 60 Tagen, fand die abschließende Ernte der restlichen Pflanzen statt.

3.2.4 Geotechnische Materialprüfung

Zur Charakterisierung der Böden wurden zusätzlich geotechnische Untersuchungen am Institut für Geotechnik der TU Dresden durchgeführt. Diese sollten nachweisen, ob die Böden zum Einbau in einer Rekultivierungsschicht geeignet sind. Die Materialien wurden bezüglich der in BQS 7-1, Anhang 1 gestellten Anforderungen untersucht. Der BQS 7-1 gilt für die Anwendung des Materials in der Rekultivierungsschicht als Handlungsleitfaden. (LAGA AD-HOC-AG 2016) Hierzu wurden die Fließgrenzen (ETC 5-C5.97 Fallkegel 60g /60°), die Proctordichte (DIN 18127 - P 100 Y), die Scherfestigkeit (DIN 18 137 Teil 3) sowie der Durchlässigkeitsbeiwert (DIN 18130 Teil 1) bestimmt (Vgl. Kapitel 2.3). Die geotechnischen Versuche wurden nur für die Böden mit Kompostbeimischung durchgeführt. Die reinen AFB-Böden dienten nur als Vergleichsboden und sollen nicht als Rekultivierungsmaterial verwendet werden.

3.2.5 Freilandversuche Deponie Cröbern

Auf der Deponie Cröbern wurden im Jahr 2019 großtechnische Pflanzversuche durchgeführt. Hierfür wurden alle Mischungen verwendet, die in Tabelle 11 zu sehen sind. Die Frästiefe für die Mischungen, welche mit der Bodenfräse aufgebracht wurden, betrug 40 cm. Alle Mischungen wurden zwischen dem 20.05.2019 und 24.05.2019 aufgebracht (Abbildung 24).

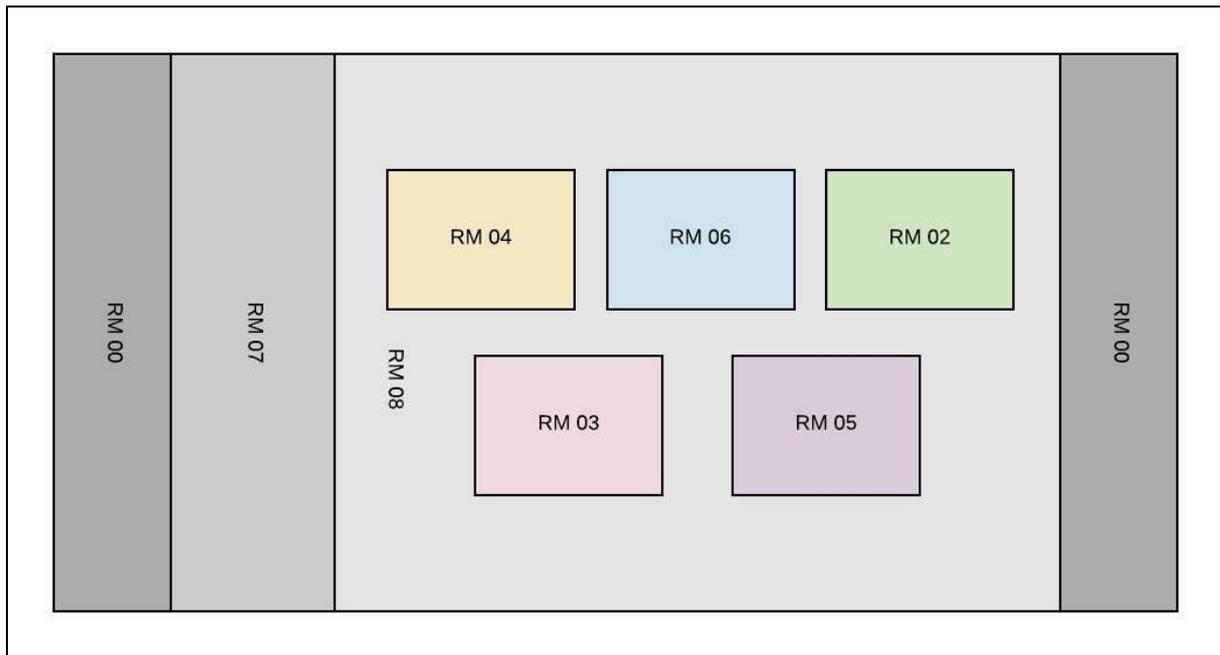


Abbildung 24: Lage der Testfelder Deponie Cröbern

Anschließend wurde der Bewuchs, bestehend aus einer Mischung aus Rasensamen für besonders trockene Lagen und einer Blumenwiesenmischung, ausgesät. (Anhang 23 und Anhang 24) Der Bewuchs wurde nicht bewässert, da hierfür die technische Machbarkeit auf der Deponie nicht gegeben war. Das Wasser hätte per Fahrzeug auf die Deponiekuppe gebracht werden müssen. Weiterhin besitzt die Deponie nur ein Bewässerungssystem, welches über wenige Meter Wurfweite verfügt und somit nicht über den vorhandenen Erdwall kam. Im Juni wurden, nachdem erste Sprösslinge gewachsen waren, einige Pflanzen markiert, welche in den kommenden Monaten vermessen wurden. Hierbei wurden einmal monatlich das Höhen- und Dickenwachstum der markierten Kontrollpflanzen vermessen. Eine statistische Auswertung wurde nicht vorgenommen, da zu Beginn der Versuche zu wenig Messwerte vorlagen und der Freilandversuch nur einige Monate durch das IAK begleitet wurde. Für die Zukunft sind unter anderem Wurzelbohrungen sowie Boden- und Blattmasseanalysen (Nährstoffe, Schadstoffe, Wassergehalt) geplant. Die Dauer der Feldversuche übersteigt jedoch den Zeithorizont der vorliegenden Arbeit.

3.2.6 Freilandversuche Deponie Wetro

Das Forschungsprojekt ist auf der Deponie Wetro angesiedelt. Der Deponieabschnitt Wetro Ostfeld erreichte 2010 den maximalen Füllstand und wurde 2015 abgedeckt. Im November 2016 die Deponie durch die Landesdirektion als stillgelegt klassifiziert. (Anhang 97, STREHLE 2019a) Im Jahr 2015 wurden im Rahmen der Rekultivierung des Abschnittes Wetro Ostfeld Testfelder angelegt (Abbildung 25) und die Rekultivierungsschicht in diesem Bereich auf 2 m erhöht. Insgesamt wurden vier Felder (je 20*40 m) angelegt und pro Feld 44 Pflanzen, aufgeteilt auf vier Reihen, gepflanzt (siehe Anhang 25 bis Anhang 28). Folgende Pflanzen

wurden gepflanzt: Schlehe, Hundsrose, Esche und Eibe. Da im ersten Jahr festgestellt wurde, dass die Eibe große Ausfälle verzeichnet, wurden diese durch Kiefern ersetzt. Alle Pflanzen wurden wurzelnackt eingepflanzt, gemulcht, gedüngt und mit 8 g Wasserspeicherstoff versehen. Die Pflanzen wurden nur zur Aufzuchtspflege - acht Mal in den ersten beiden Jahren - bewässert. Im Jahr 2017 wurden die Pflegemaßnahmen eingestellt. Ein Befahren des Versuchsfeldes war nicht vorgesehen. (FRIEDERICH 2019a)

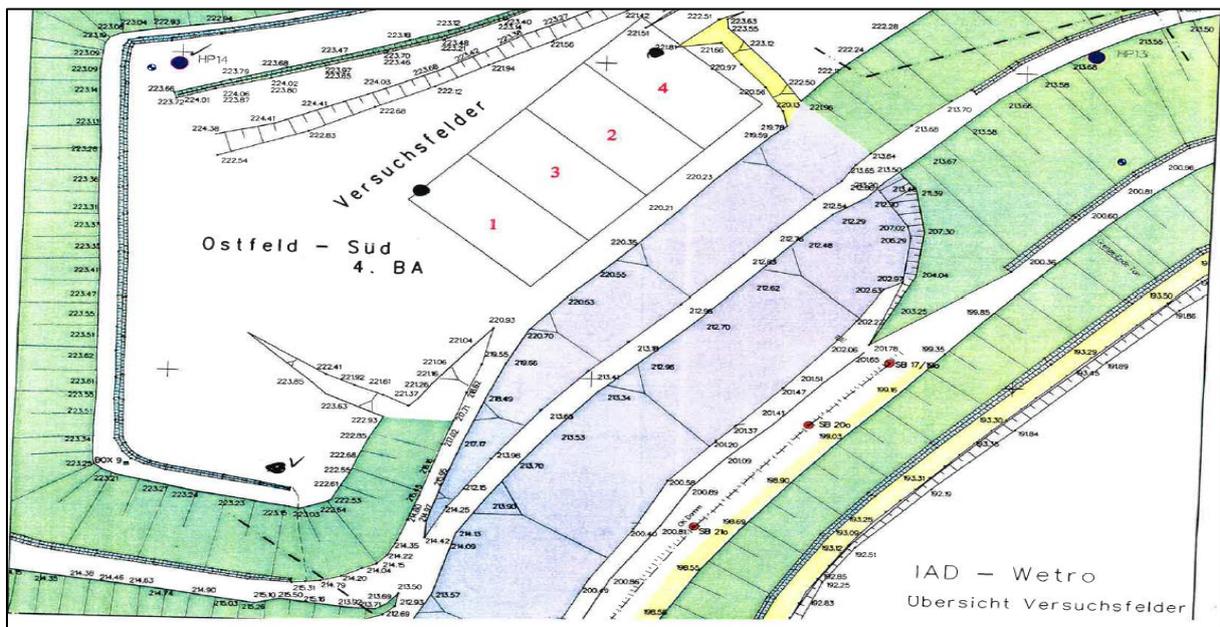


Abbildung 25: Versuchsfelder auf der Deponie Wetro (FRIEDERICH 2015)

Mindestens einmal jährlich wurde die Pflanzenentwicklung überprüft und dokumentiert. Es wurden jeweils der Höhenzuwachs des längsten Sprosses und das Dickenwachstum des Stammes (in etwa drei bis vier Zentimeter über dem Boden) jeder einzelnen Pflanze vermessen. Die Daten wurden in einem Plan vor Ort vermerkt und später in einer Excel-Tabelle zusammengeführt, um somit das Wachstum über den Jahresverlauf zu dokumentieren. Die statistische Auswertung kann in Kapitel 4.8 nachvollzogen werden.

4 Ergebnisse und Auswertung

4.1 Instrumente zur Datenbewertung

4.1.1 IBM SPSS

Statistische Auswertungen der erhobenen Daten wurde mit IBM SPSS durchgeführt. Alternative Instrumente wären die Statistiksoftware R oder aber Microsoft Excel gewesen. Letzteres bot nicht die statistische Tiefe einer spezialisierten Anwendung und wurde nur für einfache Berechnungen genutzt. SPSS und R erschienen gleichwertig, allerdings erforderte R tiefergehende Vorkenntnisse der statistischen Programmierung. Aufgrund der Mächtigkeit in Verbindung mit Anwenderfreundlichkeit wurde sich für die Verwendung von SPSS entschieden.

4.1.2 Microsoft Excel

Einfache Berechnungen wurden mithilfe von Microsoft Excel durchgeführt und verifiziert. Außerdem wurden die in der Arbeit dargestellten Diagramme (insbesondere Korrelationsdiagramme) mittels Excel produziert. Für die Erstellung von Diagrammen aus Datensätzen ist Microsoft Excel eine Standardsoftware.

4.1.3 Boniturschemata

Sowohl Blattmassen- als auch Wurzelbonitur wurden in Absprache mit der Professur für Forstbotanik an der TU Dresden durchgeführt. Dabei wurden Boniturschemata verwendet, wie für solche Pflanzversuche gängig sind (siehe Ausführungen in Kapitel 3.2.2).

4.2 Kompostierung

Die Kompostierungsversuche am IAK erfolgten in drei unterschiedlichen Ansätzen zwischen 2017 und 2018 und werden jeweils einzeln ausgewertet.

4.2.1 Erster Ansatz

In Abbildung 26 ist der Temperaturverlauf im Inneren der vier verwendeten Komposter über den Versuchszeitraum dargestellt. Es ist zu sehen, dass Variante A aus Klärschlamm und Champignonsubstrat die vorgeschriebene Temperatur nach Bioabfallverordnung von 65°C über drei Tage, 60°C über sechs Tage oder 55°C über zwei Wochen nicht erreichen konnte. (BioABFV. Fassung vom 04.04.2013) Da die Mischung einen für die Kompostierung zu hohen Wassergehalt von 65% bis 70% aufwies und damit eine unzureichende Durchlüftung des Kompostes einherging, wurden die aeroben Abbauvorgänge behindert. Hier ersetzte das Champignonsubstrat nicht in ausreichendem Maße das Strukturmaterial. Daher wurde diese Mischung in den weiteren Versuchen nicht mehr verwendet. Die anderen Varianten (B, C, D) konnten die Temperaturen zur Hygienisierung mit drei Tagen über 65 bis 70 °C erreichen.

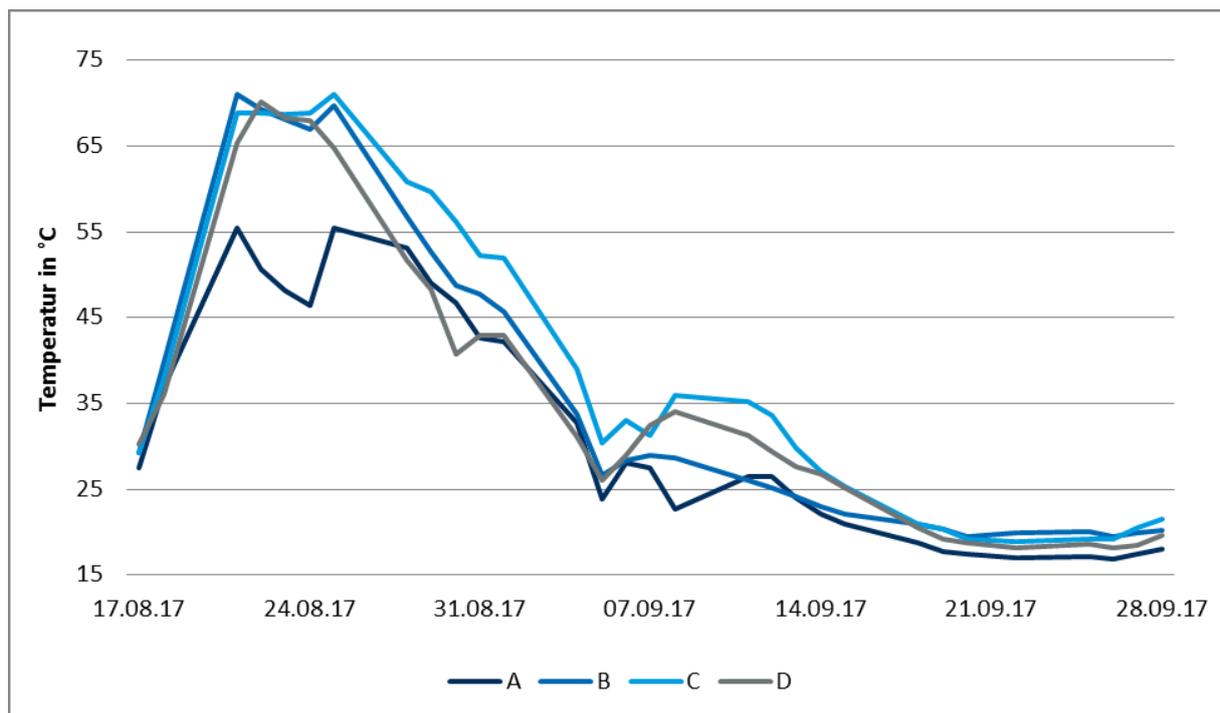


Abbildung 26: Temperaturverlauf im Kompostinneren 1. Ansatz (Mittelwerte drei Messstellen)

Durch die Versuche war ebenfalls erkennbar, dass die hohen Temperaturen von über 70°C während der Kompostierung zum Absterben des Pilzmyzels geführt haben und sich dieses nicht im Kompost ausbreiten konnte.

Aus den Messergebnissen der ersten Versuchsreihe (Tabelle 12) geht hervor, dass infolge des Kompostierungsprozesses der Anteil an organischer Trockensubstanz und der chemische Sauerstoffbedarf über die Versuchslaufzeit abgenommen haben und somit ein Abbau

stattgefunden hat. Laut BioAbfV sollte der Wassergehalt über mehrere Wochen mindestens 40% betragen und der pH-Wert bei circa 7 liegen. (BioABfV. Fassung vom 04.04.2013) Der Wassergehalt lag konstant über 40%. Bei Komposter A war er mit 70% eher zu feucht. Die anderen Komposter mit Werten um 50% lagen im Optimum. Der pH-Wert lag vor dem ersten Umsetzen bei 7,5 (Komposter A) und 7,9 (Komposter B). Komposter C und D produzierten kein Sickerwasser, weswegen der pH-Wert hier nicht ermittelt wurde. Nach dem ersten Umsetzen produzierte keiner der Komposter ausreichend große Mengen Sickerwasser, da das Wasser im Kompost haften blieb und die geringen Mengen, die austraten, schnell verdunsteten. Daher konnte keine weitere Beprobung des Sickerwassers vorgenommen werden. Der CSB hat über den Versuchszeitraum durch den Abbau von organischen Verbindungen abgenommen, was darauf schließen lässt, dass eine Kompostierung stattgefunden hat. Die organische Trockensubstanz sollte laut RAL-GÜTESICHERUNG bei größer 15% liegen. Dieser Wert wurde mit circa 40% eingehalten. (RAL GÜTESICHERUNG 2018, S.1–2) Der TOC lag zwischen 22 und 26%. Nach BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST liegt der durchschnittliche Gehalt an organischem Kohlenstoff im Fertigungskompost bei 21%. (BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST 2006, S.7) Die jeweiligen Abbaugrade können Anhang 29 entnommen werden.

Tabelle 12: Wassergehalt (WG), oTS und TOC, 1. Ansatz

Variante	WG Start [%]	WG Ende [%]	oTS Start [%]	oTS Ende [%]	CSB Start [mg/g]	CSB Ende [mg/g]	TOC Start [mg/g]	TOC Ende [mg/g]
<i>A: Entwässerter Klärschlamm und Champignonssubstrat</i>	65	70	61	45	881	795	335	240
<i>B: Frischkompost und Champignonssubstrat</i>	56	59	56	43	809	521	289	244
<i>C: Frischkompost und Kräuterseitlingssubstrat</i>	55	59	61	44	898	680	310	260
<i>D: Frischkompost</i>	51	57	61	42	868	776	316	222

4.2.2 Zweiter Ansatz

Auf Basis der ersten Wochen, in denen das Material nicht eingefroren war, wurde festgestellt, dass es bei der Kompostmischung mit Siebabfall zu einem etwas schnelleren Abbau der Organik kam - erkennbar u.a. an den höheren und schneller ansteigenden Temperaturen. Für weitere Versuche wurde daher die Beimischung von Siebabfall favorisiert. Abbildung 27 stellt den Temperaturverlauf dar. Die Temperaturen für die Hygienisierung nach BioAbfV wurden bei beiden Kompostern nicht erreicht. (BioABfV. Fassung vom 04.04.2013) Die

Höchsttemperatur im Inneren der Komposter lag anfänglich bei ca. 40°C - 45°C und sank dann auf einen Wert von 0°C - 2 °C ab.

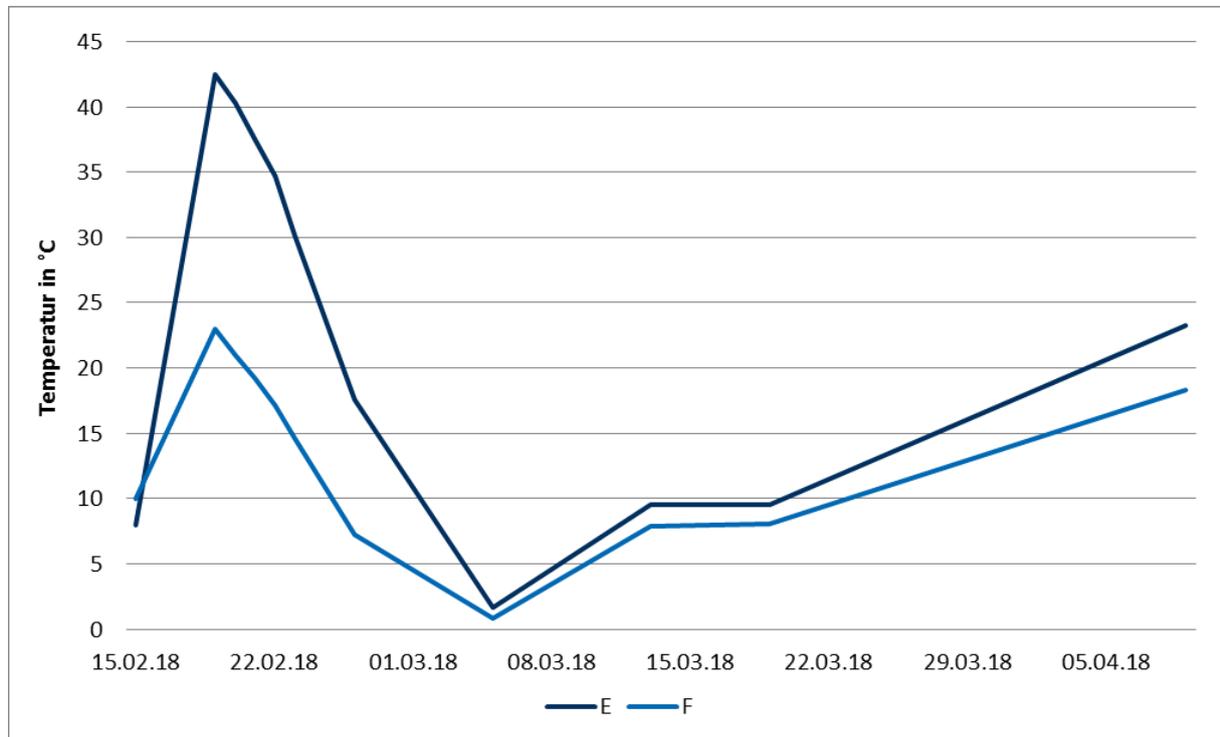


Abbildung 27: Temperaturverlauf im Kompostinneren 2. Ansatz

Aus den Messergebnissen der zweiten Versuchsreihe (Tabelle 13) geht hervor, dass infolge der Witterungsbedingungen der Kompostierungsprozess nicht stattfinden konnte. Das Einfrieren des Materials hatte zu Folge, dass der Abbau der Organik zum Erliegen kam. Die Abbaugrade wurden bei diesem Versuch nicht berechnet, da die Versuche frühzeitig abgebrochen wurden. Der Wassergehalt lag konstant über 40% und war mit 70% eher zu feucht. Da der Kompost gefror, wurde kein Sickerwasser produziert und dementsprechend der pH-Wert nicht gemessen. (BIOABFV. Fassung vom 04.04.2013) Der von der RAL-GÜTESICHERUNG geforderte Anteil organischer Trockensubstanz wurde mit circa 70% deutlich eingehalten. (RAL GÜTESICHERUNG 2018, S.1–2) Bei Komposter E hat der CSB über den Versuchszeitraum durch den Abbau von organischen Verbindungen abgenommen. Hier hat demnach eine Kompostierung eingesetzt. Diese fand jedoch nur anfänglich statt, da der Kompost bereits nach zwei Wochen eingefroren war und kein Abbau mehr stattfinden konnte. Bei Komposter F liefert der CSB keine verwertbaren Daten. Der TOC-Gehalt lag bei 29% bis 31% und somit über dem durchschnittlichen Wert für Fertigungskompost. (BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST 2006, S.7)

Tabelle 13: Wassergehalt (WG), oTS, CSB, TOC, 2. Ansatz

Variante	WG Start [%]	WG Ende [%]	oTS Start [%]	oTS Ende [%]	CSB Start [mg/g]	CSB Ende [mg/g]	TOC Start [mg/g]	TOC Ende [mg/g]
<i>E - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	71	70	67	68	1168	984	299	292
<i>F - Klärschlamm, Strukturmaterial und Champignonsubstrat</i>	72	70	71	72	939	983	314	309

Das C/N-Verhältnis (Tabelle 14) sollte optimal zwischen 10/1 und 25/1 liegen. Es lag mit 18/1 im Optimum. (FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ 2010, S.15–16)

Tabelle 14: C/N-Verhältnisse, 2. Ansatz

Variante	C/N Start	C/N Ende
<i>E - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	13/1	17/1
<i>F - Klärschlamm, Strukturmaterial und Champignonsubstrat</i>	19/1	19/1

4.2.3 Dritter Ansatz

In der dritten Versuchsreihe wurde die favorisierte Mischung - zusammengestellt aus den vorhergehenden Versuchen - im kleinen Maßstab am IAK kompostiert. In Abbildung 28 ist der Temperaturverlauf im Inneren der Komposter dargestellt. Es kann gesehen werden, dass die Kompostierung stagnierte und somit auch die Temperaturen zur Hygienisierung nicht erreicht wurden. (BIOABFV. Fassung vom 04.04.2013, Anhang 2, 2.2.2.1) Bei der Anlieferung der Mischung konnte festgestellt werden, dass sich ein hoher Anteil an Strukturmaterial im Substrat befand und es sehr trocken aussah. Der Wassergehalt betrug anfangs jedoch 50%, weswegen kein zusätzliches Wasser zugegeben wurde. Im weiteren Verlauf zeigte sich jedoch, dass die erwünschten Temperaturen nicht erreicht wurden und immer weiter absanken (Vgl. Abbildung 28). Beim 1. Umsetzen am 25.05.18 wurde festgestellt, dass der Kompost im Inneren zu trocken war. Eine Messung ergab, dass die Wassergehalte bei 30% respektive 40% lagen. Zur Erreichung des optimalen Wassergehaltes von 50% hätten den Kompostern 35 Liter (Variante 1) und 66 Liter (Variante 2) Wasser hinzugegeben werden müssen. Es wurde zuerst nur eine kleinere Menge Wasser hinzugegeben. Dabei stellte sich heraus, dass das Wasser nicht am Substrat haften blieb. Eine Befeuchtung des Kompostes war demnach nicht zielführend und die Versuche wurden vorzeitig abgebrochen. Es wurde anhand

organoleptischer Einschätzungen festgestellt, dass das Material nur ausgetrocknet war und es nur zu einem geringen Abbau der Organik kam. Es hätte dem Austrocknen entgegengewirkt werden können, wenn die Kompostmischung noch einmal um entwässerten Klärschlamm – ein strukturarmes, feuchtes Material - ergänzt worden wäre.

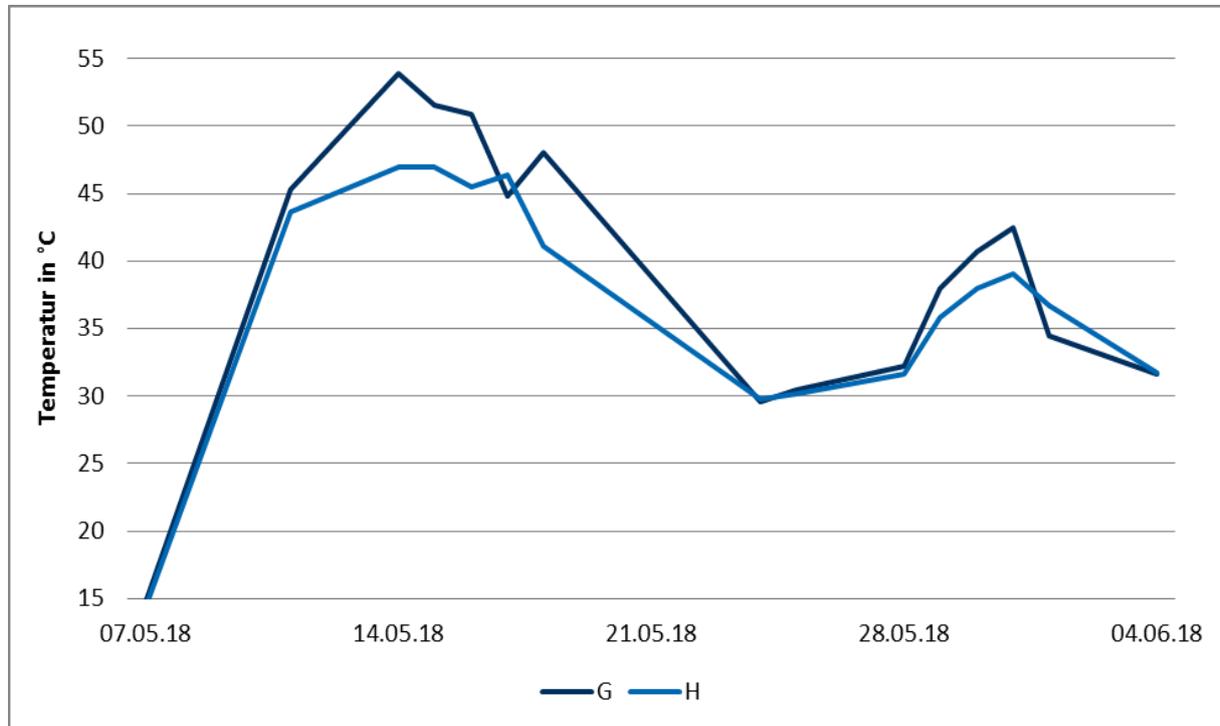


Abbildung 28: Temperaturverlauf im Kompostinneren 3. Ansatz

In Tabelle 15 werden die Analyseergebnisse des dritten Kompostversuches dargestellt. Die jeweiligen Abbaugrade wurden nicht errechnet, da die Versuche vorzeitig abgebrochen wurden. Der Wassergehalt lag zu Beginn knapp unter 50% und war am Ende eher zu trocken. Daher wurde auch kein Sickerwasser produziert und der pH-Wert nicht beprobt. (BIOABFV. Fassung vom 04.04.2013) Mit circa 55% wurde der von der RAL-GÜTESICHERUNG geforderte Gehalt an organischer Trockensubstanz eingehalten. (RAL GÜTESICHERUNG 2018, S.1–2) Bei beiden Kompostern hat der CSB über den kurzen Versuchszeitraum durch den Abbau von organischen Verbindungen abgenommen. Die Kompostierung setzte also ein. Zu beachten ist, dass der Zeitraum zwischen Probenahme zu Beginn und Ende nur bei einem Monat lag. Der TOC liegt bei 29% und übersteigt somit die durchschnittlich im Fertigungskompost gemessenen Gehalte. (BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST 2006, S.7)

Tabelle 15: Wassergehalt (WG), oTS, CSB, TOC, 3. Ansatz

Variante	WG Start [%]	WG Ende [%]	oTS Start [%]	oTS Ende [%]	CSB Start [mg/g]	CSB Ende [mg/g]	TOC Start [mg/g]	TOC Ende [mg/g]
<i>G - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	47	34	64	53	935	820	336	291
<i>H - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	48	41	63	58	1090	832	340	291

Das C/N-Verhältnis (Tabelle 16) weist am Ende mit 15/1 ein eher enges Verhältnis auf. (FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ 2010, S.15–16)

Tabelle 16: C/N-Verhältnisse, 3. Ansatz

Variante	C/N Start	C/N Ende
<i>G - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	18/1	15/1
<i>H - Klärschlamm, Siebabfall und Champignonsubstrat</i>	17/1	15/1

4.3 Pflanzversuche 2018

Es werden zuerst die verwendeten Materialmischungen charakterisiert. Außerdem werden in diesem Kapitel die im Jahr 2018 durchgeführten Pflanzversuche ausgewertet.

4.3.1 Materialmischungen

In Tabelle 17 wird der massenbezogene Wassergehalt der Materialmischungen dargestellt. Es ist zu sehen, dass dieser zu Beginn bei allen fünf Substraten in einem Bereich von 12% bis 16% variierte. Infolge regelmäßiger Bewässerung erhöhte sich bei allen Böden der Wassergehalt. Dieser lag nach der ersten Entnahme der Pflanzen (26 Tage, 31.07.18) zwischen 15% und 21 %. Am Tag des Ausbaus der restlichen Pflanzen (60 Tage, 03.09.18) zeigte sich, dass der Wassergehalt der Böden wieder abgenommen hatte. Dies liegt daran, dass die Pflanzen größer geworden sind und ein feineres Wurzelsystem ausgebildet haben. Es ist generell zu beobachten, dass der Wassergehalt schwankt, was auch an den Pflanzen zu beobachten war. Der *AFB-Boden* lag beispielsweise mit einem Wassergehalt von nur 8% sogar unter seinem Anfangswert und die Pflanzen waren teilweise stark vertrocknet. Die Mischung *KSK kf* erzielte wiederum sogar höhere Werte als zuvor, nämlich 23%. Dies war auch am Pflanzenwachstum erkennbar, denn es fanden sich hier kaum vertrocknete Pflanzen, wenn auch das Pflanzenwachstum generell niedriger war als beim *AFB-Boden*.

Tabelle 17: Wassergehalt der Materialmischungen, 2018

Variante	WG Ø 05.07.18 [%]	WG Ø 31.07.18 [%]	WG Ø 03.09.18 [%]
<i>KSK c</i>	13	15	12
<i>KSK kf</i>	14	20	23
<i>KSK cf</i>	16	21	14
<i>KSK</i>	14	20	13
<i>AFB</i>	12	18	8

Der volumetrische Wassergehalt zeigt ein etwas anderes Bild (siehe Anhang 30). Die Sonde des Messgerätes erfasst jedoch nur die ersten vier bis fünf Zentimeter des Bodens und ist somit für Aussagen über den Gesamtwasserhaushalt der Materialien nicht anwendbar.

Tabelle 18 zeigt die Analyseergebnisse der Materialmischungen. Den Erwartungen entsprechend, wiesen die Böden, welche mit Pilzsubstraten gemischt waren (*KSK kf*, *KSK c* und *KSK cf*), die höchsten Gehalte an organischer Trockenmasse auf. Das reine Abraummaterial *AFB* enthielt erwartungsgemäß kaum organische Substanz. Bei den untersuchten Mischungen lag der oTS-Gehalt bei den mit Kompost versetzten Böden zwischen 5 und 8 % und damit deutlich unter den Werten, die die RAL-GÜTESICHERUNG für Fertigkomposte vorgibt. Da die Materialmischungen im Verhältnis 2 zu 1 aus *AFB*-Boden bestanden, entsprechen die Werte hochgerechnet auf reinen Kompost jedoch den vorgegebenen Werten. (RAL GÜTESICHERUNG 2018, S.1–2) Bei den untersuchten Böden lagen die C/N-Verhältnisse, außer zu Beginn bei *KSK c* (12) und *KSK kf* (11), zu eng und nicht im optimalen Bereich. Generell gilt ein C/N-Verhältnis zwischen 10:1 und 20:1 optimal für die Stickstoffversorgung. Im Verlauf der Humifizierung wird das C/N-Verhältnis enger und kann Werte von 10/1 bis 12/1 erreichen. Ist das Verhältnis zu eng (unter 10/1), wird Stickstoff vermehrt ausgewaschen und kann für die Pflanzen unzugänglich sein, wenn er schnell mit dem Sickerwasser ausgetragen wird. Ist das Verhältnis zu weit (über 25/1), wird der Stickstoff gebunden und ist daher weder auswaschbar noch pflanzenverfügbar. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.59–68; FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ 2010, S.15–16; SCHEFFER 1958, S.179–181)

Tabelle 18: oTS (%) und C/N-Verhältnis zu Beginn und Ende der Versuche, 2018

Variante	oTS 05.07.18	oTS 03.09.18	C/N 05.07.18	C/N 03.09.18
<i>KSK c</i>	6	5	12/1	5/1
<i>KSK kf</i>	7	8	11/1	7/1
<i>KSK cf</i>	4	6	5/1	6/1
<i>KSK</i>	4	6	5/1	4/1
<i>AFB</i>	2	2	9/1	2/1

Tabelle 19 zeigt die TOC-Gehalte der einzelnen Böden, sowie den daraus (näherungsweise) berechneten Humusgehalt. Der TOC-Gehalt war beim *AFB* Boden am niedrigsten, was aufgrund der fehlenden Organik zu erwarten war. Weiterhin fand eine Verringerung des TOC-Gehaltes während des Versuchszeitraumes bei *KSK cf*, *KSK* und *AFB* statt. Bei *KSK c* und *KSK kf* konnten keine plausiblen Messwerte generiert werden, weswegen diese nicht in die Auswertung einbezogen wurden. Die TOC-Gehalte lagen in dem Bereich, der für den Oberboden von Rekultivierungsschichten empfohlen wird (unter 5% TOC). Nur der Wert bei *KSK kf* war am Ende höher. (LAGA AD-HOC-AG 2016) Die Böden sind demnach als Rekultivierungsschicht geeignet. Zur Einteilung des Humusgehaltes wurde eine Berechnung nach Ad-Hoc-AG Boden zur Hilfe genommen. Hier wird der Humusgehalt mit TOC bzw. $C_{org} * 1,72$ berechnet. (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.111) Es kann gesehen werden, dass die meisten Böden (*KSK c*, *KSK cf*, *KSK*) im humosen bis stark humosen (*KSK kf*) Bereich liegen. Wie zu erwarten, war der Boden *AFB* schwach humos. Es ist jedoch zu beachten, dass nach vier monatigem Versuch noch kein fertiger Humus vorliegt, sondern dass es sich hierbei nur um eine Schätzung handelt.

Tabelle 19: TOC und Klassifizierung Humusgehalt 2018 nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.112)

Variante	TOC 05.07.18 [mg/g]	TOC 03.09.18 [mg/g]	Humusgehalt 05.07.18 [%]	Humusgehalt 03.09.18 [%]
<i>KSK c</i>	29	30	5 - humos	5 - humos
<i>KSK kf</i>	39	55	7 - humos bis stark humos	9 - humos bis stark humos
<i>KSK cf</i>	31	29	5 - humos	5 - humos
<i>KSK</i>	28	21	5 - humos	4 - schwach humos bis humos
<i>AFB</i>	8	6	1 - schwach humos	1 - schwach humos

In Tabelle 20 sind die gemessenen nutzbaren Feldkapazitäten der Böden dargestellt. Laut DepV soll diese bei mindestens 140 mm liegen. (DEPV, Fassung vom 04.03.2016). Dieser Wert wurde bei allen Böden eingehalten und die Böden sind somit geeignet. Weiterhin sind die untersuchten Bodenmischungen einem A-Boden nach AG DEPONIETECHNIK zuzuordnen und für den Einsatz als Rekultivierungsmaterial geeignet. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.7) Die genaue Korngrößenverteilung der einzelnen Böden kann mittels der Sieblinie im Anhang nachvollzogen werden (Anhang 31 ff).

Tabelle 20: Nutzbare Feldkapazität in [mm/m], 2018

KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK	AFB
180	186	225	228	195

Zusätzlich wurden die Materialien eingeschickt und extern durch ein Prüflabor (Labor für Wasser und Umwelt GmbH, Bad Liebenwerda) nach Anhang 3 der DepV analysiert. Es werden nachfolgend nur die Grenzwertüberschreitungen (außer für Chlorid beim AFB-Boden) sowie zusätzlich der pH-Wert dargestellt.

Tabelle 21: Einbauanalytik DepV, 2018

DepV, Anhang 3	Obergrenze	AFB	KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK
Eluate						
<i>pH-Wert (Eluat)</i>	9,0*	7,5	7,5	7,4	7,5	7,6
<i>eLF $\mu\text{S}/\text{cm}$</i>	500	1858	2240	2060	2450	2150
<i>Chlorid mg/l</i>	10	< 1	19	24	33	25
<i>Sulfat mg/l</i>	50	1010	1212	1049	1320	1175
DepV eingehalten		nein	nein	nein	nein	nein

*Untergrenze pH-Wert 6,5

Die Grenzwertüberschreitungen sind alle mit einer geogenen Hintergrundbelastung zu erklären. In Sachsen finden sich einige Gebiete (Anhang 36) mit geogener Hintergrundbelastung, darunter das Gebiet um Leipzig, aus dem das verwendete AFB-Material stammt. Der Freistaat Sachsen hat eine Untersuchung zu geogenen Hintergrundbelastungen in Böden durchgeführt. Da der verwendete AFB Boden aus dem Regierungsbezirk (RB) Leipzig stammt, wird nur dieser RB betrachtet (Anhang 37). Es ist zu sehen, dass der verwendete AFB Boden im Bereich pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Sulfat und Nickel in die Spanne der Werte des RB Leipzig passt. Daher ist davon auszugehen, dass hier eine geogene Hintergrundbelastung vorlag und das Material deswegen von Beginn an erhöhte Werte für Chlorid und Sulfat aufwies. Demnach kann das Material trotz seiner Grenzwertüberschreitungen Einsatz in der Rekultivierungsschicht finden.

Weiterhin wurden verschiedene Laboruntersuchungen, angelehnt an die Anforderungen nach BQS 7-1, Anhang 1 durchgeführt. Hier wurde der Eisengehalt getestet und eine Eingangsanalytik der Böden auf ihren Nährstoffgehalt durchgeführt. Ebenso wurden Chlorid und Sulfat noch einmal bestimmt, da die Veränderung dieser Stoffe über den Versuchszeitraum betrachtet werden sollte. Die Analysen (Tabelle 24) weisen darauf hin, dass keine nachteiligen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum durch die Böden zu erwarten sind. Ebenso sind die Gehalte an Nährstoffen ausreichend (Vgl. und weitere Ausführungen siehe Kapitel 4.3.2.1). Die Eisengehalte (Anhang 38) wurden nur zu Beginn ermittelt, da dies nach BQS 7-1 vorgeschrieben ist. Die gemessenen Gehalte weisen nicht darauf hin, dass sie die Pflanzen beim Wachstum negativ beeinflussen können.

4.3.2 Pflanzenwachstum

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Pflanzversuche vom 05.07. bis 03.09.18 dargestellt. (Vgl. PENCKERT ET AL. 2019, S.31–37) Es werden die Ergebnisse der Töpfe 11-20 vorgestellt, da diese nach der ersten Entnahme noch verblieben (die Pflanzen der Töpfe 1 bis 10 wurden entnommen). Die Ergebnisse der ersten Entnahme können in Anhang 39f. eingesehen werden. Nach 26 Tagen (31.07.2018) wurde die erste Hälfte der Pflanzen entnommen und vorher nach den Boniturschemata für Blätter und Wurzeln vermessen. Abbildung 29 zeigt die Pflanzen kurz vor der ersten Entnahme.



Abbildung 29: Pflanzen am 25.07.2018

Bonitur 29.08.2018: In Abbildung 30 ist die letzte Bonitur vor der Entnahme der restlichen Pflanzen dargestellt. Es ist erkennbar, dass einige Ausfälle (vertrocknete Pflanzenteile, 4% der Sprosse in Kategorie 0) zu verzeichnen waren. *AFB* und *KSK kf* wiesen keine Ausfälle auf. Weiterhin ist zu sehen, dass nahezu alle Sprosse die Kategorie 1 und 2 verließen und ein Wachstum > 5 cm aufwiesen. Die meisten Pflanzen befanden sich in der Kategorie 4 (> 15 cm). Dort befanden sich fast alle Sprosse des Bodens *AFB*, gefolgt von *KSK kf* und *KSK*. Gleich viele Sprosse in Kategorie 4 wiesen *KSK cf* und *KSK c* auf.

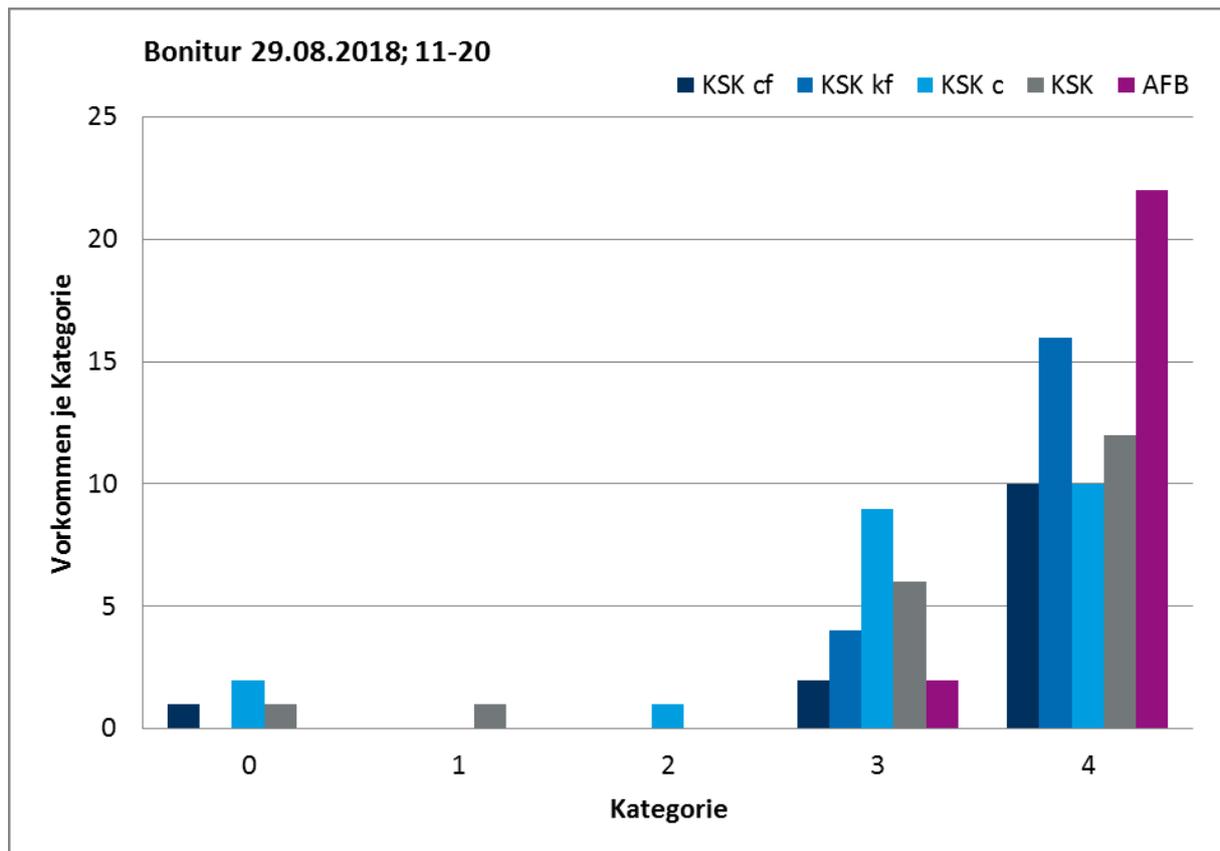


Abbildung 30: Bonitur 29.08.18, Töpfe 11-20

Zweite Entnahme: Am 03.09.2018, nach 60 Tagen, erfolgte die Entnahme der restlichen Pflanzen (Töpfe 11-20) und somit der Abbruch der Versuche. Die Sprosse und Wurzeln wurden anschließend von den Hölzern getrennt und vermessen. Weiterhin wurden Mischproben eines jeweiligen Bodens hergestellt, um weitere Analysen durchzuführen.

Abbildung 31 zeigt das Wurzelwachstum nach zweimonatiger Wachstumsphase. Es ist erkennbar, dass der Boden *KSK cf* am meisten Wurzeln in der Kategorie 4 (mit Kallus) aufwies. Im Gegensatz zur ersten Entnahme hat sich ein Teil der Wurzeln von Kategorie 6 (ohne Kallus) auf Kategorie 7 (ohne Kallus) verschoben. *KSK kf* wies auch am meisten Wurzeln in der Kategorie 4 auf. Der gleiche Trend ist bei *AFB* und *KSK* zu erkennen. Es hat über die Zeit bei vielen Stechhölzern eine Kallusbildung stattgefunden, was darauf schließen lässt, dass die Stechhölzer bei der Ernte auf der Plantage mehr beschädigt wurden, als bei der Eingangskontrolle zu sehen war. Nur *KSK c* wies weiterhin den größten Teil seiner Wurzeln in Kategorie 6 (ohne Kallus) auf.

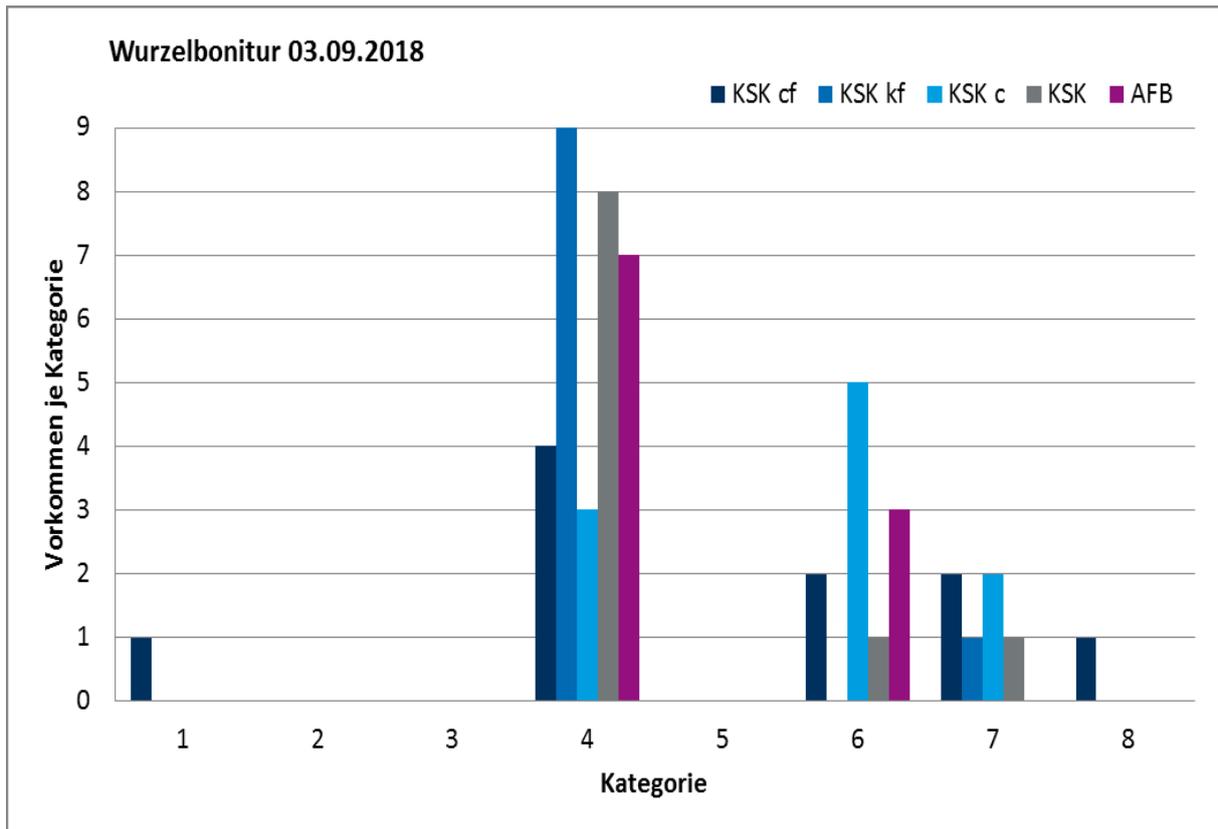


Abbildung 31: Wurzelbonitur 03.09.18, Töpfe 11-20

In Abbildung 32 sind beispielhaft Wurzeln der Kategorie 4 (links, mit Kallus) und 6 (rechts, ohne Kallus) dargestellt.



Abbildung 32: Wurzel der Kategorie 4 und 6 (links, rechts)

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Anzahl der Sprosse (gesamt) und die Einteilung in die jeweilige Wachstumsstufe über den Versuchszeitraum. Diese wird exemplarisch für den Boden *AFB* vorgenommen. Die Ergebnisse für die anderen Böden können in Anhang 41 ff. eingesehen werden. *AFB* wies mit 24 Sprossen die höchste Sprossanzahl aller Böden auf. Die Anzahl der Sprosse blieb bis zum Ende des Versuches konstant. Bereits in der ersten Woche

besaß *AFB* Sprosse in Kategorie 4, am meisten vertreten ist Kategorie 3. Schon in der zweiten Woche ist Kategorie 4 am meisten vertreten. Dieser Trend setzt sich bis zum Ende des Versuches fort. Es befand sich kein Spross in der Kategorie 0 (kein Wachstum).

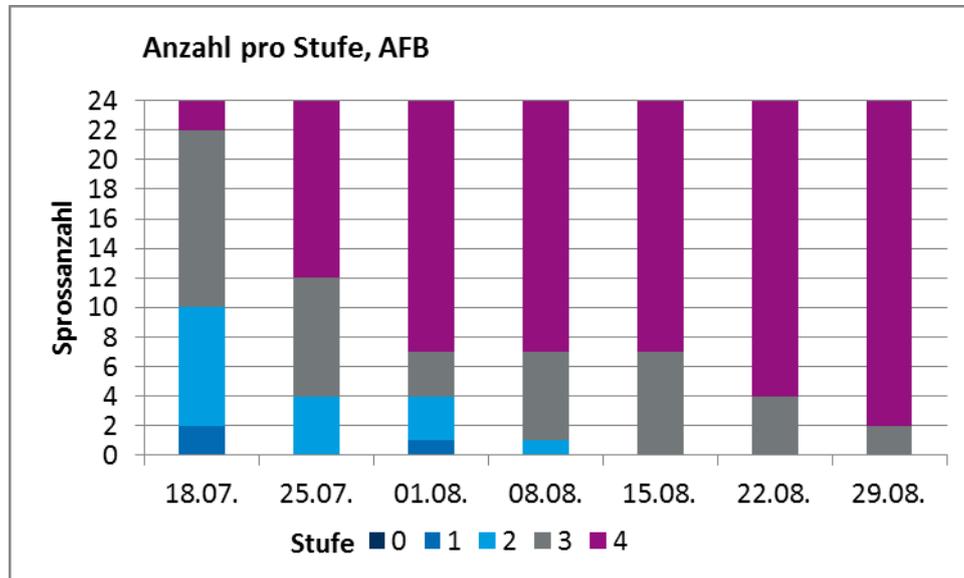


Abbildung 33: Sprosszahl über die Zeit, Boden AFB

Abbildung 34 zeigt den Zuwachs an Blattmasse von der ersten zur zweiten Entnahme. Es ist erkennbar, dass der Boden *AFB* die meiste Blattmasse produzierte, gefolgt von *KSK kf* und *KSK cf*. Außerdem ist ersichtlich, dass *AFB* bereits am Anfang ein höheres Wachstum aufwies als die anderen Böden. Eine Stagnation im Wachstum lässt sich bei *KSK c* feststellen. Eine Auswertung mit der Statistiksoftware SPSS 25 (Einfaktorielle Anova, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, $p < 0,05$ = signifikant) stellte heraus, dass die Unterschiede bezogen auf die Bodenart sowohl anfangs ($p = 0,00$) als auch am Ende ($p = 0,01$) signifikant waren. Es gab einen Zusammenhang zwischen Bodenart und Pflanzenwachstum.

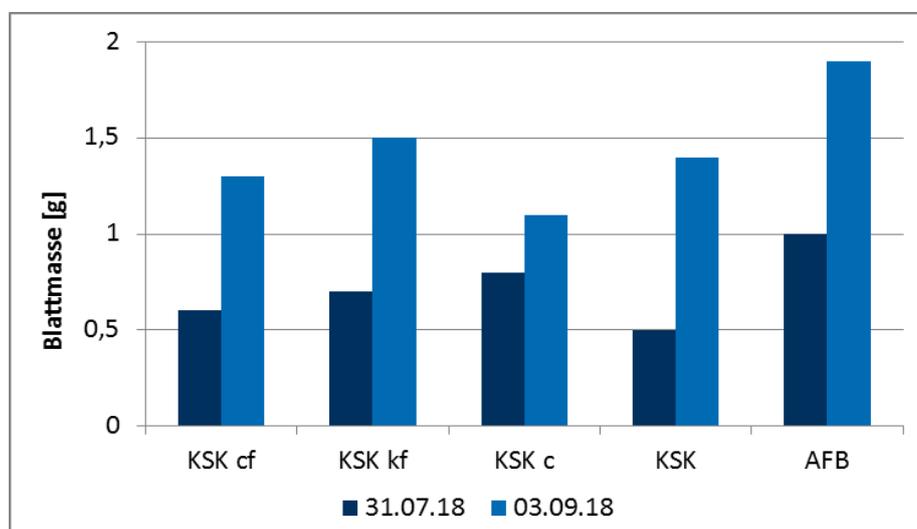


Abbildung 34: Blattmasse in g TS, Mittelwerte (n=10 je Boden), 2018

In Abbildung 35 ist jeweils der Mittelwert der längsten Sprosse aufgetragen. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Blattmassen. *AFB* wies im Mittel die längsten Sprosse mit knapp 35 cm auf. Die anderen Böden wiesen im Mittel eine ähnliche Sprosslänge von etwa 25 cm auf. Generell sind die Sprosse aller Böden im Gegensatz zum Beginn nur um etwa 5 cm gewachsen. Das Sprosswachstum war anfangs höher und stagnierte dann. Die Auswertung mit der Statistiksoftware SPSS 25 ergab, dass die Unterschiede bezogen auf die Bodenart anfangs ($p = 0,014$) und auch am Ende ($p = 0,045$) signifikant waren. Es ist zu sehen, dass es einen Zusammenhang zwischen Bodenart und Sprosswachstum gab.

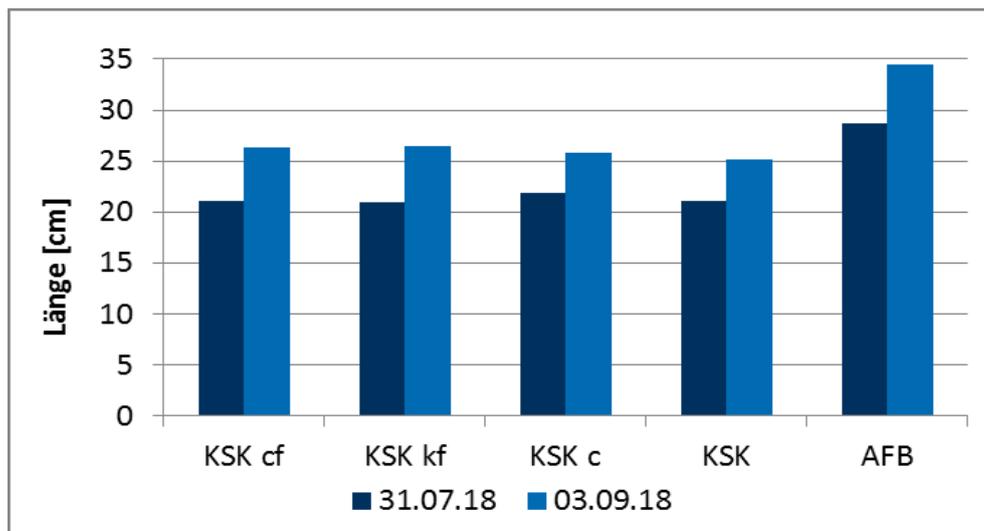


Abbildung 35: Längster Spross in cm, Mittelwerte (n=10 je Boden), 2018

Nachfolgend (Tabelle 22) ist die Kallusbildung über den Versuchszeitraum dargestellt. Gezählt wurden die Kategorien 2, 4, 5 und 8 aus dem Schema nach Abbildung 23, da diese Kategorien auf eine Kallusbildung verweisen. Es ist zu sehen, dass anfangs bei den meisten Pflanzen kein Kallus ausgebildet war. Gegen Ende nahm die Zahl der Kallusbildungen zu.

Tabelle 22: Kallusbildung Beginn und Ende, 2018, n=10

	KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK	AFB
31.07.18	3	1	5	1	0
03.09.18	3	9	5	8	7

Es ist weiterhin zu sehen, dass bei jeder Pflanze die Sprosslänge zugenommen hat. Am meisten bei *AFB*, gefolgt von *KSK cf* und *KSK kf* (Tabelle 23).

Tabelle 23: Durchschnittliche Zunahme Sprosslänge, 2018

	KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK	AFB
<i>Beginn Ø Sprosslänge [cm]</i>	21,9	21,0	21,1	21,1	28,9
<i>Ende Ø Sprosslänge [cm]</i>	25,9	26,4	26,4	25,2	34,5
Zunahme	4,0	5,4	5,3	4,1	5,6

Die Raumtemperatur lag im Mittel bei 28°C mit Höchsttemperaturen von 31°C und Tiefsttemperaturen von 26°C. Demnach sind keine großen Temperaturschwankungen zu verzeichnen, die in der kurzen Wachstumsperiode einen signifikanten Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen gehabt haben können

Es kann kein direkter Zusammenhang zwischen dem Pflanzenwachstum und dem Fensterplatz gesehen werden. Eine Beeinflussung des Standortes kann also ausgeschlossen werden. Fenster 1 - 3 wiesen im Durchschnitt ein gleiches Wachstum (1,5 bis 1,6 g/TS) auf. Nur bei Fenster 4 wurden circa 60% weniger Blattmasse im Durchschnitt (1,0 g/TS) produziert. Hier könnte eine Beeinflussung stattgefunden haben. Die Standardabweichung lag jedoch zwischen 0,4 bis 0,6, weshalb das Ergebnis statistisch unsicher ist.

Es ist jedoch ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt der Böden und dem Pflanzenwachstum erkennbar. *AFB* wies die niedrigsten Wassergehalte auf, produzierte jedoch auch am meisten Blattmasse. Je mehr Blattmasse, desto mehr Wasser wird dem Boden entzogen. Jedoch kann auch gesehen werden, dass *KSK c* am wenigsten Wachstum verzeichnete und dennoch niedrige Wassergehalte aufwies. Das kann daran liegen, dass *KSK c* von allen Böden die geringste Wasserhaltekapazität (18%) hatte und das Wasser daher durch den Boden sickerte. Die anderen Böden wiesen alle eine höhere Wasserhaltekapazität von 19% bis 23% auf. Beim Boden *KSK kf* war das Verhältnis zwischen Wassergehalt und Wachstum am meisten ausgeglichen. *AFB* wies trotz seiner geringen Wasserhaltekapazität ein gutes Pflanzenwachstum auf. Daher liegt die Vermutung nahe, dass hier die schnelle Verfügbarkeit von Nährstoffen der ausschlagende Wachstumsfaktor ist. Diese Vermutung muss in weiteren Versuchen (v.a. Langzeitversuchen) untersucht werden.

In Abbildung 36 ist zu sehen, dass im Jahr 2018 eine geringfügige Korrelation zwischen der Blattmasse und der Sprosszahl gesehen werden kann ($R = 0,47$). Dieses Ergebnis ist jedoch nicht signifikant ($p = 0,42$). Sprosszahl 22 stellt einen statistischen Ausreißer dar, verbleibt jedoch aus Vollständigkeitsgründen in der Betrachtung. Abbildung 37 zeigt, dass es im Jahr eine Korrelation zwischen dem längsten Spross und der Blattmasse gibt ($R = 0,88$). Auch hier ist das Ergebnis jedoch nicht als signifikant zu bewerten ($p = 0,5$).

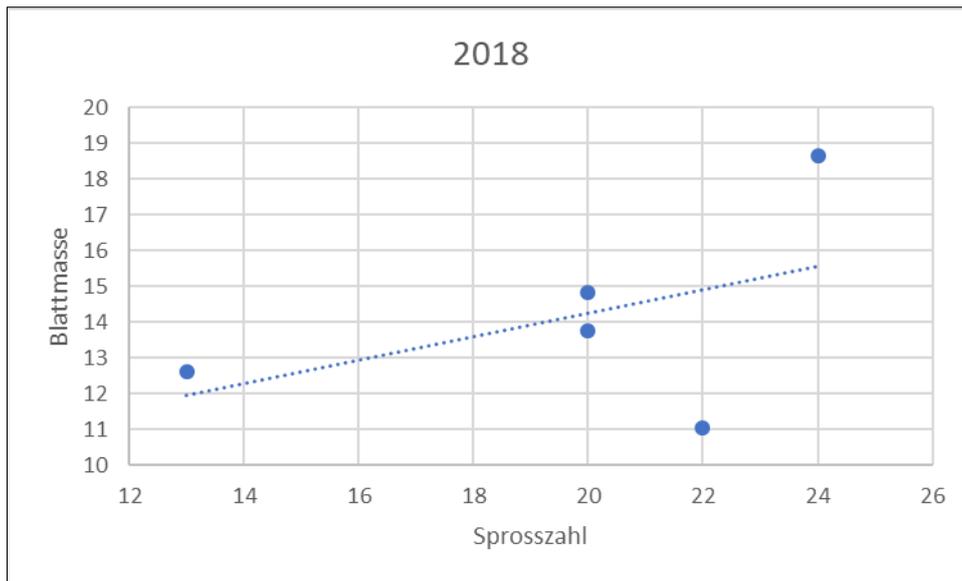


Abbildung 36: Korrelation zwischen Blattmasse & Sprosslänge 2018

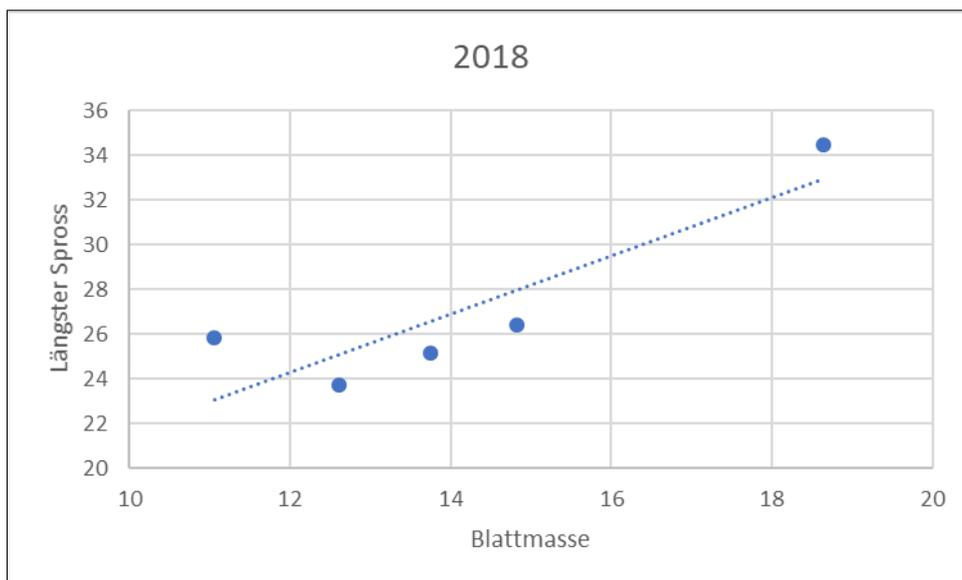


Abbildung 37: Korrelation zwischen längstem Spross & Blattmasse 2018

4.3.2.1 Nähr- und Schadstoffe in Böden und Blattmassen

Nachfolgend werden die wichtigsten Nährstoffe und deren Pflanzenverfügbarkeit sowie durchschnittliche Gehalte in Böden im Vergleich mit den Materialmischungen des Jahres 2018 betrachtet. In Tabelle 24 können die Analyseergebnisse nachvollzogen werden.

Stickstoff: Etwa 90% des Stickstoffs liegen im Boden im Humus gebunden vor und sind demnach nicht direkt für die Pflanzen verfügbar. Die restlichen 10% liegen in anorganischen Verbindungen vor und sind pflanzenverfügbar. Als pflanzenverfügbare Stickstoffverbindungen

werden v.a. Ammonium und Nitrat angesehen. Ammonium liegt vorwiegend in adsorbierter Form vor und ist schwer auswaschbar, wohingegen Nitrat leicht löslich und auswaschbar ist. Im Zuge der Mineralisierung werden organische Stickstoffverbindungen durch Mikroorganismen aus der organischen Substanz gelöst und liegen pflanzenverfügbar als NH_4 vor. Durch organische Dünger, bspw. mit Klärschlamm, zugeführte Ammoniumgehalte sind direkt pflanzenverfügbar. Über die Nitrifikation wird Ammonium zu Nitrat umgewandelt. Da die Nitrifikation Sauerstoff benötigt, ist in gut durchlüfteten Böden der Ammoniumgehalt meist geringer als der Nitratgehalt, da die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat schnell geschieht. Nitrat wird nicht vollständig durch Pflanzen aufgenommen, sondern zum großen Teil im Zuge der Denitrifikation umgesetzt und zu Luftstickstoff umgewandelt. In Mineralböden liegt der gesamte Stickstoffanteil bei 0,7 mg/g bis 2 mg/g. In Grünland können diese Werte auf 2 mg/g bis 6 mg/g ansteigen. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.403–406; PATYK & REINHARDT 1997, S.14–15) In den untersuchten Materialmischungen lagen die Stickstoffgehalte bei 1 mg/g (*AFB*) bis 7 mg/g (*KSK cf* und *KSK*). Die Gehalte können demnach als ausreichend angesehen werden. Mit steigender Wasserspeicherfähigkeit der Böden sinkt die Auswaschung von Nitrat und die Stickstoffgehalte eines Bodens steigen an. Weiterhin kann in der Vegetationsperiode Stickstoff durch eine Mineralisation nachgeliefert werden. Für organisch gebundenen Stickstoff beträgt die Mineralisationsrate 0,2 % bis 2% pro Jahr. Zu Beginn (erste zwei bis acht Wochen) der Vegetationsperiode ist die Mineralisation meist höher und sinkt dann ab. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.408–410) In den untersuchten Böden konnte teilweise gesehen werden, dass die Stickstoffgehalte anstiegen und Stickstoff durch Mineralisation nachgeliefert wurde. Dies war bei den Böden *KSK c*, *KSK kf* und *AFB* der Fall. Weiterhin ist zu beachten, dass in der Bodenlösung vorliegendes Ammonium an Bodenteilchen (bspw. Ton) fixiert werden kann. In Gefäßversuchen anderer Autoren konnte nachgewiesen werden, dass Ammonium, welches aus Gülle zugeführt wurde, bis zu 100% in den Tonmineralien der Böden fixiert wurde. Im Verlauf von zwei Jahren zeigte sich, dass dieses fixierte Ammonium wieder abgegeben wurde und den Pflanzen zur Verfügung stand. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.405) Dies kann auch bei den verwendeten Materialmischungen der Fall sein, bei denen Ammonium durch Klärschlamm zugeführt wurde.

Phosphor: Mehr als 50% des im Boden vorkommenden Phosphors liegen organisch gebunden vor und sind nicht pflanzenverfügbar. Das organisch gebundene Phosphat wird durch Mikroorganismen pflanzenverfügbar gemacht. (PATYK & REINHARDT 1997, S.15) Die Phosphorgehalte in Sandböden können < 100 mg/kg betragen. In schluffigen, lehmigen und tonigen Böden der gemäßigten Breiten kann dieser Wert auf 200 mg/kg bis 800 mg/kg ansteigen. Phosphor kann von den Pflanzenwurzeln nur in gelöster Form aufgenommen werden. Dies ist jedoch schwierig, weil generell wenig Phosphor in der Bodenlösung vorliegt.

Daher muss Phosphor durch Mineralisation nachgeliefert werden. Je höher die Phosphorgehalte in der Bodenlösung sind, desto besser ist auch die Versorgung der Pflanze. Eine optimale Konzentration in der Bodenlösung sind 0,3 bis 0,8 mg/l. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.413–419) Die Phosphorgehalte der untersuchten Böden lagen zwischen 0,23 mg/l und 0,41 mg/l und können als niedrig, jedoch ausreichend angesehen werden. Nur für den AFB-Boden sind die Gehalte zu gering, da dieser nur 0,1 mg/l Phosphor enthielt.

Kalium: Kalium kann als mittelbar pflanzenverfügbar eingestuft werden, da es überwiegend an oder in mineralischen Bodenteilchen gebunden ist und somit ausgewaschen werden kann. Ebenso kann Kalium in pflanzlicher Biomasse gebunden sein. Nur wenn es zwischen Tonmineralen eingelagert ist, ist es schwer pflanzenverfügbar. Je nach Mineralbestand und Düngung eines Bodens kann der Kaliumgehalt 100 mg/kg bis 1000 mg/kg betragen. In der Bodenlösung liegen meist Gehalte zwischen 2 mg/l und 20 mg/l vor. Austauschbares Kalium kann sehr schnell in die Bodenlösung gehen, wohingegen andere Formen länger gespeichert sind und erst nach geraumer Zeit nachgeliefert werden. (PATYK & REINHARDT 1997, S.15; SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.424) Die Kaliumgehalte der untersuchten Böden lagen nur beim AFB-Boden in einem niedrigen Bereich von 5 mg/l. Die anderen Böden wiesen Werte zwischen 30 mg/l und 85 mg/l auf, weswegen der Kaliumgehalt als überdurchschnittlich angesehen werden kann.

Magnesium: In landwirtschaftlich genutzten Böden wird der Magnesiumgehalt mit 5% bis 25% beziffert. Als optimal für die Pflanzenversorgung gelten 15%. Der Magnesiumgehalt in der Bodenlösung schwankt stark und kann zwischen < 0,1 mg/l und 60 mg/l liegen. In Ackerböden beträgt er meist 5 mg/l bis 25 mg/l. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.428) Mit circa 60 mg/l überstiegen die untersuchten Böden den durchschnittlichen Magnesiumgehalt. Der Magnesiumgehalt kann daher als ausreichend angesehen werden.

Tabelle 24: Analysen der Bodenmischungen und Blätter 2018

	Probe	Cl ⁻ (mg/g TS)	SO ₄ ²⁻ (mg/g TS)	P (µg/g TS)	K (mg/g TS)	Mg (mg/g TS)	NO ₃ (mg/g TS)	N _{ges} (mg/g TS)
Eingang	KSK c Bod.	0,2	12	3	0,5	0,6	0,1	3,0
1. Entnahme	KSK c Bod.	0,1	13	4	0,5	0,7	0,6	-
	KSK c Blatt	6,0	23	3000	31	5,0	9,9	-
2. Entnahme	KSK c Bod.	0,5	11	41	0,7	0,6	0,5	-
	KSK c Blatt	11	55	2000	28	9,0	2,9	7,0
Eingang	KSK kf Bod.	0,2	10	4	0,6	0,7	0,8	4,4
1. Entnahme	KSK kf Bod.	0,1	11	5	0,4	0,6	0,7	-
	KSK kf Blatt	5,0	18	4000	31	4,0	n.n.	-
2. Entnahme	KSK kf Bod.	0,5	13	6	0,3	0,7	0,9	7,4
	KSK kf Blatt	7,0	20	2000	23	5,0	3,0	-
Eingang	KSK cf Bod.	0,3	13	4	0,9	0,7	1,1	7,1
1. Entnahme	KSK cf Bod.	0,2	13	5	0,8	0,7	0,8	-
	KSK cf Blatt	11	24	3000	34	5,0	n.n.	-
2. Entnahme	KSK cf Bod.	0,8	15	6	0,9	0,9	1,5	5,4
	KSK cf Blatt	14	56	2000	31	9,0	2,8	-
Eingang	KSK Boden	0,3	12	2	0,3	0,6	0,0	6,7
1. Entnahme	KSK Boden	0,1	11	5	0,2	0,6	1,0	-
	KSK Blatt	4,0	15	3000	27	4,0	n.n.	-
2. Entnahme	KSK Boden	0,6	12	9	1,1	0,7	1,0	5,5
	KSK Blatt	6,0	21	2000	16	8,0	6,1	-
Eingang	AFB Boden	0,0	10	1	0,0	0,6	0,0	1,0
1. Entnahme	AFB Boden	0,0	13	2	0,1	0,6	0,0	-
	AFB Blatt	1,0	30	4000	29	5,0	0,3	-
2. Entnahme	AFB Boden	0,4	11	2	0,1	0,5	n.n.	3,9
	AFB Blatt	2,0	17	2000	17	4,0	0,4	-

Der **Phosphorgehalt** bezogen auf die TS aller Böden erhöhte sich über den gesamten Versuchszeitraum. Bei *KSK c*, 2. Entnahme, kann von einem Ausreißer ausgegangen werden. Die Anreicherung von Phosphor im Boden kommt vom Abbau des Phosphates und der Nachlieferung in den Boden bzw. in die Bodenlösung. Weiterhin nahm der Phosphorgehalt (TS) in den Blättern ab. Dies lässt sich mit der erhöhten Produktion an Blattmasse erklären. Bei *AFB* und *KSK kf* hat der Gehalt am meisten abgenommen; diese beiden Böden wiesen auch das größte Blattmassewachstum auf. Der **N_{ges}-Gehalt** hat in den Böden *KSK c*, *KSK kf* und *AFB* zugenommen. Hier ist von einer Mineralisation und damit Freisetzung von Stickstoff auszugehen. In den Böden *KSK cf* und *KSK* fand jedoch anscheinend ein größerer Stickstoffentzug als eine Freisetzung statt. Als Abbauprodukt von Stickstoff entsteht Nitrat. Dessen Gehalte stiegen bei *KSK cf* und *KSK* stark an. Hier kann ein Zusammenhang zwischen den steigenden Nitrat- und den sinkenden N_{ges}-Gehalten gesehen werden, da das Nitrat schnell ausgewaschen wird und nicht mehr im Boden zur Verfügung steht. Die Böden, die

steigende N_{ges} -Gehalte aufwiesen, wiesen generell weniger hohe und weniger stark steigende Nitratgehalte auf. Bei den Blättern kann bezüglich des Nitrats und N_{ges} -Gehalt keine Aussage getroffen werden, da zu wenige Messwerte vorliegen. Die Parameter Ammonium sowie Stickstoff konnten in den Blattproben nicht gemessen werden, da hier zu wenig Probenmaterial vorhanden war. Die **Magnesiumgehalte** des Bodens veränderten sich über den Versuchszeitraum kaum. Die leichten Anstiege und Abfälle können entstehen, da verschiedene Proben analysiert wurden. Die recht gleichbleibenden Magnesiumgehalte lassen auf eine konstante Nachlieferung des Magnesiums schließen. In den Blättern reicherte sich Magnesium überall, bis auf *AFB* mit leichtem Rückgang, an. Dies ist plausibel, da Magnesium beim Aufbau von Blattmasse in den Blättern eingelagert wird. Die **Kaliumgehalte** der Böden *KSK c*, *KSK kf* und *KSK cf* lagen auf einem ähnlichen Niveau und veränderten sich nur geringfügig. Hier ist, wie bei Magnesium, zu beachten, dass die Gehalte aus unterschiedlichen Bodenproben über den Versuchszeitraum stammen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass konstant Kalium nachgeliefert wurde. In der Blattmasse spiegelt sich wider, dass Kalium durch das erhöhte Blattmassewachstum bei allen Böden leicht sank. Möglicherweise hat auch das Pilzsubstrat einen Einfluss auf die Kaliumgehalte. Bei *KSK* und *AFB* (beide ohne Pilzsubstrat) unterschieden sich die Gehalte gegenüber den anderen Böden. Bei *KSK* stieg der Kaliumgehalt im Boden stark an, was auf eine große Nachlieferung und wenig Aufnahme in die Blätter zeugt. Der Boden *AFB* wies dagegen nur in sehr geringen Mengen Kalium auf. Dieser Trend ist in der Blattmasse jedoch nicht zu erkennen, da die Gehalte dort ähnlich der der anderen Böden sind. Beim Boden *AFB* sank der Kaliumgehalt in der Blattmasse am stärksten, was plausibel ist, da hier auch die meiste Blattmasse produziert wurde. Die **Sulfatgehalte** im Boden befanden sich bei allen Materialmischungen auf einem ähnlichen Niveau. Ebenso ist zu beobachten, dass diese nur leicht anstiegen bzw. sanken und relativ konstant blieben. Die leichten Unterschiede stammen aus den verschiedenen Proben. Außerdem stiegen die Sulfatgehalte in den Blättern - außer bei *AFB* - über den Versuchszeitraum an, was auf eine Einlagerung zurückzuführen ist. Bei *AFB* sanken die Sulfatgehalte in der Blattmasse. Ebenso wuchsen die Blätter beim *AFB* am besten. Hier kann ein Zusammenhang gesehen werden, dass höhere Sulfatgehalte in den Blättern zu einem geringeren Wachstum führten. Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich nur um eine Stichprobe handelt. Daher ist dieses Ergebnis nicht als statistisch sicher zu bewerten. Die **Chloridgehalte** im Boden stiegen über den Versuchszeitraum bei allen Böden an. Dies ist damit zu erklären, dass sich Chlorid vermehrt aus dem Boden auswusch und im Boden bzw. der Bodenlösung vorlag. Auch in den Blattmassen stiegen die Chloridgehalte konstant an. Demnach hat über den Versuchszeitraum eine Einlagerung von Chlorid in die Blätter stattgefunden. Im *AFB*-Boden waren die Chloridgehalte sowohl im Boden als auch in den Blättern am niedrigsten. Die Blattmasse war hier jedoch am höchsten. Hier kann, wie bei

Sulfat, davon ausgegangen werden, dass niedrigere Chloridkonzentrationen zu einem besseren Pflanzenwachstum führten. Generell schienen die Gehalte an Chlorid und Sulfat die Pflanzen nicht im Wachstum zu hindern, da überall eine ähnliche Blattmasse produziert wurde und die Pflanzen ein rasches Initialwachstum aufwiesen. Dies spricht für einen Einsatz der Böden als Pflanzenstandort.

Es kann gesehen werden, dass der gemessene Gehalt in den Blättern immer wesentlich höher lag als im Boden. Dies liegt wahrscheinlich an der Analysemethode. Die Werte wurden jeweils mittels Elution ermittelt und anschließend in mg/g TS umgerechnet. Bei den Böden wurden nach DI-Norm 100 g/TS (in Frischmasse) eingewogen und eluiert. (DIN EN. Nr. 12457-4 2003) Da die Blattmassen jedoch nur einen Bruchteil dieser Masse aufwiesen, wurden dort nur zwischen 5 g/TS und 10 g/TS eingewogen. Weiterhin konnte keine Blattfrischmasse eingewogen werden, da die gesamte Blattmasse für die Analyse des Wassergehaltes und anderer Analysen getrocknet wurde. Dementsprechend wurde die Trockenmasse für die Elution verwendet. Es ist davon auszugehen, dass sich aus der Blattmasse wesentlich schneller Nährstoffe lösen, da diese nicht so stark gebunden vorliegen wie im Boden. Im Boden liegen die Nährstoffe teilweise schwer löslich, gebunden an Bodenteilchen und in Mineralschichten vor und sind nicht innerhalb von 24 h gänzlich ausgelöst. Weiterhin war die Blattmasse stärker zerkleinert als die Bodenproben, weswegen eine schnellere Auswaschung stattgefunden haben kann. Daher kommen große Unterschiede zwischen den Boden- und Blattmasseproben zu Stande. Demnach kann keine plausible Massenbilanz durchgeführt werden, sondern nur eine Einzelbetrachtung zwischen Boden und Blättern, sowie ein Vergleich zu den Versuchen im Jahr 2019 (Kapitel 4.4.2.1).

LIEBHARD stellte dar, wie hoch der Nährstoffbedarf von Pappeln ist. Bei Kalium sollte die Versorgung bei 12 mg/g bis 18 mg/g TS liegen. Für Phosphor wird ein Wert zwischen 1,8 mg/g und 3 mg/g TS angegeben. Eine ausreichende Versorgung mit Magnesium ist mit 3 mg/g bis 5 mg/g TS gegeben. (LIEBHARD 2010, S.46) Der Gehalt an Stickstoff konnte nicht gemessen werden, da hierfür die Probenmengen (Blattmassen) nicht ausreichte. Anhand der Mengen im Boden (Eingangsanalytik) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine ausreichende Versorgung der Blätter mit Stickstoff vorlag. Phosphor lag mit 3 mg/g TS bis 4 mg/g TS anfänglich sogar über den Grenzwerten und zum Ende des Versuches mit 2 mg/g TS im vorgeschlagenen Bereich. Ebenso lag Kalium zu Beginn mit 27 mg/g TS bis 34 mg/g TS deutlich über den angegebenen Werten. Am Ende des Versuches sanken die Kaliumkonzentrationen in den Blättern, wiesen jedoch mit 16 mg/g TS bis 31 mg/g TS immer noch eine gute Versorgung auf. Magnesium lag anfangs mit 4 mg/g TS bis 5 mg/g TS genau in den Grenzwerten. Zum Ende stieg dieser Wert auf 4 mg/g TS bis 9 mg/g TS. Die

Nährstoffgehalte werden in allen Böden als ausreichend angesehen und sie sprechen für eine Eignung als Pflanzenstandort. Für die Nährstoffversorgung der Pflanzen ist auch der pH-Wert des Bodens wichtig. Bei zu niedrigen pH-Werten werden die Nährstoffe größtenteils nur ausgeschwemmt, wohingegen bei hohen pH-Werten die Nährstoffe im Boden zurückgehalten werden. (PATYK & REINHARDT 1997, S.12) Die pH-Werte der analysierten Böden lagen mit etwa 7,5 im neutralen Bereich. Daher kann seitens des pH-Wertes von einer optimalen Versorgung ausgegangen werden.

Anhang 45 gibt eine Übersicht über den optimalen pH-Wert und die Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen im Boden. Für ein optimales Pappelwachstum sollte der pH-Wert bei 5,5 bis 6,5 liegen (siehe Kapitel 2.2.6.2). Die pH-Werte der Böden lagen mit Werten von etwa 7,5 höher als der als optimal beschriebene Bereich. Da die pH-Werte der Böden zwischen 7,0 und 7,5 lagen, ist generell nicht von einer toxischen Wirkung von Schadstoffen wie Kupfer, Zink oder Aluminium auszugehen. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.435–439) Auch bezüglich der Eisengehalte ist bei allen Böden nicht von einer Hemmung auszugehen, da die pH-Werte der Böden nicht in den Bereichen lagen, in denen Eisen vermehrt ausgewaschen wird (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.434). Weiterhin lagen die pH-Werte der untersuchten Böden in einem Bereich, in dem die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor sichergestellt ist. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.152–160) Tabelle 25 zeigt, dass keiner der verwendeten Böden Schadstoffkonzentrationen aufwies, welche sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken können. (SCHUBERT 2006, S.212) Die Böden sind als Pflanzenstandort geeignet.

Tabelle 25: Vgl. kritischer Schadstoffkonzentrationen im Boden nach (SCHUBERT 2006, S.212)

Schadstoff	Grenzwert mg/kg TS	KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK	AFB
Blei	100	8	8	7	8	7
Cadmium	3	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Chrom	100	39	40	44	43	41
Kupfer	100	16	14	12	9	5
Nickel	50	46	47	47	49	51
Quecksilber	2	0	0	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zink	300	74	71	62	56	40

4.4 Pflanzversuche 2019

Nachfolgend werden die im zweiten Durchgang der Pflanzversuche im Zeitraum vom Mai bis Juli 2019 generierten Ergebnisse vorgestellt. Die Analytik erfolgte wie im Vorjahr.

4.4.1 Materialmischungen

In Tabelle 26 sind die massenbezogenen Wassergehalte der jeweiligen Böden jeweils am Anfang, zum ersten Ausbau und am Ende dargestellt. Der Boden *RM00* wies durchweg den geringsten Wassergehalt auf. Dieser lag am Ende nur bei 7%. Dies hängt einerseits mit dem geringen Organikgehalt zusammen. Andererseits damit, dass dieser Boden viel Blattmasse produzierte und die Pflanzen dem Boden viel Wasser entzogen. Da zum Ende des Versuches größere Pflanzen wuchsen, sank auch der Wassergehalt. Gleiches war bei Boden *RM08* zu beobachten. Die Böden *RM03* und *RM05* wiesen beide hohe Wassergehalte auf, welche über den Versuchszeitraum anstiegen. Da bei beiden Böden kein bzw. kaum ein Pflanzenwachstum zu verzeichnen war, wurde das Wasser nur im Boden gesammelt und nicht verbraucht. Bei Boden *RM02* stieg der Wassergehalt trotz des moderaten Pflanzenwachstums an. Anhang 46 stellt den volumetrischen Wassergehalt über den gesamten Versuchszeitraum dar.

Tabelle 26: Wassergehalt (WG) der Materialmischungen, 2019

Variante	WG 24.05.19 [%]	WG 19.06.19 [%]	WG 23.07.19 [%]
<i>RM00</i>	13	16	7
<i>RM02</i>	20	28	30
<i>RM03</i>	16	27	29
<i>RM05</i>	26	36	37
<i>RM08</i>	17	28	14

Tabelle 27 zeigt, dass Boden *RM00* am wenigsten organische Trockensubstanzen besaß. Da dieser Boden zu 100% aus AFB-Boden bestand, ist dies plausibel. Der Boden *RM08* besaß nur 20% Kompostzugabe und daher ebenso niedrige oTS-Gehalte. Der Boden *RM05* bestand ebenfalls nur aus 20% Kompost und zu 80% aus AFB Boden. Jedoch war hier der Kompost zusätzlich mit Pilzen versetzt. Dies führte zu höheren oTS-Gehalten. Auch die Böden *RM02* und *RM03* waren mit Pilzkompost (33%) versetzt und bestanden zu 66% aus AFB-Material. Die oTS-Gehalte beider Böden lagen auf einem ähnlichen Niveau. Bei den untersuchten Bodenmischungen lag der oTS-Gehalt, außer bei Boden *RM05*, unter 10% und somit unter den von der RAL-GÜTESICHERUNG empfohlenen Werten. (RAL GÜTESICHERUNG 2018, S.1–2) Es muss jedoch beachtet werden, dass keine reinen Komposte vorlagen, sondern Gemische mit Bodenzugabe. In den Böden war prozentual nur zwischen 20% (*RM05* und *RM08*) und 33% (*RM02* und *RM03*) Kompost beigemischt. Das C/N-Verhältnis (Tabelle 27) bei Boden *RM00* ist sehr eng. Bei den anderen Böden liegt es mit 10/1 bis 14/1 leicht darüber, jedoch nicht im optimalen Bereich. (Vgl. Kapitel 4.3.1 und (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.59–68; FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ 2010, S.15–16)

Tabelle 27: oTS (%) und C/N-Verhältnisse der Materialmischungen zu Beginn und Ende, 2019

Variante	oTS 24.05.19	oTS 23.07.19	C/N 24.05.19	C/N 23.07.19
<i>RM00</i>	2	2	2/1	2/1
<i>RM02</i>	6	9	13/1	10/1
<i>RM03</i>	8	9	13/1	12/1
<i>RM05</i>	12	11	12/1	11/1
<i>RM08</i>	5	6	14/1	13/1

Nachfolgende Tabelle 28 zeigt die TOC-Gehalte der Böden, sowie die kalkulierten Humusgehalte. Der Boden *RM00* wies auch hier die geringsten Werte auf, da diesem Boden keine Organik beigemischt wurde. Außer bei den Böden *RM00* und *RM05* stiegen die TOC-Gehalte während des Versuchszeitraums an. Die höchsten TOC-Gehalte wies, ähnlich der oTS-Gehalte, der Boden *RM05* auf. Die TOC-Gehalte lagen mit unter 5% in dem Bereich, der für den Oberboden von Rekultivierungsschichten empfohlen wird. Nur der Boden *RM05* lag anfangs deutlich darüber und am Ende nur knapp darunter. (LAGA AD-HOC-AG 2016) Die Böden können somit als Rekultivierungsmaterial verwendet werden.

Tabelle 28: TOC- und Humusgehalt 2019 nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.112)

Variante	TOC 24.05.19 [mg/g]	TOC 23.07.19 [mg/g]	Humusgehalt 24.05.19 [%]	Humusgehalt 23.07.19 [%]
<i>RM00</i>	6	6	1 - schwach humos	1 - schwach humos
<i>RM02</i>	23	35	4 - schwach humos bis humos	6 - humos bis stark humos
<i>RM03</i>	28	26	5 - humos	4 - schwach humos bis humos
<i>RM05</i>	74	49	13 - stark humos	8 - humos bis stark humos
<i>RM08</i>	19	26	3 - schwach humos bis humos	4 - schwach humos bis humos

In Tabelle 29 sind die gemessenen nutzbaren Feldkapazitäten der Böden dargestellt. Laut DepV soll die nutzbare Feldkapazität bei mindestens 140 mm liegen. (DEPV. Fassung vom 04.03.2016). Dieser Wert wurde bei allen Böden eingehalten und die Böden sind somit geeignet. Auch im Jahr 2019 waren alle verwendeten Materialmischungen einem A-Boden nach AG DEPONIETECHNIK zuzuordnen und für den Einsatz als Rekultivierungsmaterial

geeignet. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.7) Die genaue Korngrößenverteilung der einzelnen Böden ist mit deren Sieblinie im Anhang dargestellt (Anhang 47 ff.)

Tabelle 29: Nutzbare Feldkapazität [mm/m] 2019

<i>RM00</i>	<i>RM02</i>	<i>RM03</i>	<i>RM05</i>	<i>RM08</i>
175	216	207	242	249

Zusätzlich wurde das Material eingeschickt und nach Anhang 3 der DepV analysiert. Dargestellt werden nur die Grenzwertüberschreitungen sowie die pH-Werte (Tabelle 30). Auch bei den 2019 getesteten Böden gab es Überschreitungen (Sulfat, Chlorid, eLF, Zink), welche auf die geogene Hintergrundbelastung zurückzuführen sind. Auch Kupfer, Chrom und Nickel können darauf zurückzuführen sein, auch wenn sie im Vergleich mit RB Leipzig unter den gängigen Gehalten liegen (Anhang 51). Die ermittelten Schadstoffgehalte für den RB Leipzig bilden nur Medianwerte ab. PAK und Benzo(a)pyren müssen als Verunreinigungen beim Mischen auf der Abfallbehandlungsanlage entstanden sein (siehe Anhang 52 Einzelsubstrate). Die hohen PAK- und Schwermetallbelastungen scheinen nicht generell aus den AFB-Böden zu stammen, denn Boden *RM00* wies keine Überschreitungen auf und lag bereits auf dem Deponiekörper. Die erhöhten Gehalte müssen bei der Lagerung der verschiedenen Materialien (M1 bis M3 und AFB 2019) auf der Abfallbehandlungsanlage und beim Mischen eingetragen worden sein. Für die Böden *RM02*, *RM03* und *RM05* wurde das Material direkt auf der Anlage mit Hilfe einer Mischerschaufel gemischt und dann auf den Deponiekörper gefahren. Das AFB-Material, welches den Mischungen *RM02*, *RM03* und *RM05* beigemischt wurde, weist auch erhöhte PAK- und Benzo(a)pyren-Verunreinigungen auf. Ein Grund für die erhöhten PAK-Gehalte kann Maschinen- oder Hydrauliköl von der Mischerschaufel sein. Für Boden *RM08* wurde das Kompostmaterial (ohne Pilze) direkt auf dem Deponiekörper eingearbeitet, ohne vorheriges Vermischen auf der Anlage. Diese Mischung wies keine PAK- und Benzo(a)pyren-Überschreitungen auf. Ebenso wurde das Pilzmyzel einzeln untersucht (Anhang 52). Dieses wies erhöhte Konzentrationen in allen zu untersuchenden Eluatgrenzwerten nach DepV auf. Das Pilzsubstrat lag mehrere Wochen in der Nachrotte und die Pilze sind währenddessen gut gewachsen. Hierbei kann es zu einer Anreicherung von Schwermetallen gekommen sein. Außerdem können Staubverwehungen Schwermetalle in das Substrat eingetragen haben. Da das Pilzsubstrat in den Böden *RM02* und *RM03* verwendet wurde, kam es hier zu einem zusätzlichen Eintrag an Schadstoffen in die Böden. In Boden *RM03* wurde frisches Pilzsubstrat verwendet und es ist zu sehen, dass hier, im Unterschied zu Boden *RM02*, bei dem kompostiertes Pilzsubstrat verwendet wurde, wesentlich höhere Schadstoffgehalte auftreten. Im frischen Pilzsubstrat haben sich demnach mehr Schadstoffe angereichert. Für Boden *RM08* wurde nur Klärschlammkompost ohne Pilzsubstrat verwendet. Das Kompostsubstrat wies

kaum Grenzwertüberschreitungen auf, ebenso wie der AFB-Boden. Es ist davon auszugehen, dass sich in den Pilzsubstraten vermehrt Schadstoffe angereichert haben. Demnach sind nur die Böden *RM00* und *RM08* als Rekultivierungsmaterial geeignet. Die anderen Böden sind aufgrund ihrer Schadstoffbelastungen nicht zulässig.

Zusätzlich wurde eine Eingangsanalytik der Böden der nach BQS 7-1 vorgeschlagenen Nährstoffe durchgeführt und Chlorid und Sulfat beprobt (Tabelle 34). Die Analysen zeigen, dass keine nachteiligen Auswirkungen durch die Böden zu erwarten sind. Ebenso sind die Nährstoffgehalte ausreichend (Vgl. und weitere Ausführungen siehe Kapitel 4.4.2.1). Der Phosphorgehalt bei *RM05* kann als Ausreiser betrachtet werden, da die Phosphorgehalte im weiteren Verlauf eher denen der anderen Böden gleichen. Die Eisengehalte (Anhang 53) wurden nur zu Beginn ermittelt, da dies nach BQS 7-1 vorgeschrieben ist. Diese weisen nicht darauf hin, dass sie die Pflanzen beim Wachstum negativ beeinflussen können.

Tabelle 30: Eingangsanalytik Materialmischungen nach DepV, 2019

DepV, Anhang 3	Obergrenze	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
Feststoffanalytik						
<i>Benzo(a)pyren mg/kg TS</i>	0,6	< 0,01	1,0	0,7	3,1	0,4
<i>Summe PAK mg/kg TS</i>	5,9	1,8	13,4	9,9	45,0	4,5
Königswasseraufschluss						
<i>Chrom ges. mg/kg TS</i>	120	47	92	350	51	41
<i>Kupfer mg/kg TS</i>	80	5	64	520	46	22
<i>Zink mg/kg TS</i>	300	36	1000	1800	705	140
Eluate						
<i>pH-Wert (Eluat)</i>	9,00*	7,7	7,1	7,4	6,8	7,1
<i>eLF µS/cm</i>	500	1881	2160	2680	2280	1962
<i>Chlorid mg/l</i>	10	<1	35	93	54	46
<i>Sulfat mg/l</i>	50	737	1001	1096	874	747
<i>Kupfer mg/l</i>	0,05	< 0,005	0,02	0,13	0,01	0,01
<i>Nickel mg/l</i>	0,05	0,06	0,03	0,06	0,02	0,02
<i>Zink mg/l</i>	0,1	0,02	0,09	0,2	0,09	0,04
DepV eingehalten		nein	nein	nein	nein	nein

*Untergrenze pH-Wert 6,5

4.4.2 Pflanzenwachstum

Nachfolgend sind die Ergebnisse des zweiten Pflanzversuches im Zeitraum vom 24.05. bis 23.07.19 dargestellt. Auch hier werden nur die Ergebnisse der Töpfe 11-20 vorgestellt, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Die Ergebnisse der ersten Entnahme können in Anhang 54 und Anhang 55 gesehen werden. Nach 26 Tagen (19.06.2019) wurde die erste

Hälfte der Pflanzen entnommen und sowohl die Blätter als auch die Wurzeln nach den Boniturschemata klassifiziert. Abbildung 38 zeigt die Pflanzen vor dem ersten Ausbau.



Abbildung 38: Pflanzen 19.06.19 (RM08 links bis RM00 rechts)

Bonitur 15.07.2019: Nach 52 Tagen wurde die letzte Bonitur vor der endgültigen Entnahme der restlichen Pflanzen durchgeführt. In Abbildung 39 ist zu sehen, dass sich alle Sprosse des Bodens *RM08* in Kategorie 4 (Wachstum über 15 cm) befanden und somit am besten wuchsen. Darauf folgt der Boden *RM00*, bei dem sich die meisten Sprosse in Kategorie 4 befanden, sowie Boden *RM02*. Weiterhin ist anzumerken, dass der Boden *RM05* eine wesentlich geringere Sprosszahl (7 Sprosse, ehemals 20) aufwies als die anderen Böden. Die Pflanzen des Bodens *RM03* waren komplett abgestorben.

Zweite Entnahme: Nach 60 Tagen (23.07.2019) erfolgte die Entnahme der restlichen Pflanzen (Töpfe 11-20) und somit der Abbruch der Versuche. Sowohl die Sprosse als auch die Wurzeln wurden von den Steckhölzern getrennt und vermessen. Die Mischproben der Böden wurden im Labor analysiert. In Abbildung 40 ist zu sehen, dass sich bei Boden *RM03* alle Wurzeln in Kategorie 1 befanden, also kein Wachstum aufwiesen. Auch der Boden *RM05* hatte die meisten Wurzeln in Kategorie 1. Der Boden *RM00* wies die meisten Wurzeln in Kategorie 4 auf, was auf ein gutes laterales Wachstum, jedoch mit Kallusbildung, hinweist. Die Böden *RM02* und *RM08* wiesen die meisten Wurzeln in Kategorie 7 auf, bei der nur zentral und apikal (oberflächennah) Wurzeln vorhanden sind, jedoch nicht basal (bodennah).

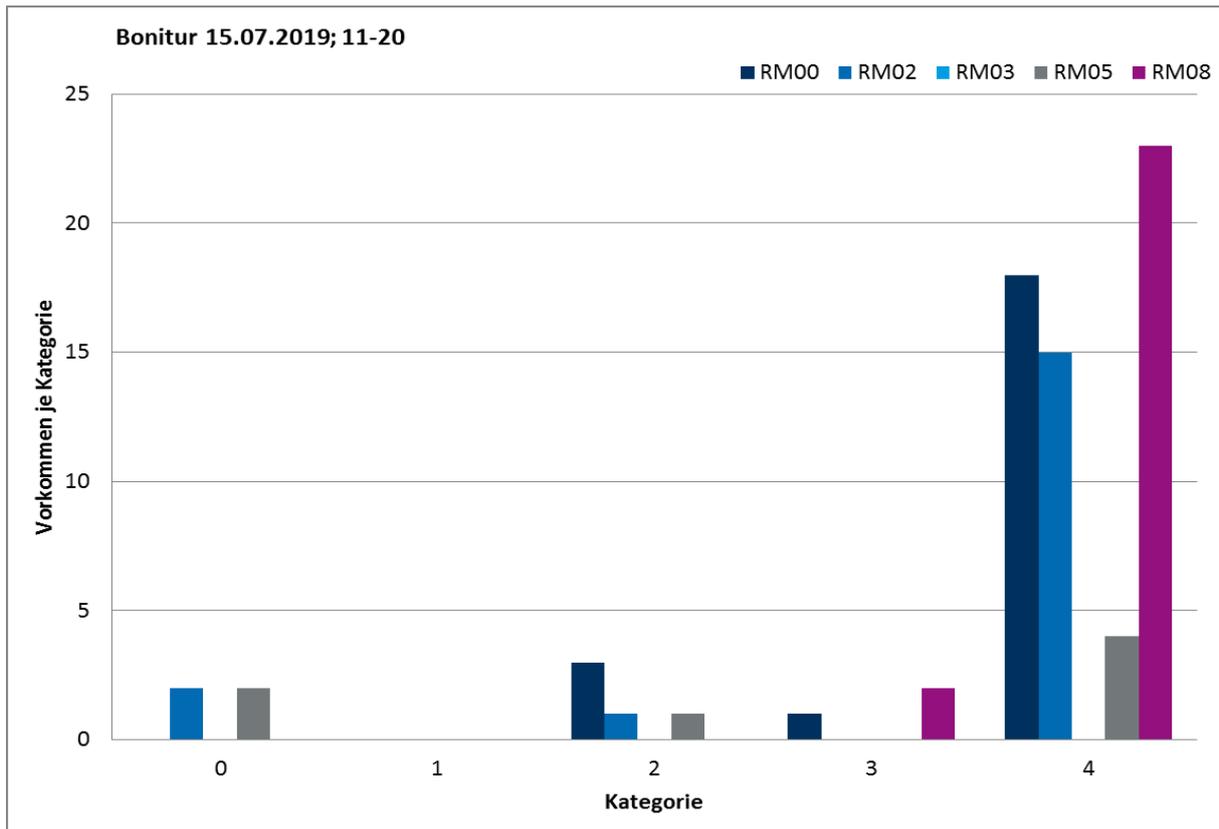


Abbildung 39: Bonitur 15.07.2019, Töpfe 11-20

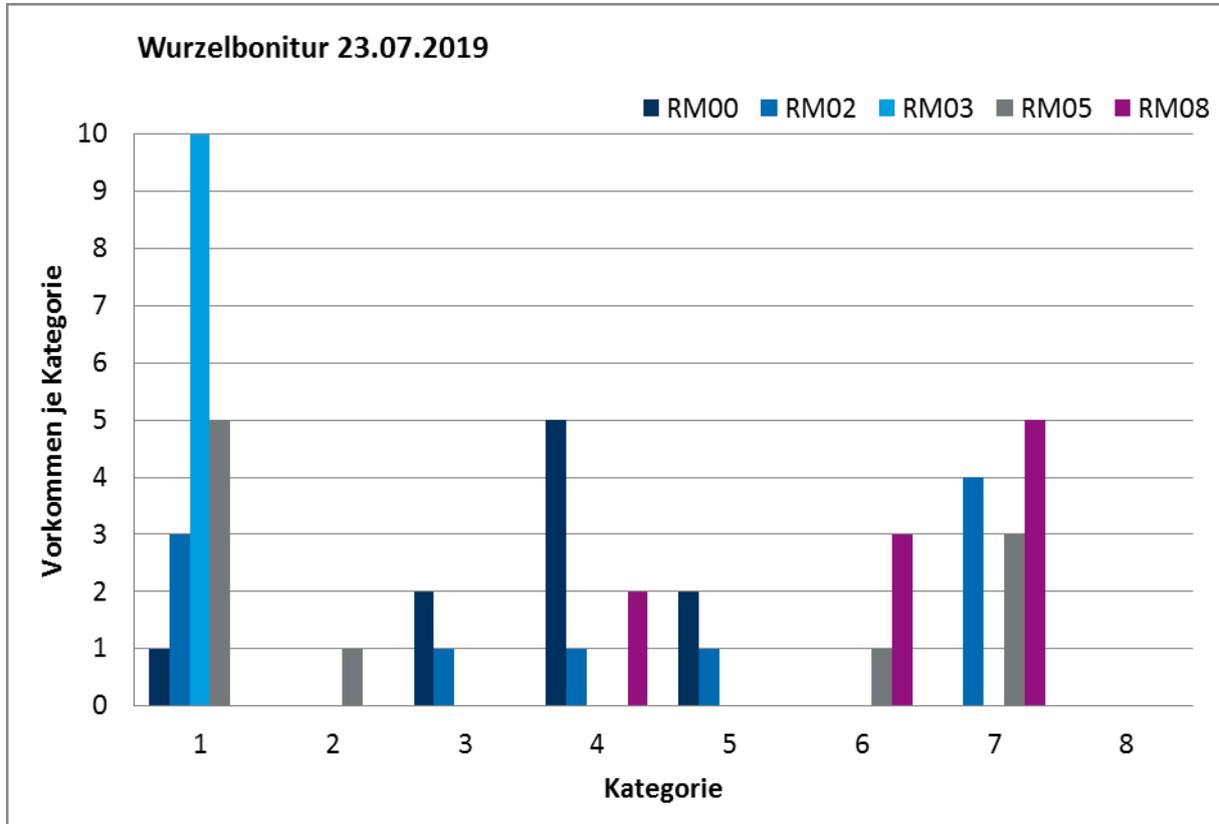


Abbildung 40: Wurzelbonitur 23.07.19; Töpfe 11-20

Nachfolgend ist beispielhaft das oberirdische Pflanzenwachstum für Boden *RM05* dargestellt (weitere Böden Anhang 56 ff.). Die Pflanzen bei Boden *RM05* besaßen zu Beginn der Versuche insgesamt 22 Sprosse. Diese Zahl sank im Versuchszeitraum und fiel gegen Ende des Versuches auf drei Sprosse. Es gab dauerhaft einige Sprosse in Kategorie 0 (kein Wachstum).

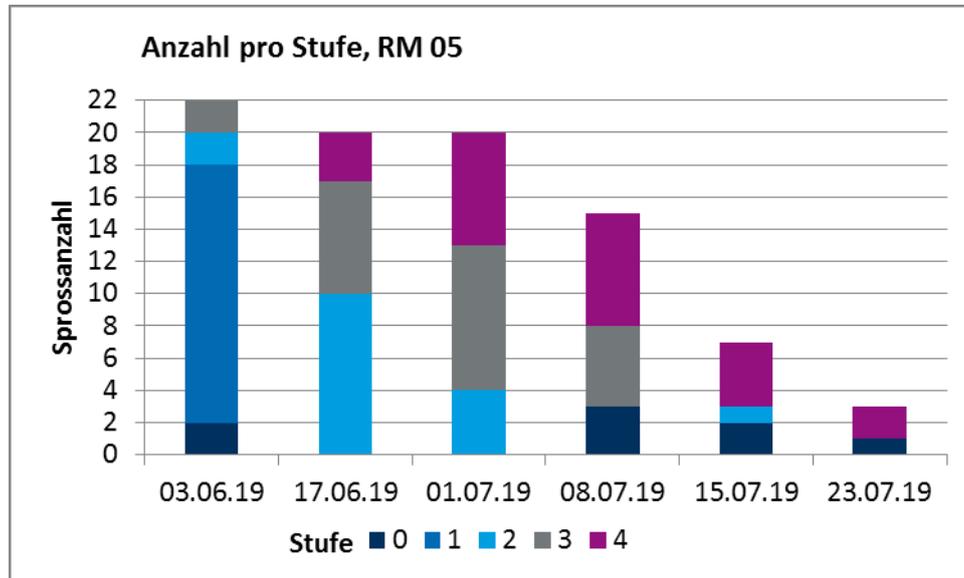


Abbildung 41: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM05

Tabelle 31 zeigt die gesamte Anzahl abgestorbener Pflanzen (nicht nur einzelne Sprosse).

Tabelle 31: Abgestorbene Pflanzen Versuchende 2019 (n=10 zu Beginn)

RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
1	3	10	9	0

Nachfolgend (Abbildung 42) ist zu sehen, dass die Pflanzen der Böden *RM00* und *RM08* am Ende am meisten Blattmasse aufwiesen. Danach folgen die Pflanzen des Bodens *RM02*. Bei den Pflanzen des Bodens *RM05* war kaum Blattmasse zu verzeichnen, da es hier zu vielen Ausfällen kam. Bei Boden *RM03* waren zum Ende alle Pflanzen abgestorben. Eine Auswertung mit der Statistiksoftware SPSS 25 (Einfaktorielle Anova, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, $p < 0,05$ = signifikant) ergab, dass die Unterschiede bezogen auf die Bodenart (bezogen auf Blattmasse TS) sowohl zu Beginn als auch am Ende signifikant ($p = 0,000$) waren. Das bedeutet, dass es einen Zusammenhang zwischen Bodenart und Pflanzenwachstum gab.

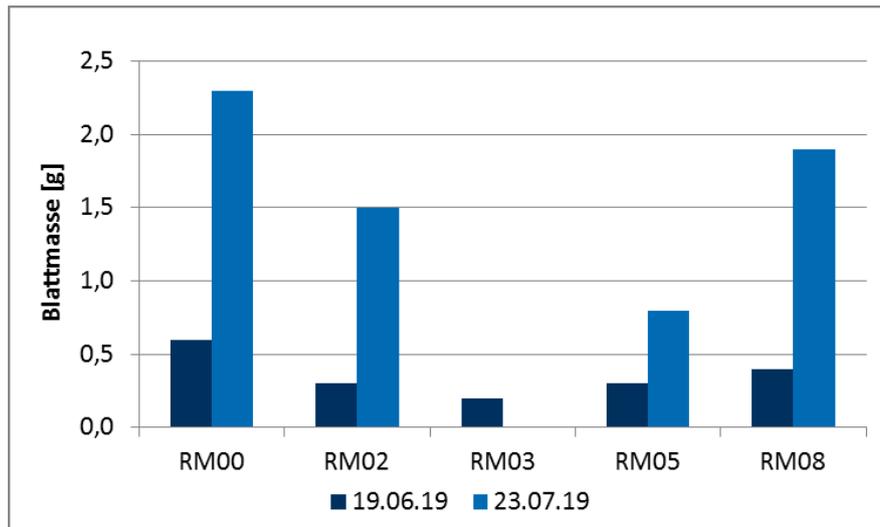


Abbildung 42: Blattmasse in g TS, 2019 (Mittelwerte)

Auch anhand der Sprosslängen ist zu sehen, dass die Pflanzen der Böden *RM00* und *RM08* die längsten Sprosse aufwiesen. Danach folgten, fast gleich auf, die Pflanzen der Böden *RM02* und *RM05*. Die Pflanzen des Bodens *RM03* wiesen aufgrund des kompletten Absterbens keine Sprosslängen. Auch hier wurde eine statistische Auswertung (ohne Bodengruppe *RM03* wegen der Ausfälle) vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass nur am Ende signifikante Unterschiede vorlagen ($p = 0,00$). Am Anfang waren die Unterschiede als nicht signifikant anzusehen ($p = 0,11$). Es gab demnach nur am Ende der Versuche einen Zusammenhang zwischen Bodenart und Sprosswachstum.

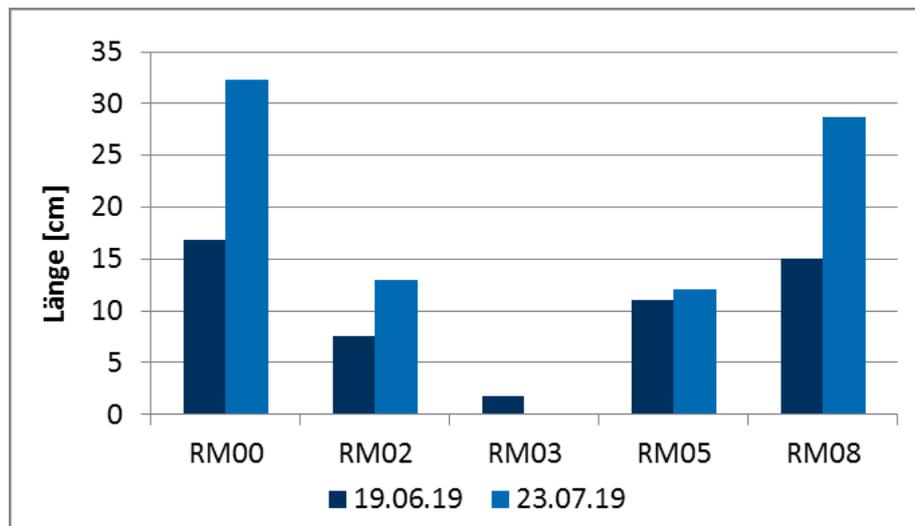


Abbildung 43: Längster Spross in cm, 2019 (Mittelwerte)

Tabelle 32 zeigt, dass die Pflanzen des Bodens *RM00* am meisten von Kallusbildung betroffen waren. Die anderen Pflanzen (*RM02*, *RM05* und *RM08*) wiesen zum Ende der Versuche kaum eine Kallusbildung auf. Der Boden *RM03* wies keine Kallusbildung auf, da dort die Pflanzen komplett abgestorben waren und sich keine Wurzeln ausbildeten.

Tabelle 32: Kallusbildung Beginn und Ende, 2019

	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
19.06.19	4	6	0	1	2
23.07.19	7	2	0	1	1

Nachfolgende Tabelle 33 zeigt, dass die Pflanzen der Böden *RM00* und *RM08* die höchste Zunahme an Sprosslänge aufwiesen. Danach folgten mit einigem Abstand die Pflanzen des Bodens *RM02*. Die Pflanzen des Bodens *RM05* wiesen nur eine Zunahme von 1 cm auf. Bei Boden *RM03* waren alle Pflanzen abgestorben. Er weist daher ein negatives Wachstum auf.

Tabelle 33: Zunahme Sprosslänge, 2019

Sprosslänge [cm]	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
<i>Beginn</i> Ø	16,8	7,6	1,8	11,0	15,1
<i>Ende</i> Ø	32,3	13,0	0,0	12,1	28,7
Zunahme	15,5	5,4	-1,8	1,1	13,6

Die Raumtemperatur lag im Mittel bei 26°C, mit Höchsttemperaturen von 30°C und Tiefsttemperaturen von 26°C. Es waren keine großen Temperaturschwankungen zu verzeichnen, welche in der zweimonatigen Wachstumsperiode einen signifikanten Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen gehabt haben können.

Auch in der zweiten Versuchsreihe ist kein direkter Zusammenhang zwischen dem Wachstum und dem Fensterplatz zu erkennen. Beispielsweise generierten die Pflanzen des Bodens *RM02* in Fenster 1 etwa 0,3 g TS Blattmasse (WG frische Blattmasse 83%), in Fenster 2 circa 0,2 g TS (WG Frischmasse 81%) und in Fenster 3 rund 0,3 g TS Blattmasse (WG Frischmasse 78%).

Jedoch war auch hier ein Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Pflanzenwachstum erkennbar. Die Pflanzen des Bodens *RM00* wiesen das beste Wachstum auf, ebenso geringe Wassergehalte. Hier entzog die Blattmasse dem Boden viel Wasser. Ebenfalls konnte dies bei Boden *RM08* gesehen werden. Der Boden *RM05* war sehr feucht, da hier kaum ein Pflanzenwachstum stattfand. Gerade gegen Ende fielen viele Pflanzen aus und entzogen dem Boden kein Wasser mehr, weswegen der Boden sehr feucht war. Ebenso war dies bei Boden *RM03* zu sehen. Die Wasserhaltekapazitäten lagen, außer bei Boden *RM00* mit 17%, zwischen 21 bis 25%. Die Böden *RM03* und *RM08* konnten daher das Wasser, welches durch fehlendes Pflanzenwachstum nicht entzogen wurde, gut im Boden speichern. Die Pflanzen bei Boden *RM08* wiesen ein gutes Wachstum auf. Der Boden besaß ebenso die höchste Wasserhaltekapazität. Dies lässt darauf schließen, dass die Versorgung der Pflanzen mit

Wasser ausreichend abgedeckt war. Die Pflanzen des Bodens *RM00* wiesen trotz der sehr geringen Wasserhaltekapazität des Bodens ein gutes Wachstum auf. Daher liegt die Vermutung nahe, dass hier die schnelle Verfügbarkeit von Nährstoffen ausschlagender Wachstumsfaktor ist.

Abbildung 44 zeigt, dass es bei den Pflanzversuchen im Jahr 2019 eine Korrelation zwischen Blattmasse und Sprosszahl gibt ($R = 0,95$), welche signifikant ist ($p = 0,01$).

Auch zwischen dem längsten Spross und der Blattmasse besteht im Jahr 2019 eine signifikante Korrelation ($R = 0,97$, $p = 0,004$), wie Abbildung 45 zeigt.

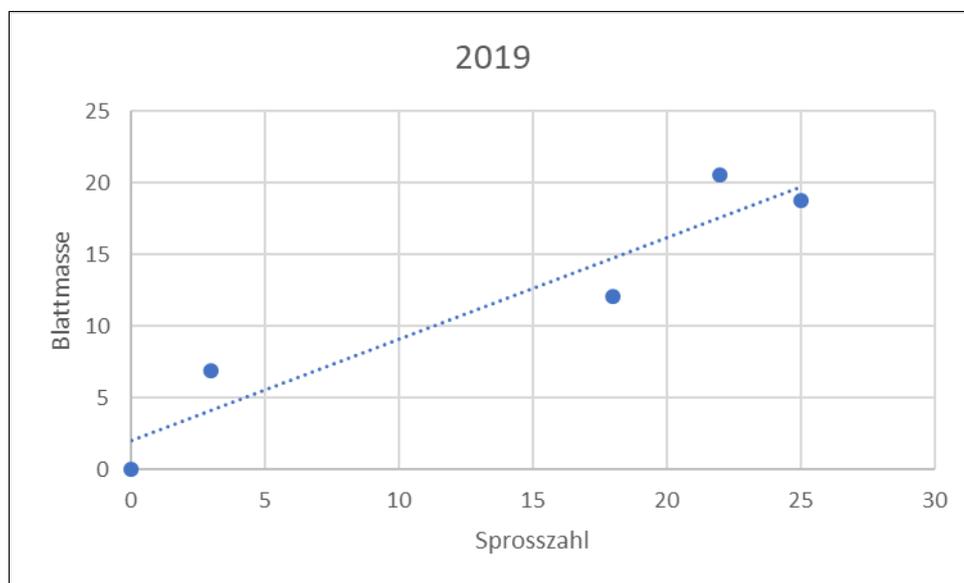


Abbildung 44: Korrelation zwischen Blattmasse & Sprosszahl 2019

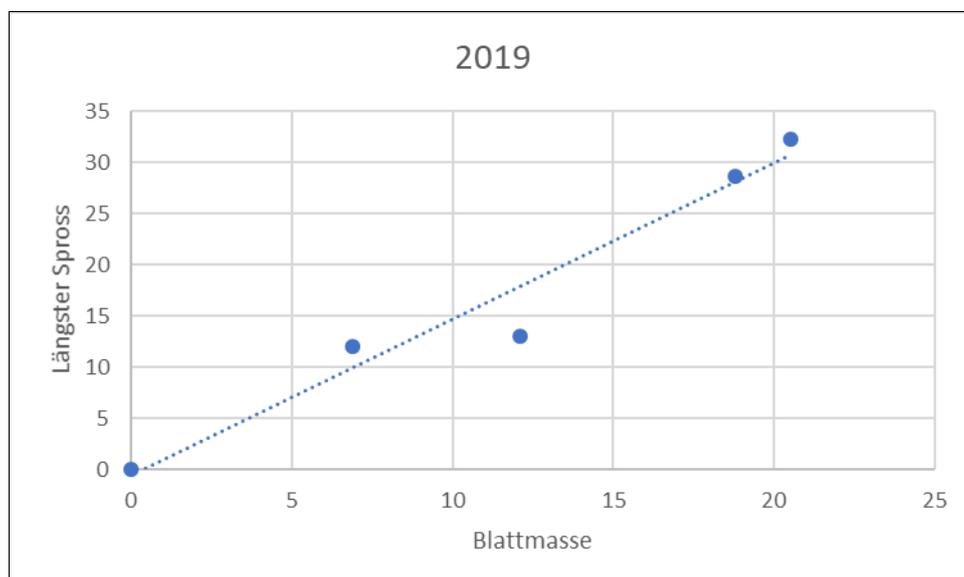


Abbildung 45: Korrelation zwischen längstem Spross und Blattmasse 2019

4.4.2.1 Nähr- und Schadstoffe in Böden und Blattmassen

Nachfolgend werden einige Nährstoffe, deren Pflanzenverfügbarkeit sowie die durchschnittlichen Gehalte in gängigen Böden im Vergleich zu den Materialmischungen des Jahres 2019 dargestellt. Detaillierte Ausführungen zu den vorgestellten Nährstoffen finden sich in Kapitel 4.3.2.1.

Stickstoff: Bei Mineralböden beträgt der Stickstoffanteil etwa 0,7 mg/g bis 2 mg/g. Diese Werte können für Grünland auf 2 mg/g bis 6 mg/g ansteigen. (PATYK & REINHARDT 1997, S.14–15; SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.404–406) In den untersuchten Böden lagen die Stickstoffgehalte bei 1,6 mg/g (*RM08*) bis 6,5 mg/g (*RM05*). Die Gehalte können demnach als ausreichend angesehen werden. Nur bei *RM00* war der Gehalt mit 0,4 mg/g sehr niedrig. Bezüglich der Mineralisation konnte in den untersuchten Materialmischungen teilweise gesehen werden, dass Stickstoff durch Mineralisation nachgeliefert wurde und die Stickstoffgehalte angestiegen. Dies war bei den Böden *RM02*, *RM03* und *RM08* der Fall. Bezüglich der Fixierung von Ammonium an den Tonteilchen eines Bodens konnte gesehen werden, dass die Ammoniumkonzentrationen im zweimonatigen Versuch vorerst sanken. Eine Langzeitbetrachtung würde zeigen, ob diese Werte wieder ansteigen.

Phosphor: Eine optimale Phosphorkonzentration in der Bodenlösung liegt zwischen 0,3 mg/l und 0,8 mg/l. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.413) Die Phosphorgehalte der untersuchten Böden lagen zwischen 0,27 mg/l und 0,37 mg/l und können als ausreichend, wenn auch eher niedrig, angesehen werden. Nur für den Boden *RM00* mit Gehalten von 0,12 mg/l waren diese zu gering.

Kalium: In der Bodenlösung liegt Kalium meist mit Gehalte zwischen 2 mg/l und 20 mg/l vor. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.424) In den untersuchten Böden lagen die Kaliumgehalte zwischen 40 mg/l und 180 mg/l, weswegen die Kaliumgehalte als überdurchschnittlich angesehen werden können. Nur im Boden *RM00* lagen die Gehalte mit 5 mg/l eher im niedrigen Bereich.

Magnesium: Der Magnesiumgehalt in der Bodenlösung schwankt zwischen < 0,1 mg/l und 60 mg/l. Bei Ackerböden wird er meistens auf 5 mg/l bis 25 mg/l beziffert. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.428) Mit 30 mg/l bis 60 mg/l überstiegen die untersuchten Böden die durchschnittlichen Magnesiumgehalte und können daher als ausreichend angesehen werden.

Tabelle 34: Analyse der Böden und Blätter 2019

	Probe	Cl ⁻ (mg/ g TS)	SO ₄ ²⁻ (mg/g TS)	P (µg/g TS)	K (mg/ g TS)	Mg (mg/ g TS)	NO ₃ (mg/ g TS)	NH ₄ (mg/g TS)	N _{ges} (mg/g TS)
Eingang	RM00 Bod.	0	11	1	0,1	0,5	n.n.	0	0,4
1. Entnahme	RM00 Bod.	0,6	10	1	0	0,4	0,4	0,01	-
	RM00 Blatt	3	31	3000	22	5	2	n.n.	-
2. Entnahme	RM00 Bod.	0,1	12	1	0,1	0,5	0	0,02	0,4
	RM00 Blatt	4	20	1000	15	6	1	n.n.	-
Eingang	RM02 Bod.	0,4	12	4	0,9	0,6	0,4	0,1	3
1. Entnahme	RM02 Bod.	0,8	11	7	0,9	0,5	1,2	0,01	-
	RM02 Blatt	10	15	3000	33	3	19	n.n.	-
2. Entnahme	RM02 Bod.	0,2	14	3	0,8	0,4	0,3	0,01	3,6
	RM02 Blatt	21	24	2000	43	6	14	n.n.	-
Eingang	RM03 Bod.	1,3	13	3	0,7	0,5	0	0,4	2,5
1. Entnahme	RM03 Bod.	1,2	13	2	0,6	0,5	1,4	0,01	-
2. Entnahme	RM03 Bod.	1,1	13	3	0,7	0,5	1,6	0,01	3,2
Eingang	RM05 Bod.	1	12	13	1,8	0,6	1,5	0,2	6,5
1. Entnahme	RM05 Bod.	1	12	10	1,5	0,6	2,2	0,02	-
	RM05 Blatt	12	14	3000	39	2	31	n.n.	-
2. Entnahme	RM05 Bod.	0,5	10	13	1,4	0,6	1,1	0,01	4,9
	RM05 Blatt	22	28	2000	53	6	37	n.n.	-
Eingang	RM08 Bod.	0,2	7	3	0,4	0,3	0	0,3	1,6
1. Entnahme	RM08 Bod.	1	7	3	0,3	0,3	1	0,01	-
	RM08 Blatt	4	12	3000	25	2	13	n.n.	-
2. Entnahme	RM08 Bod.	0,2	7	3	0,3	0,3	0,3	0,01	1,9
	RM08 Blatt	6	10	1000	15	3	3	n.n.	-

Die **Phosphorgehalte** bezogen auf die TS in den Materialmischungen variierten stark. *RM05* wies die höchsten Phosphorgehalte auf, *RM00* die niedrigsten. Bei allen Böden war zwischen Beginn und Ende kaum eine Veränderung in den Phosphorgehalten zu sehen. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass Phosphor konstant nachgeliefert wurde. In den Blättern sanken die Phosphorgehalte bei allen Böden aufgrund der Zunahme des Blattmassewachstums. Am stärksten bei *RM00* und *RM08*, welche beide auch das größte Pflanzenwachstum aufwiesen. Daher sind diese Werte plausibel. Die **N_{ges}-Gehalte** lagen bei den Böden ohne Pilzsubstratzugabe (*RM00* und *RM08*) am niedrigsten. *RM00* wies unverändert geringe Werte auf, was mit dem fehlenden Organikgehalt des Bodens zu erklären ist. Die Gehalte in den Böden *RM02*, *RM03* und *RM08* stiegen an, was mit einem Abbau der Stickstoffverbindungen und einer Nachlieferung in den Boden bzw. die Bodenlösung zu erklären ist. Bei Boden *RM05* schien der Stickstoffentzug größer als die Nachlieferung zu sein. Als Abbauprodukte von Stickstoff entstehen Ammonium und Nitrat. Die Gehalte an Ammonium sanken in allen Bodenmischungen, was damit zu erklären ist, dass Ammonium sowohl von den Pflanzen aufgenommen wurde als auch weiter zu Nitrat umgewandelt wurde. Die

Nitratwerte stiegen - außer bei *RM03* - zuerst an und sanken dann wieder ab. Dies ist plausibel, da Nitrat sowohl von den Pflanzen aufgenommen wird, jedoch auch recht schnell ausgewaschen wird und nicht mehr im Boden vorliegt. Da bei *RM03* kaum bzw. am Ende gar keine Blattmasse vorhanden war, wurde das Nitrat hier nicht von den Pflanzen aufgenommen und stieg deswegen wahrscheinlich an. Es konnte auch hier, wie 2018, ein Zusammenhang zwischen einem erhöhten Nitratgehalt (in den Blättern) und einem sinkenden N_{ges} -Gehalt gesehen werden. Dies ist bei *RM05* der Fall. Nitrat wird schnell ausgewaschen und wurde in diesem Fall anscheinend schnell durch die Blätter aufgenommen, was zu geringeren N_{ges} -Gehalten im Boden führte. Die anderen Blattmassen wiesen sinkende Nitratgehalte auf, jedoch höhere N_{ges} -Gehalte im Boden. Hier scheint das Nitrat weniger durch die Blätter aufgenommen worden zu sein, sondern eher im Boden vorzuliegen. Die Parameter Ammonium sowie Stickstoff konnten in den Blattproben nicht gemessen werden, da zu wenig Probenmaterial vorhanden war. Die **Magnesiumgehalte** der Bodenmischungen lagen alle auf einem ähnlichen Niveau und veränderten sich zwischen kaum. Hier schien eine konstante Nachlieferung stattgefunden zu haben. In den Blättern erhöhten sich die Magnesiumgehalte überall, was auf eine Einlagerung schließen lässt. Bei den **Kaliumgehalten** war zu sehen, dass sich die Gehalte im Boden auch über den Versuchszeitraum kaum veränderten und demnach eine konstante Nachlieferung stattgefunden hat. Bei den Blättern sanken die Gehalte bei den Böden *RM00* und *RM08*, was plausibel ist, da hier das größte Blattmassewachstum stattfand. Bei den anderen Böden mit geringerem Pflanzenwachstum stiegen die Gehalte an und Kalium lagerte sich ein. Der **Sulfatgehalt** in den Bodenmischungen änderte sich über den Versuchszeitraum kaum. Es ist, erkennbar, dass die Böden *RM00* und *RM08* die niedrigsten Sulfatgehalte aufwiesen und die Gehalte in den Blättern sanken. Diese beiden Böden wiesen auch das höchste Blattmassewachstum auf. Wie im Jahr 2018 kann daher geschlossen werden, dass niedrigere Sulfatgehalte zu einem besseren Pflanzenwachstum führten. Die **Chloridgehalte** im Boden stiegen über den gesamten Versuchszeitraum bei allen Mischungen an. Hier war zu sehen, dass Chlorid aus dem Boden ausgewaschen wird und in der Bodenlösung zur Verfügung steht. Weiterhin stiegen die Chloridgehalte bei allen Blattproben an. Es kam hier demnach zu einer Einlagerung in die Blattmasse. Boden *RM05*, welcher die höchsten Chloridgehalte aufwies, wies auch die höchsten Gehalte in der Blattmasse auf. Es kann, wie 2019, gesehen werden, dass die Böden mit dem größten Pflanzenwachstum (*RM00* und *RM08*) die niedrigsten Chloridgehalte sowohl im Boden als auch in den Blättern aufwiesen. Demnach kann auch hier der Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Pflanzenwachstum gesehen werden. Generell schienen die Gehalte an Chlorid und Sulfat das Pflanzenwachstum jedoch nicht zu behindern, was für einen Einsatz der Böden als Pflanzenstandort spricht. Es war anfangs ein gutes Pflanzenwachstum zu beobachten und auch gegen Ende wuchsen die meisten Pflanzen gut, unabhängig vom Chlorid- und Sulfatgehalt der Böden. Die

wachstumshemmenden Faktoren sind eher in den hohen Schadstoffbelastungen der Böden zu sehen (siehe Ausführung weiter unten). Es ist generell zu beachten, dass verschiedene Probemengen für die Analysen verwendet wurden, da die Blattmassen bei jedem Boden sehr stark variierten (Boden *RM05* bspw. nur eine Pflanze zur Beprobung). Daher können die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen teilweise nicht als statistisch sicher angesehen werden.

Auch im Jahre 2019 lagen die Gehalte in den Blättern über denen der Böden; hier ist die Erklärung aus Kapitel 4.3.2.1 zu beachten. Im Vergleich zum Vorjahr ist jedoch zu sehen, dass die Chloridgehalte im Boden im Jahr 2019 etwas höher als im Jahr 2018 waren, jedoch trotzdem auf einem ähnlichen Niveau. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass 2019 ein anderes AFB-Material benutzt wurde. Der Stickstoffgehalt (gesamt) war im ersten Jahr generell etwas höher als im zweiten Jahr, jedoch in derselben Größenordnung. Dies kann an der unterschiedlichen Zusammensetzung der Böden und Kompostmischungen liegen. Die restlichen Nährstoff- und auch die Sulfatgehalte unterschieden sich kaum voneinander und lagen auf einem ähnlichen Niveau. Die Messwerte werden demnach als plausibel angesehen.

LIEBHARD zeigt, wie hoch der Nährstoffbedarf von Pappeln ist. (Vgl. Kapitel 4.3.2.1 und LIEBHARD 2010, S.46). Der Gehalt an Stickstoff in den Blättern konnte nicht gemessen werden, da hierfür die Probenmenge nicht ausreichte. Anhand der Mengen im Boden kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine ausreichende Versorgung der Blätter mit Stickstoff vorlag. Bei den anderen Nährstoffen war die Versorgung der beprobten Blätter ausreichend. Phosphor lag mit 3 mg/g TS am Anfang und 1 mg/g TS bis 2 mg/g TS am Ende im vorgeschlagenen Bereich. Kalium lag sowohl zu Beginn (22 mg/g TS bis 39 mg/g TS) als auch zum Ende (15 mg/g TS bis 53 mg/g TS) über den angegebenen Werten. Magnesium lag anfangs mit 2 mg/g TS bis 5 mg/g TS im Grenzbereich, am Ende mit 3 mg/g TS bis 6 mg/g TS sogar leicht darüber. Die Nährstoffgehalte werden in allen Böden als ausreichend angesehen und das Material kann als Pflanzenstandort dienen. Bezüglich des optimalen pH-Wertes für die Nährstoffversorgung ist zu sehen, dass die pH-Werte mit 7 bis 8 im neutralen Bereich lagen und daher für die Nährstoffversorgung optimal sind.

Anhang 45 zeigt eine Übersicht über den optimalen pH-Wert und die Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen im Boden. Für ein optimales Pappelwachstum sollte der pH-Wert zwischen 5,5 bis 6,5 liegen. Die pH-Werte der Böden lagen mit Werten von 7 bis 8 höher als dieser als optimal beschriebene Bereich. Weiterhin ist anhand des pH-Wertes generell nicht von einer toxischen Wirkung von Schadstoffen wie Kupfer, Zink oder Aluminium auszugehen. (siehe Tabelle 35 und SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.435–439) Auch bezüglich der

Eisengehalte ist bei den untersuchten Böden nicht von einer Hemmung auszugehen. Die pH-Werte der Mischungen befanden sich nicht in den Bereichen, in denen Eisen vermehrt ausgewaschen wird. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.434) Es ist außerdem zu sehen, dass die pH-Werte der Böden in einem Bereich lagen, der die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen wie Stickstoff, Kalium, Magnesium und Phosphor sicherstellt. (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.152–160) Es ist zu beachten, dass stark erhöhte Schadstoffgehalte im Boden unabhängig vom pH-Wert toxisch wirken können. Tabelle 35 zeigt, dass nur der Boden *RM08* nicht im Bereich der kritischen Schadstoffkonzentrationen nach SCHUBERT lag. Bei Boden *RM00* war nur Nickel leicht erhöht, was wahrscheinlich das Pflanzenwachstum nicht negativ beeinflusst hat. Diese beiden Böden sind demnach als Pflanzenstandort geeignet. Die Böden *RM02* und *RM05* wiesen sehr stark erhöhte Zinkgehalte auf. Diese können toxisch auf das Pflanzenwachstum wirken und erklären, warum viele Pflanzen bei diesen Bodengruppen eingegangen sind. Der Boden *RM03* zeigte die meisten Überschreitungen, nämlich bei Chrom, Kupfer, Nickel und Zink. Hier ist es wahrscheinlich, dass die vielzähligen Überschreitungen bei den Schwermetallgehalten toxisch wirkten, denn bei Boden *RM03* hat zum Ende des Versuches keine Pflanze überlebt. (Vgl. 4.3.2.1 und SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL ET AL. 2010, S.435–439; KRÄMER 2010, S.518–519) Die Böden *RM02*, *RM03* und *RM05* sind nicht als Pflanzenstandort geeignet.

Tabelle 35: Vgl. kritischer Schadstoffkonzentrationen im Boden nach (SCHUBERT 2006, S.212)

Schadstoff	Grenzwert mg/kg TS	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
Blei	100	5	94	86	26	10
Cadmium	3	< 0,01	0,3	0,9	0,2	0,2
Chrom	100	47	92	350	51	41
Kupfer	100	5	64	520	46	22
Nickel	50	55	49	74	42	46
Quecksilber	2	< 0,05	0,1	0,3	0,1	0,1
Zink	300	36	1000	1800	705	140

Weiterhin können die erhöhten PAK- und Benzo(a)pyren-Gehalte in den Böden (*RM02*, *RM03* und *RM05*) toxisch gewirkt haben. Generell werden Weidengewächse auch zur Phytoremediation eingesetzt. Daher kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass diese Bäume Schadstoffe aufnehmen können, ohne dass das Wachstum negativ beeinflusst wird. Pappeln eignen sich dabei eher für organische Schadstoffe, Weiden bei Schwermetallbelastungen. (TRAPP 2000, S.246; ZERBE 2019, S.51) Da in den vorliegenden Untersuchungen erhöhte Schwermetallbelastungen festgestellt wurden, ist davon auszugehen, dass die Pappeln mit den PAK-Gehalten besser zurechtkamen und eher die Schwermetallbelastungen zum Absterben führten. DELSCHEN ET AL. konnten darüber hinaus

feststellen, dass PAK in Pflanzen sowohl durch atmosphärische Deposition als auch über den Boden aufgenommen werden. Bei der Aufnahme durch den Boden dominiert die Aufnahme dadurch, dass sich Bodenpartikel auf Pflanzenteilen anlagern und es zu einem direkten Übergang der Schadstoffe auf die Pflanze kommt. Nur geringe Mengen PAK werden über die Wurzeln aufgenommen. Weiterhin ist Benzo(a)pyren schwer löslich und wird daher von den Pflanzen eher direkt über bodennahe Pflanzteile aufgenommen als durch Wurzeln. Sowohl die atmosphärische Deposition als auch der Direktübergang kann bei den am IAK durchgeführten Versuchen ausgeschlossen werden. Es ist zu schlussfolgern, dass die erhöhten PAK-Gehalte nicht der hauptsächliche Grund für das Absterben der Pflanzen (v.a. *RM03*) waren, sondern vielmehr die Schwermetalle in der Bodenlösung. (DELSCHEN ET AL. 1999, S.79–85) Andere Autoren pflanzten ebenfalls Weiden und Pappeln zur Phytoremediation. Sie konnten feststellen, dass einige Bäume durch die Kontamination im Boden abstarben, einige Bäume wiederum gut damit zurechtkamen. Dies ist auch in den am IAK durchgeführten Versuchen zu sehen (*RM03* starb komplett ab, *RM02* kam gut zurecht). (LARSEN ET AL. 2001, S.231) Die Pflanzen des Bodens *RM03* sind komplett abgestorben, obwohl die PAK-Gehalte bei *RM05* wesentlich höher waren. Bei *RM03* waren allerdings die Zinkgehalte am höchsten (Tabelle 35). Daher ist davon auszugehen, dass die hohen Zinkgehalte der Pflanze mehr geschadet haben als die PAK-Gehalte. Auch die hohen Gehalte an anderen Schwermetallen, wie Chrom und Kupfer, trugen dazu bei.

4.5 Geotechnische Materialprüfung 2018

Zur Charakterisierung der Böden wurde eine geotechnische Materialprüfung durchgeführt. Die Analysen sollten nachweisen, ob die Böden zum Einbau in einer Rekultivierungsschicht geeignet sind. Die Materialien wurden bezüglich der in BQS 7-1, Anhang 1 gestellten Anforderungen untersucht, da dieser als Handlungsleitfaden für die Anwendung des Materials in der Rekultivierungsschicht gilt. Im BQS 7-1 wird nur bezüglich der Konsistenzzahl I_c ein Wert vorgegeben, den das Material aufweisen soll. Bei den anderen Parametern werden keine konkreten Werte vorgeschrieben, sondern nur die Charakterisierung und der Nachweis der Eignung verlangt. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.14) Im Folgenden werden die einzelnen untersuchten Parameter dargestellt und auf ihre Eignung in der Rekultivierungsschicht bewertet. Die Untersuchungen wurden im Jahr 2018 und 2019 durchgeführt. Die Ergebnisse werden einzeln betrachtet, da es sich in beiden Jahren um verschiedene Materialmischungen handelt. Nachfolgend sind die Ergebnisse für das Jahr 2018 dargestellt.

4.5.1 Zustandsgrenzen

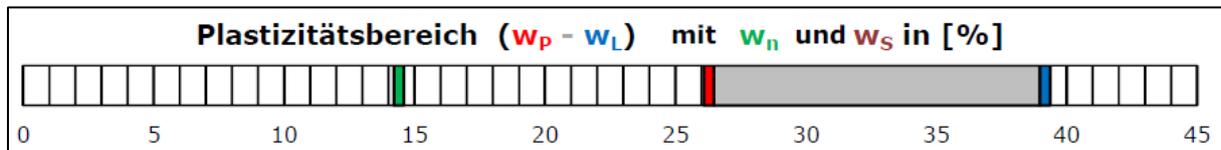
Nachfolgende Tabelle 36 zeigt, die Konsistenzzahl (I_c) der einzelnen Böden. Die Böden *KSK c*, *KSK kf* und *KSK* befanden sich alle in einem ähnlichen Bereich, halbfest bis fest

(Übergangsbereiche siehe Abbildung 15). Nur Boden *KSK cf* war etwas weniger fest und befand sich eher im halbfesten Bereich. Laut BQS 7-1 sollte der Wert für die Konsistenzzahl I_c über 1 liegen. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.14) Das war bei allen Böden der Fall und sie können somit in der Rekultivierungsschicht angewendet werden.

Tabelle 36: I_c der Bodenproben, 2018

	KSK c	KSK cf	KSK kf	KSK
I_c [-]	1,9	1,4	1,8	1,9

Abbildung 46 stellt beispielhaft den Plastizitätsbereich für Boden *KSK c* dar. Die anderen Plastizitätsbereiche können im Anhang 60 ff. eingesehen werden (Plastizitätsdiagramm Anhang 64). Hier sind w_n (grün) als natürlicher Wassergehalt, w_p (rot) als Ausrollgrenze und w_l (blau) als Fließgrenze dargestellt. Der Plastizitätsbereich eines Bodens liegt zwischen w_p und w_l . Alle untersuchten Böden lagen in einem mittelplastischen Bereich und sind somit in Rekultivierungsschichten anwendbar. (SCHROEDER 2014, S.30) In Anhang 63 sind die jeweiligen ermittelten Kennwerte im Detail nachzuvollziehen.

Abbildung 46: Plastizitätsbereich Boden *KSK c*

4.5.2 Proctordichte

Ein Proctorversuch wird durchgeführt, um zu ermitteln, bei welchem Wassergehalt der Boden eine optimale Verdichtung erreicht und somit bestmögliche Ergebnisse erreicht werden. (KUNTSCHKE 2016, S.151; SCHMIDT ET AL. 2017, S.90) Die Ermittlung der Proctordichten ist für den Einbau des Bodens in die Rekultivierungsschicht wichtig, da die Böden mit einer bestimmten Dichte eingebaut werden, welche vorher festgelegt wird. Auf der Deponie Wetro wurden die verwendeten Böden beispielsweise mit einer Proctordichte von 90% bis 92% eingebaut (Abbildung 20). Laut GESELLMANN sind 95% Proctordichte für Rekultivierungsschichten gängig. (GESELLMANN 2018) Für die Proctordichte wird im BQS 7-1 keine Vorgabe gemacht. Die mittels der geotechnischen Versuche ermittelten Werte dienen der Charakterisierung des Materials und müssen beim Einbau des Materials durch eine Verdichtung eingestellt werden. Im Anhang 65 werden die einzelnen Proctorkurven jedes Bodens mit den dazugehörigen Kennwerten bei sowohl maximaler als auch 97%iger und 95%iger Verdichtung dargestellt. Die Proctordichten (Anhang 66 bis Anhang 69) befanden sich

bei allen Böden bei einem ähnlichen Wert. Bei 95% Verdichtung lagen diese zwischen 1,4 und 1,5 g/cm³. Weiterhin sind die optimalen Wassergehalte im Anhang 66 ff. dargestellt.

4.5.3 Scherfestigkeit

Abbildung 17 zeigt eine Schergerade nach DIN 18137-3 für Bodenproben, welche keine Kohäsion aufweisen und somit durch den Nullpunkt verlaufen. Dies ist beispielsweise für nicht bindige Böden der Fall. Auch nähern sich ungestörte Bodenproben dem Nullpunkt an. Es ist zu sehen, dass keiner der getesteten Böden dieser Schergerade entsprach, da im vorliegenden Versuch gestörte Bodenproben vorlagen. Die Böden erfuhren eine Vorbelastung, wodurch Unterschiede zwischen der Normalspannung und der Scherspannung auftauchen können. Dies resultiert in einer Verschiebung der Schergerade auf der y-Achse. Der Abstand, der unter der Geraden zur y-Achse entsteht, ist die Kohäsion. (Anhang 98, GESELLMANN 2019a) In Anhang 72 sind die ermittelten Schergeraden der jeweiligen Böden dargestellt. Die Scherfestigkeitsuntersuchung und Untersuchung zur Hebung und Senkung können im Anhang 73 und Anhang 74 nachvollzogen werden.

Die Kohäsion und der Reibungswinkel sind die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Scherfestigkeit bzw. des Scherverhaltens. Die Kohäsion ist bei nicht bindigen, kiesigen bis grobkörnigen Böden gleich 0. Bei bindigen, feinkörnigen Böden liegt sie zwischen 0 bis 25 kPa. Der Reibungswinkel liegt bei grobkörnigen Böden zwischen 30° und 40°. Bei feinkörnigen Böden bei 15° bis 30°. (INSTITUT FÜR GEOTECHNIK 2017, S.15) Der Kohäsion nach zu urteilen, waren alle verwendeten Böden leicht bindige Böden, in Richtung grobkörnig tendierend. Der Reibungswinkel lag bei allen Böden im grobkörnigen Bereich. Alle Böden sind anhand ihrer Bindigkeit noch für Rekultivierungsschichten geeignet.

Tabelle 37: Scherparameter, 2018

Probe	Kohäsion c' [kPa]	Reibungswinkel [°]
KSK c	10	35
KSK kf	3	39
KSK cf	13	35
KSK	13	33

Nach BQS 7-1 ist für das gesamte Oberflächenabdichtungssystem die Standsicherheit nachzuweisen. Daher müssten auch die Scherfestigkeiten zwischen allen Deponieschichten einzeln berechnet werden. Bei den Materialmischungen konnte gesehen werden, dass die Scherspannungen am Peak der Schergeraden ähnlich den Werten des kritischen Zustandes waren. Demzufolge waren sowohl der kritische Reibungswinkel als auch der Peak-Reibungswinkel fast gleich groß. Grob geschätzt deutet dies darauf hin, dass eine Deponieböschung auch bei einem Gefälle von 25° noch stabil wäre. (Anhang 99, GESELLMANN

2019b) Da Deponien, auf denen Bewuchs angebaut wird, ein Gefälle von maximal 10% (entspricht 5,7°) aufweisen sollen (Kapitel 2.2.4.4), kann das verwendete Material als stabil angesehen werden. Es ist demnach als Rekultivierungsmaterial geeignet.

4.5.4 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit der Proben wurde in zwei Durchgängen bestimmt. Im ersten Durchgang wurde simuliert, dass 1 m Auflast auf dem Boden aufliegt, da die Rekultivierungsschicht nach DepV mindestens 1 m dick sein muss. Es wurden drei Durchgänge mit jeweils verdoppelter Druckdifferenz durchgeführt. Die Parameter sind in Anhang 70 aufgelistet. Daraus kann der Durchlässigkeitswert k_{10} ermittelt werden, welcher nachfolgend für alle Proben dargestellt ist.

Tabelle 38: Durchlässigkeitsbeiwerte bei 0,2 bis 0,8 bar, 2018

Probe	k_f [m/s], 0,2 bar	k_f [m/s], 0,4 bar	k_f [m/s], 0,8 bar
KSK c	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$
KSK kf	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$
KSK cf	$9,4 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
KSK	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$

Da die Böden eine sehr geringe Durchlässigkeit (Vergleich Ton = Durchlässigkeit $>10^{-8}$, Schluff = 10^{-8} bis 10^{-6} , Vgl. Tabelle 8) aufwiesen, wurde ein zweiter Versuch mit einer simulierten Auflast von 30 cm durchgeführt. Hier sollte simuliert werden, dass das Material als Oberboden der Deponie genutzt wird, welches für das hergestellte Material auch der Einsatzort sein soll. Für die Untersuchungen wurde der geringstmögliche Druck eingestellt. Es wurde nur ein Durchgang mit gleichbleibenden Parametern durchgeführt (Anhang 71).

Tabelle 39: Durchlässigkeitsbeiwerte bei 0,1 bar, 2018

Probe	k_f [m/s], 0,1 bar
KSK c	$4,8 \cdot 10^{-10}$
KSK kf	$5,9 \cdot 10^{-10}$
KSK cf	$4,3 \cdot 10^{-10}$
KSK	$9,4 \cdot 10^{-10}$

Es kann gesehen werden, dass die Durchlässigkeiten hier noch niedriger waren als bei 1 m Auflast und höheren Drücken. Nach Tabelle 8 liegen die Werte im Durchlässigkeitsbereich von Ton ($>10^{-8}$). Die Böden können somit als sehr schwach durchlässig klassifiziert werden. Die Wasserdurchlässigkeit der Böden war gering und die Böden sind daher nur bedingt für die Rekultivierungsschicht geeignet. Es ist jedoch zu beachten, dass der k_f -Wert im Labor oft nicht der Realität im Feld entspricht. Die Proben, welche im Labor analysiert werden, sind gestört und nicht repräsentativ. Auch spielt die Fließrichtung eine Rolle. In horizontaler Fließrichtung (Boden im Freiland) ist die Durchlässigkeit größer als in vertikaler (Boden im Labor)

Fließrichtung. (KUNTSCHKE 2016, S.204) Die Bestimmung des k_f -Wertes im Labor ist fehlerbehaftet und nur übertragbar, wenn die Bodenprobe den Boden ausreichend repräsentiert und das Bodengefüge bei den Probenahmen nicht verändert wurde. (MÖLLER 2013, S.165) Im Topfversuch zeigten sich die Böden nicht so undurchlässig, wie nach den Laboruntersuchungen bescheinigt. Das Pflanzenwachstum war bei allen Böden gut und die Böden waren beim Ausbau gleichmäßig durchwässert. Daher sind die Durchlässigkeitsuntersuchungen unter Freilandbedingungen zu wiederholen.

4.6 Geotechnische Materialprüfung 2019

Auch im Jahr 2019 wurden die Bodenmischungen auf ihre geotechnischen Eigenschaften untersucht. Die Versuche wurden wie im Jahr 2018 durchgeführt. (Vgl. Kapitel 4.5)

4.6.1 Zustandsgrenzen

Nachfolgende Tabelle zeigt, in welchem Bereich die Zustandsform (Konsistenzzahl I_c) der einzelnen Böden eingeordnet werden kann. Die Böden *RM02* und *RM03* befanden sich im steifen Bereich, die Böden *RM03* und *RM05* im halbfesten Bereich (Übergangsbereiche siehe Abbildung 15). Die I_c sollte nach BQS 7-1 größer als 1 sein. (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.14) Dies traf bei den Böden *RM03* und *RM08* zu. Diese sind somit für den Einbau in Rekultivierungsschichten geeignet. Die I_c der anderen beiden Böden lagen knapp unter diesem Wert, die Böden sind aber generell noch geeignet. (siehe auch Anhang 78)

Tabelle 40: I_c der Böden, 2019

	RM02	RM03	RM05	RM08
I_c [-]	0,95	1,8	0,95	1,6

Abbildung 47 zeigt den Plastizitätsbereich für Boden *RM02* (andere Böden Anhang 75 ff.; Plastizitätsdiagramm Anhang 79). Alle Böden lagen in einem mittelplastischen Bereich. Der Boden *RM05* lag sogar im ausgeprägt plastischen Bereich. (SCHROEDER 2014, S.30) Die Böden sind somit als Rekultivierungsmaterial geeignet.

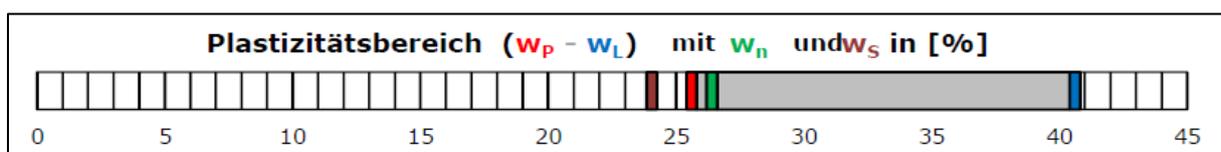


Abbildung 47: Plastizitätsbereich Boden RM02

4.6.2 Proctordichte

Eine Proctordichte von 90% bis 95% ist für Rekultivierungsschichten gängig (siehe Kapitel 4.5.2). Die Proctordichten müssen beim Einbau des Materials in der Rekultivierungsschicht eingestellt werden. In Anhang 80 werden die Proctorkurven eines jeden Bodens mit den dazugehörigen Kennwerten bei maximaler, sowie 97%iger und 95%iger Verdichtung dargestellt. Die Proctordichten (Anhang 81 bis Anhang 84) der Böden waren ähnlich, wenn auch etwas breiter gestreut als 2018. Bei einer 95%igen Verdichtung lagen diese zwischen 1,2 und 1,6 g/cm³. Auch die optimalen Wassergehalte sind im Anhang dargestellt (Anhang 81 bis Anhang 84).

4.6.3 Scherfestigkeit

In Anhang 86 sind die Schergeraden für die Böden dargestellt. Es ist zu sehen, dass nur einer der Böden der Schergerade mit einer Kohäsion gleich 0 (Abbildung 17) entsprach, nämlich Boden *RM02*, obwohl dieser Boden ebenfalls eine Vorbelastung erfahren hat. Bei den anderen Bodenproben kam es zu einer Verschiebung auf der y-Achse und einer daraus resultierenden Kohäsion (Vgl. 4.5.3). Die Scherfestigkeitsuntersuchung und Untersuchung zur Hebung und Senkung können im Anhang 87 und Anhang 88 nachvollzogen werden.

Die Kohäsion und der Reibungswinkel sind die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Scherfestigkeit eines Bodens. Der Kohäsion nach zu urteilen waren die verwendeten Böden *RM03*, *RM05* und *RM08* bindige Böden. Der Boden *RM02* war ein nicht bindiger Boden. Der Reibungswinkel lag bei allen Böden im grobkörnigen Bereich. Alle Böden, außer Boden *RM02*, welcher als nicht bindig klassifiziert wurde, sind für den Einsatz in Rekultivierungsschichten geeignet. (Vgl. INSTITUT FÜR GEOTECHNIK 2017, S.15)

Tabelle 41: Scherparameter, 2019

Probe	Kohäsion c' [kPa]	Reibungswinkel [°]
<i>RM02</i>	0	39
<i>RM03</i>	19	35
<i>RM05</i>	18	38
<i>RM08</i>	8	42

Auch im Jahr 2019 kann gesehen werden, dass die Scherspannungen der Materialmischungen am Peak ähnlich den Werten des kritischen Zustandes sind. Dementsprechend sind sowohl der kritische Reibungswinkel also auch der Peak-Reibungswinkel fast gleich groß. Dies deutet darauf hin, dass eine Böschung auch bei einem Gefälle von 25° noch stabil wäre. (GESELLMANN 2019b) Auf Deponien, auf denen Pflanzen angebaut werden, sollte das Gefälle nur maximal 10% (5,7°) sein (Kapitel 2.2.4.4). Demnach kann das verwendete Material als stabil eingestuft werden und ist geeignet.

4.6.4 Durchlässigkeit

In der zweiten Versuchsreihe 2019 wurde - im Gegensatz zu der ersten Versuchsreihe 2018 - von Anfang an die Durchlässigkeit mit der geringsten möglichen Auflast (30 cm) simuliert. Für die Untersuchungen wurde ebenso der geringstmögliche Druck eingestellt. Es wurde nur ein Durchgang mit gleichbleibenden Parametern durchgeführt (Anhang 85). Daraus kann der Durchlässigkeitswert k_{10} ermittelt werden, welcher nachfolgend für alle Proben dargestellt ist.

Tabelle 42: Durchlässigkeitswerte bei 0,1 bar, 2019

Probe	k_f [m/s], 0,1 bar
RM02	$2,8 \cdot 10^{-9}$
RM03	$1,5 \cdot 10^{-9}$
RM05	$1,8 \cdot 10^{-9}$
RM08	$1,4 \cdot 10^{-9}$

Es kann gesehen werden, dass die Durchlässigkeit der Böden sehr gering war. Nach Tabelle 8 liegen die Werte im Durchlässigkeitsbereich von Ton ($>10^{-8}$). Die Böden können somit als sehr schwach durchlässig klassifiziert werden. Die Böden sind daher nur bedingt als Pflanzenstandort (Rekultivierungsschicht) geeignet. Es sind jedoch die Aussagen zu den im Labor ermittelten Werten nach Kapitel 4.5.4 zu beachten. Auch im Jahr 2019 konnte sowohl im Gefäß- als auch im Freilandversuch in der Praxis nicht festgestellt werden, dass die Durchlässigkeiten der Böden zu gering sind. Die Pflanzen wuchsen und die Böden waren während der Gefäßversuche und im Freiland gut durchwässert. Demnach müssen auch hier die Durchlässigkeiten noch einmal unter Realbedingungen im Feld bestimmt werden.

4.7 Freilandversuche Cröbern

Auf der Deponie Cröbern wurden Pflanzversuche durchgeführt und einmal monatlich das Wachstum vermessen. Das Pflanzenwachstum wurde über einen Zeitraum von vier Monaten durch das IAK begutachtet. Die Pflanzversuche sollen jedoch länger durchgeführt werden und werden nicht abgebaut, nachdem das Forschungsprojekt beendet wird. Es war geplant, pro Testfeld eine Pflanze in Höhe und Durchmesser vermessen. Wegen des trockenen Sommers wuchsen jedoch viele Pflanzen nicht oder vertrockneten über den Zeitraum wieder. Die Vermessung wurde daher angepasst und es wurden zwanzig Pflanzen zum Vermessen ausgewählt, unabhängig von der Lage im Testfeld. Nachfolgende Abbildung 48 zeigt die Lage der vermessenen Pflanzen. Ein Vergleich mit der ungefähren Lage der verschiedenen Böden ist in Abbildung 24 zu sehen.

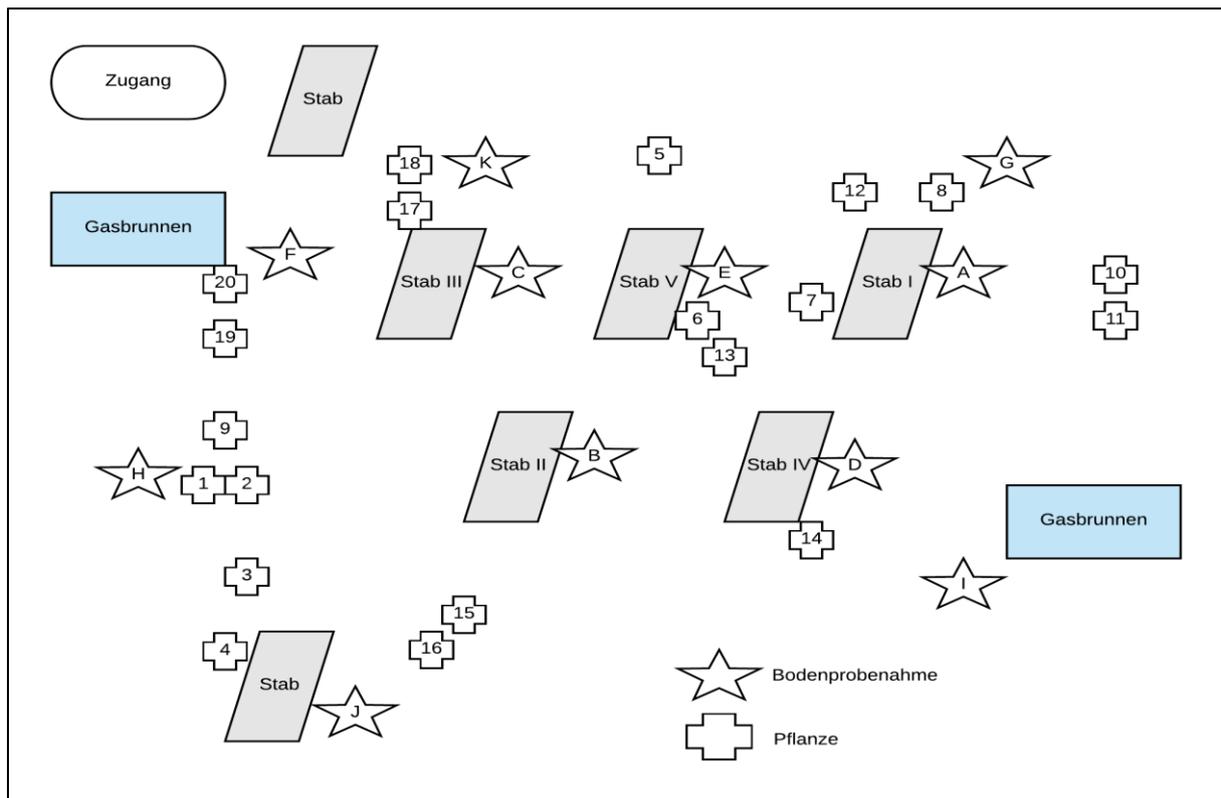


Abbildung 48: Lage der beprobten Pflanzen Deponie Cröbern

Nachfolgend (Tabelle 43 und Tabelle 44) sind ausgewählte Messwerte dargestellt. Es ist zu sehen, dass die wenigen Pflanzen, welche auf dem Testfeld wuchsen, kontinuierlich Zuwachs generierten. Auch der Zuwachs im Stängeldurchmesser der einzelnen Pflanzen nahm kontinuierlich zu. Anfänglich war ein geringes Wachstum zu verzeichnen und auch der Rasen breitete sich nicht flächig aus. Es gab im Sommer 2019 sehr wenig Regen und Temperaturen bis zu 40°C. Das Wetter in Cröbern war nach dem Einbringen der Samen im Juni und über den gesamten Sommer hin wärmer als in den Vorjahren. Im Juni war es im Schnitt 5,4°C wärmer (Vergleich Monatsmittel 1981-2010), im Juli 1,0°C wärmer und im August 2,3°C. Außerdem regnete es weniger als im Monatsmittel (Referenzwerte 1981-2010). So regnete es im Juni nur 63% vom langjährigen Mittel, im Juli nur 54% v.l.M und im August nur 52% v.l.M. (WETTERKONTOR 2019) Auch nach einigen Monaten breitete sich der Rasen nicht flächig aus. Einige Blumen aus der Blumenmischung wuchsen gut an, jedoch nicht flächendeckend. Auf der gesamten Fläche befinden sich nur circa 40 bis 50 Pflanzen. Die Abbildung 49 zeigt beispielhaft das Wachstum der Pflanzen auf dem Testfeld. In Abbildung 50 ist erkennbar, dass sich keine flächenhafte Begrünung in Form von Gräsern ausgebildet hat, sondern nur einzelne Pflanzen auf den Testfeldern wuchsen. Im September gab es einige starke Regenfälle in der Region Cröbern, welche dazu führten, dass die Grassamenmischung anschließend anfang auszutreiben. Nun finden sich vereinzelt grüne Stellen auf dem Testfeld. Es bleibt abzuwarten, ob sich in den folgenden Monaten bzw. Jahren eine flächendeckende Begrünung ausbildet.

Tabelle 43: Höhenwachstum der Pflanzen Deponie Cröbern in cm

Pflanze	Höhe 25.07.19	Höhe 29.08.19	Höhe 20.09.19
5	14	37	45
13	8	43	43
15	9	16	39
16	4	16	41
17	3	17	39
18	5	23	42

Tabelle 44: Dickenwachstum (Durchmesser Haupttrieb) der Pflanzen Deponie Cröbern in cm

Pflanze	Durchmesser 25.07.19	Durchmesser 29.08.19	Durchmesser 20.09.19
5	0,5	1,1	1,4
13	0,5	1,2	2,3
15	0,8	0,9	1,1
16	0,7	0,7	1,0
17	0,5	0,7	2,3
18	0,1	0,7	1,1



Abbildung 49: Pflanze Nummer 13, Juli bis September 2019 (Fotos: R. Rüger)



Abbildung 50: Testfeld Deponie Cröbern 08.2019 (Foto: R. Rüger)

4.8 Freilandversuche Wetro

In diesem Kapitel werden die Messwerte zu den Freilandversuchen zwischen 2016 und 2019 dargestellt. Abbildung 51 zeigt, dass die Pflanzen sich in den jeweiligen Testfeldern (T) auf einem ähnlichen Wachstumsniveau befanden und es kaum Wachstumsunterschiede gab.

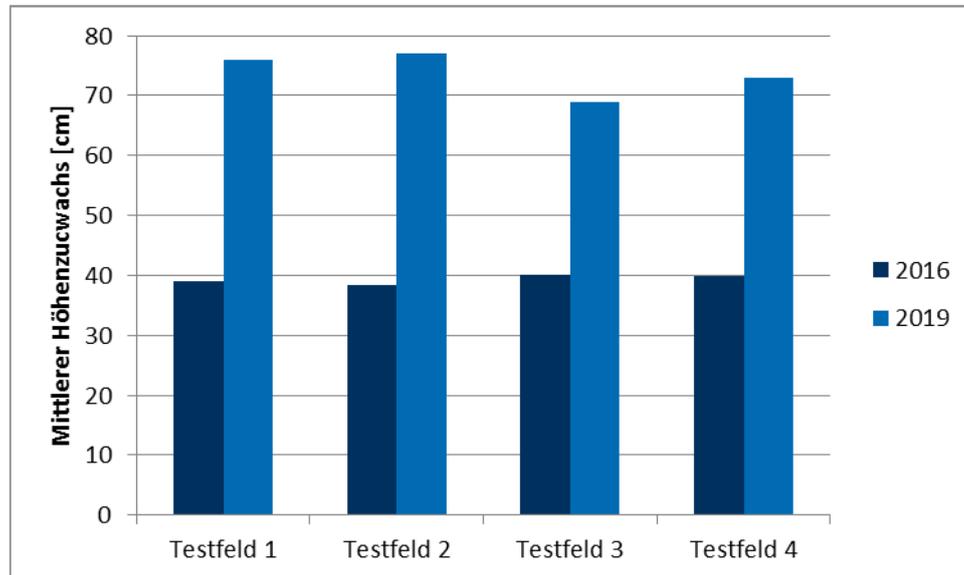


Abbildung 51: Mittlerer Höhenzuwachs 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Zwischen den einzelnen Arten gab es jedoch Wachstumsunterschiede. In Abbildung 52 ist zu sehen, dass die Hundsrose (T1 bis T4: n = 11 {2016 bis 2019}) in jedem Feld ein gleichmäßiges Wachstum aufwies. So konnte zwischen 2016 und 2019 das durchschnittliche Höhenwachstum auf T1 und T3 verdreifacht werden, auf T2 und T4 Faktor 3,5 respektive 3,7. Es ist außerdem zu sehen, dass die Hundsrose neben der Esche bezüglich des Höhenwachstums am besten wuchs.

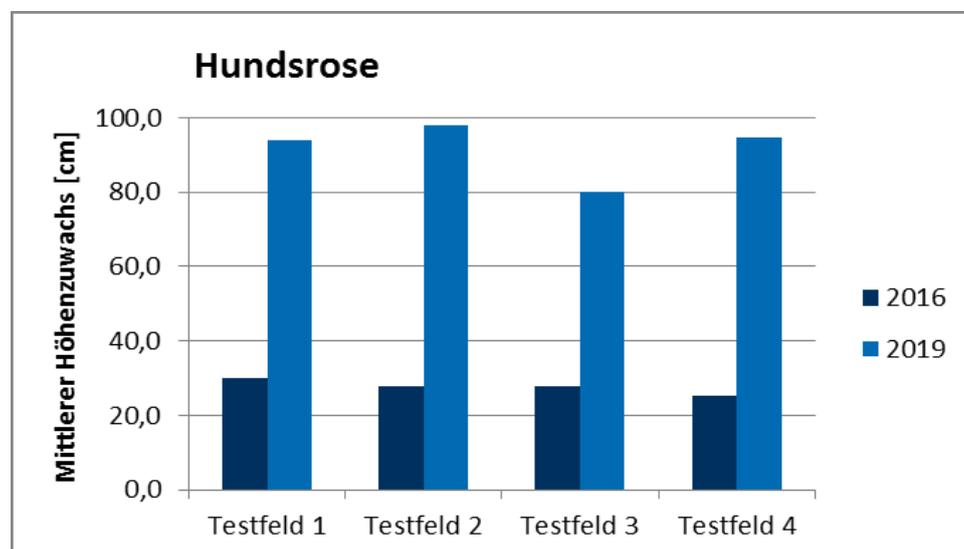


Abbildung 52: Höhenwachstum Hundsrose 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Die Schlehe (T1 und T4: n = 11 {2016}, 12 {2017, 2019}; T2 und T3: n = 11 {2016 bis 2019}) wies ein anfänglich gutes Wachstum auf und lag mit ihrem Initialwachstum im Jahr 2016 teilweise 30 cm (T1) über dem Wachstum der Hundsrose. Im weiteren Verlauf sanken die Zuwachsraten. Nur auf T2 konnten 30 cm mehr Wachstum generiert werden (Abbildung 53).

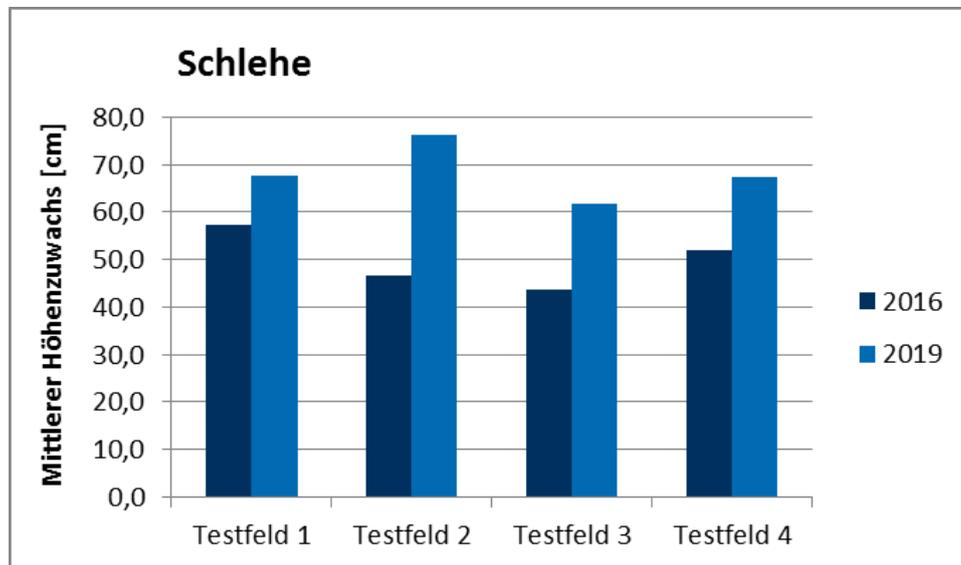


Abbildung 53: Höhenwachstum Schlehe 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Bei der Eibe waren einige Ausfälle zu beobachten, daher wurden im Jahr 2017 viele Pflanzen durch Kiefern ersetzt. Es wurden im Jahr 2015 jeweils 11 Eiben pro Feld gepflanzt. Nachfolgend (Tabelle 45) ist dargestellt, wie viele Eiben 2017 durch Kiefern ersetzt wurden.

Tabelle 45: Anzahl ersetzter Eiben pro Testfeld 2017, Deponie Wetro

Testfeld 1	Testfeld 2	Testfeld 3	Testfeld 4
11	6	5	7

So ist zu sehen (Abbildung 54), dass auf Testfeld 1 alle Eiben (T1: n = 3 {2016}, n = 0 {2019}; T2: n = 11 {2016}, n = 5 {2019}, T3: n = 11 (2016), n = 6 (2019); T4: n = 11 {2016}, n = 4 {2019}) ausgefallen sind. Auch auf den anderen Feldern ist zu sehen, dass die Eiben kaum gewachsen sind und im Gegensatz zu den anderen Pflanzen sehr klein blieben. Zwischen 2016 und 2019 konnte die Eibe kaum an Höhenwachstum (6 cm bis 10 cm auf T4 und T3) zulegen. Auf T2 jedoch verdoppelte sie ihr Wachstum fast. Gegenüber den anderen Arten liegen die Werte jedoch deutlich niedriger.

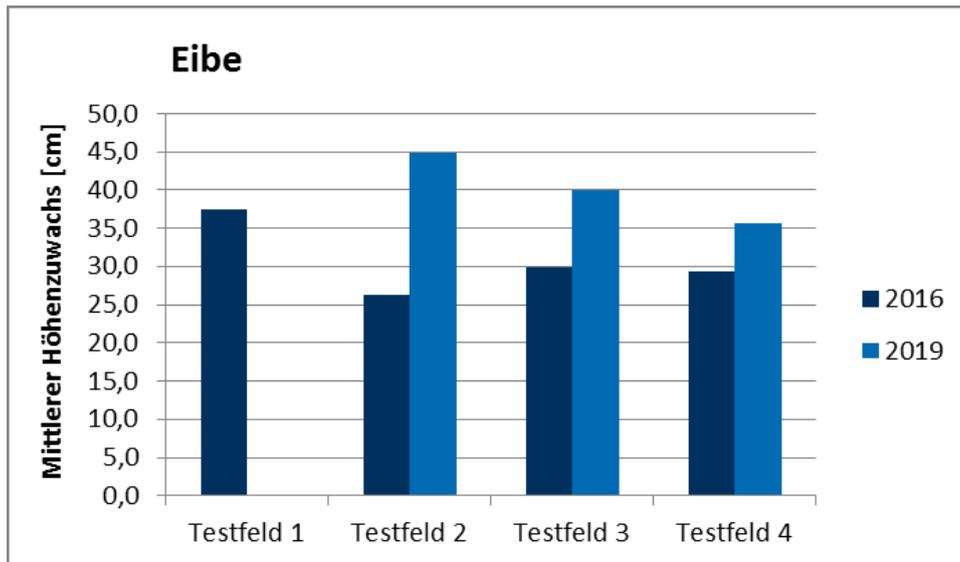


Abbildung 54: Höhenwachstum Eibe 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Das Wachstum der Esche (Abbildung 55, T1 bis T4: n = 11 {2016 bis 2019}) war zu Beginn ungefähr mit dem der Schlehe vergleichbar. Die Eschen befanden sich im Jahr 2019 alle auf einem ähnlichen Niveau bei etwa 80 cm bis 85 cm. Der Zuwachs der Esche war über die letzten Jahre circa 25 cm (T1, T3 und T4) bis 30 cm (T2). Es ist außerdem zu sehen, dass die Esche neben der Hundsrose am besten von allem Pflanzen wächst (Höhenwachstum).

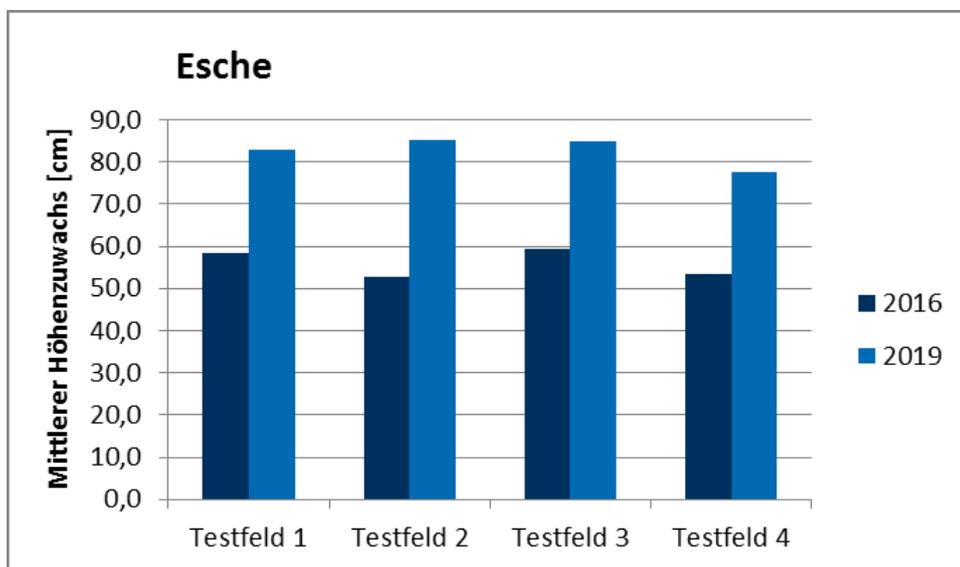


Abbildung 55: Höhenwachstum Esche 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Bei den Kiefern (Abbildung 56, T1: n = 10 {2017 bis 2019}, T2 und T4: n = 6 {2017 bis 2019}, T3: n = 5 {2017, 2019}) ist zu beachten, dass diese erst im Jahr 2017 als Ersatz für die Eiben gepflanzt wurden. Kiefern treten in Sachsen im Zuge der natürlichen Sukzession auf, weswegen Kiefern für die Neupflanzung gewählt wurden (Vgl. Kapitel 2.2.6.3) Es ist zu sehen, dass die Kiefern im ersten Jahr bereits etwa 20 cm gewachsen sind. Esche und Schlehe beispielsweise hatten während der doppelten Zeit einen Zuwachs von 20 cm. Jedoch ist auch

bei den anderen Pflanzen im ersten Jahr ein höheres Initialwachstum erkennbar. Im zweiten Jahr stagnierte das Wachstum. Die Kiefer konnte im Zeitraum von drei Jahren ungefähr 30 bis 35 cm wachsen und befindet sich in ihrem Wachstum noch unterhalb der anderen Pflanzen (Hundsrose, Schlehe, Esche). Nur die Eibe verzeichnete auch im Jahr 2019 ein geringeres Wachstum als die Kiefer.

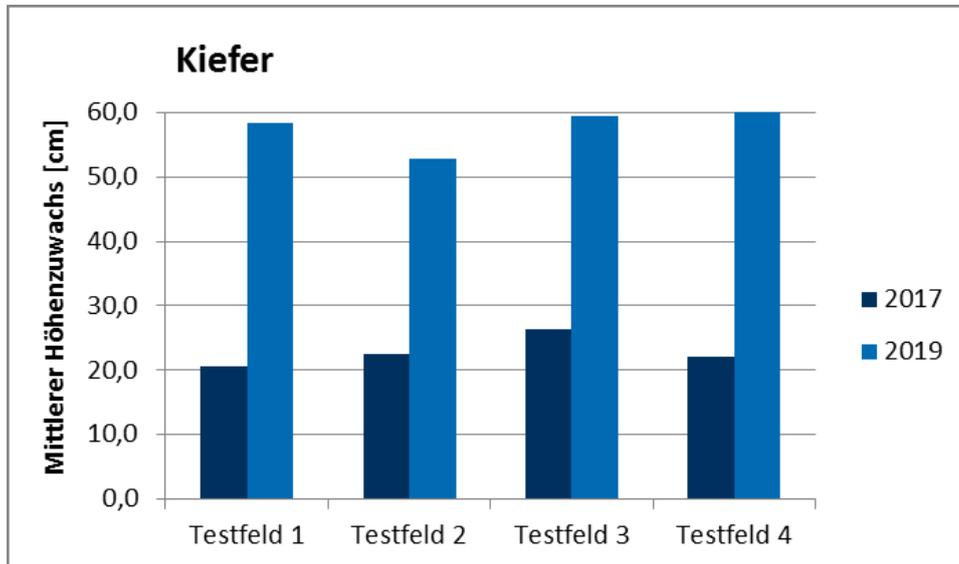


Abbildung 56: Höhenwachstum Kiefer 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Abbildung 57 stellt beispielhaft je eine Pflanze der jeweiligen Pflanzenart dar.



Abbildung 57: Eibe, Esche, Hundsrose, Kiefer und Schlehe (v.l.n.r.) 2019, Deponie Wetro

Auf dem Testfeld befindet sich (Stand 2019) viel Begleitvegetation in Form von Ginster, welcher sich stark über die gesamte Fläche ausbreitete. Da dieser wahrscheinlich die anderen Pflanzen am Wachstum hindert, wurde er teilweise zurückgeschnitten. Das Testfeld soll jedoch seinem natürlichen Wachstum überlassen werden und es sind keine Pflegemaßnahmen vorgesehen. Deswegen wurde der Ginster nicht im großen Maßstab zurückgeschnitten, sondern nur vereinzelt im Bereich der Testpflanzen.



Abbildung 58: Ginsterwachstum 2019, Deponie Wetro

Beim Dickenwachstum des Stammes (Abbildung 59) ist zu beobachten, dass im Jahr 2016 alle Stämme durchschnittlich eine etwa gleiche Dicke (etwa 0,8 cm) aufwiesen. Im Jahr 2019 lagen alle Testfelder zwischen 1,6 cm (T1 und T2) und 1,4 cm (T3 und T4). Die Zunahme des Dickenwachstums pro Pflanzensorte kann im Anhang gesehen werden (Anhang 89 ff.).

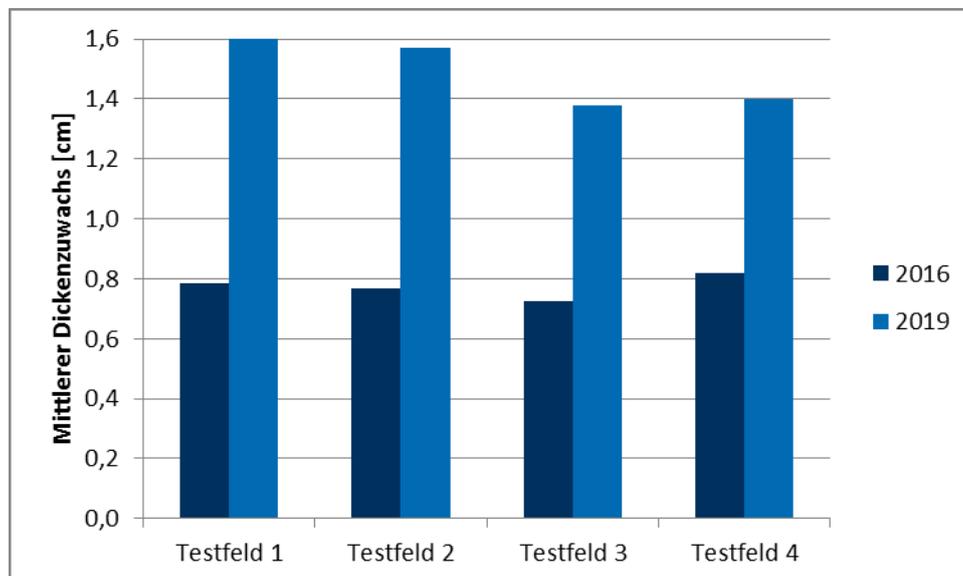


Abbildung 59: Mittlerer Dickenzuwachs 2016 bis 2019, Deponie Wetro

Eine Auswertung mit der Statistiksoftware SPSS 25 (Einfaktorielle Anova, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, $p < 0,05$ = signifikant) sollte testen, ob die Wachstumsunterschiede zwischen den einzelnen Testfeldern signifikant waren, da jeweils verschiedene Böden verwendet wurden. Beim Dickenwachstum (Stamm) konnte festgestellt werden, dass sowohl 2016 als auch 2019 die Unterschiede zwischen den Feldern nicht signifikant waren ($p = 0,437$ bzw. $0,89$). Ebenso zeigten sich keine signifikanten Unterschiede

beim Höhenwachstum ($p = 0,942$ bzw. $0,927$). Der Versuchszeitraum beträgt derzeit vier Jahre, weswegen nur erste Trends für das Wachstum abgelesen werden können. In der Langzeitbetrachtung muss sich zeigen, ob zwischen den einzelnen Testfeldern Unterschiede im Wachstum auftreten. In den ersten Jahren wachsen die verschiedenen Baum- und Buschsorten aufgrund ihrer Art unterschiedlich schnell. Daher muss untersucht werden, welche Pflanzen sich langfristig etablieren können und welche Arten verdrängt werden. Weiterhin soll in den nächsten Jahren eine Wurzelbohrung durchgeführt werden, um festzustellen, wie sich die Wurzeln der einzelnen Pflanzen im Untergrund ausbreiten und ob die Oberflächenabdichtung langfristig beeinträchtigt werden kann.

4.9 Berechnung zum Klärschlammverbrauch

Es wurde eine Berechnung durchgeführt, wieviel Klärschlamm in der Rekultivierung, beispielhaft für zwei Deponien, eingesetzt werden könnte. Diese Berechnungen sollen zeigen, wie groß die einsetzbaren Klärschlamm-mengen für die Rekultivierung der Deponien Wetro (Fläche Anhang 100) und Cröbern (Fläche Anhang 101) sein könnten, sowie für die von FRICKE ET AL. genannten Zahlen. (Kapitel 2.2.2; FRICKE ET AL. 2005, S. 10&115) Hierzu wurde die gesamte Fläche der Rekultivierungsschicht betrachtet und davon ausgegangen, dass der Klärschlamm(-kompost) in die obersten 30 cm der Rekultivierungsschicht eingearbeitet wird. Der Wassergehalt des Klärschlammkompost wurde mit 50% angenommen (WG entwässerter Klärschlamm 70%, WG Siebabfall 20%) und der Kompost besteht etwa zu 50% aus Klärschlamm und zu 50% aus Siebabfall. Die in den Versuchen hergestellten Materialmischungen für das Rekultivierungsmaterial bestehen aus zwei Teilen Boden und einem Teil Klärschlammkompost. Dieses Verhältnis wurde auch für die Berechnung angewendet. Die Berechnung kann in Tabelle 46 nachvollzogen werden.

Tabelle 46: Berechnung Klärschlammverbrauch Deponieabdeckung

Deponie	Fläche in m ²	Dicke in m	Vol. in m ³	Dichte in t/m ³	Rekultivierungsmaterial in t	Masse KS gesamt in t/TS
Wetro	218.830	0,30	65.649	1,60	104.956	5.250
Cröbern	436.975	0,30	131.092	1,60	209.584	10.480
nach Fricke et al.	1.000.000.000	0,30	300.000.000	1,60	479.625.000	23.981.250
nach Fricke et al.	150.000.000	0,30	45.000.000	1,60	71.943.750	3.597.190

Die jährlich anfallende Menge an Klärschlamm in Deutschland beträgt 1,8 Mio. t TS. Der Klärschlammverbrauch, welcher für die Rekultivierung der gesamten Deponie Wetro

verbraucht würde, wären nur 0,3% des Klärschlammanfall eines Jahres. In Cröbern wären es einmalig 0,6%. Nach den prognostizierten Zahlen von FRICKE ET AL. würde der Klärschlammanfall von 13 Jahren (1.000.000.000 m²) respektive 2 Jahren (150.000.000 m²) ausreichen, um alle genannten Deponieflächen abzudecken. Die Zahlen beziehen sich auf die in den Versuchen hergestellten Materialmischungen und Mischungsverhältnisse. In der Praxis angewendete Rekultivierungsmaterialien können zu anderen Anteilen Klärschlämme enthalten. Es kann jedoch generell festgehalten werden, dass der Klärschlammverbrauch für Rekultivierungsschichten gering ausfällt.

4.10 Verworfenene Ansätze

Die meisten verworfenen Ansätze wurden aus ökonomischen Gründen nicht weiterverfolgt (siehe Tabelle 47). Einerseits stellte sich verwendetes Material selbst als zu kostenintensiv heraus (beispielsweise Klärschlammgranulat oder HTC-Kohle), andererseits war Material kostengünstiger in großen Mengen verfügbar (beispielsweise AFB-Material in Bodenmischungen). Einige Materialien wurden aufgrund ihrer Grenzwertüberschreitungen (bspw. Schwermetalle) nicht weiter betrachtet.

Tabelle 47: Verworfenene Ansätze

Gruppe	Verworfenener Ansatz
Materialien	Pilzsubstrat Austerseitling Grund: Zu geringe Menge für ausführliche Tests vorhanden.
	Klärschlammgranulat Grund: Grenzwertüberschreitungen, ökonomische Komponente (sehr aufwändig und teuer in der Herstellung)
	HTC-Kohle aus Klärschlamm Grund: Grenzwertüberschreitungen, ökonomische Komponente (sehr aufwändig und damit teuer in der Herstellung)
Bodenmischungen	AFB Klärschlammkompost mit Champignonsubstrat (kompostiert); Mischungsverhältnis 1:1 Grund: Verworfen aus ökonomischen Gründen (wirtschaftlich sinnvoller sind zwei Teile AFB zu einem Teil Kompostsubstrat)
	AFB Klärschlammfrischkompost mit Champignonsubstrat (frisch); Mischungsverhältnis 1:1 Grund: Verworfen aus ökonomischen Gründen (wirtschaftlich sinnvoller sind zwei Teile AFB zu einem Teil Kompostsubstrat)
	AFB Klärschlammfrischkompost mit Kräuterseitlingssubstrat (frisch); Mischungsverhältnis 1:1 Grund: Verworfen aus ökonomischen Gründen (wirtschaftlich sinnvoller sind zwei Teile AFB zu einem Teil Kompostsubstrat)

4.11 Fehlerbetrachtung

Die Blattmassen wiesen im getrockneten Zustand geringe Probemengen auf, weswegen je Materialmischung jeweils eine Mischprobe aller Blätter hergestellt wurde. Die Analytik wurde

im Jahr 2018 jeweils mit 5 g Blattmasse durchgeführt. Im Jahr 2019 konnten beispielsweise bei den Pflanzen, die auf Boden *RM05* gewachsen sind, die 5 g Probemenge nicht generiert werden und es wurde weniger Probenmenge verwendet. Demnach ist eine Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander im zweiten Jahr und zwischen 2018 und 2019 schwierig. Weiterhin werden in den meisten Pflanzen Schwermetalle in den Wurzeln akkumuliert. (KRÄMER 2010, S.523) Die Nähr- und Schadstoffkonzentrationen wurden jedoch bei den durchgeführten Versuchen nicht in den Wurzeln gemessen, sondern in den Blättern, da zu wenig Wurzelmasse für eine Analyse vorhanden war.

Weiterhin wurde von den Bodenproben der Pflanzversuche jeweils eine Mischprobe hergestellt. Diese kann durch größere Materialbrocken oder grobe Stücke fehlerbehaftet sein. Auch bei der Beprobung des Kompostes wurde jeweils eine Mischprobe genommen. Bei den jeweiligen Probenahmen können u.U. Proben genommen worden sein, welche nicht repräsentativ sind. Außerdem unterscheiden sich die Materialien, welche für die verschiedenen Komposte und Materialmischungen verwendet wurden, von Mal zu Mal. Somit variiert bspw. auch die Zusammensetzung des Klärschlammes und der AFB-Böden. Dies ist bei den Vergleichen zwischen 2018 zu 2019 zu beachten.

Die Herstellung homogener Materialmischungen gestaltete sich schwierig. Einerseits wurden die Pilzsubstrate in kompakt gepressten Ballen angeliefert und das Aufbrechen dieser Ballen führte nur teilweise zu einem homogenen Substrat. Für die Herstellung der Materialmischungen wurde 2018 eine Mischanlage in Betrieb genommen (diese war Teil des Projektes). Es wurde jedoch festgestellt, dass durch die Anlage keine optimale Vermischung erreicht werden kann. Der Klärschlamm verklebte die Anlage teilweise und es waren große Materialbrocken in den fertigen Mischungen zu finden. Da für die Mischanlage 2019 kein genehmigter Stellplatz gefunden wurde, wurden die Mischungen mit Hilfe von Mischschaufeln und Baggern direkt auf der Deponie gemischt. Dies führte teilweise zu einem inhomogenen Material. Außerdem wurden nicht ausreichend Sicherheitsmaßnahmen getroffen, sodass die Materialmischungen kontaminiert wurden. Die Materialien sollten separat gelagert und gemischt werden und erst danach auf die Deponie gefahren werden. Durch die Verwendung des kontaminierten Materials ist zwischen den Pflanzversuchen 2018 und 2019 kaum ein Vergleich möglich.

Vor dem Einbau auf der Deponie und der Benutzung der Böden in den Pflanzversuchen (2019) hätten die Mischungen auf ihre Schadstoffgehalte analysiert werden sollen, um von Beginn an schadstoffbelastete Böden auszuschließen. Da die Analyse nach DepV durch externe Labore eine gewisse Zeit dauert und das Material nicht für längere Zeit auf der

Abfallbehandlungsanlage zwischengelagert werden konnte, wurde es direkt eingebaut. Generell sollte in nachfolgenden Versuchen das Versuchsdesign angepasst, d.h. mit mehr Pufferzeiten und Wartezeiten für die Analysen versehen werden. Die meisten Versuche konnten nur in einem kurzen Zeitfenster (bspw. Pflanzversuche nur in den Frühlings- und Sommermonaten, Kompostierung im Winter schwierig etc.) durchgeführt werden. Bereits kleine Verschiebungen einzelner Komponenten führten somit zur Verschiebung des gesamten Zeitplanes.

Wegen Bauarbeiten am Institut wurden 2019 andere Stellplätze für die Pflanzen genutzt. Die Fensterplätze waren jedoch vergleichbar und besaßen ähnliche Lichtverhältnisse. Auch wurden die Pflanzversuche im Jahr 2018 (Juli bis September) etwas später durchgeführt als im Jahr 2019 (Mai bis Juli).

Die geotechnischen Versuche wurden unter Laborbedingungen durchgeführt und bilden nicht exakt das Verhalten der Materialmischungen im Freiland ab. Die Ermittlung des k_f -Wertes im Labor ist beispielsweise fehlerbehaftet und oft nicht mit den im Freiland gemessenen Werten vergleichbar. (KUNTSCHKE 2016, S.204; MÖLLER 2013, S.165)

Die Durchführung von kleintechnischen Topfversuchen gibt nur einen ersten Trend für die Eignung der Materialien als Pflanzenstandort. Für eine abschließende Prüfung müssen Langzeitversuche im Freiland durchgeführt werden. Die Freilandversuche waren jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht geplant bzw. konnten diese nur anfänglich begleitet werden (Deponie Cröbern). Auch war die Probenmenge für die statistische Auswertung der Pflanzversuche mit $n = 10$ pro Bodenmischung recht gering. Die Repräsentativität eines Ergebnisses steigt mit einer größeren Anzahl an Proben. Ein größerer Umfang an Pflanzen war aufgrund begrenzter personeller Kapazitäten und Räumlichkeiten jedoch nicht möglich.

5 Zusammenfassung

Im Zuge der Arbeit sollte geklärt werden, ob Klärschlamm als Deponieersatzbaustoff in der Rekultivierungsschicht eingesetzt werden kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keiner der Böden alle geforderten Parameter einhielt und somit keiner der Böden ein optimales Rekultivierungsmaterial darstellte. Die Böden des Jahres 2018 wiesen jedoch nur eine zu geringe Wasserdurchlässigkeit auf, deren Ermittlung im Labormaßstab fehlerbehaftet sein kann. Unter Realbedingungen im Feld können diese Böden andere Wasserdurchlässigkeiten aufweisen und durchaus geeignete Rekultivierungsmaterialien darstellen. Die Böden des Jahres 2018 können bezüglich deren nutzbaren Feldkapazitäten, der Nährstoff- und Schadstoffgehalten als gute Böden bezeichnet werden. Die Grenzwerte, welche nach DepV für Rekultivierungsschichten gelten, hielten alle Böden ein, abgesehen von Überschreitungen bei Chlorid und Sulfat und einer daraus resultierenden erhöhten elektrischen Leitfähigkeit. Diese Werte sind jedoch als geogene Hintergrundbelastung des AFB-Materials zu klassifizieren und somit nicht per se ein Ausschlusskriterium für die Zulassung des Materials. Die Böden des Jahres 2019 wiesen in mehreren Bereichen, am deutlichsten jedoch bei der Schadstoffbelastung, Schwächen auf und eignen sich nicht als Rekultivierungsmaterial. Hier müssen im Versuchsdesign (Mischtechnik u.ä.) Anpassungen vorgenommen werden. Da die Böden im Jahr 2019 in ihrer Zusammensetzung den Böden des Jahres 2018 ähneln, kann davon ausgegangen werden, dass sich auch diese Böden generell eignen, wenn die Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden. Im Jahr 2019 waren die Nährstoffe in den Böden auf einem ähnlich guten Niveau wie 2018 und die nutzbaren Feldkapazitäten ausreichend. Es hielt jedoch nur der Boden „AFB + Klärschlammkompost (RM08)“ die Grenzwerte der DepV ein. Dieser wies lediglich Überschreitungen bei Chlorid und Sulfat auf, welche aus der geogenen Hintergrundbelastung resultieren. Der reine „AFB-Boden (RM00)“ wies zusätzlich zur Überschreitung im Bereich Sulfat eine geringfügige Überschreitung im Bereich Nickel auf. Die anderen Bodenmischungen (RM02, RM03, RM05) wiesen zahlreiche Grenzwertüberschreitungen auf, bspw. bei PAK oder Zink. Hier wurde das Material während der Aufbereitung kontaminiert und kann daher nicht als Deponieersatzbaustoff verwendet werden. Diese Verunreinigungen führten auch zur Hemmung des Pflanzenwachstums. Aus geotechnischen Gesichtspunkten ähnelten sich die Böden beider Jahre und können als Deponieersatzbaustoff verwendet werden. Lediglich die Wasserdurchlässigkeit war sehr gering, was gegen den Einsatz des Materials in der Rekultivierungsschicht spricht. Die Bestimmung der Durchlässigkeit im Labor ist jedoch fehlerbehaftet (siehe weiter oben im Text). Es muss außerdem angemerkt werden, dass der reine Klärschlamm die Grenzwerte nach DepV nicht einhielt (Anhang 7). Die hergestellten Ersatzbaustoffe (Jahr 2018) halten in der Mischung zwar die Grenzwerte nach DepV ein, jedoch müssen die einzelnen verwendeten Materialien vorher schon die vorgeschriebenen Grenzwerte einhalten. Da es nach KrWG ein

Vermischungsverbot für Abfälle gibt, ist fraglich, ob die zuständige Behörde einen Deponieersatzbaustoff mit den verwendeten Klärschlämmen zulässt. So konnten im Zuge des Forschungsprojektes Vermischungen durchgeführt werden, die praxisnahe Anwendung ist bedenklich. Wie in der Berechnung der Klärschlammengen, die in der Rekultivierung eingesetzt werden könnten, zu sehen ist, fallen die einsetzbaren Klärschlammengen gering aus (bspw. 0,3% der jährlichen Klärschlammmenge für die Rekultivierung der Deponie Wetro).

Mit Hilfe von Pflanzversuchen sollte zudem überprüft werden, inwieweit sich Klärschlämme als Bodenverbesserer eignen. Generell konnten keine signifikanten Wachstumsunterschiede bei den Böden mit Klärschlammbeimischungen zu den reinen AFB-Böden gesehen werden. Vielmehr zeigten die zweimonatigen Pflanzversuche Wachstumsvorteile bei den AFB-Böden ohne Klärschlamm(-kompost). Generell war das Wachstumsniveau im Jahr 2018 bei allen Böden mit Kompostbeimischung ähnlich (1,1 g TS - 1,5 g TS Blattmasse). Die Pflanzen des reinen AFB-Bodens wuchsen am besten (bis zu 72% mehr Blattmasse). Im Jahr 2019 gab es große Unterschiede im Wachstumsniveau (0,0 g TS - 2,3 g TS Blattmasse). Auch hier wuchs der reine AFB-Boden (*RM00*) am besten (100% Blattmasse). Der Boden mit „AFB + Klärschlammkompost (*RM08*)“ erzeugte Blattmasse auf einem ähnlichen Niveau (82% Blattmasse). Der Boden „Klärschlamm + 33% Pilzsubstrat + AFB (*RM02*)“ erreichte nur etwa 2/3 so viel Blattmasse (65%). Und der Boden „Klärschlamm + 20% Pilzsubstrat + AFB (*RM05*)“ verzeichnete am Ende fast gar keine Sprosse mehr (35% Blattmasse). Die Pflanzen des Bodens „Frischkompost + Pilzsubstrat + AFB (*RM03*)“ starben komplett ab. Dies liegt an den Grenzwertüberschreitungen, hervorgerufen durch die Verunreinigung des Materials mit PAK und Schwermetallen, nicht an der Klärschlammbeimischung. Es ist zusammenfassend zu sagen, dass das Wachstum der Pflanzen im Jahr 2018 (alle Böden) und 2019 (Böden *RM00* und *RM08*) bei den Böden, welche keine massiven Verunreinigungen aufwiesen, ähnlich war - unabhängig von einer Klärschlamm- bzw. Kompostbeimischung. Im Jahr 2019 wuchs der reine AFB-Boden (*RM00*) sogar besser als der reine AFB-Boden 2018 (*AFB*). Er generierte zum Ende der Versuche 21% mehr Blattmasse. Bei den Böden mit Verunreinigungen (*RM02*, *RM03* und *RM05*) ist das Wachstum nicht vergleichbar, weil die Schadstoffe in den Böden das Wachstum negativ beeinflussten und keine Aussagen bezüglich der Wirkung anderer Parameter getroffen werden können.

Weiterhin sollte untersucht werden, ob sich abgetragene Pilzsubstrate aus der Speisepilzproduktion als Zuschlagstoffe für Deponieersatzbaustoffe eignen und deren pflanzenbauliche Eigenschaften, wie beispielsweise die Wasserhaltekapazität, positiv beeinflussen können. Dies sollte in einem größeren Pflanzenwachstum resultieren. Im ersten Versuchsjahr konnten jedoch keine signifikanten Wachstumsunterschiede zwischen den

verschiedenen Kompostvarianten gesehen werden. Der Boden „AFB + Klärschlammkompost + frisches Kräuterseitlingssubstrat (*KSK kf*)“ hatte bei Parametern wie Blattmasse und Wassergehalt geringfügig verbesserte Werte als die anderen Böden mit Kompost- und Pilzbeimischung (*KSK c*, *KSK cf*), jedoch können diese nicht als signifikant angesehen werden. In den Versuchen des Jahres 2019 konnten durch die Verunreinigungen der Böden keine Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Beimischung von Pilzsubstraten zum Kompost brachte keine Nachteile, jedoch auch keine signifikanten Vorteile.

Darüber hinaus sollte die Frage beantwortet werden, ob sich nährstoff- und organikarme Böden aus Tagebauen durch die Zugabe von Kompost und anderen organischen Substraten so aufwerten lassen, dass diese für Deponieersatzbaustoffe in der Rekultivierung eingesetzt werden können. In den zweimonatigen Pflanzversuchen konnte gesehen werden, dass die AFB-Böden sich sowohl mit als auch ohne Beimischung von Kompost eignen. Die Topfversuche geben jedoch nur einen ersten Eindruck. Vor allem die Langzeitwirkung ist bedeutend. Daher wurden die Pflanzversuche im großtechnischen Maßstab auf der Deponie Cröbern initiiert. In der Langzeitbetrachtung sollten die Böden, welche mit Kompost versehen sind, einen deutlichen Vorteil gegenüber den verarmten AFB-Böden bringen. Derzeit kann gesehen werden, dass der AFB-Boden sehr schnell Nährstoffe und Wasser zur Verfügung stellt, was den Pflanzen im Initialwachstum einen besseren Zuwachs bringt. Langfristig sollten die mit Kompost versehenen Böden jedoch eine bessere Wirkung haben, da sie die Nährstoffe langsamer an die Pflanzen abgeben und bei Trockenperioden durch ihre höheren Wasserspeicherkapazitäten mehr Wasser speichern können. Leider wurden die Böden auf der Deponie Cröbern kontaminiert. Somit werden die Ergebnisse wahrscheinlich verfälscht. Entscheidungen über den Fortlauf der Versuche auf der Deponie stehen an. In der Theorie ist es sinnvoll, verarmte Tagebauböden mit Kompost aufzuwerten, wie zahlreiche Studien zeigen. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich jedoch gezeigt, dass die praktische Umsetzung zu erheblichen Schwierigkeiten führen kann. Zum einen ist die Aufbereitung des Pilzsubstrates (eingeschweißte Kräuterseitlingssubstrate, Beschaffung der benötigten Mengen) derzeit im großtechnischen Maßstab nicht machbar. Daher eignen sich abgetragene Pilzsubstrate nicht für die Herstellung von Deponieersatzbaustoffen im großen Maßstab. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Herstellung von homogenen Materialmischungen schwierig ist. Hierfür wäre Maschinenteknik nötig, welche in Ansätzen im Forschungsprojekt entwickelt wurde, jedoch noch nicht ausgereift ist. Auch der Standort einer solchen Mischanlage ist fraglich. Die Erteilung einer Aufstellgenehmigung war ein Problem im Forschungsprojekt, daher wurden die Mischungen direkt auf der Deponieanlage gemischt. Da hier diverse Abfallstoffe und Fahrzeuge im Umlauf sind, sowie die Flächen nicht lange belegt werden können, kam es zum Eintrag von Schadstoffen in die einzelnen Substrate. Somit ist der im Forschungsprojekt

untersuchte Ansatz in der Theorie sinnvoll, in der Praxis jedoch mit vielen Einschränkungen und Anpassungen verbunden.

Zusätzlich sollte geklärt werden, ob sich Deponieflächen für den Anbau von mehrjährigem Bewuchs eignen. Bei den theoretischen Untersuchungen zeigte sich, dass Kurzumtriebsplantagen und anderer mehrjähriger Bewuchs eine geeignete Nachnutzungsform für rekultivierte Deponien darstellen. Es ist weiterhin zu sehen, dass ein Flächenpotenzial an Rekultivierungsflächen zur Verfügung steht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Flächenpotenzial für Sachsen betrachtet. Dieses ist auf andere Bundesländer übertragbar. Auf der Deponie Wetro konnte das Pflanzenwachstum von Bäumen und Büschen über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Generell eignet sich diese Deponiefläche zum Anbau von mehrjährigem Bewuchs, da kaum Ausfälle zu verzeichnen waren und die Pflanzen gut anwuchsen. Derzeit können keine Wachstumsunterschiede zwischen den einzelnen Testfeldern mit verschiedenen Bodenarten gesehen werden. Da es sich im Rahmen dieser Arbeit um einen relativ kurzen Betrachtungszeitraum von vier Jahren handelt, muss die Langzeitbetrachtung zeigen, wie sich die Bäume und Büsche etablieren. Wichtig für die Beurteilung über die Eignung von Deponieflächen für mehrjährigen Bewuchs ist ebenso, ob die darunterliegenden Abdichtungskomponenten vor Durchwurzelung und anderen Schäden geschützt sind. Hierzu sollen in den nächsten Jahren Wurzelbohrungen durchgeführt werden.

6 Ausblick

An die Experimente der vorliegenden Arbeit sollten sich weitere Langzeitversuche mit den Materialmischungen anschließen. Hierfür sollten nach Möglichkeit noch einmal neue Bodensubstrate mit den gleichen Inhaltsstoffen und Mischungsverhältnissen wie im Jahr 2019 hergestellt werden. Die kontaminierten Mischungen auf der Deponie Cröbern sollten durch diese neuen Materialien ersetzt und die großtechnischen Pflanzversuche erneut durchgeführt werden. Außerdem sollte die Durchlässigkeit der Materialmischungen im Freiland unter realen Bedingungen getestet werden, um herauszufinden, ob sich diese doch als Rekultivierungsmaterial eignen.

Weiterhin sollte die Wirkung der Pilzsubstrate - v.a. Champignonsubstrat wegen ausreichend vorhandener Mengen - anhand der großtechnischen, langfristig angelegten Pflanzversuche untersucht werden. In den kleintechnischen Topfversuchen konnte gegenüber normalen Klärschlammkomposten kein zusätzlicher positiver Einfluss des Pilzsubstrates auf das Pflanzenwachstum und die Bodeneigenschaften gezeigt werden. Über einen längeren Versuchszeitraum könnten sich jedoch Wachstumsvorteile bieten.

Für die Deponie Wetro stehen in den kommenden Jahren Wurzelbohrungen an, um das Wurzelverhalten der Bäume zu untersuchen und zu sehen, ob unterliegende Komponenten des Abdichtungssystems von Schäden betroffen sind bzw. sein können. Weiterhin ist zu klären, ob das starke Ginsterwachstum eingeschränkt werden soll und sich somit der Pflegeaufwand erhöht. Oder ob, wie anfangs im Projekt angedacht, das Testfeld sich selbst überlassen wird und der Ginster demnach die schwächeren Bäume zurückdrängt.

Der bodenbezogene Klärschlammeinsatz wird aufgrund der Novellierung der AbfKlärV weiterhin zurückgehen und der Großteil der Klärschlämme wird verbrannt werden. Für anfallende Restmengen aus kleineren Kläranlagen wird die bodenbezogene Verwertung jedoch weiterhin eine Verwertungsmöglichkeit darstellen. Auch die Rekultivierung von Deponien wird weiterhin ein bedeutendes Thema bleiben, da in den nächsten Jahren immer mehr (Alt-)Deponien geschlossen werden. Die Zahl der neu errichteten Deponien wird weiterhin gering bleiben, da nur noch geringe Abfallmengen deponiert werden. Mit einer steigenden thermischen Verwertung und einem damit einhergehenden Anstieg an zu entsorgenden Aschen und Schlacken, könnte die Zahl der Deponien jedoch wieder etwas ansteigen.

7 Literaturverzeichnis

- ABFKLÄRV (2017): *Abf. Klärschlammverordnung - Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung - Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost*. Fassung vom 27.09.2017. Bundesregierung.
- AVV (2011): *Abfallverzeichnis-Verordnung - Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis*. Fassung vom 17.07.2017. Bundesregierung & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Auflage 5. Druckhaus Thomas Müntzer. Hannover. 438 S.
- ALVARENGA, P.; MOURINHA, C.; FARTO, M.; SANTOS, T.; PALMA, P.; SENGO, J.; MORAIS, M.-C. & CUNHA-QUEDA, C. (2015): *Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors*. In: *Waste management (New York)*. Jg 40. S. 44–52.
- AMTHAUER GALLARDO, D. (2014): *Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weidenklonen in Kurzumtriebsplantagen*. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN. Fakultät für Umweltwissenschaften. Dresden. Datum 05.2014. 219 S.
- ANDERSCH, J. (2019): *Altdeponien in Dresden*. Email. Datum 30.07.2019. Empfänger Paula Penckert.
- BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2018): *Zeitphasen einer Deponie*. zuletzt geprüft 02.01.2020. abgerufen von: https://www.lfu.bayern.de/abfall/gefaehrliche_nichtgefaehrliche_abfaelle/zeitphasen/index.htm.
- BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2019): *Geogene Belastungen*. zuletzt geprüft 09.12.2019. abgerufen von: https://www.lfu.bayern.de/boden/hintergrundwerte/geogene_grundbelastungen/index.htm.
- BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2019): *Wirkung und Verbrauch von Kalk im Boden*. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: https://www.lwg.bayern.de/analytik/boden_umwelt/110945/index.php.
- BERNSDORF, S. und LIEMEN, F. (2009): *Besondere Anforderungen an den Bewuchs und den Oberboden bei der Gestaltung von Rekultivierungs-/ Wasserhaushaltsschichten unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitskomponente*. S. 43–50. In: Prof. Dr. -Ing. Said Al-Akel (Hrsg.). *5. Leipziger Deponiefachtagung*. Leipziger Deponiefachtagung. 10./11.05.2009. Leipzig.
- BERNSDORF, S.; LIEMEN, F. & MEISSNER, R. (2009): *Einsatz von Klärschlammkompost auf einer Kalirückstandshalde in Sondershausen unter Berücksichtigung des Anbaus von Energiepflanzen*. In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (Hrsg.). *Jahrestagung*. Böden - eine endliche Ressource. 2009. Bonn.
- BIOABFV (1998): *Bioabfallverordnung - Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden*. Fassung vom 04.04.2013. Bundesregierung.

- BORMANN, H.; MÜLLER, F. & VODEGEL, S. (2017): *Thermochemische Verfahren zur Klärschlammverwertung: Übersicht der Entwicklungen in Deutschland*. In: Wasser und Abfall. Jg 19. Nr. 11. S. 29–34.
- BOTHMANN, P. (2000): *Bedeutung der Rekultivierungsschicht für die langfristige Sicherheit von Deponien*. S. 1–9. In: RAMKE, H.-G. / BERGER, K. / STIEF, K. (Hrsg.). *Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten*. Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht. Fachtagung. 08.09.2000. Hamburg. Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg. Band 47.
- BRÄCKER, W. (2018): *Aktuelles aus der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnik" zu BQS und Eignungsbeurteilungen*. S. 15–22. In: EGLOFFSTEIN, T. / BURKHARDT, G. (Hrsg.). *Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten - Planung und Bau neuer Deponien*. Schaffung von neuem Deponieraum, Genehmigungsprozesse, Nachnutzung von Deponien, frei gemessene nicht-radioaktive Abfälle, Entlassung aus der Nachsorge. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten - Planung und Bau neuer Deponien. 17.- 18.10.2018. Karlsruhe. ICP Eigenverlag Bau und Umwelt.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (2012): *Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven*. Datum 30.01.2012. 40 S.
- BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (2012): *Die Pappel*. KLONE, KLONMISCHUNGEN UND FAMILIENELTERN. REFERAT 324 - REGISTERSTELLE FÜR GEPRÜFTES VERMEHRUNGSGUT DER PAPPEL. Datum 05.2012. Bonn. 12 S.
- BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST (2006): *Organische Düngung*. GRUNDLAGEN DER GUTEN FACHLICHEN PRAXIS. Kompost für die Landwirtschaft. Auflage 3. Datum 06.2006. Köln. 28 S.
- BUNDESVERWALTUNGSGERICHT (2006): *Urteil BVERWG 7 C 4.06*. Datum 14.12.2006.
- CARLIG, M.; LÄNDELL, M.; MYRHEDE, E. & SUNDBERG, J. (2002): *Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska*. RVF Utveckling. Datum 11.2002. Malmö. 68 S.
- DELSCHEN, T.; HEMBROCK-HEGER, A.; LEISNER-SAABER, J. & SOPCZAK, D. (1999): *Verhalten von PAK im System Boden/Pflanze*. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Nr. 11. S. 79–87.
- DEPV (2009): *Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager*. Fassung vom 04.03.2016. Bundesregierung & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- DESTATIS (2018): *70 % des kommunalen Klärschlammes wurden 2017 verbrannt*. PRESSEMITTEILUNG NR. 484. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/12/PD18_484_32214.html.
- DIN. Nr. 18122-1 (1997): *Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- DIN. Nr. 18130-1 (1998): *Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts Teil 1 : Laborversuche*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- DIN. Nr. 18137-3 (2002): *Bestimmung der Scherfestigkeit Teil 3: Direkter Scherversuch*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

- DIN EN. Nr. 12457-4 (2003): *Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämme, Teil 4*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- DIN. Nr. 18137-1 (2010): *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- DIN. Nr. 18127 (2012): *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch*. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- DÖRFELT, D. (2004): *Verwertung von Klärschlämmen in der Rekultivierungsschicht für Oberflächenabdichtung auf Deponien*. DGAW-Regionaltreffen Mitteldeutschland "Klärschlämme". Veranstalter DGAW. Datum 23.11.2004. Bitterfeld.
- DREWES, R.; HAUBRICH, E.; HEGEWALD, K.-D.; SPANGENBERG, G.; WATTENDORF, P. & ZIEMKE, R. (2017): *Kurzumtriebsplantagen auf Deponien: Technische Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen*. In: Müll und Abfall. Jg 2017. Nr. 9-17. S. 456–464.
- DÜMV (2012): *Düngemittelverordnung - Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln*. Fassung vom 12.04.2017. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- DÜV (2017): *Düngeverordnung - Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen*. Fassung vom 26.05.2017. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- EUWID (2017): *Report Klärschlamm 2018 - Sonderpublikation: Klärschlammmenge für die Monoverbrennung steigt bis 2032 auf 1,2 Mio. Jahrestonnen*. In: Euwid. Jg 2017. Nr. 21.2017. S. 26.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. FNR (2018): *Bioenergie: Energiepflanzen*. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: <https://bioenergie.fnr.de/bioenergie/energiepflanzen>.
- FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ (2010): *Richtlinie für die Anwendung von Kompost aus biogenen Abfällen in der Landwirtschaft*. Datum 2010. Wien. 39 S.
- FAHLANDER, D. (2004): *Kompostering av avloppslam för produktion av anläggningsjord*. Masterarbeit. SWEDISH UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES. Department of Soil Sciences. Uppsala. Datum 2004. 60 S.
- FELDWISCH, N. (2011): *Umweltgerechter Anbau von Energiepflanzen: Rahmenbedingungen und Strategien für einen an Umweltaspekten ausgerichteten Anbau der für Sachsen relevanten Energiepflanzen*. In: LfULG-Schriftenreihe. Nr. 43.
- FRICKE, K.; RICHTER, O.; SCHMEHL, M.; HILLEBRECHT, K.; BORKOWSKY, O.; GNESE, D. & TEUNERT, R. : *Nachnutzung von Deponien für den Anbau von Energiepflanzen. - BEWERTUNG VON ANFORDERUNGEN UND SYNERGIEN BEI DER PRODUKTION VON ENERGIEPFLANZEN, DER DEPONIENACHSORGE UND DEM NATURSCHUTZ -*. TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG. Datum 20.10.2005. Braunschweig. 141 S.
- FRIEDERICH, I. (2015): *IAD-Wetro Übersicht Versuchsfelder*. INTERNE UNTERLAGEN.
- FRIEDERICH, I. (2018): *Deponien in Nachsorge*. Persönliche Übermittlung als Excel-Tabelle. Datum 05.12.2018. Empfänger Paula Penckert.

- FRIEDERICH, I. (2019a): *Versuchsfelder Wetro*. Mündliche Mitteilung. Datum 16.01.2019. Empfänger Paula Penckert.
- FRIEDERICH, I. (2019b): *Deponien in Sachsen*. Email. Datum 29.08.2019. Empfänger Paula Penckert.
- GEIßLER, M. (2019): *Rekultivierungsstand von Deponien in Sachsen*. Seminararbeit. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN. Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft. Dresden. Datum 25.03.2019. 48 S.
- GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. (GDV) (2005): *Einsatz von Ersatzbrennstoffen in kohlebefeuerter Kraftwerken*. MERKBLATT ZUR SCHADENVERHÜTUNG. Datum 08.2005. Köln. 24 S.
- GESELLMANN, S. (2018): *Einbau Rekultivierungsschicht - geotechnische Parameter*. Mündliche Mitteilung. Datum 17.10.2018. Empfänger Paula Penckert.
- GESELLMANN, S. (2019a): *Durchlässigkeitsversuche*. Email. Datum 01.11.2019. Empfänger Paula Penckert.
- GESELLMANN, S. (2019b): *AW: Durchlässigkeitsversuche*. Email. Datum 18.11.2019. Empfänger Paula Penckert.
- GREENPEACE MAGAZIN (2019): *Neustart*. In: Greenpeace Magazin. Jg 2019. Nr. 03. S. 48 f.
- HAASZIO, S. und REHSE, H. (2006): *Reststoffe für die Verwendung in Oberflächenabdichtungssystemen für Deponien und Altlasten*. Fachtagung "Die sichere Deponie". Veranstalter SKZ - ConSem GmbH; Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V. Datum 16.-17.02.2006. Würzburg.
- HEINITZ, F.; FARACK, K. & ALBERT, E. (2013): *Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau*. In: LfULG-Schriftenreihe. Nr. 9. S. 1–46.
- HEINKELE, T.; HÜTTL, R. F.; HAUBOLD-ROSAR, M.; SCHAAF, W. & GAST, M. (2005): *Anforderungen an und Regeln für den Einsatz von Kompost und Klärschlamm bei der Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften*. 51-53. In: MELCHIOR, S. / BERGER, K. (Hrsg.). *Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften*. Fachtagung. 31.03-01.04.2005. Hamburg. Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten. Band 56.
- HENKEN-MELLIES, W.-U. (2003): *Die Bedeutung der Rekultivierungsschicht für die Wirksamkeit von Deponie-Oberflächenabdichtungen*. LGA Deponieseminar. LGA-GRUNDBAUINSTITUT. Datum 2003. Nürnberg. 16 S.
- HENKEN-MELLIES, W.-U.; MAIER-HARTH, U. & MELCHIOR, S. (2010): *E 2-4. OBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEME*. GDA Empfehlung. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (GDA). Datum 07.2010a. 8 S.
- HENKEN-MELLIES, W.-U.; MAIER-HARTH, U.; MELCHIOR, S. & WATTENDORF, P. (2010): *E 2-31. REKULTIVIERUNGSSCHICHTEN*. GDA Empfehlung. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (GDA). Datum 06.2010b.
- HÜTTL, R. F.; HAUBOLD-ROSAR, M.; SCHAAF, W.; HEINKELE, T. & GAST, M. (2004): *Leitfaden zum Einsatz von Kompost und Klärschlamm bei der Rekultivierung*. Auflage 1. Band 3. Forschungszentrum Bergbaulandschaften BTU Cottbus. Cottbus. 1-123. ISBN 3937728023.

- INSTITUT FÜR GEOTECHNIK (2017): *Bodenmechanik und Grundbau*. SCHERVERHALTEN. Vorlesung. TU DRESDEN. Professur für Bodenmechanik und Grundbau. Dresden. Datum 06.06.2017. 40 S.
- KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; RORAT, A.; BRATTEBO, H.; ALMAS, A. & SINGH, B. (2017): *Sewage sludge disposal strategies for sustainable development*. In: Environmental research. Jg 156. S. 39–46.
- KAISER, A. (2019): *Grundflächen von Deponien* Statistisches Bundesamt. Email. Datum 16.07.2019. Empfänger Paula Penckert.
- KEHRES, B. und THELEN-JÜNGLING, M. (2011): *Verwertung von abgetragenen Pilzsubstraten*. In: H&K aktuell. Nr. 10. S. 1–3.
- KIEPENKERL (2019a): *Kiepenkerl Blumenwiese*. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: <https://www.rasensamen-kaufen.de/kiepenkerl-blumenwiese-samen-1-kg.html>.
- KIEPENKERL (2019b): *Kiepenkerl RSM 2.2.2. GEBRAUCHSRASEN FÜR EXTREME TROCKENLAGEN*. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: <https://www.rasensamen-kaufen.de/kiepenkerl-rsm-222-gebrauchsrasen-extreme-trockenlagen-10kg-rasensamen.html>.
- KIETZ, E. (2015): *Umsetzung der Klärschlammkonzeption für den Freistaat Sachsen*. Landeskonferenz 2015. Datum 09.11.2015. Dresden. zuletzt geprüft 27.01.2020. abgerufen von: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/TOP3_LK_2015_KlaerSN.pdf.
- KNORRE, S.; BERNSDORF, S.; LIEMEN, F. & MEISSNER, R. (2014): *Verfahrenstechnische und energetische Bewertung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe auf zu rekultivierenden Flächen mit Hilfe von Klärschlammkompost*. S. 227–234. In: Prof. Dr. -Ing. Said Al-Akel (Hrsg.). *10. Leipziger Deponiefachtagung*. Leipziger Deponiefachtagung. 11.-12.03.2014. Leipzig.
- KNORRE, S.; LIEMEN, F.; BERNSDORF, S.; VETTER, A. & MEISSNER, R. (2017): *Anbau von Energiepflanzen als mögliche Nachnutzung von Deponien*. In: Müll und Abfall. Jg 2017. Nr. 4. S. 186–193.
- KOLYMBAS, D. (2019): *Geotechnik*. BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND TUNNELBAU. Auflage 5. Springer Vieweg. Berlin. 587 S. ISBN 978-3-662-58471-2.
- KONOLD, W.; WATTENDORF, P.; EHRMANN, O.; BIBERSTEIN, A.; REITH, H.; BÖNECKE, G. & SCHACK-KIRCHNER, H. : *Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten*. FORSCHUNGSBERICHT FZKA-BWPLUS. Datum 07.2004. Freiburg. 123 S.
- KÖRNER, I. (2008): *Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung*. BILANZEN, GEHALTE, UMSETZUNGS- UND AUSTRAGSPROZESSE. BAND 33. Abfall Aktuell. Hamburg. 450 S. ISBN 978-3-9812867-0-0.
- KOSTELETSKY, G. (2015): *Einbaukonzept Testfelder Rekultivierungsschicht IAD Wetrop Ostfeld (4.BA)*. Datum 11.03.2015. Dresden. S. 1–3.
- KRABEL, D.; MEYER, M.; SOLGER, A.; MÜLLER, R.; CARVALHO, P. & FOULKES, J. (2015): *Early root and aboveground biomass development of hybrid poplars (Populus spp.) under drought conditions*. In: Canadian Journal of Forest Research. Jg 45. Nr. 10. S. 1289–1298.
- KRÄMER, U. (2010): *Metal hyperaccumulation in plants*. In: Annual review of plant biology. Jg 61. S. 517–534.
- KRWG (2012): *Kreislaufwirtschaftsgesetz - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*. Fassung vom 04.04.2016. Bundestag.

- KUNTSCHKE, K. (2016): *Geotechnik*. ERKUNDEN - UNTERSUCHEN - BERECHNEN - AUSFÜHREN - MESSEN. Auflage 2. Springer Vieweg. Wiesbaden. 506 S. ISBN 978-3-8348-0412-9.
- LAGA AD-HOC-AG (2016): *Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1*. „REKULTIVIERUNGSSCHICHTEN IN DEPONIEOBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEMEN“. Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard. LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“. Datum 13.04.2016. 33 S.
- LAGA ATA AD-HOC AUSSCHUSS (2018): *Grundsätze zur Entlassung von Deponien aus der Nachsorge*. LAGA ATA AD-HOC AUSSCHUSS "ENTLASSUNG VON DEPONIEEN AUS DER NACHSORGE". Datum 05.2018. 14 S.
- LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2007): *Untersuchung Bodenmaterial*. BERICHT ZUR AUSWERTUNG ANALYTISCHER DATEN ZU UNTERBÖDEN UND BODENAUSHUB. REFERAT ABFALLWIRTSCHAFT. Datum 07.2007. Dresden. 66 S.
- LANDESDIREKTION SACHSEN (2019): *Deponien*. § 22A DEPONIEVERORDNUNG – DEP.V. zuletzt geprüft 13.01.2020. abgerufen von: https://www.lids.sachsen.de/bekanntmachung/?ID=14598&art_param=665&q=1.
- LANDESHAUPTSTADT DRESDEN UMWELTAMT (2014): *Karte 3.19*. STILLGELEGTE DEPONIEEN IN STÄDTISCHER VERANTWORTUNG. Datum 03.2014. S. 1 f. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: http://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/ua_3_19_text.pdf.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER (2004): *Pilzkultursubstrate*: Umweltgerechte Verwertung in der Landwirtschaft. In: Merkblätter für Beratung, Praxis und Vollzug. Jg 2004. Nr. 2.
- LARSEN, L.; ZAMBRANO, K.; CHRISTIANSEN, H.; KÖHLER, A.; KARLSON, U. & TRAPP, S. (2001): *Bepflanzung einer Tankstelle mit Weiden*: Beitragsserien: Phytoremediation organischer Schadstoffe. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Jg 2001. Nr. 13. S. 227–236.
- LAV MARKKRANSTÄDT (2019): *Interne Projektunterlagen*. SIEBLINIEN. LAV MARKKRANSTÄDT. Datum 2017-2019. Markranstädt.
- LEXIKON DER BIOLOGIE (2019): *Kallus*. zuletzt geprüft 11.12.2019. abgerufen von: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/kallus/35197>.
- LIEBHARD, P. (2010): *Energieholz im Kurzumtrieb*. ROHSTOFF DER ZUKUNFT. Auflage 2. Stocker. Graz. 128 S. ISBN 9783702011505.
- LIEMEN, F.; MEIßNER, R. & BERNSDORF, S. (2009): *Sickerwasseruntersuchungen bei Einsatz von Kompost zur Rekultivierung einer Kalirückstandshalde*. S. 139–142. In: MAROLD, B. (Hrsg.). *13. Gumpensteiner Lysimetertagung*. Lysimeter - Perspektiven in Forschung und Anwendung. Gumpensteiner Lysimetertagung. 21.- 22. April 2009. Raumberg Gumpenstein. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein. BAL Bericht.
- MANTAU, U.; SAAL, U.; PRINS, K.; STEIERER, F.; LINDNER, M. & VERKERK, H. (2010): *EUwood-Real potential for changes in growth and use of EU forests*. FINAL REPORT. Datum 30.06.2010. Hamburg. 160 S.
- MIX-SPAGEL, K. (2017): *Die neue Klärschlammverordnung: Was müssen Betreiber beachten?* In: wwt Wasserwirtschaft und Wassertechnik. Jg 67. Nr. 10. S. 15–17.

- MÖLLER, G. (2013): *Geotechnik*. BODENMECHANIK. Auflage 2. Ernst & Sohn. Berlin. 516 S. ISBN 9783433029961.
- MONTAG, D.; EVERDING, W.; MALMS, S.; PINNEKAMP, J.; REINHARDT, J.; FEHRENBACH, H.; ARNOLD, U.; TRIMBORN, M.; GOLDBACH, H.; KLETT, W. & LAMMERS, T. (2014): *Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz*. INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT. Datum 30.11.2014. Aachen. 226 S.
- MONTAG, D.; PLUTA, H.-J.; ROSKOSCH, A.; STEFFENS, D.; KABBE, C.; SERVERON, K.; REIFENSTUHL, R.; LEIFERT, I.; KEHRES, B.; WAIDA, C. & HECK, A. (2013): *Phosphorrecycling - Düngemittel mit Recycling-P*. THEMENPAPIER. Datum 10.2013. Köln. 23 S.
- MÜLLER, M. (2019): *Entlassung von Deponien aus der Nachsorge*. TKoR Netzwerktreffen. Veranstalter LAV Markranstädt. Datum 05.06.2019. Markranstädt.
- MÜLLER, R. (2013): *Frühe Wurzel- und Sprossentwicklung von Pappelsteckhölzern der Sorten AF2, Hybride 275 und Max 3 im Bewässerungsversuch*. Bachelorarbeit. TU DRESDEN. Institut für Forstbotanik und Forstzoologie. Tharandt. Datum 16.06.2013. 61 S.
- NATALIE RANGNO (2019): *Einsatz abgetragener Pilzsubstrate aus Speisepilz-Produktion in neuartigen Deponieersatzbaustoffen*. Internes Projekttreffen. Datum 20.06.2019. Dresden.
- NILSSON, U.; MYRHEDE, E. & SUNDBERG, J. (2001): *Användning av avloppsslam för tätning av deponier*. FÖRSTUDIE. RVF rapport. RVF UTVECKLING. Datum 11.2001. Malmö. 28 S.
- OBERVERWALTUNGSGERICHT BERLIN-BRANDENBURG (2017): *Nachträgliche Anordnung einer Sicherheitsleistung für eine Kompostierungsanlage* OVG 11 S 78.16. Datum 23.05.2017.
- PALM, A.; KOCKX, M.; ARLT, K.-J. & TAUBER, H. (2006): *Technische, wirtschaftliche und rechtliche Gesichtspunkte beim Einsatz von alternativen Deponieersatzbaustoffen*. S. 163–173. In: KÜHLE-WEIDEMEIER, M. (Hrsg.). *Praxistagung Deponie 2006*. Zwischenlager - Deponien - Nachsorge. Praxistagung Deponie. 06./07.12.2006. Cuvillier Verlag.
- PATYK, A. und REINHARDT, G. (1997): *Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen*. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden. 223 S. ISBN 9783663080152.
- PENCKERT, P.; ZENTNER, A. & DORNACK, C. (2019): *Pflanzversuche mit Materialmischungen aus Klärschlammkompost, Pilzkultursubstraten und Abraummaterial*. In: Müll und Abfall. Jg 2019. Nr. 01. S. 31–37.
- PETZOLD, R. (2013): *Standortsökologische Aspekte und Anbaupotenziale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen*. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN. Fakultät Umweltwissenschaften. Dresden. Datum 22.05.2013. 130 S.
- RAL GÜTESICHERUNG (2018): *Schwellenwerte und Grenzwerte*. DOK. 251-006-4. Datum 18.07.2018. 2 S.

- RAPF, M. (2018): *Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche vor dem Hintergrund der neuen deutschen Klärschlammverordnung*. S. 723–728. In: POMBERGER, R. / ADAM, J. / ALDRIAN, A. / CURTIS, A. / FRIEDRICH, K. / KRANZINGER, L. / KÜPPERS, B. / LORBER, K. E. / MÖLLNITZ, S. / NEUHOLD, S. / NIGL, T. / PFANDL, K. / RUTRECHT, B. / SARC, R. / SATTLER, T. / SCHWARZ, T. / SEDLAZECK, P. / VICZEK, S. / VOLLPRECHT, D. / WEIßENBACH, T. / WELLACHER, M. (Hrsg.). *Recy & DepoTech 2018*. Recy & DepoTech. 07.-09.11.2018. Leoben.
- REEG, T.; BEMMANN, A.; KONOLD, W.; MURACH, D. & SPIECKER, H. (2009): *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH. Weinheim. 355 S. ISBN 9783527324170.
- ROSENWINKEL, K.-H.; SEYFRIED, C. F.; KROISS, H.; WEILAND, P. & DICHTL, N. (2015): *Anaerobtechnik. ABWASSER-, SCHLAMM- UND RESTSTOFFBEHANDLUNG, BIOGASGEWINNUNG*. Auflage 3. Springer Vieweg. Berlin Germany. 852 S. ISBN 978-3-642-24894-8.
- RÖTSCHKE, H.; BASMER, R.; EINECKE, M. & TRIBULOWSKI, T. (2009): *Untersuchungen zur Wirksamkeit und Herstellbarkeit eines auf Deponieersatzbaustoffen basierenden Oberflächenabdichtungssystem auf der Hochhalde Schkopau im Rahmen des europäischen Demonstrationsprojekts CONWASTE*. In: Prof. Dr. -Ing. Said Al-Akel (Hrsg.). *5. Leipziger Deponiefachtagung*. Leipziger Deponiefachtagung. 10./11.05.2009. Leipzig. Band 5.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2009): *Anbauempfehlung. SCHNELLWACHSENDE BAUMARTEN IM KURZUMTRIEB. REFERAT 71 - PFLANZENBAU, NACHWACHSENDE ROHSTOFFE*. Datum 01.11.2009. Dresden. 60 S.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2014): *Schnellwachsende Baumarten. ANBAU AUF LANDWIRTSCHAFTLICHEN FLÄCHEN. ABTEILUNG PFLANZLICHE ERZEUGUNG*. Auflage 4. Datum 01.06.2014. Dresden. 12 S.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2018a): *Deponien und Entsorgungsanlagen*. zuletzt geprüft 09.12.2019. abgerufen von: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wertstoffe/13573.htm>.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2018b): *Gebiete mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten*. zuletzt geprüft 09.12.2019. abgerufen von: <https://www.boden.sachsen.de/gebiete-mit-grossflachig-erhohten-schadstoffgehalten-19023.html>
- SCHEFFER, F. (1958): *Der organisch gebundene Stickstoff des Bodens, seine Verwertbarkeit (auch Harnstoff)*. S. 179–196. In: ALLEN, E. K. / ALLEN, O. N. / BÖTTGER, I. / CASPERSSON, T. / DILLEMANN, G. / ENGEL, H. / FISCHER, H. / GUGGENHEIM, M. / HAAS, P. / HAUROWITZ, F. / LOOMIS, W. D. / MANSHARD, E. / MCKEE, H. S. / MCQUELLEN, K. / MEVIUS, W. / MORITZ, O. / MOTHE, K. / NIELSEN, N. / RAUTANEN, N. / ROMEIKE, A. / SCHEFFER, F. / SCHMALFUSS, K. / SCHRAMM, G. / SCHRÖTER, H.-B. / SHEAT, D. E. G. / SPENCER, D. / STREET, H. E. / STUMPF, P. K. / TÄUFEL, K. / THOMAS, M. / WALDSCHMIDT-LEITZ, E. / WALEY, S. G. / WILSON, P. W. / YEMM, E. W. (Hrsg.). *Der Stickstoffumsatz / Nitrogen Metabolism*. Berlin, Heidelberg. Springer. Handbuch der Pflanzenphysiologie / Encyclopedia of Plant Physiology.

- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, F./P.; BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; THIELE-BRUHN, S.; WELP, G. & WILKE, B.-M. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Auflage 16. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 578 S. ISBN 978-3-8274-1444-1.
- SCHIRMER, R. (2009): *Sortenprüfung von Pappelklonen - Voraussetzung für erfolgreichen Energieholzanbau*. S. 1–7. In: Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung (Hrsg.). *28. Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung*. 28. Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. 4.- 6. 11.2009. Treis-Karden (Mosel).
- SCHMIDT, H.-H.; BUCHMAIER, R. & VOGT-BREYER, C. (2017): *Grundlagen der Geotechnik*. GEOTECHNIK NACH EUROCODE. Auflage 5. Springer Vieweg. Wiesbaden. 783 S. ISBN 978-3-658-14930-7.
- SCHMIDT, W. (2009): *Anbau von Speisepilzen*. KULTURVERFAHREN IM HAUPT- UND NEBENERWERB. Auflage 1. Eugen Ulmer KG. Stuttgart. 236 S. ISBN 9783800146284.
- SCHMIDTCHEN, C. (2019): *Größe Deponie Cröbern*. Email. Datum 29.10.2019.
- SCHREFF, D. (n.n.): *Überlegungen zum wirtschaftlichen Einsatz der anaeroben Schlammstabilisierung in Kläranlagen*. INGENIEURBÜRO FÜR WASSER, ABWASSER UND ENERGIE. Datum n.n. zuletzt geprüft 30.01.2020. abgerufen von: http://www.ibschreff.de/fileadmin/Daten/Publikationen/ibSchreff_tah_faulung.pdf. 10 S.
- SCHROEDER, B. (2014): *Geotechnik für Ingenieure*. EIN ÜBERBLICK. Springer Vieweg. Wiesbaden. 39 S. ISBN 978-3-658-08496-7.
- SCHUBERT, S. (2006): *Pflanzenernährung*. GRUNDWISSEN BACHELOR. Auflage 2. Band 2802. Ulmer. Stuttgart (Hohenheim). 224 S. ISBN 9783825228026.
- SPANGENBERG, G.; HAUBRICH, E.; BERNSDORF, S.; KNORRE, S.; WATTENDORF, P.; HEGEWALD, K.-D.; DREWES, R. & ZIEMKE, R. (2015): *Kriterien der Energiepflanzenproduktion auf Deponien*. In: Müll und Abfall. Jg 2015. Nr. 7. 368-375.
- SPANGENBERG, G.; HEIN, S. & VAN HELT, J. (2016): *Energieholzanbau als Nachnutzung auf einem Deponiestandort: Praxisbeispiel*. 198-213. In: AL-AKEL, Said (Hrsg.). *12. Leipziger Deponiefachtagung // Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien*. Leipziger Deponiefachtagung. 08.-09.03.2018. Leipzig.
- STATISTISCHES BUNDESAMT & DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 STATISTIK (2015): *Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Betrachtungen: Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut*. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall. Jg 2015. Nr. (62)1. S. 48.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) (2018): *Abwasserbehandlung - Klärschlamm - Tabellenband*. 2015/2016. Datum 13.07.2018. 84 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) (2019): *Abfallentsorgung*. FACHSERIE 19 REIHE 1. Fachserie 19. STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS). Datum 25.06.2019. 256 S.
- STREHLE, R. (2019a): *Informationen zur Deponie Wetro*. Email. Datum 08.01.2019. Empfänger Paula Penckert.
- STREHLE, R. (2019b): *Größe Deponie Wetro*. Email. Datum 30.10.2019.

- SVENSKT VATTEN (2013): *Slamanvändning och strategier för slamanvändning*. Meddelande 137. SVENSKT VATTEN. Datum 03.2013. Stockholm. 40 S.
- TAUCHNITZ, S. (2006): *Untersuchung zum Wasserhaushalt und Stickstoffumsatz von Rekultivierungsschichten aus Klärschlammkomposten*. Dissertation. MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG. Agrartechnik und Landeskultur. Halle/Saale. Datum 2006. 240 S.
- TRAPP, S. (2000): *Aspekte der Phytoremediation organischer Schadstoffe*. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Jg 12. Nr. 5. S. 246–255.
- UMWELTBUNDESAMT (2018): *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. UMWELTBUNDESAMT. Auflage 1. Datum 05.2018. Dessau-Roßlau. 104 S.
- VDZ VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (2009): *Environmental Data of the German Cement Industry 2008*. Datum 08.2009. Düsseldorf. 52 S.
- VDZ VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (2019): *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2018*. Datum 08.2019. Düsseldorf. 40 S.
- WATTENDORF, P. (2001): *Anforderungen an die Bepflanzung von Deponien aus deponietechnischer, forstwirtschaftlicher und landespflegerischer Sicht: Eine Gratwanderung zwischen landespflegerischen Zielen und der langfristigen Sicherung des Deponiebauwerks*. In: MAIER-HARTH, U. (Hrsg.). *4. Deponieseminar. Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. Deponieseminar. Deponieseminar. Band 4*.
- WATTENDORF, P.; MAIER-HARTH, U.; MELCHIOR, S. & SOKOLLEK, V. (2010): *E 2-32. GESTALTUNG DES BEWUCHSES AUF DEPONIEEN*. GDA Empfehlung. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (GDA) ARBEITSKREIS 6.1. Datum 07.01.2010.
- WETTERKONTOR (2019): *Monats- und Jahreswerte für Leipzig - Temperatur, Niederschlag und Sonnenschein - WetterKontor*. zuletzt geprüft 04.02.2020. abgerufen von: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp?id=10469>.
- WETTERONLINE (2017): *Höchsttemperatur 09.08.2017 bis 31.10.2017*. zuletzt geprüft 10.01.2020. abgerufen von: https://www.wetteronline.de/wetterdaten/dresden?pcid=pc_rueckblick_data&gid=10488&pid=p_rueckblick_diagram&sid=StationHistory&iid=10488&metparaid=TXLD&period=12&month=10&year=2017.
- WETTERONLINE (2018a): *Höchsttemperatur 05.02.2018 bis 30.04.2018*. zuletzt geprüft 10.01.2020. abgerufen von: https://www.wetteronline.de/wetterdaten/dresden?pcid=pc_rueckblick_data&gid=10488&pid=p_rueckblick_diagram&sid=StationHistory&iid=10488&metparaid=TXLD&period=12&month=04&year=2018.
- WETTERONLINE (2018b): *Höchsttemperatur 06.05.2018 bis 29.07.2018*. zuletzt geprüft 10.01.2020. abgerufen von: https://www.wetteronline.de/wetterdaten/dresden?pcid=pc_rueckblick_data&gid=10488&pid=p_rueckblick_diagram&sid=StationHistory&iid=10488&metparaid=TXLD&period=12&month=07&year=2018.

ZERBE, S. (2019): *Renaturierung von Ökosystemen im Spannungsfeld von Mensch und Umwelt*. EIN INTERDISZIPLINÄRES FACHBUCH. Auflage 1. Springer Spektrum. 730 S. ISBN 978-3-662-58649-5.

8 Anhang

Inhaltsverzeichnis

Anhang 1: Grenzwerte nach AbfKlärV (MIX-SPAGEL 2017; DÜMV. Fassung vom 12.04.2017; ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017).....	IV
Anhang 2: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems (DEPV. Fassung vom 04.03.2016).....	IV
Anhang 3: Häufigkeit max. Wurzeltiefen auf Deponien nach (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.22).....	V
Anhang 4: Orientierungshilfe zur Auswahl von Böden (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.7).....	V
Anhang 5: Porengrößenbereiche nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.123–124).....	V
Anhang 6: Nähr-/Schadstoffe Pilzkultursubstrate (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 2004, S.5).....	VI
Anhang 7: Analyseergebnisse entwässerter Klärschlamm 2018 nach DepV	VI
Anhang 8: Analyseergebnisse Klärschlammkompost nach DepV	VI
Anhang 9: Analyseergebnisse Pilzsubstrat nach DepV	VII
Anhang 10: Analyseergebnisse Bodensubstrat nach DepV	VIII
Anhang 11: Zusätzliche Grenzwertüberschreitungen AFB-Boden, 2019.....	VIII
Anhang 12: Organoleptische Bodenansprache der Materialmischungen, 2018	IX
Anhang 13: Organoleptische Bodenansprache der Materialmischungen, 2019	X
Anhang 14: Charakterisierung der Steckhölzer, 2018	X
Anhang 15: Charakterisierung der Steckhölzer, 2019	X
Anhang 16: Außentemperatur während des 1. Kompostversuches 2017 (WETTERONLINE 2017).....	XI
Anhang 17: Außentemperatur während des 2. Kompostversuches 2018 (WETTERONLINE 2018a).....	XI
Anhang 18: Außentemperatur während des 3. Kompostversuches 2018 (WETTERONLINE 2018b).....	XI
Anhang 19: Einwaage der Böden, 1. Pflanzversuch 2018.....	XII
Anhang 20: Verteilung der Pflanzen pro Fenster, 2018.....	XIII
Anhang 21: Einwaage der Böden, 2. Pflanzversuch 2019.....	XIII
Anhang 22: Verteilung der Pflanzen pro Fenster, 2019.....	XIII
Anhang 23: Rasenmischung für trockene Lagen (KIEPENKERL 2019b).....	XIII
Anhang 24: Blumenwiese Mischung (KIEPENKERL 2019a).....	XIV
Anhang 25: Wetro Testfeld 1, Pflanzplan	XIV
Anhang 26: Wetro Testfeld 2, Pflanzplan	XIV
Anhang 27: Wetro Testfeld 3, Pflanzplan	XV
Anhang 28: Wetro Testfeld 4, Pflanzplan	XV
Anhang 29: Abbaugrade (oTS, CSB, TOC) und Masseverluste (Wasser) in %.....	XV
Anhang 30: Volumetrischer Wassergehalt, Pflanzversuche 2018	XVI
Anhang 31: Sieblinie AFB 2018 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)	XVI
Anhang 32: Sieblinie KSK c (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)	XVII
Anhang 33: Sieblinie KSK kf (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)	XVII
Anhang 34: Sieblinie KSK cf (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)	XVIII
Anhang 35: Sieblinie KSK (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019).....	XVIII
Anhang 36: Gebiete mit geogener Hintergrundbelastung Sachsen (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2018b).....	XIX
Anhang 37: Vergleich AFB-Boden mit geogenen Hintergrundwerten (Vgl. LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2007, S.51).....	XIX
Anhang 38: Eisengehalte Materialmischungen, 05.07.2018 in (µg/g TS).....	XIX

Anhang 39: Bonitur 25.07.18, Töpfe 11-20.....	XX
Anhang 40: Wurzelbonitur 01.08.18, Töpfe 1-10.....	XX
Anhang 41: Sprosszahl über die Zeit, KSK cf.....	XXI
Anhang 42: Sprosszahl über die Zeit, KSK kf.....	XXI
Anhang 43: Sprosszahl über die Zeit, KSK c.....	XXII
Anhang 44: Sprosszahl über die Zeit, KSK.....	XXII
Anhang 45: pH-Optimum für Nährstoffverfügbarkeit (BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 2019).....	XXIII
Anhang 46: Volumetrischer Wassergehalt, Pflanzversuche 2019.....	XXIII
Anhang 47: Sieblinie RM02 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019).....	XXIV
Anhang 48: Sieblinie RM03 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019).....	XXIV
Anhang 49: Sieblinie RM05 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019).....	XXV
Anhang 50: Sieblinie RM08 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019).....	XXV
Anhang 51: Vergleich AFB-Boden mit geogener Hintergrundbelastung, 2019 (Vgl. LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2007, S.51).....	XXVI
Anhang 52: Eingangsanalytik Bodenproben 2019 nach DepV, Materialien einzeln.....	XXVI
Anhang 53: Eisengehalt Bodenproben, 24.05.2019 in (µg/g TS).....	XXVII
Anhang 54: Bonitur 17.06.2019, Töpfe 11-20.....	XXVII
Anhang 55: Wurzelbonitur 19.06.2019, Töpfe 11-20.....	XXVII
Anhang 56: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM00.....	XXVIII
Anhang 57: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM02.....	XXVIII
Anhang 58: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM03.....	XXIX
Anhang 59: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM08.....	XXIX
Anhang 60: Plastizitätsbereich Boden KSK kf.....	XXIX
Anhang 61: Plastizitätsbereich Boden KSK cf.....	XXX
Anhang 62: Plastizitätsbereich Boden KSK.....	XXX
Anhang 63: Kennwerte Fließgrenzenbestimmung, 2018.....	XXX
Anhang 64: Plastizitätsdiagramm der Materialmischungen, 2018.....	XXX
Anhang 65: Proctorkurve Boden KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.).....	XXXI
Anhang 66: Kennwerte Proctordichte Boden KSK c.....	XXXI
Anhang 67: Kennwerte Proctordichte Boden KSK kf.....	XXXI
Anhang 68: Kennwerte Proctordichte Boden KSK cf.....	XXXI
Anhang 69: Kennwerte Proctordichte Boden KSK.....	XXXI
Anhang 70: Kennwerte Durchlässigkeitsmessung, 2018, mehr Auflast.....	XXXII
Anhang 71: Parameter für die Ermittlung der Durchlässigkeitswerte, 2018, weniger Auflast.....	XXXII
Anhang 72: Scherdiagramm KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.), 2018.....	XXXIII
Anhang 73: Scherverhalten KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.).....	XXXIV
Anhang 74: Hebung - Senkung KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.).....	XXXIV
Anhang 75: Plastizitätsbereich Boden RM03.....	XXXIV
Anhang 76: Plastizitätsbereich Boden RM05.....	XXXV
Anhang 77: Plastizitätsbereich Boden RM08.....	XXXV
Anhang 78: Kennwerte Fließgrenzenbestimmung, 2019.....	XXXV
Anhang 79: Plastizitätsdiagramm der Materialmischungen, 2019.....	XXXV
Anhang 80: Proctorkurve Boden RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.), 2019.....	XXXVI
Anhang 81: Kennwerte Proctordichte Boden RM02.....	XXXVI
Anhang 82: Kennwerte Proctordichte Boden RM03.....	XXXVI

Anhang 83: Kennwerte Proctordichte Boden RM05	XXXVI
Anhang 84: Kennwerte Proctordichte Boden RM08	XXXVI
Anhang 85: Parameter für die Ermittlung der Durchlässigkeitswerte RM02 bis RM08	XXXVII
Anhang 86: Scherdiagramm RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.), 2019.....	XXXVII
Anhang 87: Scherverhalten RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.).....	XXXVIII
Anhang 88: Hebung - Senkung RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.).....	XXXVIII
Anhang 89: Mittlerer Dickenzuwachs Hundsrose 2016 bis 2019, Deponie Wetro	XXXIX
Anhang 90: Mittlerer Dickenzuwachs Schlehe 2016 bis 2019, Deponie Wetro	XXXIX
Anhang 91: Mittlerer Dickenzuwachs Eibe 2016 bis 2019, Deponie Wetro	XXXIX
Anhang 92: Mittlerer Dickenzuwachs Esche 2016 bis 2019, Deponie Wetro	XL
Anhang 93: Mittlerer Dickenzuwachs Kiefer 2016 bis 2019, Deponie Wetro	XL
Anhang 94: Email Friederich - Deponien in Sachsen (FRIEDERICH 2019b).....	XL
Anhang 95: Email Andersch - Altdeponien in Dresden (ANDERSCH 2019).....	XLI
Anhang 96: Email Kaiser Destatis - Grundfläche von Deponien (KAISER 2019).....	XLI
Anhang 97: Email Strehle - Informationen zur Deponie Wetro (STREHLE 2019a).....	XLI
Anhang 98: Email Gesellmann - Durchlässigkeitsversuche (GESELLMANN 2019a).....	XLI
Anhang 99: Email Gesellmann - AW: Durchlässigkeitsversuche (GESELLMANN 2019b)	XLII
Anhang 100: Email Strehle - Informationen zur Deponie Wetro 2 (STREHLE 2019b).....	XLIII
Anhang 101: Email Schmidtchen - Größe Deponie Cröbern (SCHMIDTCHEN 2019).....	XLIII

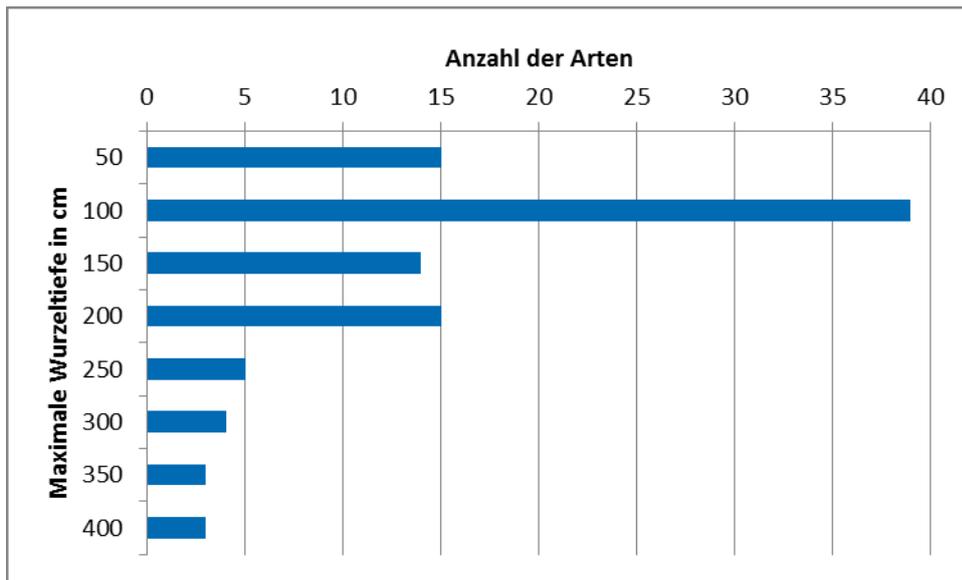
Anhang 1: Grenzwerte nach AbfKlärV (MIX-SPAGEL 2017; DÜMV. Fassung vom 12.04.2017; ABFKLÄRV. Fassung vom 27.09.2017)

Parameter	Alter Grenzwert (DümV/AbfKlärV) (mg/kg TS)	Neuer Grenzwert (DümV/AbfKlärV) (mg/kg TS)
As	40	40
Pb	150	150
Cd	1,5	1,5
Cr	900	-
Cr ^{Wi}	2	2
Ni	80	80
Hg	1,0	1,0
Tl	1,0	1,0
Cu	800	900
Zn	2500/2000	4000
PFT (PFOA und PFOS)	0,1	0,1
Summe Dioxine und di-PCB	30 ng/kg TM	30 ng/kg TM
PCB, 28,52,101,138,153,180 Kongenere	0,2	0,1
PCDD/PCDF	100 ng TE/kg TM	-
AOX	500	400
Benzo(a)pyren	-	1

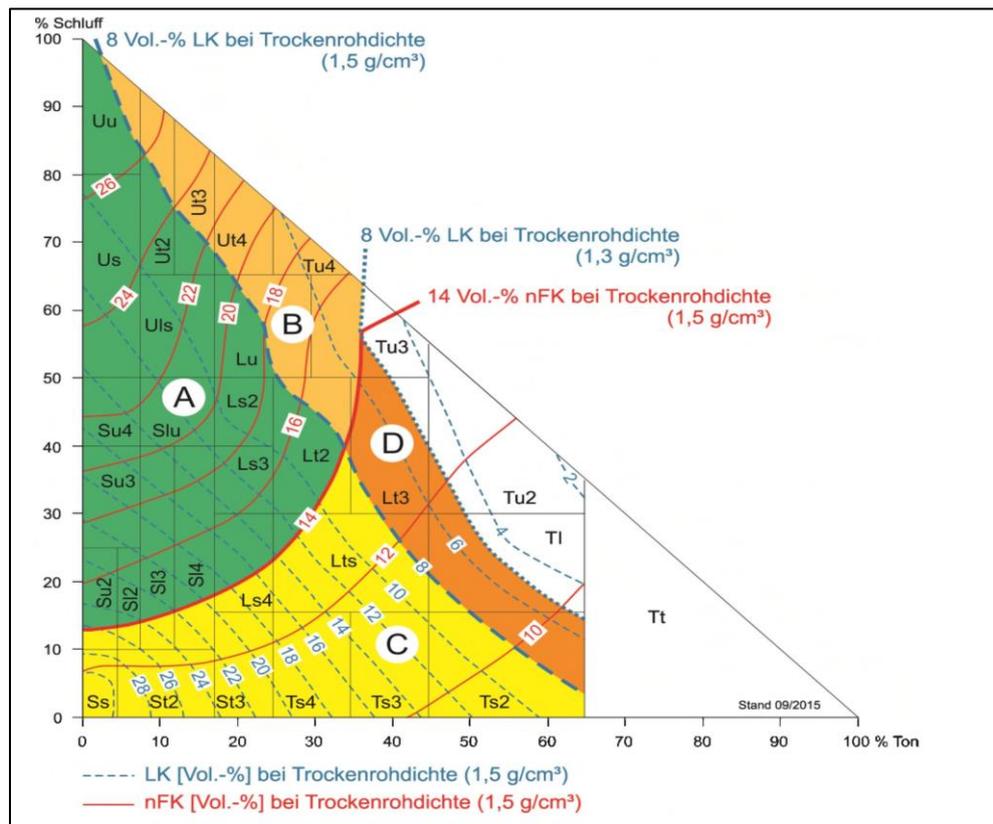
Anhang 2: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems (DEPV. Fassung vom 04.03.2016)

Systemkomponente	DK 0	DK I	DK II	DK III
<i>Ausgleichsschicht</i>	Nicht erforderlich	Ggf. Erforderlich	Ggf. Erforderlich	Ggf. Erforderlich
<i>Gasdränschicht</i>	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Ggf. Erforderlich	Ggf. Erforderlich
<i>Erste Abdichtungskomponente</i>	Nicht erforderlich	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich
<i>Zweite Abdichtungskomponente</i>	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Erforderlich	Erforderlich
<i>Dichtungskontrollsystem</i>	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Erforderlich
<i>Entwässerungsschicht</i>	Nicht erforderlich	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich
<i>Rekultivierungsschicht und technische Funktionsschicht</i>	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich	Erforderlich

Anhang 3: Häufigkeit max. Wurzeltiefen auf Deponien nach (HENKEN-MELLIES ET AL. 2010b, S.22)



Anhang 4: Orientierungshilfe zur Auswahl von Böden (LAGA AD-HOC-AG 2016, S.7)



Anhang 5: Porengrößenbereiche nach (AD-HOC-AG BODEN 2005, S.123–124)

Porengrößenbereich	Äquivalentdurchmesser [µm]	Speicherkapazität
Weite Grobporen	> 50	Luftkapazität
Enge Grobporen	50 - 10	Nutzbare Feldkapazität
Mittelporen	10 - 0,2	Nutzbare Feldkapazität
Feinporen	< 0,2	Totwasser

Anhang 6: Nähr-/Schadstoffe Pilzkultursubstrate (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 2004, S.5)

Parameter in mg/g TS	Gehalt in Pilzkultursubstraten
Stickstoff	19
Phosphor	10
Kalium	28
Magnesium	4
Blei	8
Cadmium	0,4
Chrom	7
Nickel	4
Kupfer	26
Zink	121
Quecksilber	0,06

Anhang 7: Analyseergebnisse entwässerter Klärschlamm 2018 nach DepV

	Obergrenze	Entwässerter Klärschlamm
Trockenmasse %	-	27,4
pH-Wert (Eluat)	9,00*	7,7
LF yS/cm	500	7310
Nickel mg/l	0,05	0,2
Chlorid mg/l	10,00	60,5
Cadmium mg/kg TS	1,00	1,3
Kupfer mg/kg TS	80,00	273
Zink mg/kg TS	300,00	1040

*pH-Wert 6,5 Untergrenze

Anhang 8: Analyseergebnisse Klärschlammkompost nach DepV

	Obergrenze	Klärschlammkompost 2018	Klärschlammkompost 2019
Trockenmasse %	-	70,2	52,2
pH-Wert (Eluat)	9,00*	8,0	8,0
LF yS/cm	500	2850	2650
Kupfer mg/l	0,05	0,05	0,05
Zink mg/l	0,1	0,3	0,12
Chlorid mg/l	10,00	148	143
Sulfat mg/l	50,00	297	200
Arsen mg/l	0,01	0,08	0,07
Kupfer mg/kg TS	80,00	82	87
Zink mg/kg TS	300,00	386	382

*pH-Wert 6,5 Untergrenze

Klärschlamm Für die Versuche wurden sowohl entwässerter Klärschlamm, als auch im Großmaßstab hergestellter Klärschlammkompost verwendet. Der entwässerte Klärschlamm wurde nur 2018 im Einzelversuch am IAK verwendet, danach wurden nur noch fertig gemischte Klärschlammkomposte verwendet. Die Materialien wurden vollständig nach Anhang 3 der DepV analysiert, dargestellt werden nur die Grenzwertüberschreitungen. Der verwendete Klärschlammkompost besteht aus entwässertem Klärschlamm und Strukturmaterial. Seitens der LAV gibt es für die Herstellung der

Klärschlammkomposte kein standardisiertes Verfahren. Dadurch kann es in deren qualitativer Zusammensetzung zu Schwankungen kommen.

Anhang 9: Analyseergebnisse Pilzsubstrat nach DepV

	Obergrenze	Champignon 2018	Kräuterseitling 2018	Pilzsubstrat Gemisch 2019
Trockenmasse %	-	30,4	22,4	45,6
pH-Wert (Eluat)	9,00*	6,6	4,0	4,3
LF yS/cm	500	5180	2930	6990
Chrom ges. mg/l	0,03	< 0,007	0,01	0,2
Kupfer mg/l	0,05	0,017	0,15	0,12
Nickel mg/l	0,05	0,03	0,1	0,06
Zink mg/l	0,10	0,2	2,1	3,5
Chlorid mg/l	10,00	217	41	582
Sulfat mg/l	50,00	1200	32	114
Arsen mg/l	0,01	0,01	<0,01	0,13
Blei mg/l	0,04	<0,01	0,025	0,86
Cadmium mg/l	0,002	<0,002	<0,002	0,011

*pH-Wert 6,5 Untergrenze

Pilzsubstrat Im Jahr 2018 wurden Champignon- und Kräuterseitlingssubstrat jeweils einzeln in den Bodenmischungen verwendet. Da zwischen den beiden Mischungen am Ende jedoch kein großer Unterschied bestand (Pflanzwachstum u.a.), wurde 2019 ein Mischsubstrat aus den Pilzen hergestellt. Verglichen mit den durchschnittlichen Schadstoffgehalten in Anhang 6 liegen die verwendeten Pilzsubstrate (Feststoffwerte, siehe Anhang 52 alle in einem ähnlichen Bereich, meist sogar unter den angegebenen Werten. Im Jahr 2019 liegen die Werte für Chrom und für Nickel leicht über den durchschnittlichen Gehalten. Generell sind die Werte aber nicht ungewöhnlich und eine Kontamination durch die Pilzsubstrate ist auszuschließen. Für die Versuche wurde vorwiegend Champignonssubstrat verwendet, da dieses in großen Mengen verfügbar ist. Außerdem ist es nicht verpackt und kann somit leichter verwendet werden. Kräuterseitling stellt eher ein Nischenprodukt dar und ist nicht in großen Mengen erhältlich. Problem ist, dass die Substratblöcke des Kräuterseitlings einzeln in Plastik verpackt sind und demnach händisch entpackt werden müssen. Da dies nicht wirtschaftlich ist, wurden nur kleine Mengen Kräuterseitlingssubstrat eingesetzt und stattdessen größere Mengen Champignonssubstrat (siehe Kapitel 3.1.1.).

Anhang 10: Analyseergebnisse Bodensubstrat nach DepV

	Obergrenze	AFB Boden 2018	AFB liegend 2019	AFB Boden 2019
<i>Trockenmasse %</i>	-	88,7	86,3	88,4
<i>pH-Wert (Eluat)</i>	9,00*	7,1	7,7	7,8
<i>eLF $\mu\text{S}/\text{cm}$</i>	500	2600	1831	1885
<i>Nickel mg/l</i>	0,05	0,04	0,06	0,01
<i>Sulfat mg/l</i>	50,00	1510	737	595

*pH-Wert 6,5 Untergrenze

Im AFB-Boden von 2019 gab es zusätzliche Überschreitungen der Grenzwerte (Anhang 11).

Anhang 11: Zusätzliche Grenzwertüberschreitungen AFB-Boden, 2019

	Obergrenze	AFB Boden 2019
<i>Benzo(a)pyren mg/kg TS</i>	0,6	1,7
<i>PAK mg/kg TS</i>	5	18,5
<i>Blei mg/kg TS</i>	140	148
<i>Chrom mg/kg TS</i>	120	144
<i>Kupfer mg/kg TS</i>	80	459
<i>Zink mg/kg TS</i>	300	5664

Bodensubstrat Das Bodensubstrat ist ein Abraumförderbrückenmaterial (AFB-Boden) aus der Nähe von Leipzig, der durch die Deponie Cröbern bereitgestellt wurde. Da die Deponie bereits in den Bereichen abgedeckt ist, wo die Testfelder errichtet wurden, wurde im Versuch von 2019 teilweise das bereits auf der Deponie liegende AFB-Material verwendet. Im AFB- Boden gibt es keine Überschreitung bei Cadmium, Blei und Arsen, welche mit einer geogenen Hintergrundbelastung erklärt werden können. Daher müssen die Überschreitungen, welche in den Materialmischungen von 2019 auftreten, eine andere Eintragsquelle haben (Vgl. Kapitel 4.4.1).

Anhang 12: Organoleptische Bodenansprache der Materialmischungen, 2018

Parameter	KSK	KSK c	KSK cf	KSK kf	AFB
<i>Farbe</i>	Tiefbraun	Tiefbraun	Tiefbraun	Tiefbraun	Tiefbraun
<i>Geruch</i>	Unauffällig	Unauffällig	Unauffällig	Unauffällig	Geruchlos
<i>Konsistenz</i>	Locker gelagert; feucht, aber weniger feucht als KSK c, cf, kf	Locker gelagert; feuchter als KSK und AFB	Locker gelagert; feuchter als KSK und AFB	Locker gelagert; feuchter als KSK und AFB	Locker gelagert; trockener als die KSK-Böden
<i>Makroskopische Inhaltsstoffe</i>	Leicht steinig; größere Bodenpartikel; teilweise klumpend	Kaum Steine; gröbere Bodenpartikel; teilweise klumpend	Wenige Steine; gröbere Bodenpartikel; teilweise klumpend	Wenige Steine; gröbere Bodenpartikel; teilweise klumpend	Keine Steine; feine Bodenpartikel; nicht klumpend
<i>Zusatz</i>	Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Keine Pilze erkennbar; Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Keine Pilze erkennbar; Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Keine Pilze erkennbar; Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Färbt beim Zerreiben die Finger braun

Anhang 13: Organoleptische Bodenansprache der Materialmischungen, 2019

Parameter	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
<i>Farbe</i>	Hellbraun	Braun	Braun	Tiefbraun	Hellbraun
<i>Geruch</i>	Unauffällig	Unauffällig	Unauffällig	Unauffällig	Geruchlos
<i>Konsistenz</i>	Locker gelagert; feucht; etwas trockener als 02,03,05	Locker gelagert; feucht, ähnlich 03	Locker gelagert; feucht, ähnlich 02	Locker gelagert; feucht	Locker gelagert, etwas trockener als 02,03,05
<i>Makroskop. Inhaltsstoffe</i>	Keine Steine; keine Organik; feine Bodenpartikel; nicht klumpend	Einige Steine und Plastikverunreinigungen; gröbere Bodenpartikel; teilweise klumpend	Einige Steine und Plastikverunreinigungen; gröbere Bodenpartikel (aber feiner als 02); teilweise klumpend	Einige Steine und Stöcke; viel Organik; Plastikverunreinigungen; gröbere Bodenpartikel (ähnlich 03, etwas feiner gemahlen); teilweise klumpend	Einige Steine und Stöcke; gröbere Bodenpartikel; schlechter Mahlgrad; inhomogen; kein Plastik erkennbar
<i>Zusatz</i>	Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Pilze schimmeln leicht, Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Keine Pilze erkennbar; Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Keine Pilze erkennbar; Färbt beim Zerreiben die Finger braun	Färbt beim Zerreiben die Finger braun

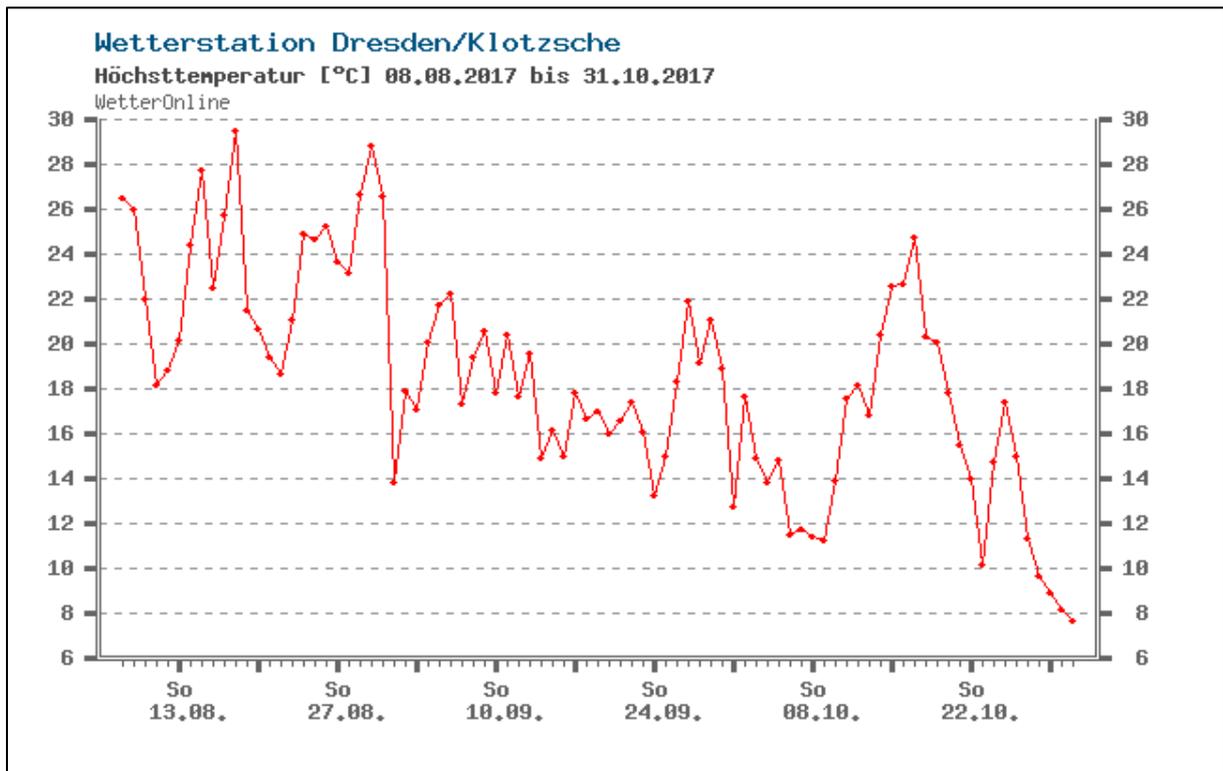
Anhang 14: Charakterisierung der Steckhölzer, 2018

Durchmesserklassen [cm]	0,7 - 0,9	1,0 - 1,2	1,3 - 1,5	1,6 - 1,8	1,9 - 2,1	2,2 - 2,4
<i>Anzahl, Ø oben</i>	1	14	34	37	12	2
<i>Anzahl, Ø unten</i>	0	5	22	42	25	6
<i>Knospenanzahl</i>	1 & 2	3	4	5	6	7
<i>Anzahl</i>	0	11	49	31	8	1

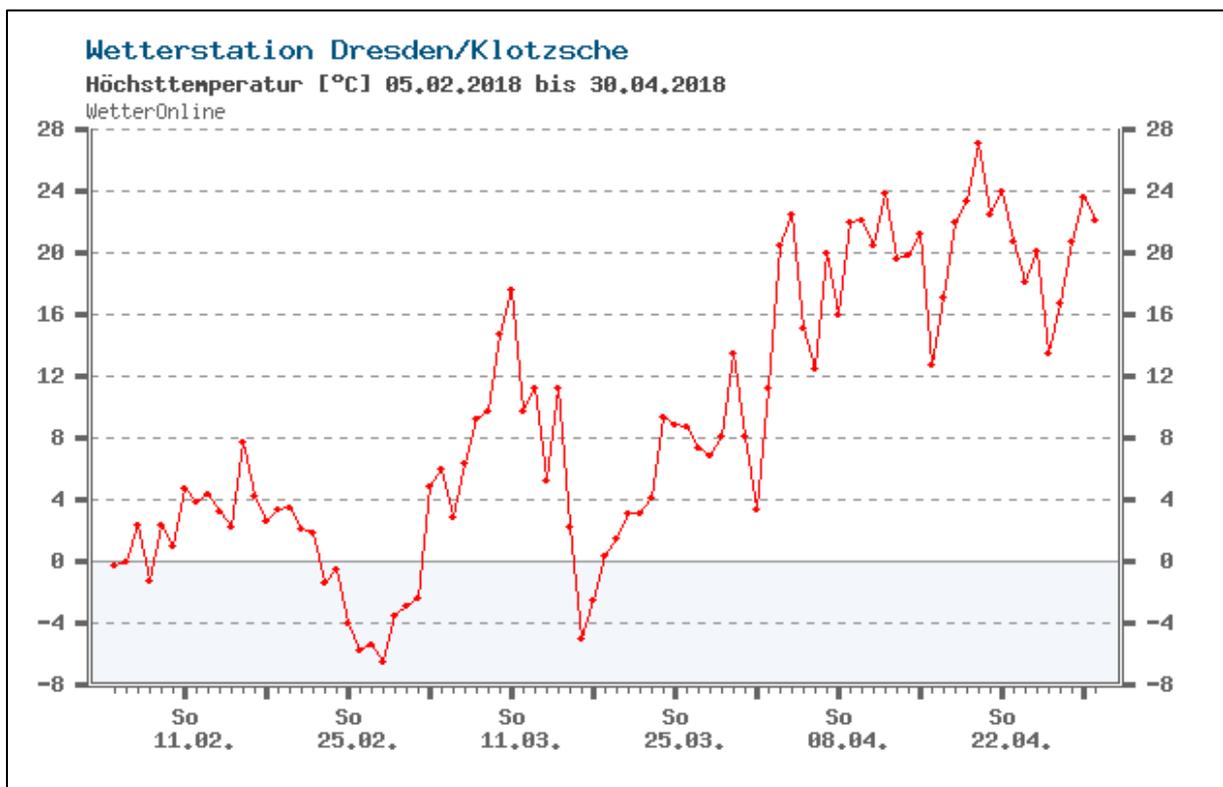
Anhang 15: Charakterisierung der Steckhölzer, 2019

Durchmesserklassen [cm]	0,7 - 0,9	1,0 - 1,2	1,3 - 1,5	1,6 - 1,8	1,9 - 2,1	2,2 - 2,4
<i>Anzahl, Ø oben</i>	0	28	48	13	9	2
<i>Anzahl, Ø unten</i>	0	15	53	15	13	4
<i>Knospenanzahl</i>	1 & 2	3	4	5	6	7
<i>Anzahl</i>	0	6	35	35	23	1

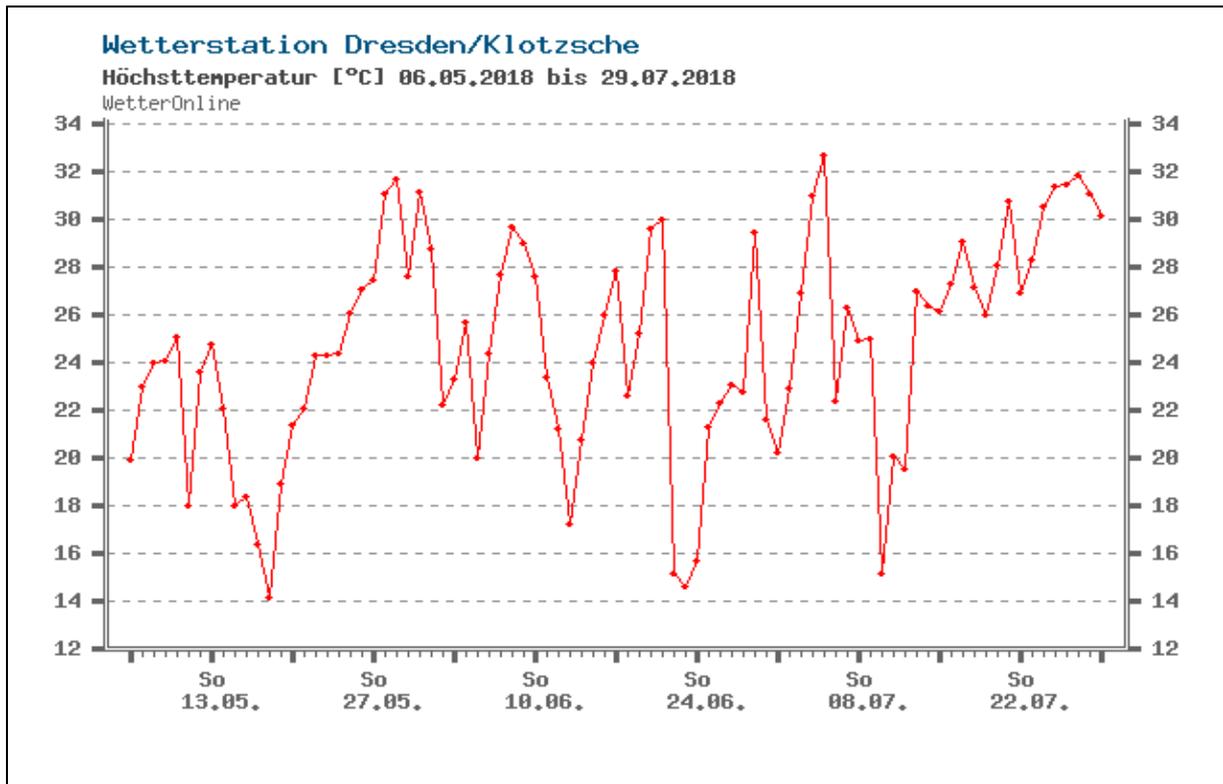
Anhang 16: Außentemperatur während des 1. Kompostiersversuches 2017 (WETTERONLINE 2017)



Anhang 17: Außentemperatur während des 2. Kompostiersversuches 2018 (WETTERONLINE 2018a)



Anhang 18: Außentemperatur während des 3. Kompostiersversuches 2018 (WETTERONLINE 2018b)



Anhang 19: Einwaage der Böden, 1. Pflanzversuch 2018

Topf Nr.	Einwaage KSK cf [g]	Einwaage KSK kf [g]	Einwaage AFB [g]	Einwaage KSK [g]	Einwaage KSK c [g]
1	1515	1550	1719	1680	1828
2	1506	1655	1734	1648	1793
3	1524	1574	1697	1654	1722
4	1643	1568	1704	1610	1739
5	1522	1614	1697	1693	1696
6	1508	1670	1711	1664	1718
7	1473	1591	1759	1698	1775
8	1562	1555	1642	1741	1730
9	1526	1634	1727	1637	1767
10	1530	1625	1840	1636	1766
11	1559	1588	1724	1596	1752
12	1446	1651	1717	1597	1747
13	1562	1568	1792	1609	1801
14	1509	1576	1738	1738	1719
15	1469	1662	1752	1078	1799
16	1515	1560	1743	1554	1774
17	1516	1587	1758	1597	1708
18	1535	1732	1727	1591	1747
19	1531	1588	1709	1579	1673
20	1649	1619	1729	1598	1657
Ø	1530	1608	1731	1610	1746

Anhang 20: Verteilung der Pflanzen pro Fenster, 2018

Fenster	KSK cf	KSK kf	AFB	KSK	KSK c	Gesamt
1	4	6	6	5	4	25
2	4	5	7	4	5	25
3	7	5	3	5	6	26
4	5	4	4	6	5	24

Anhang 21: Einwaage der Böden, 2. Pflanzversuch 2019

Topf Nr.	Einwaage RM00 [g]	Einwaage RM02 [g]	Einwaage RM03 [g]	Einwaage RM05 [g]	Einwaage RM08 [g]
1	1667	1638	1760	1405	1492
2	1635	1636	1713	1527	1443
3	1592	1630	1722	1509	1508
4	1841	1718	1682	1510	1475
5	1736	1650	1677	1588	1449
6	1661	1634	1701	1399	1449
7	1751	1634	1688	1449	1430
8	1733	1681	1693	1522	1487
9	1707	1754	1729	1472	1426
10	1791	1614	1719	1575	1428
11	1714	1628	1684	1491	1407
12	1784	1610	1722	1438	1465
13	1718	1601	1702	1455	1512
14	1755	1649	1719	1480	1456
15	1656	1639	1674	1449	1426
16	1963	1688	1750	1423	1493
17	1812	1698	1750	1392	1459
18	1860	1663	1747	1420	1438
19	1765	1688	1694	1470	1441
20	1737	1615	1696	1439	1421
Ø	1744	1653	1711	1471	1455

Anhang 22: Verteilung der Pflanzen pro Fenster, 2019

Fenster	RM00	RM02	RM03	RM05	RM08	Gesamt
1	7	7	7	7	7	35
2	6	7	7	6	5	31
3	7	6	6	7	8	34

Anhang 23: Rasenmischung für trockene Lagen (KIEPENKERL 2019b)

Zusammensetzung	Art
70%	Festuca arundinacea
20%	Poa pratensis (Wiesen Riespengras)
10%	Lolium perenne (Deutsches Weidelgras)

Anhang 24: Blumenwiese Mischung (KIEPENKERL 2019a)

Zusammensetzung	Art
18,3%	Wildblumen und Kräuter
10%	Arrhenaterum elatius Arone
10%	Festuca trichophylla Libano
5%	Cynosurus cristatus
16%	Poa pratensis Sunray
5%	Poa nemoralis Barchopin
17%	Festuca rubra commutata Raisa
16%	Festuca trachyphylla Mentor
<1%	Verschiedene andere Arten

Anhang 25: Wetro Testfeld 1, Pflanzplan

Reihe 1		Reihe 2		Reihe 3		Reihe 4	
Apr 16	Sep 17						
Baumart							
Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Sch	HRO	HRO
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRO	HRO	Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki	HRO	HRO
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRO	HRO	Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki	Sch	Sch
Es	Es	Sch	Sch	HRO	HRO	Ei	Ki
HRO	HRO	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es

Ei = Eibe Es = Esche HRO = Hundsrose Sch = Schlehe Ki = Kiefer

Anhang 26: Wetro Testfeld 2, Pflanzplan

Reihe 1		Reihe 2		Reihe 3		Reihe 4	
Apr 16	Sep 17						
Baumart							
Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki	HRO	HRO
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRO	HRO	Ei	Ei	HRO	HRO	Ei	Ki
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ki	HRO	HRO	Ei	Ki	HRO	HRO
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRO	HRO	Ei	Ei	HRO	HRO	Ei	Ki
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ei	HRO	HRO	Ei	Ei	Sch	Sch
Es	Es	Sch	Sch	HRO	HRO	Ei	Ei
HRO	HRO	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es

Anhang 27: Wetro Testfeld 3, Pflanzplan

Reihe 1		Reihe 2		Reihe 3		Reihe 4	
Apr 16	Sep 17						
Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart
Ei	Ki	HRo	HRo	Ei	Ei	HRo	HRo
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRo	HRo	Ei	Ei	HRo	HRo	Ei	Ki
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ei	HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo	Ei	Ei
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ei	HRo	HRo	Ei	Ki	Sch	Sch
Es	Es	Sch	Sch	HRo	HRo	Ei	Ei
HRo	HRo	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es

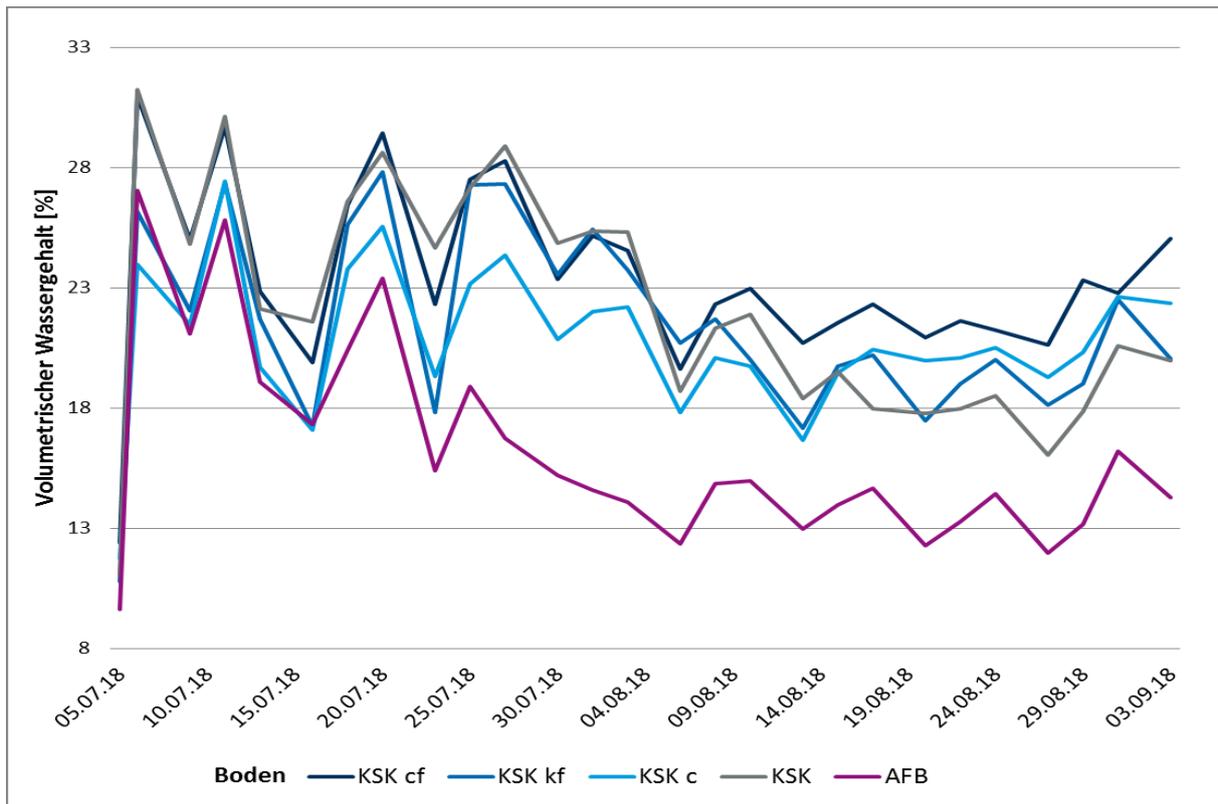
Anhang 28: Wetro Testfeld 4, Pflanzplan

Reihe 1		Reihe 2		Reihe 3		Reihe 4	
Apr 16	Sep 17						
Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart	Baumart
Ei	Ki	HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo
Es	Es	Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch
HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo	Ei	Sch
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ei	HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
HRo	HRo	Ei	Ki	HRo	HRo	Ei	Ei
Sch	Sch	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es
Ei	Ei	HRo	HRo	Ei	Ki	Sch	Sch
Es	Es	Sch	Sch	HRo	HRo	Ei	Ei
HRo	HRo	Es	Es	Sch	Sch	Es	Es

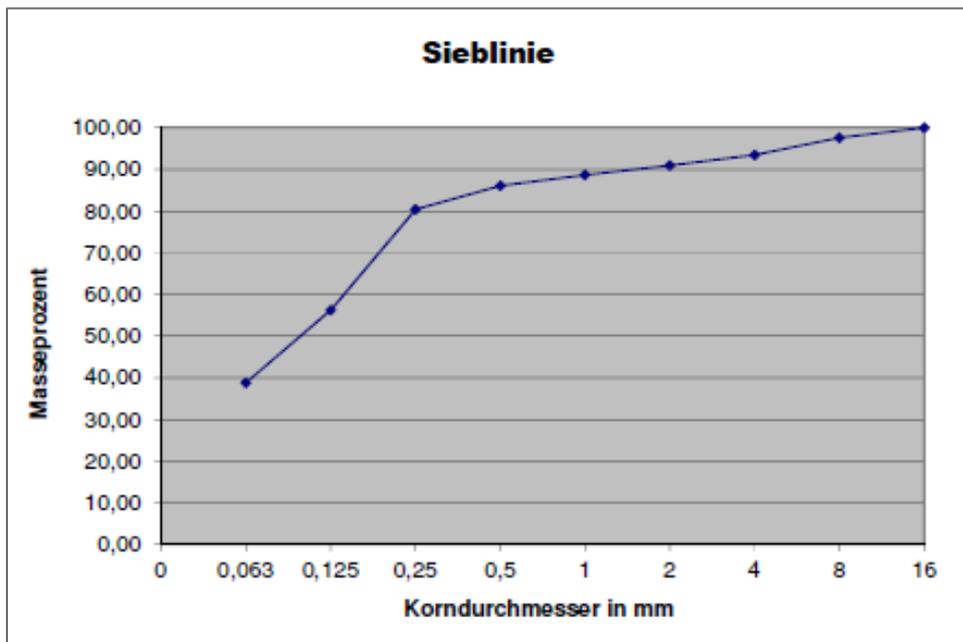
Anhang 29: Abbaugrade (oTS, CSB, TOC) und Masseverluste (Wasser) in %

Variante	WG	oTS	CSB	TOC
<i>A - Entwässerter KS und Champignonsubstrat</i>	11	51	26	41
<i>B - Frischkompost und Champignonsubstrat</i>	21	47	52	37
<i>C - Frischkompost und Kräuterseitlingsubstrat</i>	25	52	46	40
<i>D - Frischkompost</i>	19	56	35	49

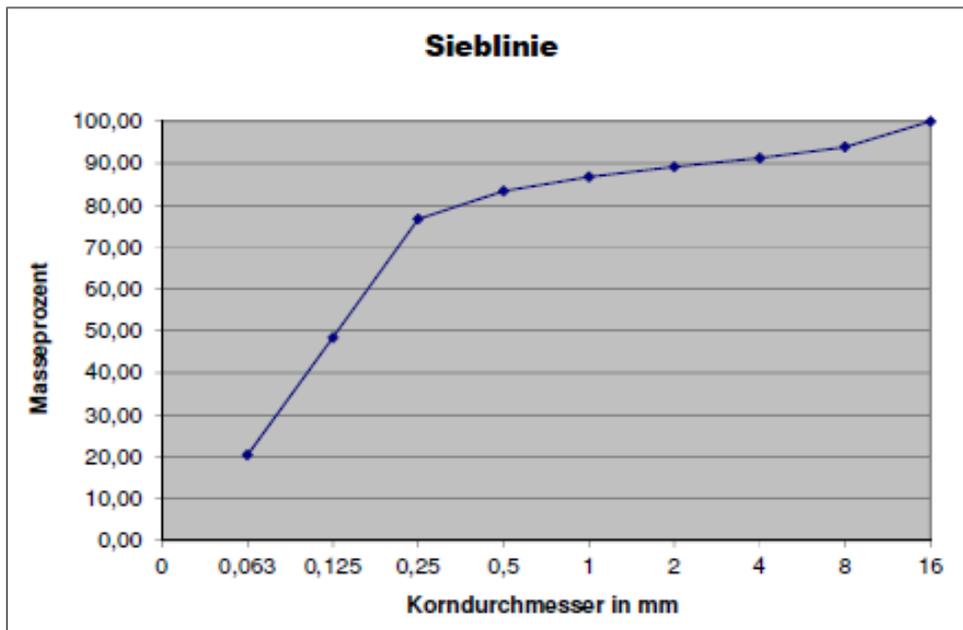
Anhang 30: Volumetrischer Wassergehalt, Pflanzversuche 2018



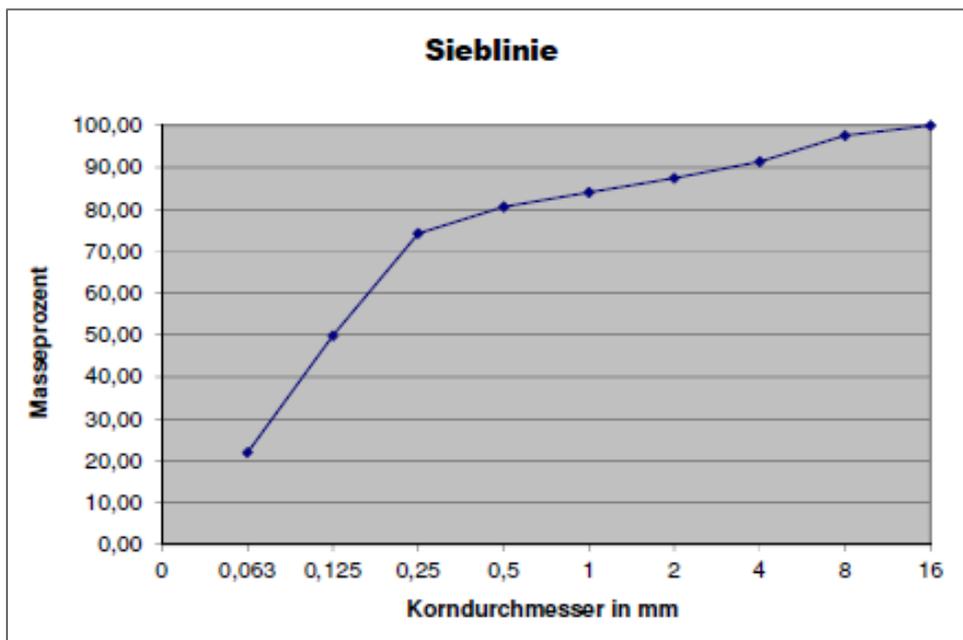
Anhang 31: Sieblinie AFB 2018 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



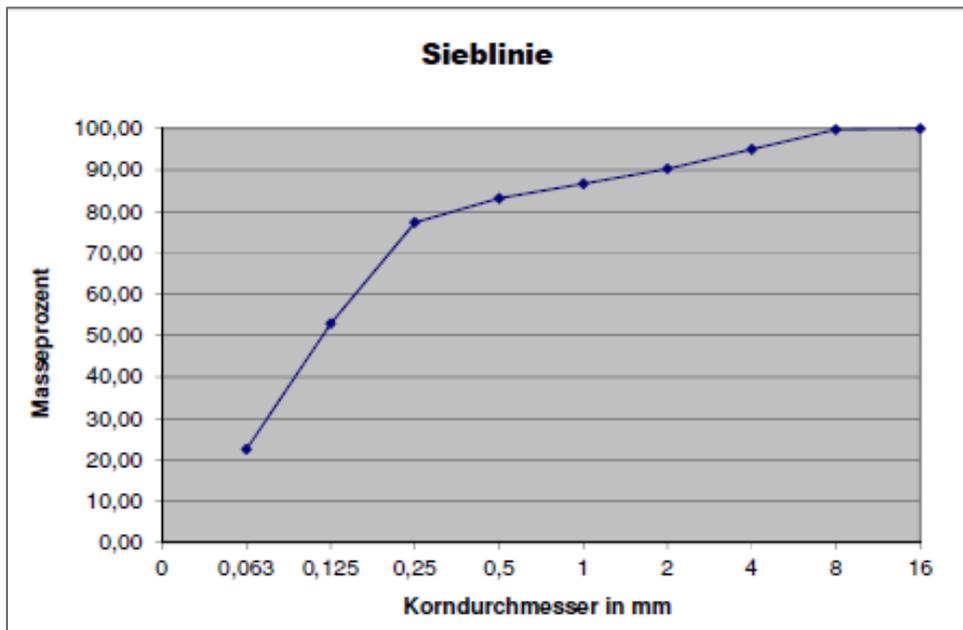
Anhang 32: Sieblinie KSK c (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



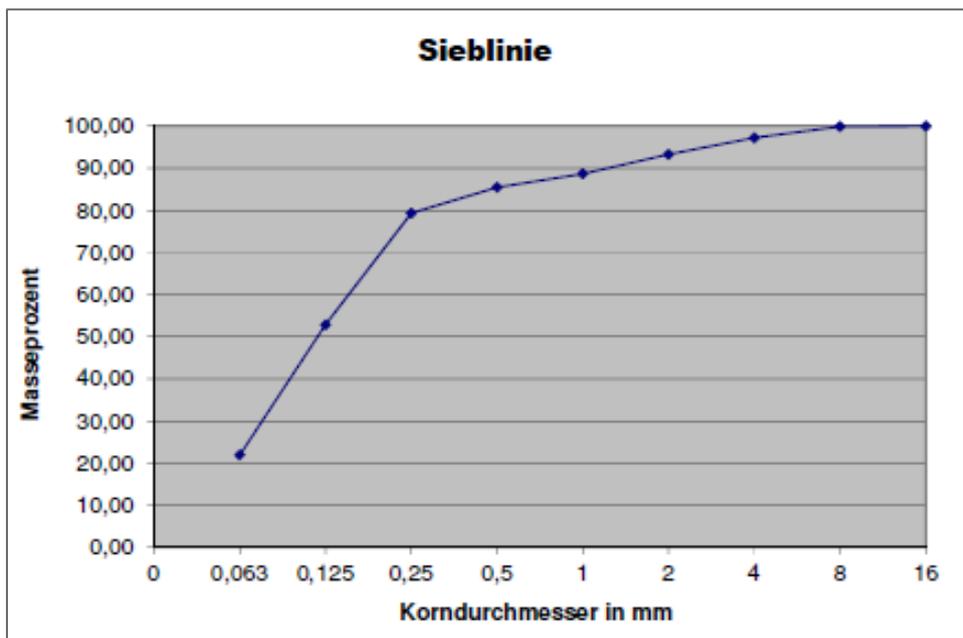
Anhang 33: Sieblinie KSK kf (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)

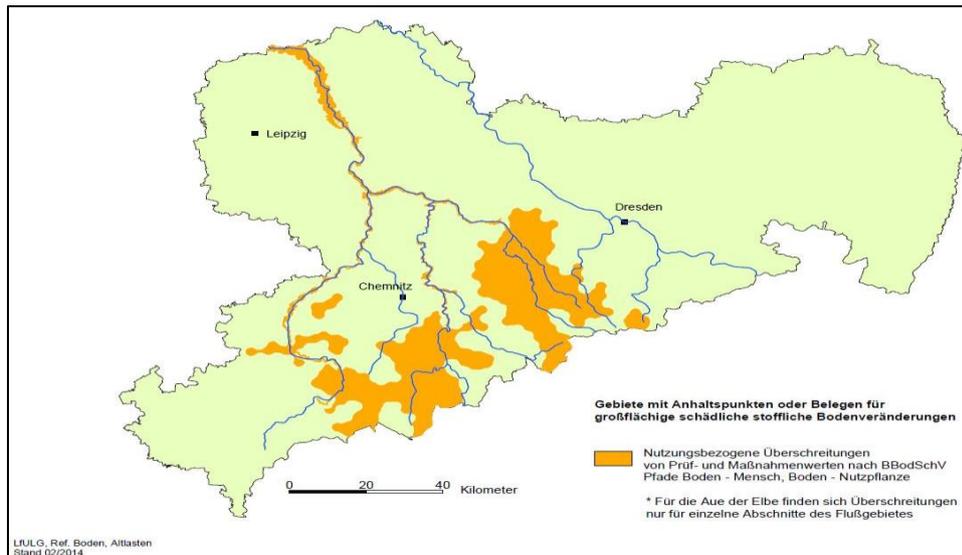


Anhang 34: Sieblinie KSK cf (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



Anhang 35: Sieblinie KSK (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



Anhang 36: Gebiete mit geogener Hintergrundbelastung Sachsen (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2018b)


Als geogene Hintergrundbelastungen werden erhöhte Schadstoffgehalte in Böden bezeichnet, welche durch die Natur bzw. den Ursprung des Bodens bedingt sind. So können sowohl ein Mineralbestand im Ausgangsgestein als auch Stoffumverteilungsprozesse in Böden wie Anreicherung oder Verarmung zu erhöhten Belastungen führen. (BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2019) In Sachsen finden sich einige Gebiete mit geogener Hintergrundbelastung, darunter das Gebiet um Leipzig. Aus der Nähe von Leipzig kommt der verwendete AFB Boden.

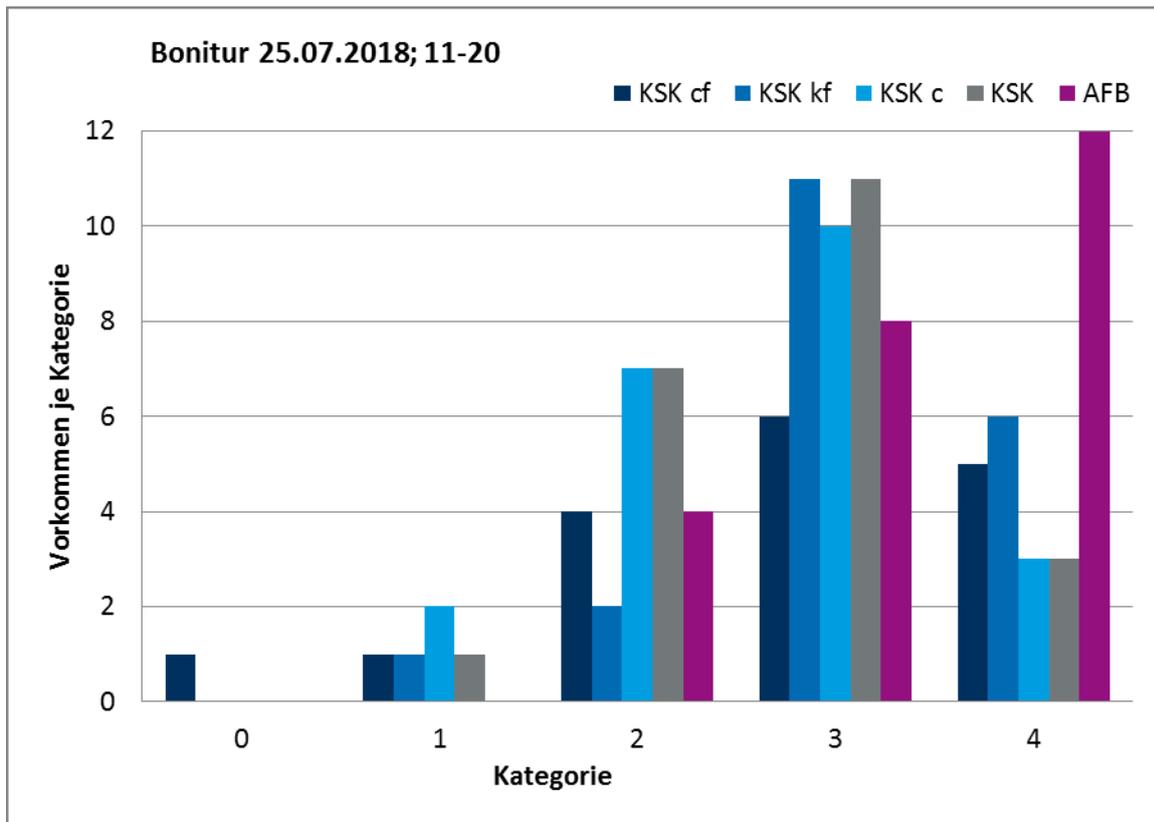
Anhang 37: Vergleich AFB-Boden mit geogenen Hintergrundwerten (Vgl. LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2007, S.51)

	RB Leipzig Median	RB Leipzig 90% Perzentil	AFB 2018
Eluate			
pH-Wert (Eluat)	7,6	10,4	7,4
eLF $\mu\text{S}/\text{cm}$	353	2759	2050
Chlorid mg/l	5	55	3
Sulfat mg/l	70	1565	1095
Cadmium $\mu\text{g}/\text{l}$	1	9	< 0,2
Blei $\mu\text{g}/\text{l}$	10	23	< 10
Arsen $\mu\text{g}/\text{l}$	10	13	< 10
Chrom $\mu\text{g}/\text{l}$	10	19	< 7
Kupfer $\mu\text{g}/\text{l}$	20	30	< 5
Nickel $\mu\text{g}/\text{l}$	20	34	25
Quecksilber $\mu\text{g}/\text{l}$	0,2	0,2	< 0,1
Zink $\mu\text{g}/\text{l}$	20	113	< 10

Anhang 38: Eisengehalte Materialmischungen, 05.07.2018 in ($\mu\text{g}/\text{g}$ TS)

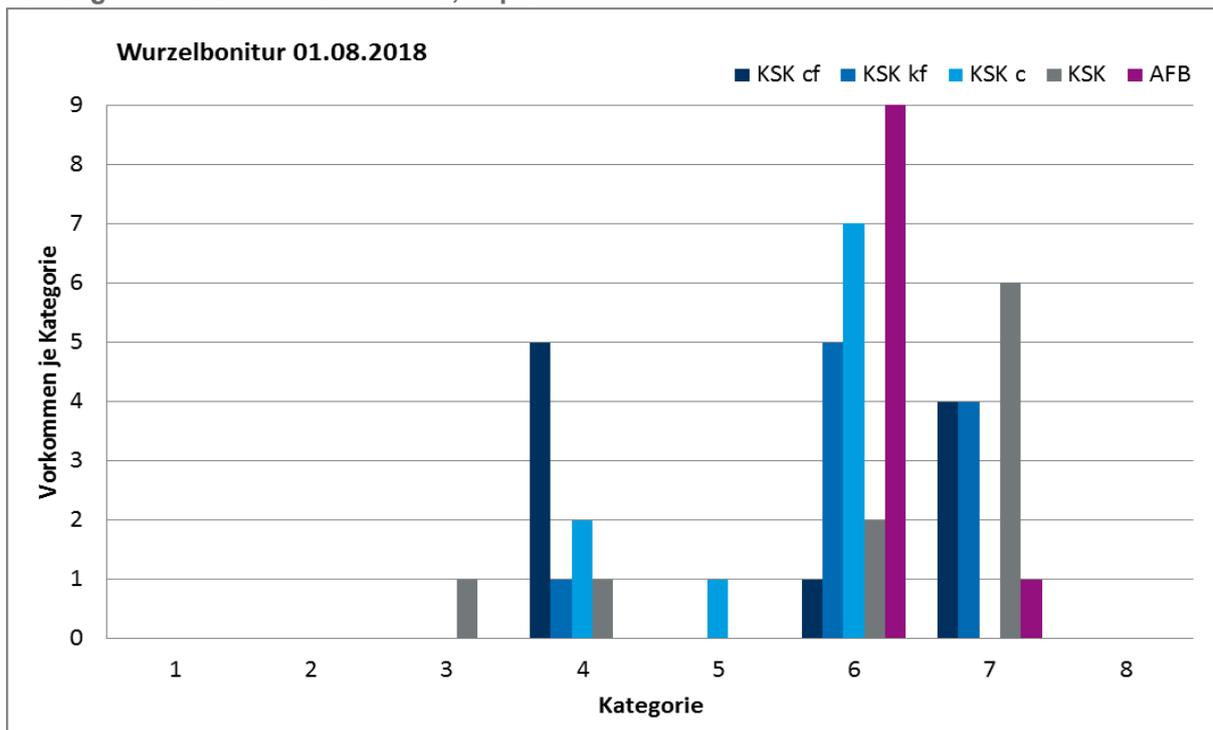
KSK c	KSK kf	KSK cf	KSK	AFB
0,7	1,4	2,4	1,6	0,7

Anhang 39: Bonitur 25.07.18, Töpfe 11-20

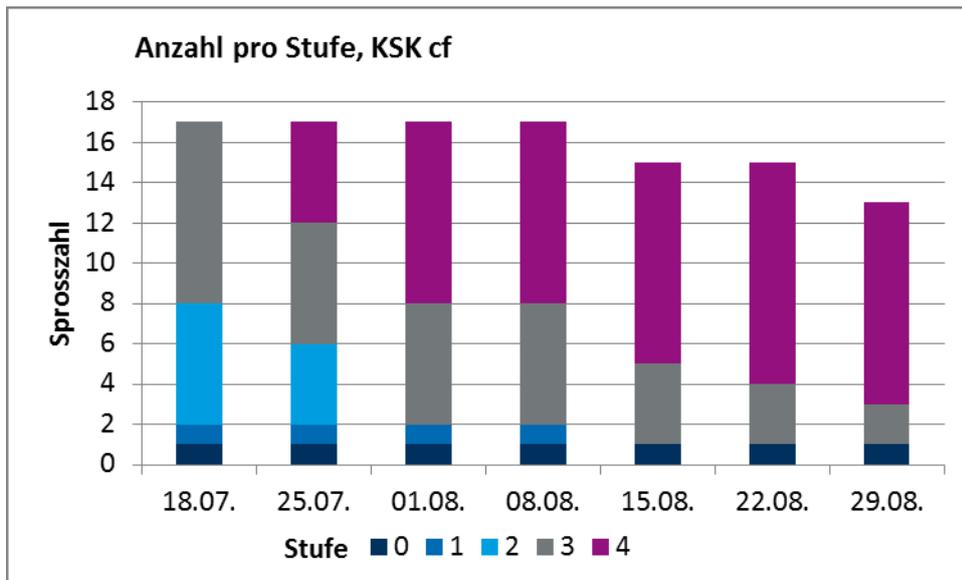


Es sind - für die bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander - nur die Ergebnisse für das Pflanzenwachstum der Töpfe 11-20 dargestellt. So können die Ergebnisse der ersten Entnahme mit den Ergebnissen der zweiten Entnahme verglichen werden, bei der nur noch die Töpfe 11-20 übrig waren. Das Wurzelwachstum wurde von Topf 1 bis 10 betrachtet, da diese Pflanzen entnommen wurden und eine Wurzelbonitur durchgeführt werden konnte.

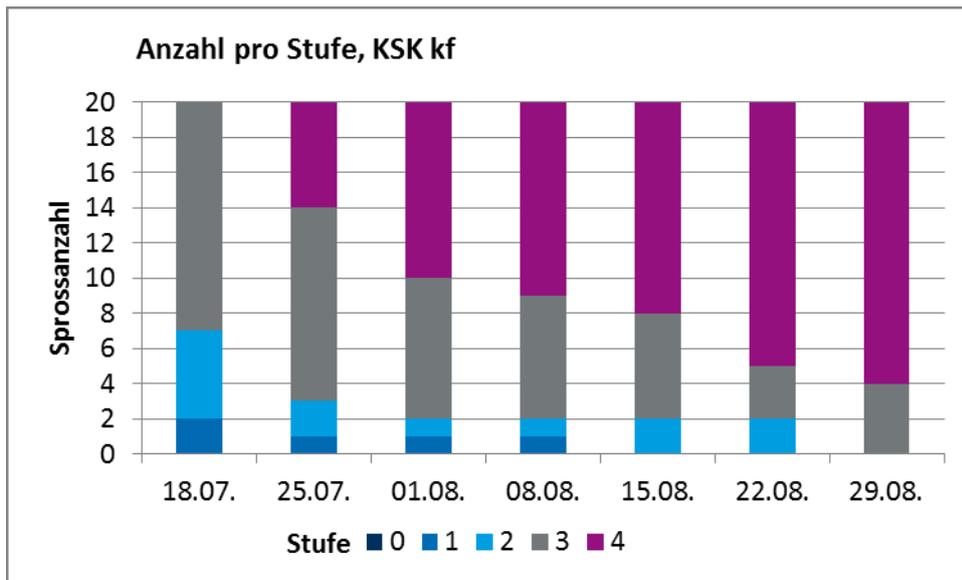
Anhang 40: Wurzelbonitur 01.08.18, Töpfe 1-10



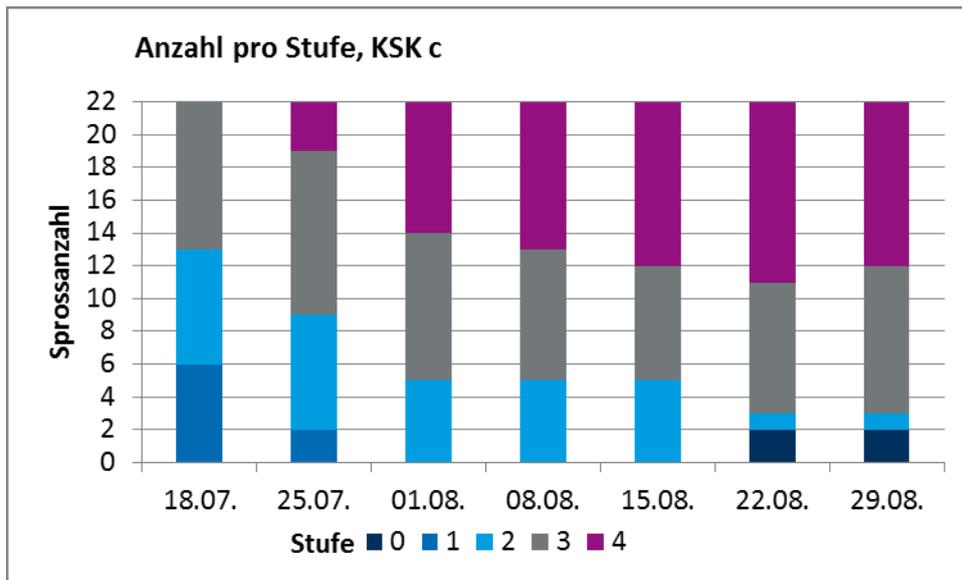
Anhang 41: Sprosszahl über die Zeit, KSK cf



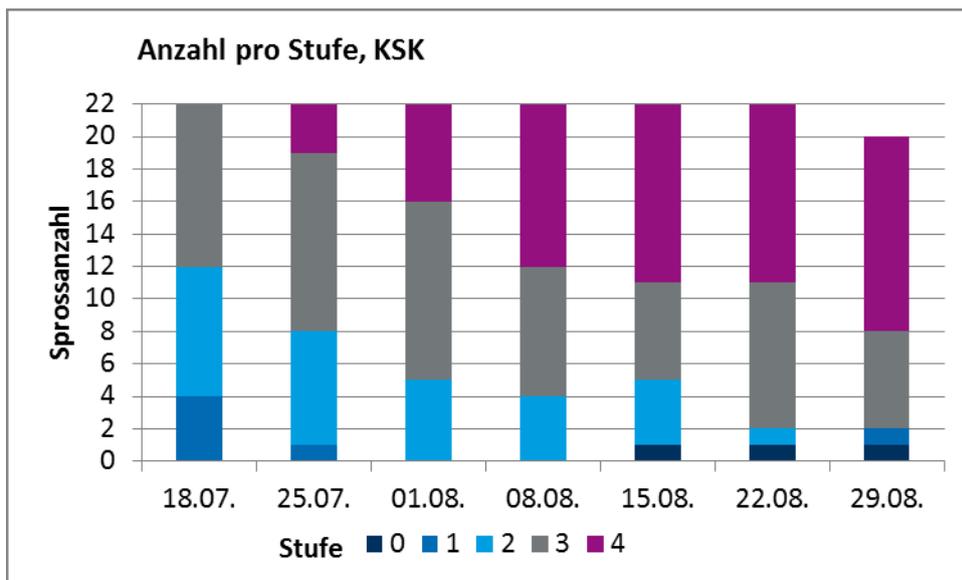
Anhang 42: Sprosszahl über die Zeit, KSK kf



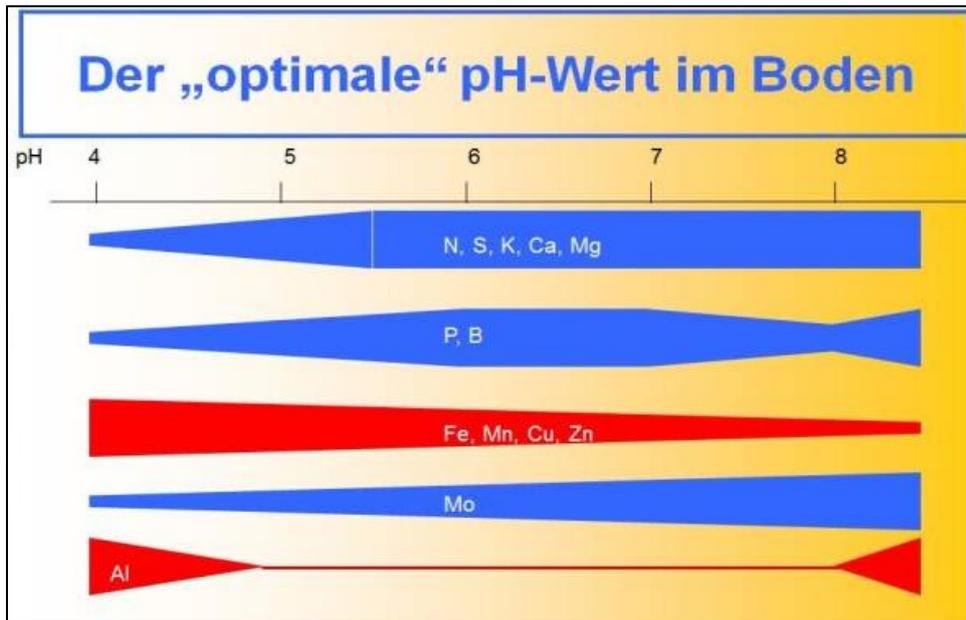
Anhang 43: Sprosszahl über die Zeit, KSK c



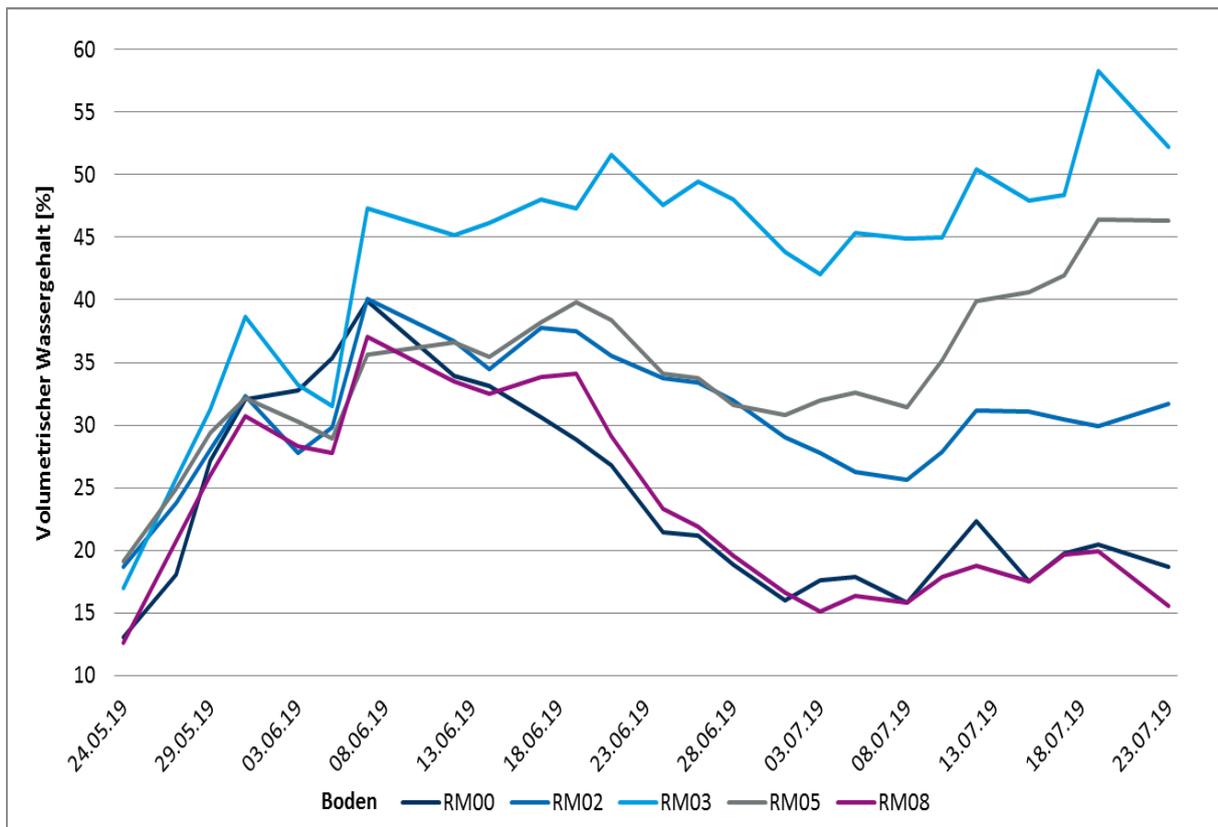
Anhang 44: Sprosszahl über die Zeit, KSK



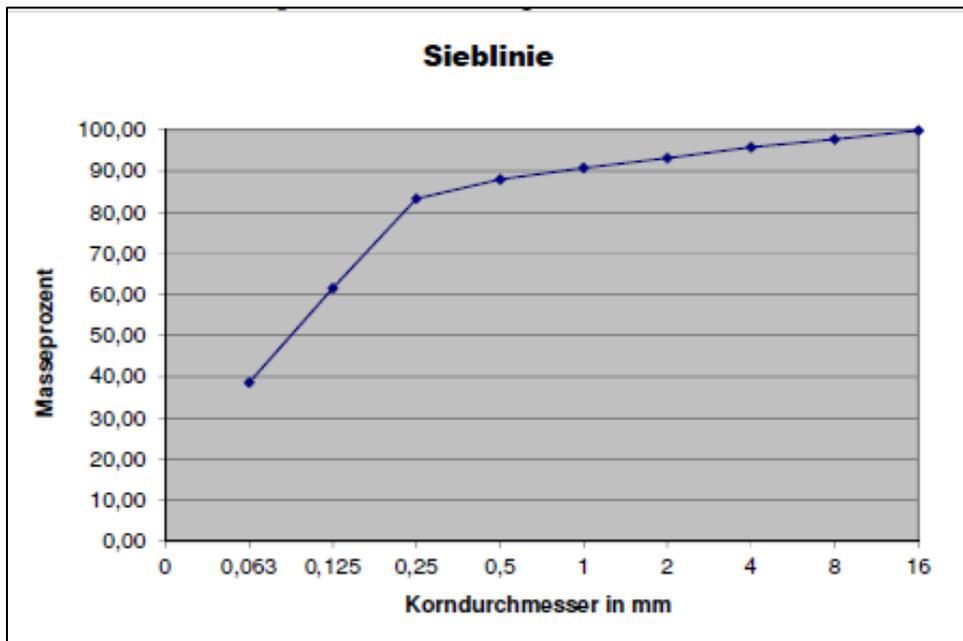
Anhang 45: pH-Optimum für Nährstoffverfügbarkeit (BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 2019)



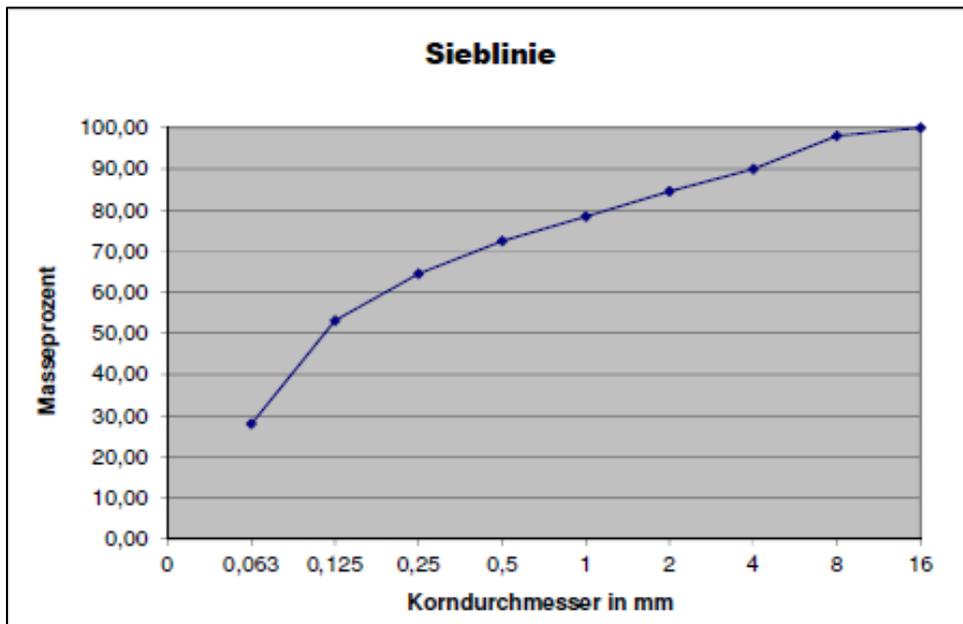
Anhang 46: Volumetrischer Wassergehalt, Pflanzversuche 2019



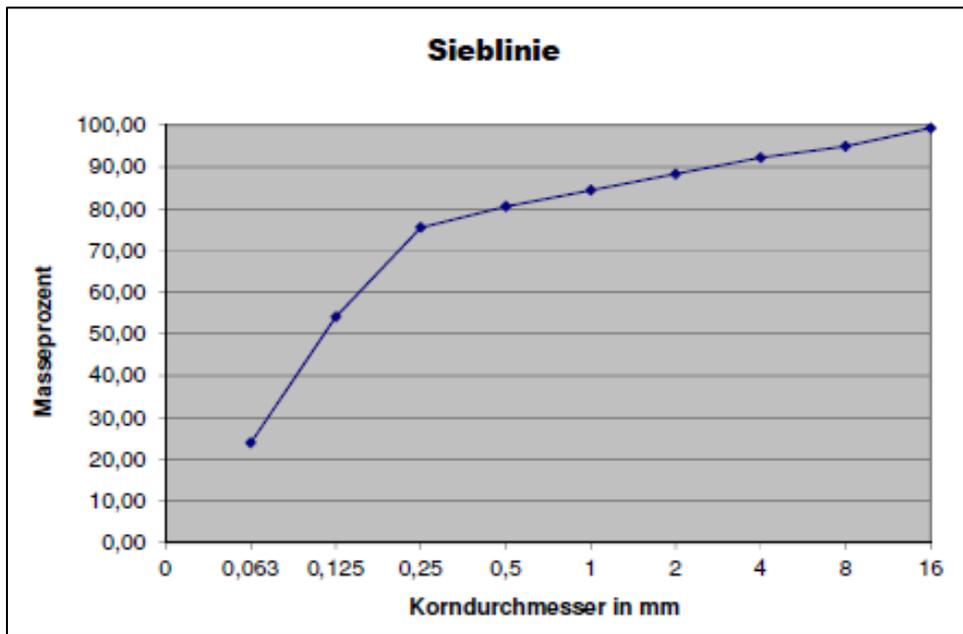
Anhang 47: Sieblinie RM02 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



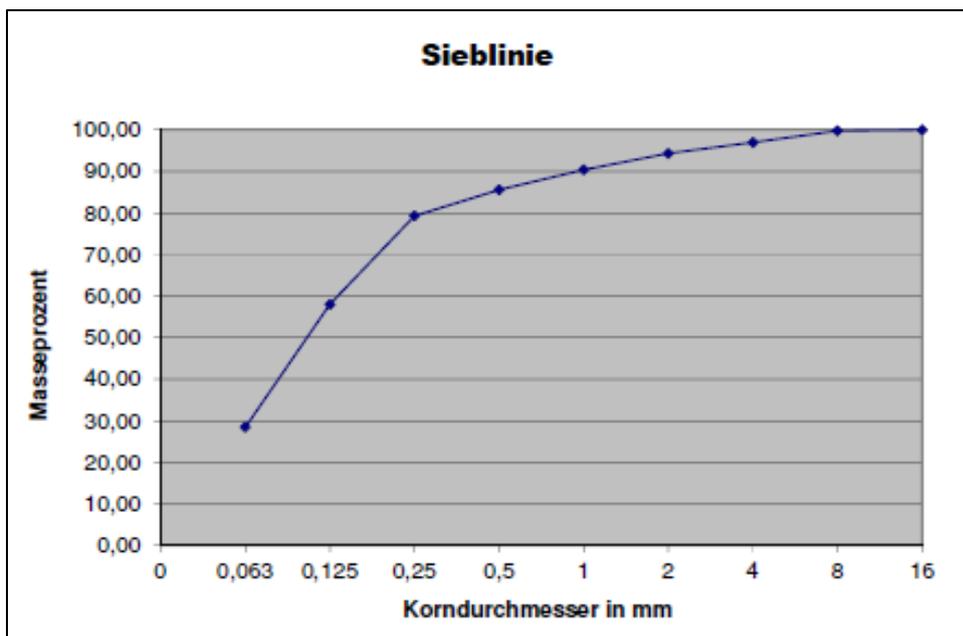
Anhang 48: Sieblinie RM03 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



Anhang 49: Sieblinie RM05 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



Anhang 50: Sieblinie RM08 (LAV MARKKRANSTÄDT 2017-2019)



Anhang 51: Vergleich AFB-Boden mit geogener Hintergrundbelastung, 2019 (Vgl. LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2007, S.51)

	RB Leipzig Median	RB Leipzig 90% Perzentil	AFB 2019
Eluate			
pH-Wert (Eluat)	7,6	10,4	7,8
eLF $\mu\text{S}/\text{cm}$	353	2759	1885
Chlorid mg/l	5	55	4
Sulfat mg/l	70	1565	595
Cadmium $\mu\text{g}/\text{l}$	1	9	< 0,2
Blei $\mu\text{g}/\text{l}$	10	23	< 10
Arsen $\mu\text{g}/\text{l}$	10	13	< 10
Chrom $\mu\text{g}/\text{l}$	10	19	< 7
Kupfer $\mu\text{g}/\text{l}$	20	30	13
Nickel $\mu\text{g}/\text{l}$	20	34	13
Quecksilber $\mu\text{g}/\text{l}$	0,2	0,2	< 0,1
Zink $\mu\text{g}/\text{l}$	20	113	34

Anhang 52: Eingangsanalytik Bodenproben 2019 nach DepV, Materialien einzeln

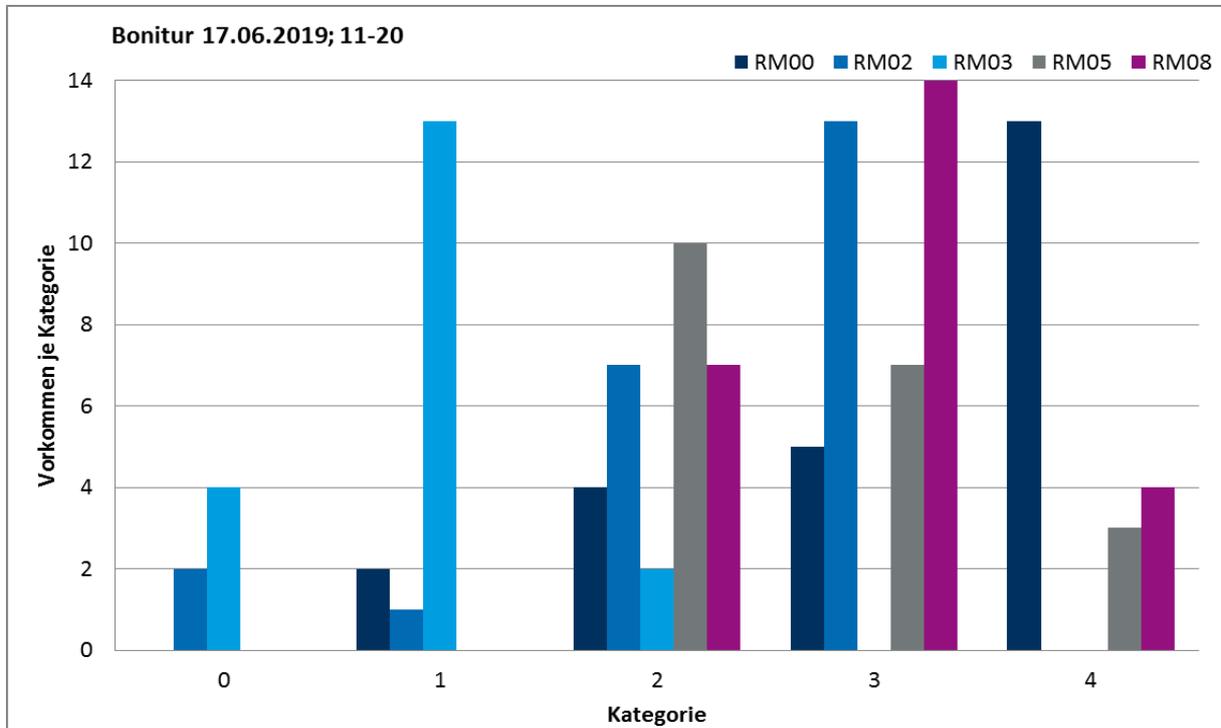
Analytik nach Depv	Obergrenze	AFB	KSK	Pilze	M 1	M 2*	M 3
Feststoffanalytik							
Benzo(a)pyren mg/kg TS	0,6	1,73	0,166	<0,01	0,013	0,533	0,088
Summe PAK mg/kg TS	5,9	18,5	4,57	0,949	2,59	9,47	3,75
Königswasseraufschlüssen							
Blei mg/kg TS	140,00	148	24,3	5,32	20,3	234	30,6
Chrom ges. mg/kg TS	120,00	144	24,5	8,55	14,6	885	24,9
Kupfer mg/kg TS	80,00	459	86,8	20,9	85,0	1411	85,4
Zink mg/kg TS	300,00	5664	382	58,8	397	1524	321
Cadmium	1,0	0,57	0,48	0,13	0,44	2,94	0,53
Eluate							
pH-Wert (Eluat)	9,00**	7,76	8,03	4,3	7,89	7,84	8,24
elekt. Leitfähigkeit (25°) $\mu\text{S}/\text{cm}$	500,00	1885	2650	6990	6080	7430	4920
Chlorid mg/l	10,00	4,35	225	582	225	388	158
Sulfat mg/l	50,00	595	1090	114	1090	1504	641
Kupfer mg/l	0,05	0,013	0,052	0,12	0,11	2,07	0,029
Nickel mg/l	0,05	0,013	0,035	0,061	0,016	0,17	0,014
Zink mg/l	0,1	0,034	0,12	3,45	0,11	0,45	0,052
Arsen mg/l	0,01	<0,01	0,067	0,13	0,045	<0,01	<0,01
Blei mg/l	0,04	<0,01	<0,01	0,086	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmium mg/l	0,002	<0,002	<0,002	0,011	<0,002	0,002	<0,002
Chrom mg/l	0,03	<0,007	<0,007	0,18	0,01	0,28	<0,007
DepV eingehalten		nein	nein	nein	nein	nein	nein

*M2: PCB über Grenzwert (0,75 zu 0,1) **pH-Wert Untergrenze 6,5

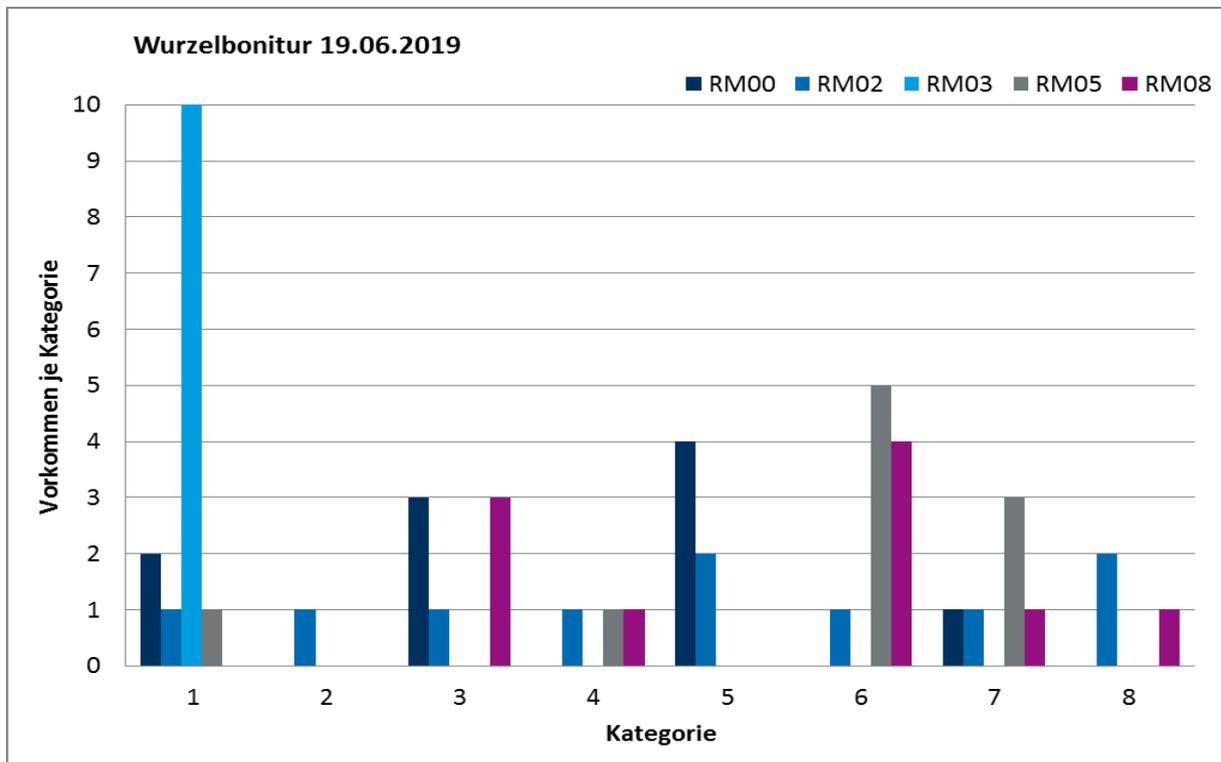
Anhang 53: Eisengehalt Bodenproben, 24.05.2019 in (µg/g TS)

RM00	RM02	RM03	RM05	RM08
0,2	0,2	0,2	0,3	0,1

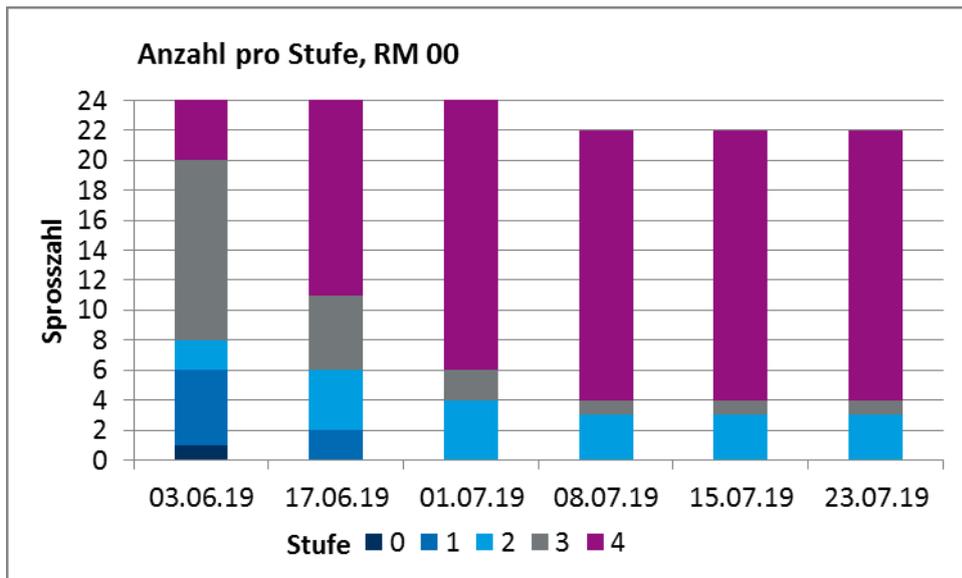
Anhang 54: Bonitur 17.06.2019, Töpfe 11-20



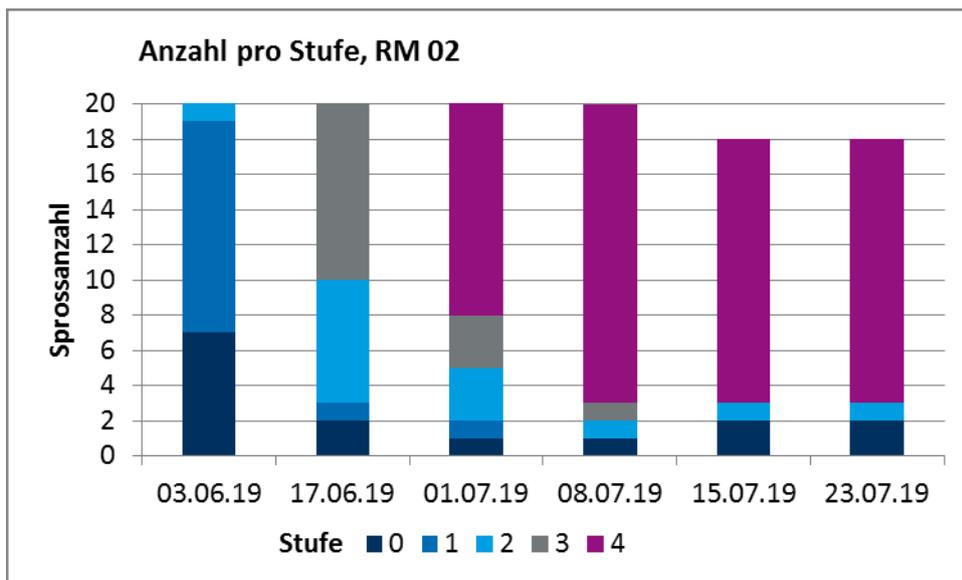
Anhang 55: Wurzelbonitur 19.06.2019, Töpfe 11-20



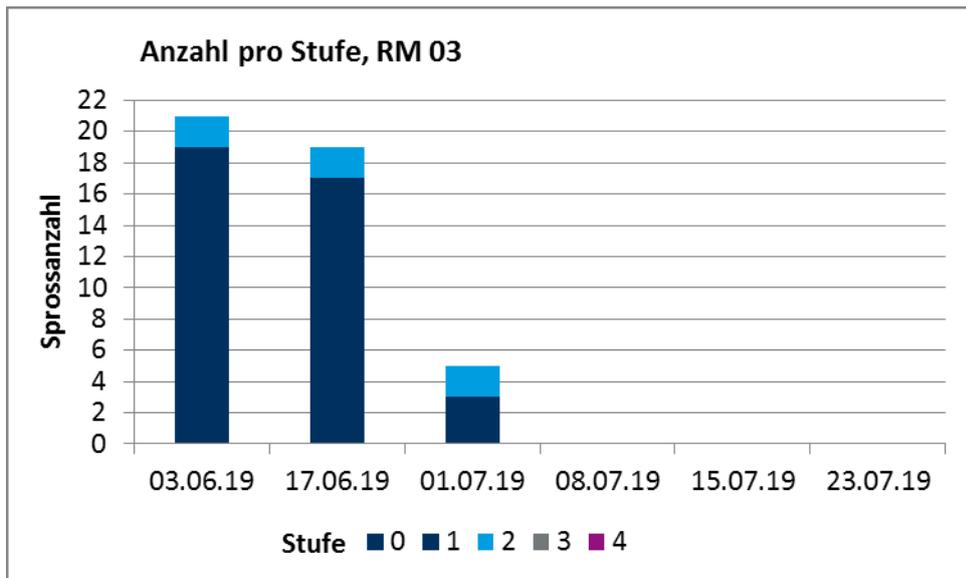
Anhang 56: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM00



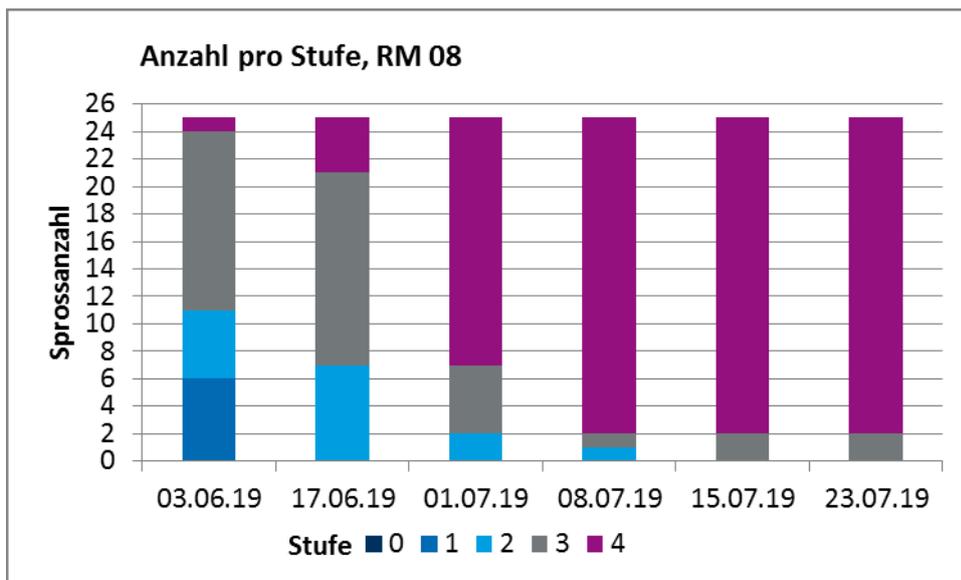
Anhang 57: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM02



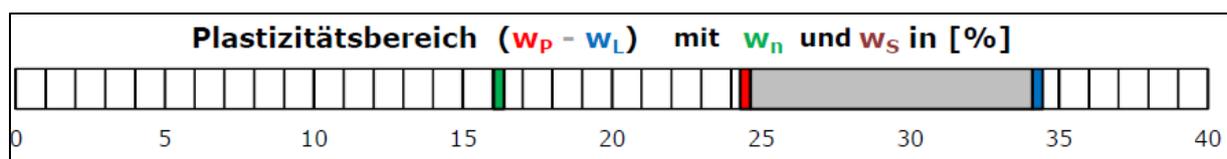
Anhang 58: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM03



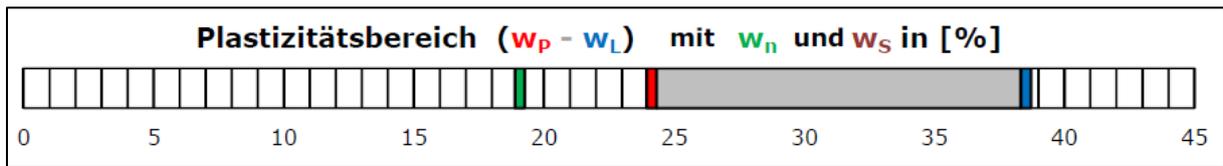
Anhang 59: Sprosszahl pro Stufe über die Zeit, RM08



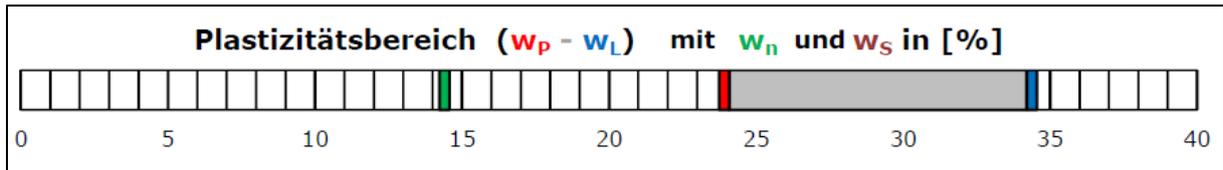
Anhang 60: Plastizitätsbereich Boden KSK kf



Anhang 61: Plastizitätsbereich Boden KSK cf



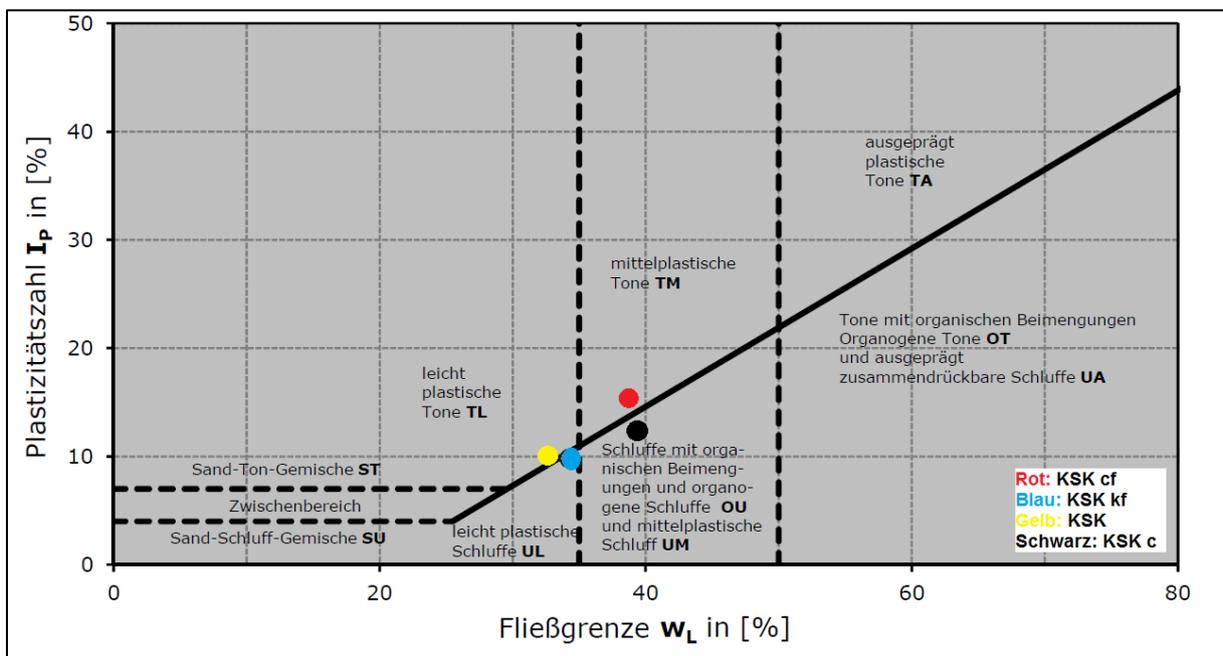
Anhang 62: Plastizitätsbereich Boden KSK



Anhang 63: Kennwerte Fließgrenzenbestimmung, 2018

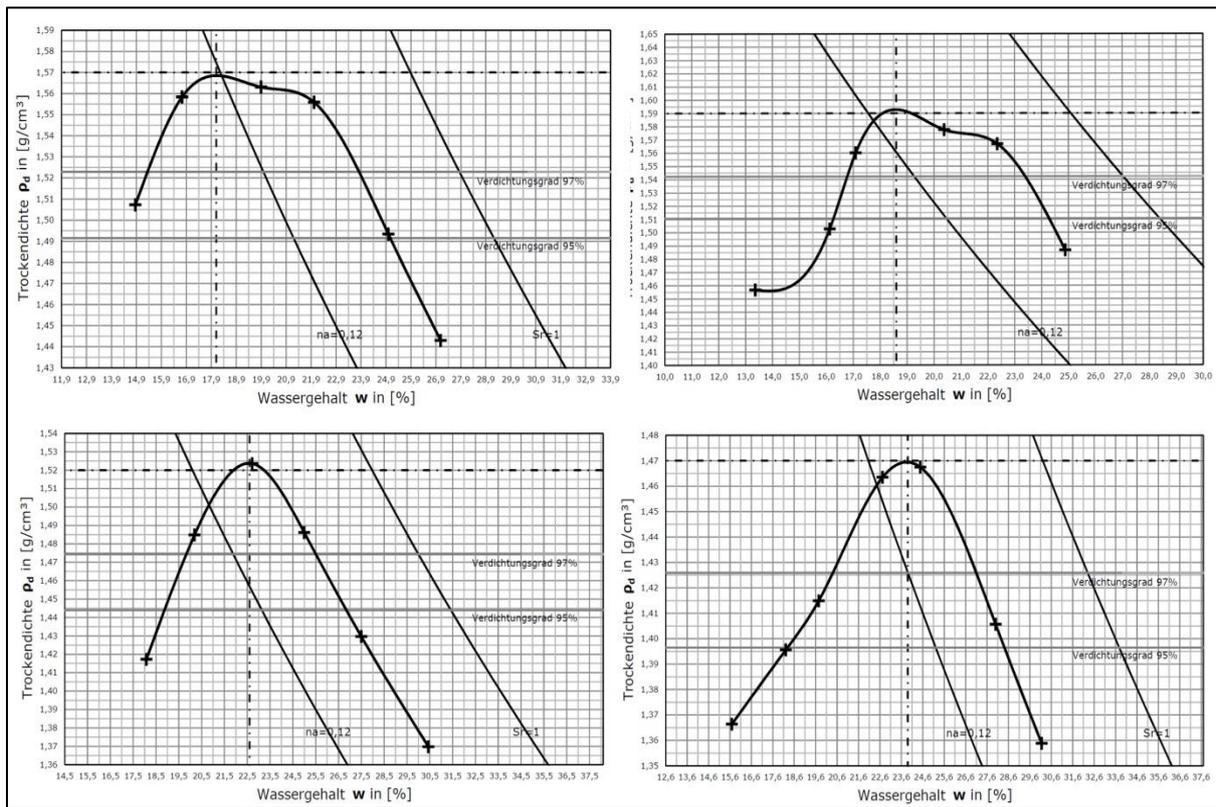
Boden	I_c [-]	I_p [%]	W_L [%]	W_p [%]	W_n [%]
KSK c	1,92	12,88	39,17	26,29	14,40
KSK kf	1,84	9,81	34,29	24,48	16,21
KSK cf	1,35	14,37	38,51	24,14	19,07
KSK	1,91	10,47	34,38	23,92	14,41

Anhang 64: Plastizitätsdiagramm der Materialmischungen, 2018



Das Plastizitätsdiagramm ergibt sich aus der Bestimmung der Fließgrenzen ergibt. Es ist zu sehen, dass alle Mischungen als ähnlicher Bodentyp klassifiziert werden können. Die Böden variieren in einem schmalen Bereich zwischen Tonen und Schluffen, genauer leicht plastische Tone (gelb, KSK), leicht plastische Schluffe (blau, KSK kf), mittelplastische Tone (rot, KSK cf) und Schluffe mit organischen Beimengungen (schwarz, KSK c). Da alle Böden in etwa die gleichen Inhaltsstoffe enthalten, ist dies plausibel.

Anhang 65: Proctorkurve Boden KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.)



Anhang 66: Kennwerte Proctordichte Boden KSK c

Verdichtung	Proctordichte [g/cm³]	Wassergehalt [%]
100%	1,59	18,6 (optimaler WG)
97%	1,54	16,8 / 23,3
95%	1,51	16,3 / 24,2

Anhang 67: Kennwerte Proctordichte Boden KSK kf

Verdichtung	Proctordichte [g/cm³]	Wassergehalt [%]
100%	1,47	23,9 (optimaler WG)
97%	1,43	20,3 / 27,1
95%	1,40	18,2 / 28,4

Anhang 68: Kennwerte Proctordichte Boden KSK cf

Verdichtung	Proctordichte [g/cm³]	Wassergehalt [%]
100%	1,52	22,6 (optimaler WG)
97%	1,47	19,9 / 25,3
95%	1,44	19,0 / 26,7

Anhang 69: Kennwerte Proctordichte Boden KSK

Verdichtung	Proctordichte [g/cm³]	Wassergehalt [%]
100%	1,57	18,1 (optimaler WG)
97%	1,52	15,3 / 23,9
95%	1,49	- / 25,1

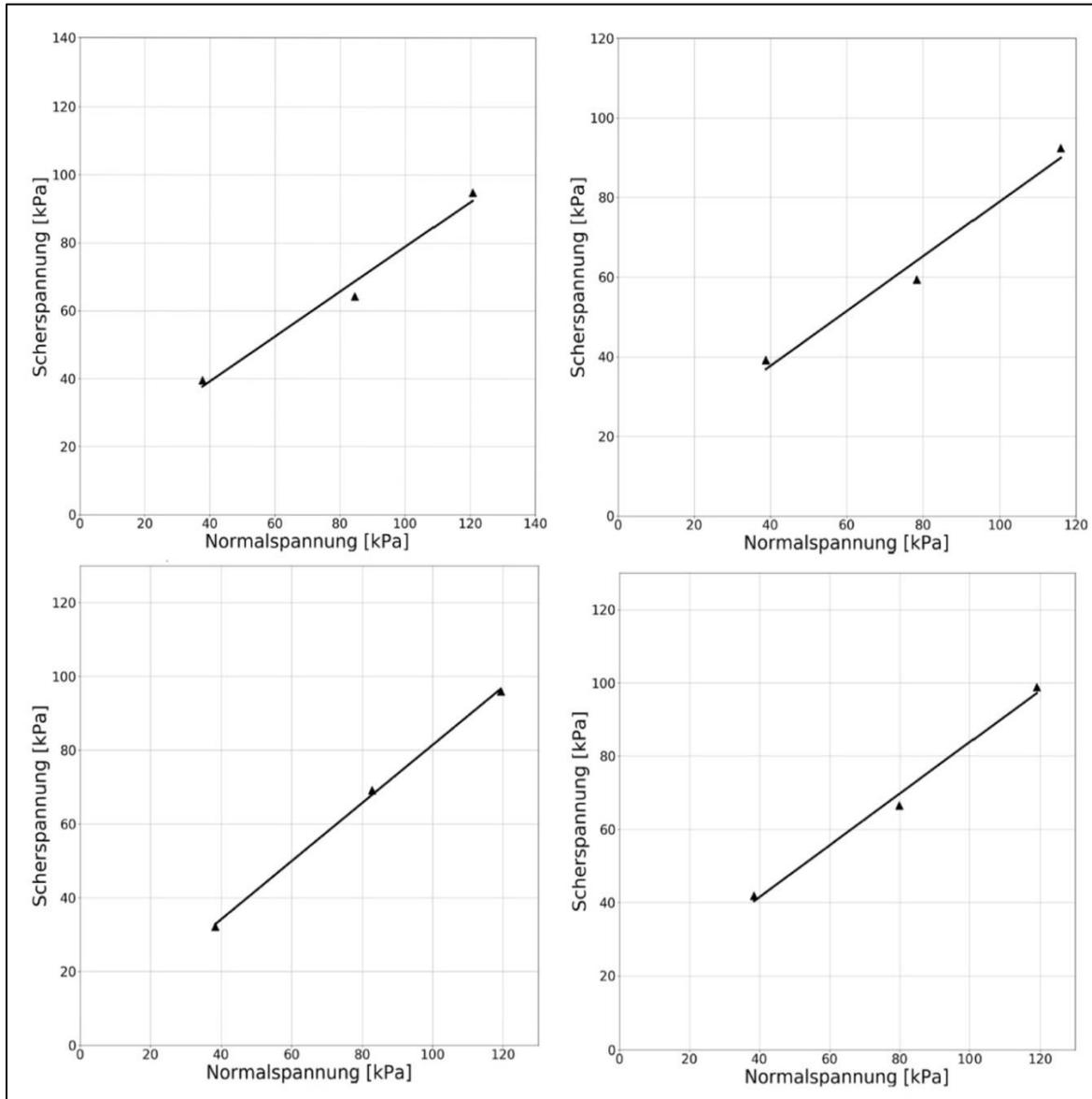
Anhang 70: Kennwerte Durchlässigkeitsmessung, 2018, mehr Auflast

Durchgang	Seiten- druck [bar]	Porenwasser- druck oben [bar]	Porenwasser- druck unten [bar]	Druck- differenz [bar]	Hydr. Höhenunter- schied [m]	Hydr. Gefälle
1	8,0	7,0	7,2	0,2	2,00	Ca. 25
2	8,0	7,0	7,4	0,4	4,00	Ca. 50
3	8,0	7,0	7,8	0,8	8,00	Ca. 100

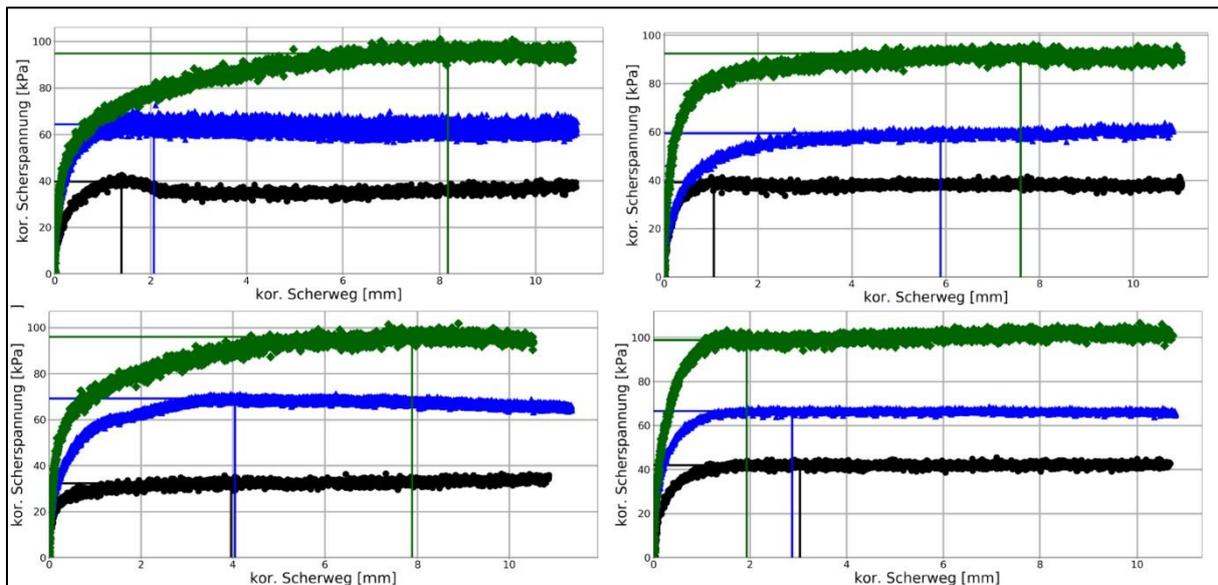
Anhang 71: Parameter für die Ermittlung der Durchlässigkeitswerte, 2018, weniger Auflast

Seiten- druck [bar]	Porenwasser- druck oben [bar]	Porenwasser- druck unten [bar]	Druck- differenz [bar]	Hydr. Höhenunter- schied [m]	Hydr. Gefälle
7,2	7,0	7,0	0,1	1,00	8,5

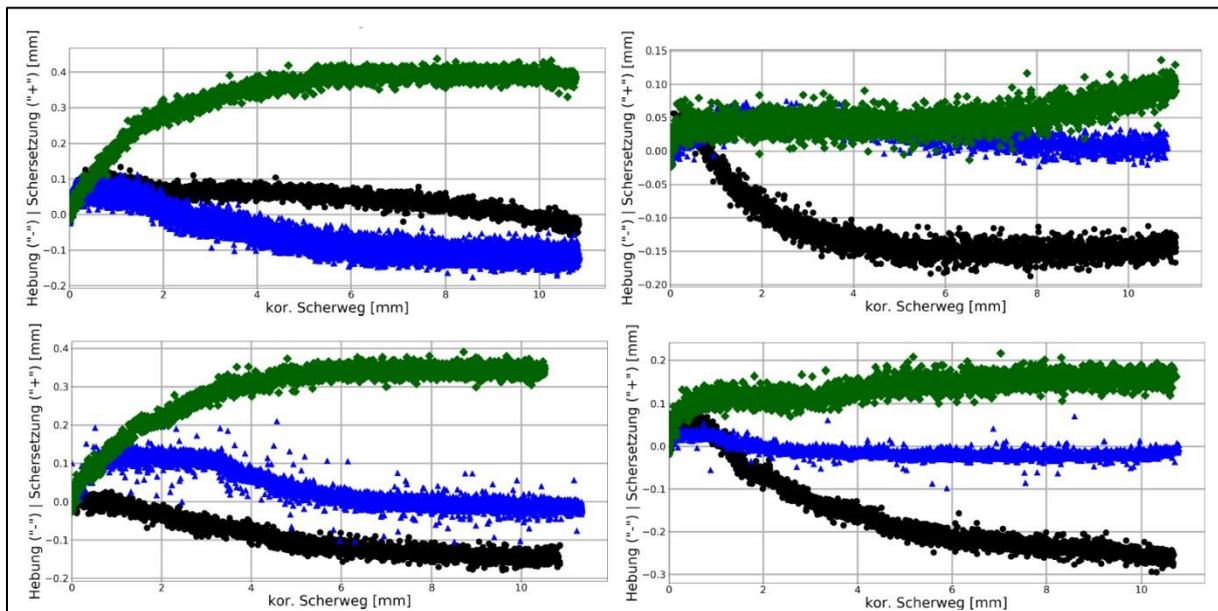
Anhang 72: Scherdiagramm KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.), 2018



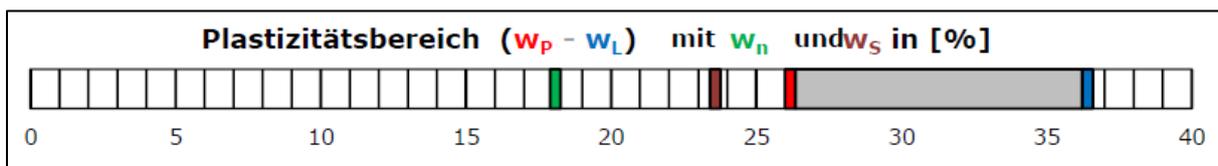
Anhang 73: Scherverhalten KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.)



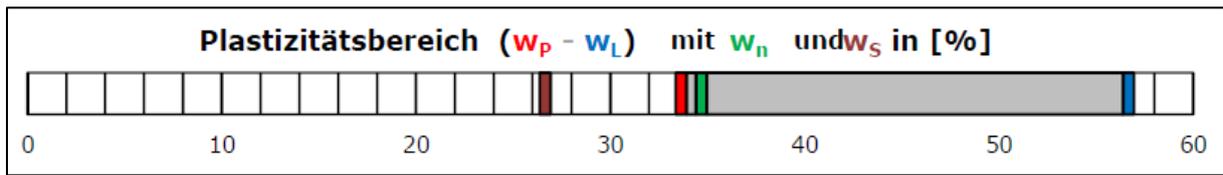
Anhang 74: Hebung - Senkung KSK (l.o.), KSK c (r.o.), KSK cf (l.u.), KSK kf (r.u.)



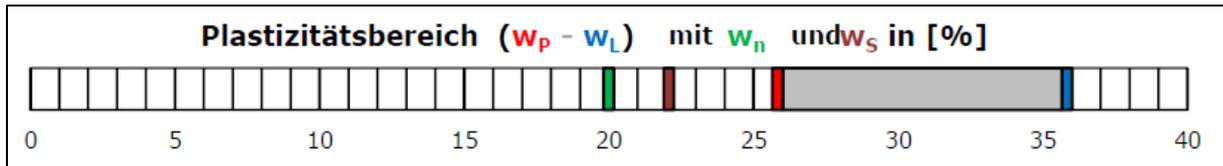
Anhang 75: Plastizitätsbereich Boden RM03



Anhang 76: Plastizitätsbereich Boden RM05



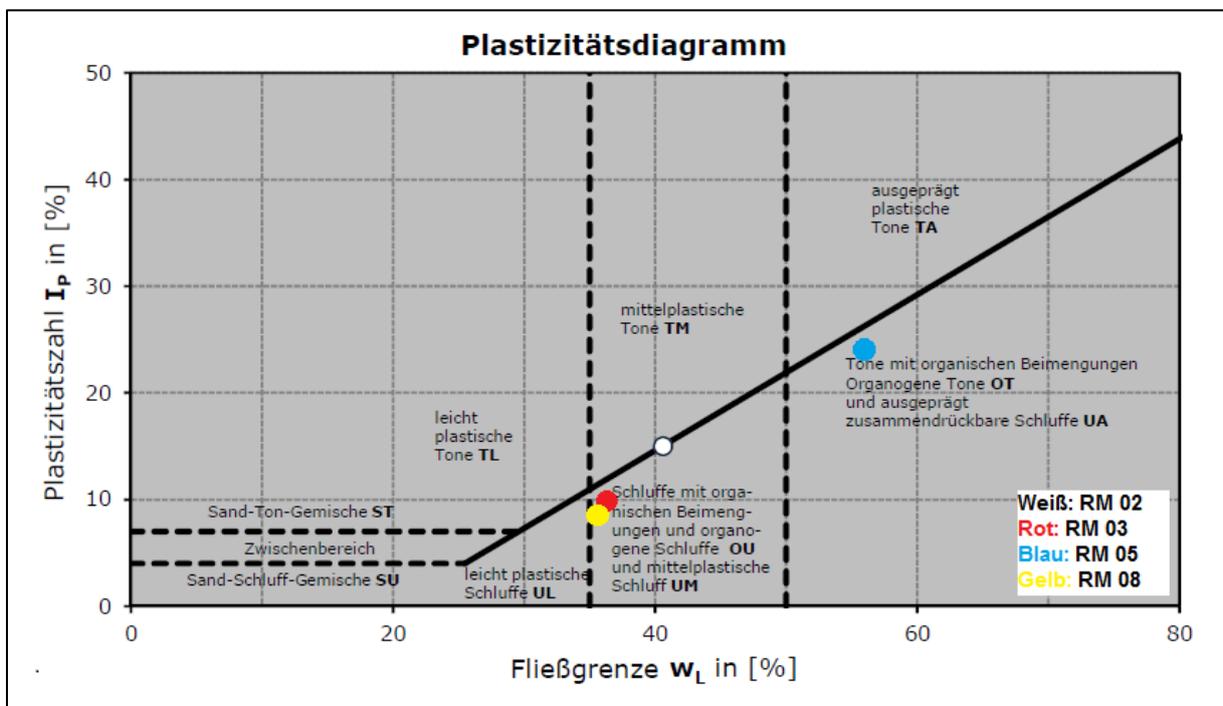
Anhang 77: Plastizitätsbereich Boden RM08



Anhang 78: Kennwerte Fließgrenzenbestimmung, 2019

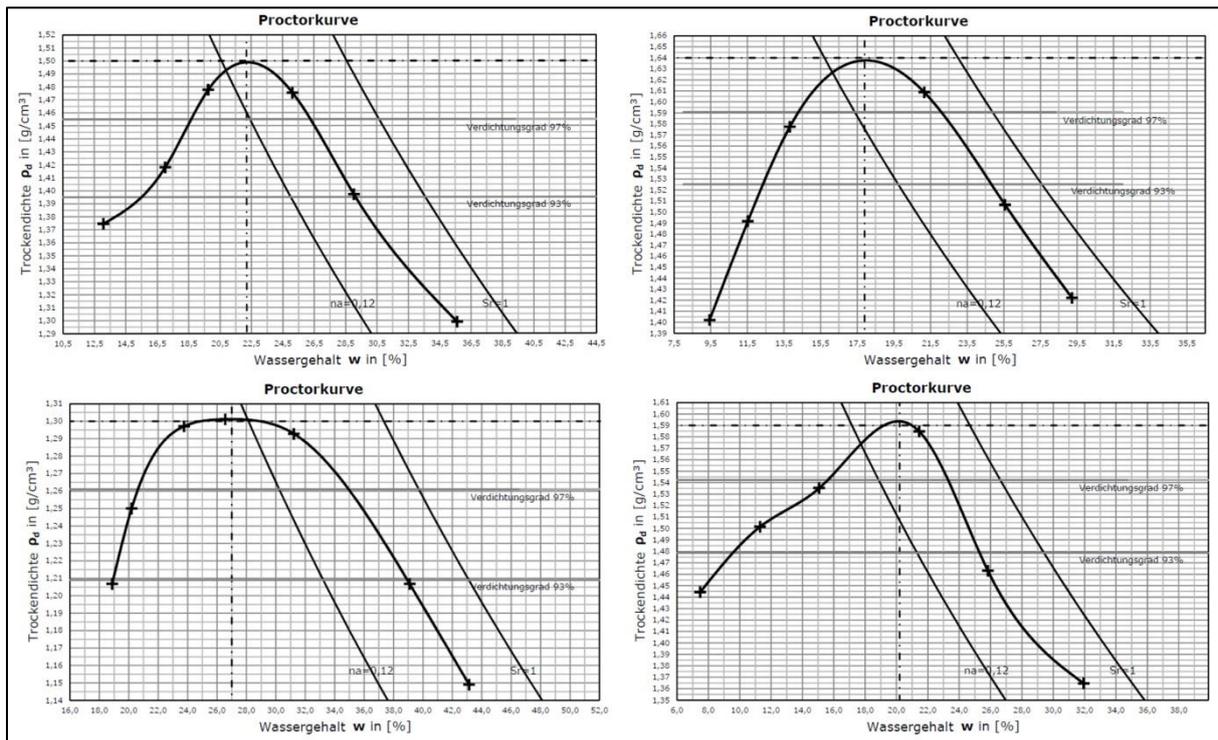
Boden	I_c [-]	I_p [%]	W_l [%]	W_p [%]	W_n [%]
RM 02	0,95	15,00	40,61	25,61	26,41
RM 03	1,79	10,24	36,41	26,17	18,08
RM 05	0,95	23,02	56,67	33,65	34,69
RM 08	1,58	10,00	35,84	25,84	20,00

Anhang 79: Plastizitätsdiagramm der Materialmischungen, 2019



Die Böden RM02, RM03 und RM08 liegen in einem ähnlichen Bereich und können als ähnliche Bodentypen klassifiziert werden. Die Böden variieren in einem schmalen Bereich zwischen Tonen und Schluffen, genauer mittelplastische Tone/Schluffe (weiß, RM02) und Schluffe mit organischen Beimengungen (rot und gelb, RM03 und RM08). Nur der Boden RM05 liegt im Bereich der organogenen Tone bzw. in dem der zusammendrückbaren Schluffe (blau, RM05).

Anhang 80: Proctorkurve Boden RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.), 2019



Anhang 81: Kennwerte Proctordichte Boden RM02

Verdichtung	Proctordichte [g/cm^3]	Wassergehalt [%]
100%	1,50	22,2 (optimaler WG)
97%	1,46	18,6 / 26,3
95%	1,43	15,4 / 29,2

Anhang 82: Kennwerte Proctordichte Boden RM03

Verdichtung	Proctordichte [g/cm^3]	Wassergehalt [%]
100%	1,64	17,9 (optimaler WG)
97%	1,59	14,2 / 22,2
95%	1,56	12,3 / 24,9

Anhang 83: Kennwerte Proctordichte Boden RM05

Verdichtung	Proctordichte [g/cm^3]	Wassergehalt [%]
100%	1,30	27,0 (optimaler WG)
97%	1,26	20,7 / 34,8
95%	1,24	18,9 / -

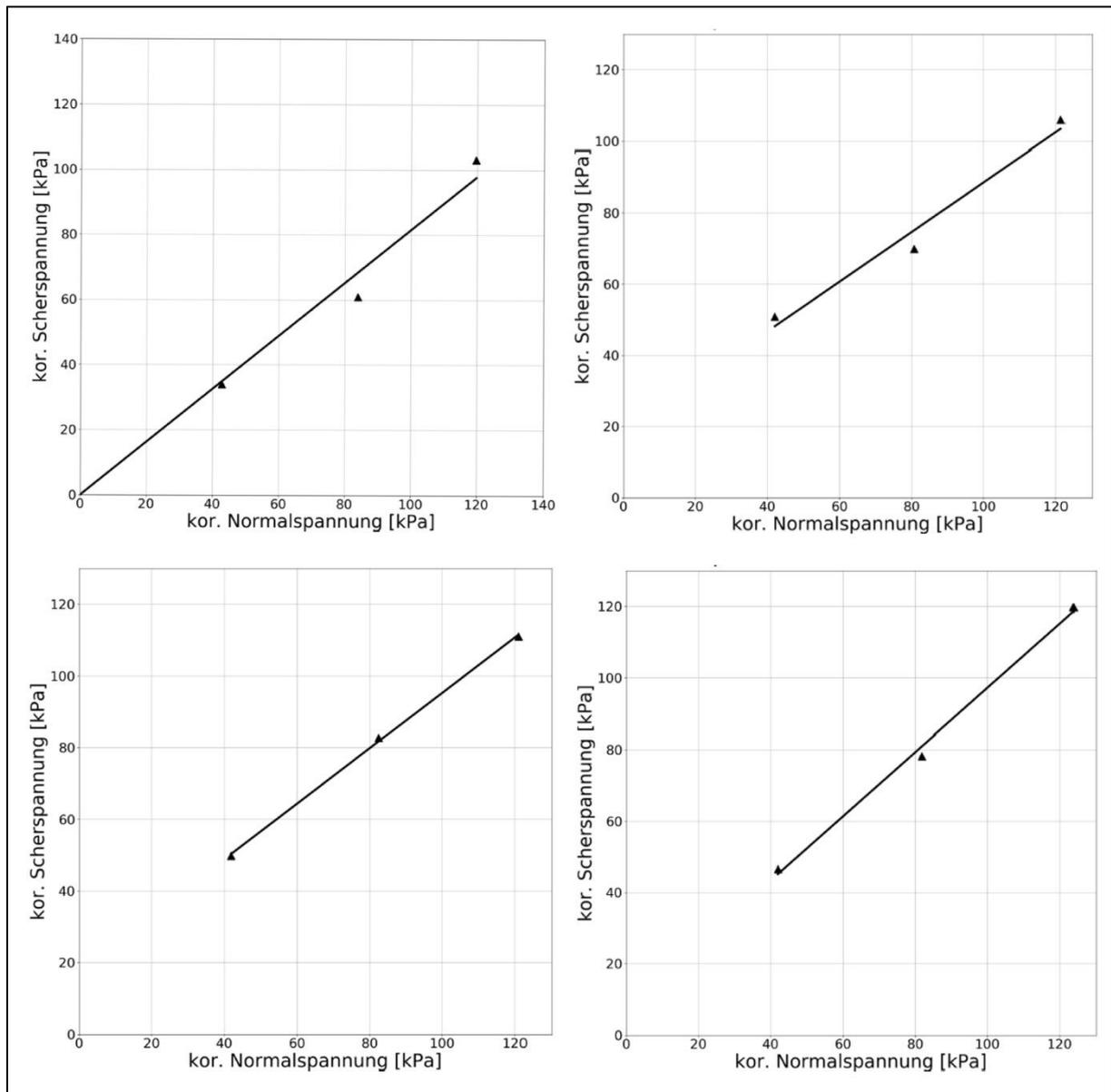
Anhang 84: Kennwerte Proctordichte Boden RM08

Verdichtung	Proctordichte [g/cm^3]	Wassergehalt [%]
100%	1,59	20,2 (optimaler WG)
97%	1,54	15,8 / 23,2
95%	1,51	9,8 / 25,2

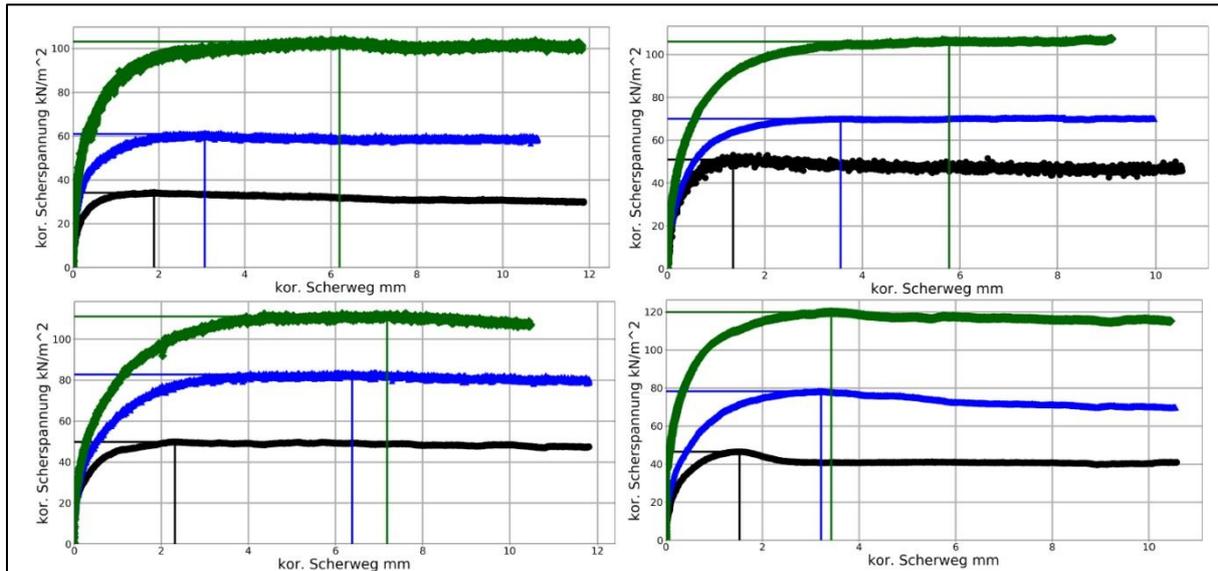
Anhang 85: Parameter für die Ermittlung der Durchlässigkeitswerte RM02 bis RM08

Seiten- druck [bar]	Porenwasser- druck oben [bar]	Porenwasser- druck unten [bar]	Druck- differenz [bar]	Hydr. Höhenunter- schied [m]	Hydr. Gefälle
7,2	7,0	7,0	0,1	1,00	8,8

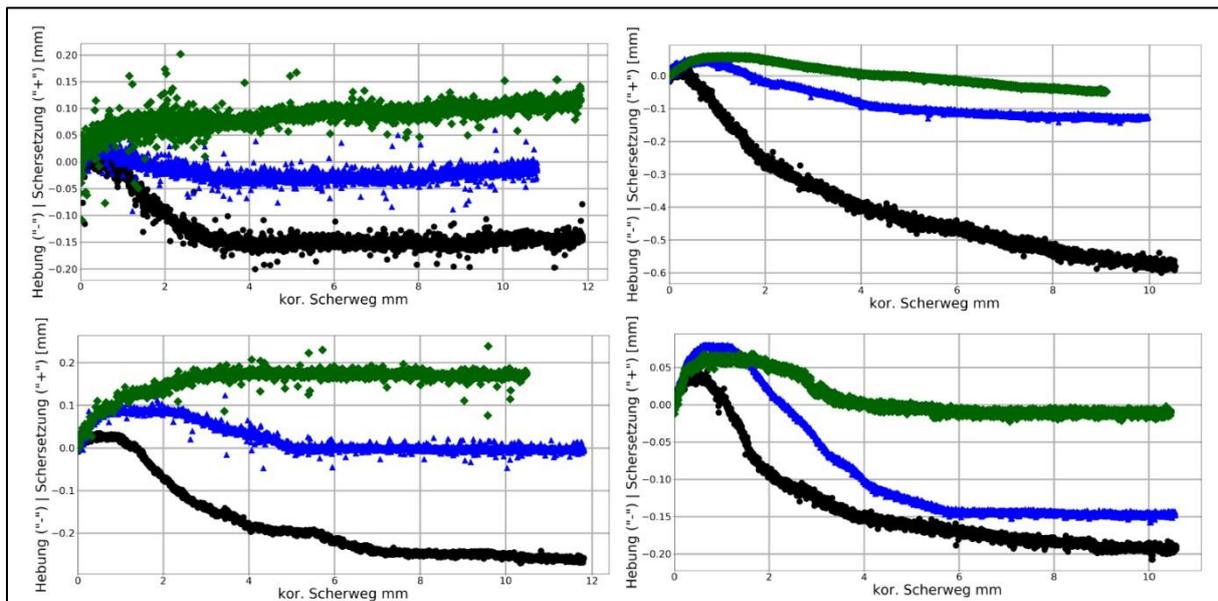
Anhang 86: Scherdiagramm RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.), 2019



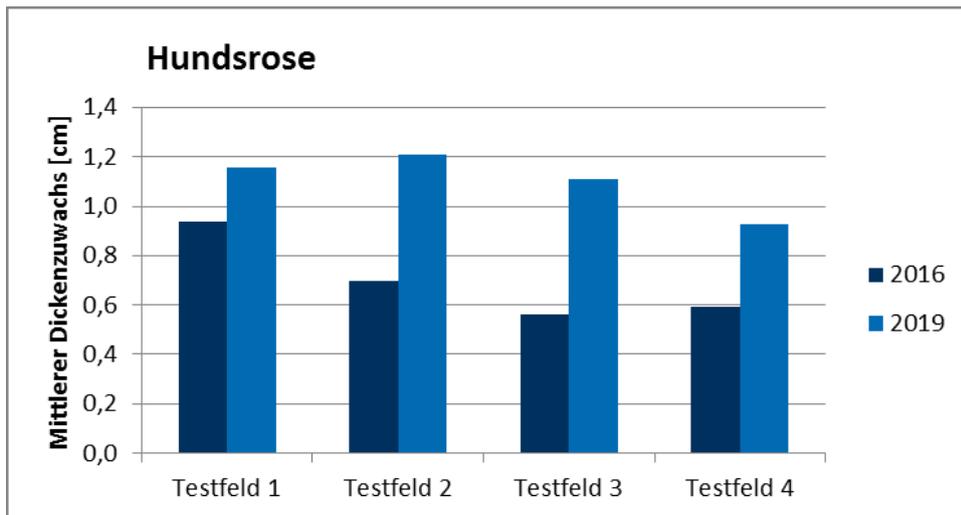
Anhang 87: Scherverhalten RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.)



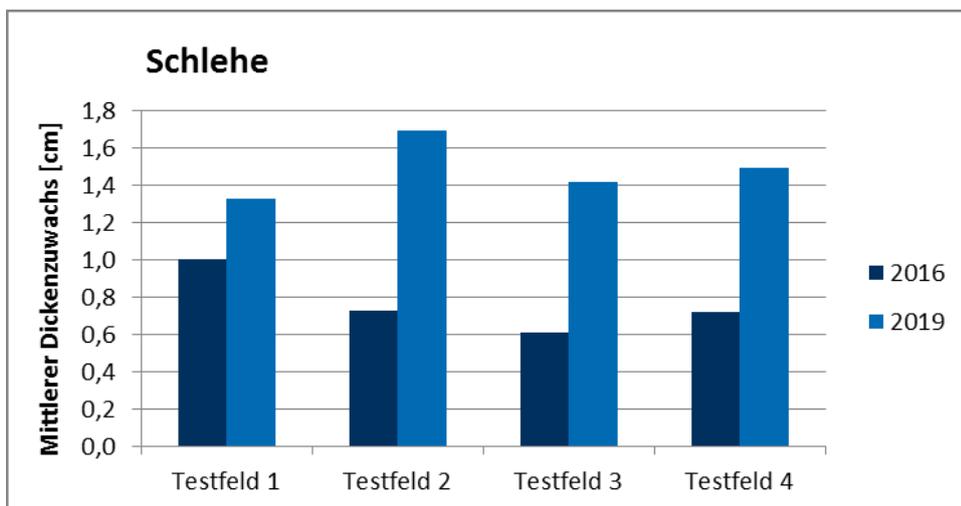
Anhang 88: Hebung - Senkung RM02 (l.o.), RM03 (r.o.), RM05 (l.u.), RM08 (r.u.)



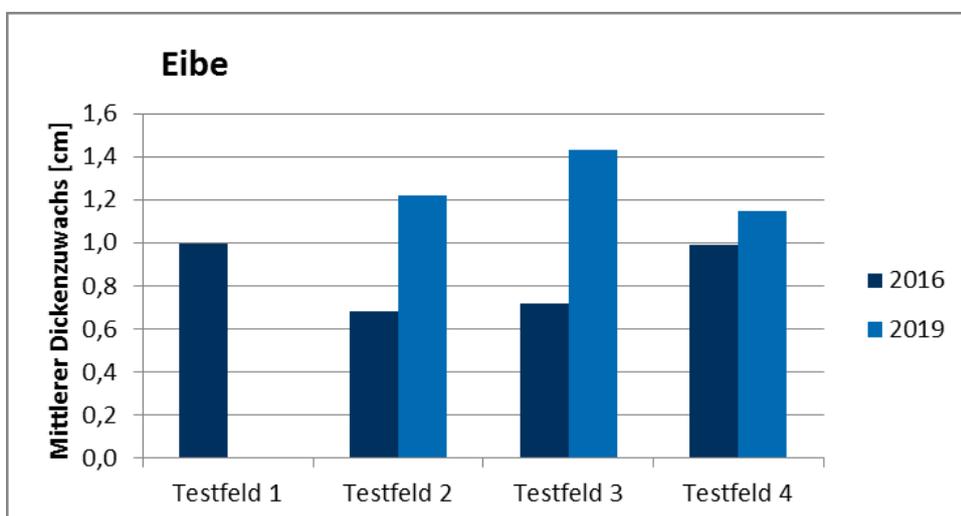
Anhang 89: Mittlerer Dickenzuwachs Hundsrose 2016 bis 2019, Deponie Wetro



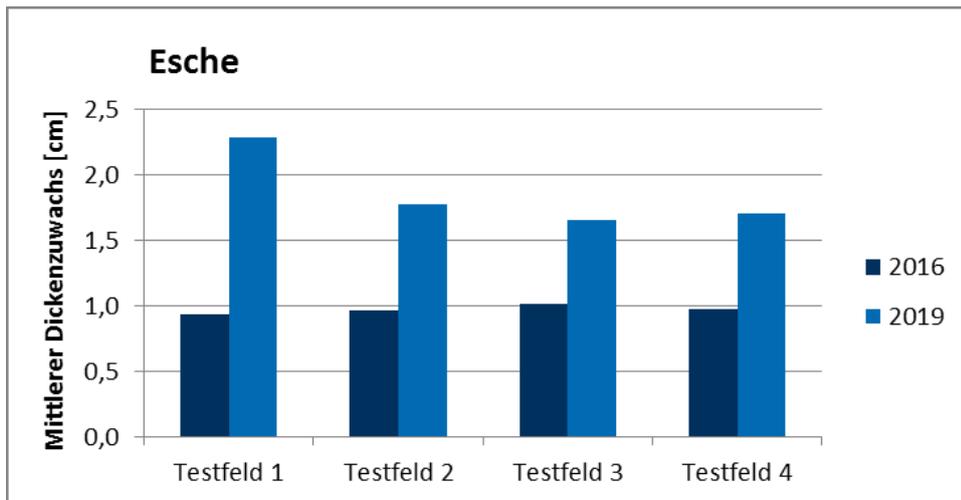
Anhang 90: Mittlerer Dickenzuwachs Schlehe 2016 bis 2019, Deponie Wetro



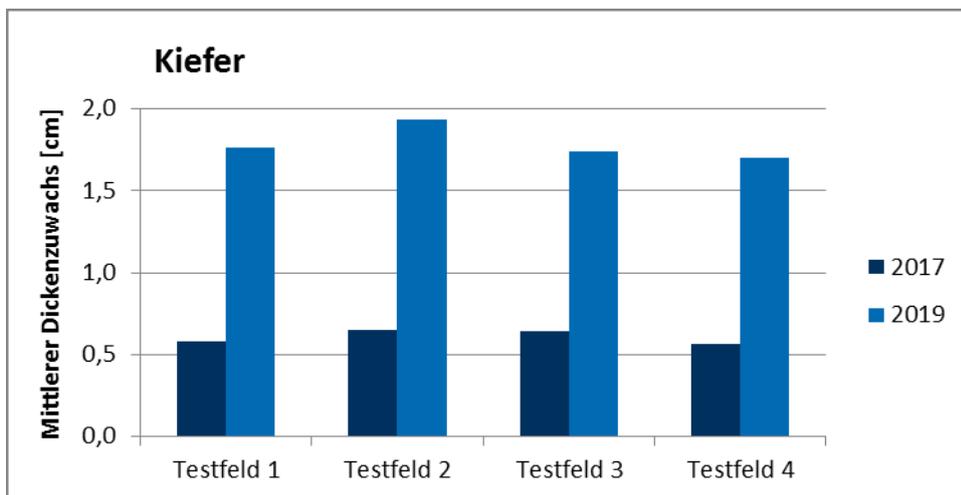
Anhang 91: Mittlerer Dickenzuwachs Eibe 2016 bis 2019, Deponie Wetro



Anhang 92: Mittlerer Dickenzuwachs Esche 2016 bis 2019, Deponie Wetro



Anhang 93: Mittlerer Dickenzuwachs Kiefer 2016 bis 2019, Deponie Wetro



Email-Korrespondenzen

Anhang 94: Email Friederich - Deponien in Sachsen (FRIEDERICH 2019b)

Do 29.08.2019 12:21

An: Penckert, Paula

„Sehr geehrte Frau Penckert,

die u.g. Website ist noch immer aktuell. Die dortige Abbildung stellt nur die öffentlich-rechtlichen (Siedlungsabfall)Deponien dar. Die weiteren Deponien, die in Sachsen betrieben werden, sind privatwirtschaftlich organisiert. Folgende Deponien sind in Sachsen im Betrieb:

Wetro-Puschwitzer Feld [DK III], Grumbach [DK II], Gleina [DK 0], Soculahora [DK 0], Rothschönberg (erst seit Jahresende 2018) [DK I], Gröbern (örE) [DK II] Kunnorsdorf (örE) [DK II], Cröbern (örE) [DK II mit Abschnitten DK III] [...] Mit freundlichen Grüßen Ines Friederich“

Anhang 95: Email Andersch - Altdeponien in Dresden (ANDERSCH 2019)

Di 30.07.2019 09:59

An: Penckert, Paula;

„Hallo Frau Penckert, die Zahl der Deponien schwankt ein wenig, da immer wieder mal Objekte diesen Status neu erlangen oder bei manchen Objekten festgestellt wird, dass doch kein Deponiebetrieb nachweisbar ist. Insofern sind die genannten Zahlen für K I bis K III nur „grobe“ Angaben. Die Diskrepanz entsteht vermutlich aus der nicht sauberen Trennung von Altdeponien (außerhalb der DepV) und Deponien, die der DepV unterliegen. Insgesamt sind derzeit im Datenbestand 555 Deponien, also Altdeponien K I bis K III (512 Objekte) und Deponien nach DepV (DK 0 bis DK III). 16 Deponien wurden bereits aus der Nachsorge entlassen, insgesamt waren/sind es also 571 Objekte. In der Nachsorge sind derzeit 412 Objekte. [...] Beste Grüße, J. Andersch“

Anhang 96: Email Kaiser Destatis - Grundfläche von Deponien (KAISER 2019)

Di 16.07.2019 10:31

An: Penckert, Paula;

„Sehr geehrte Frau Penckert
vielen Dank für Ihre Anfrage vom 12 Juli 2019. Die gewünschten Daten liegen im Informationsangebot der amtlichen Statistik nicht vor. [...] Mit freundlichen Grüßen Im Auftrag Angelika Kaiser“

Anhang 97: Email Strehle - Informationen zur Deponie Wetrot (STREHLE 2019a)

08.01.2019

12:58

An: Penckert, Paula

„Sehr geehrte Frau Penckert, wie gewünscht, anbei ein paar Angaben zu unserer stillgelegten Deponie Wetrot Ostfeld. Die insgesamt abgelagerte Menge beträgt 4.390.292t. Der Deponieabschnitt, in welchem die Versuchspflanzungen erfolgten, wurde in 2015 oberflächenabgedeckt. Dieses war der letzte Deponieabschnitt, so dass nachfolgend am 30.11.2016 mit Bescheid der Landesdirektion Sachsen die endgültige Stilllegung der Deponie erfolgte. Anbei ein Regelprofil zum Aufbau der Oberflächendichtung. Abweichend davon, wurde im Plateaubereich (also der Bereich der Versuchspflanzungen) zusätzlich 1m Erdaushub eingebaut, so dass dieser nunmehr 2m Gesamtmächtigkeit besitzt. Im Bereich der Versuchspflanzungen erfolgte ein anderer Rekultivierungsschichtenaufbau. Dieser Bereich wurde in 4 Teilfelder unterteilt, mit jeweils unterschiedlichem Schichtenaufbau (siehe Anhang). Ich hoffe, das hilft Ihnen weiter. Mit freundlichen Grüßen René Strehle“

Anhang 98: Email Gesellmann - Durchlässigkeitsversuche (GESELLMANN 2019a)

Fr 01.11.2019 11:27

An: Penckert, Paula

„Hallo Paula, [...] Die Auswertung der Scherversuche erfolgt meistens, auch wie in diesem Fall, in dem untersuchten Spannungsbereich. Weiterhin wird für die Auswertung der maximale Wert der korrigierten Scherspannung für den jeweiligen Versuch benutzt. Die Höhe der Peakwerte hängt von der Vorbelastung bzw. Verdichtung der Probe ab und wird maximale Scherfestigkeit oder Peakscherfestigkeit genannt. Bei weiterer Scherung sinkt die Scherfestigkeit auf ein fast gleichbleibendes Niveau ab, bei Verwendung dieser Messwerte spricht man von der Bestimmung der Restscherfestigkeit. Ein aufbereiteter Boden (Auflösung alle durch die Bodenentstehung gebildeten Verbindungen) der bis zu einer Normalspannung belastet wird, ohne eine nachfolgende Entlastung, gilt als normalkonsolidiert. Diese

normalkonsolidierten Böden weisen beim Abschervorgang keinen eindeutigen Peakwert in der Scherspannung auf und verbleiben auf dem gleichen Niveau und sinken erst nach einer längeren Scherphase leicht ab. In diesem Fall sollte die Schergerade durch den Nullpunkt verlaufen da die Peakscherfestigkeit der Restscherfestigkeit entspricht. Böden die eine Vorbelastung oder Verdichtung erfahren haben nennt man überkonsolidierte Boden da die entstandene Struktur im Boden nicht mehr den aktuellen Spannungszustand in der Probe entspricht. Bei diesen Böden können hohe Unterschiede zwischen der Peakscherfestigkeit und der Restscherfestigkeit entstehen. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung der Schergeraden nach oben und einem Verlauf der nicht durch den Nullpunkt verläuft. Der Schnittpunkt wird auch als Kohäsion bezeichnet. Obwohl es in den meisten Fällen einen scheinbare Kohäsion ist die rein durch den linearen Verlauf der Geraden geometrisch erzeugt wird. Mittlerweile geht man eher davon aus, dass es sich bei der "Schergeraden" um einen gekrümmte Spannungsumhüllenden handelt. Gerade bei dichten grobkörnigen Materialien die wenig Feinanteile aufweisen kann die Auswertung mit der traditionellen Schergeraden zu einer hohen scheinbaren Kohäsion führen, die physikalisch nicht belegt ist. Bei den untersuchten Bodenproben haben wir ein verdichtetes Material aus verschiedene Bestandteilen. Die erreichte Verdichtung hat dazu geführt, das sich die Versuchskurven mit geringeren Auflasten eher überkonsolidiert und die Versuchskurven mit höherer Auflast eher normalkonsolidiert Verhalten. Dies ist besonders gut an den Verläufen der der Scherersetzung zu erkennen. Die bei dichten Böden zu einer Hebung führen. Die dichteren Teilversuche heben beider der Auswertung der Versuche die Schergerade an und erzeugen somit eine scheinbare Kohäsion. Einige Streuungen könnten auch aus dem nicht homogenen Gemisch der einzelnen Bodenproben entstehen. [...] Silvio“

Anhang 99: Email Gesellmann - AW: Durchlässigkeitsversuche (GESELLMANN 2019b)

18.11.2019 18:09

An: Penckert, Paula

Hallo Paula, [...] Zum Nachweis der Standsicherheit von Böschungen sind die Scherparameter notwendig. Und die Berechnung ist ein typisches geotechnisches Problem. Doch in diesem Fall handelt es sich um einen Deponiekörper. Und dabei ist die Aussage des zweiten Satzes entscheidender. "Die Standsicherheit ist für das gesamte Oberflächenabdichtungssystem nachzuweisen" Zu dem gesamte Oberflächenabdichtungssystem gehören aber z.B. mineralische Dichtung, Dichtungsbahn aus Kunststoff, Vlies, Drainagematerial, Rekultivierungsschicht und vielleicht noch mehr Schichten die mir jetzt aber nicht einfallen. Für die Standfestigkeitsberechnung müsste man die Scherfestigkeit zwischen allen Konstruktionsschichten einzeln ermitteln und die gesamte Geometrie mit allen Schichten betrachten. Ich denke, dass sollte nicht Teil deiner Arbeit sein. Die ermittelten Reibungswinkel liegen, wie du geschrieben hast, schon im Bereich von grobkörnigen Böden und sind auch hoch. Anhand der Verläufe der Rahmenscherversuche sieht man, dass die ermittelten Scherspannungen am Peak fast den Werten des kritischen Zustand (am Ende der Normalspannung-Scherspannung-Kurve) ähneln. Und somit der kritische Reibungswinkel fast so hoch ist wie der Peak-Reibungswinkel. Der kritische Reibungswinkel ist eine Materialkonstante und kann nicht kleiner werden. Das würde bedeuten, grob geschätzt, dass einen Böschung nur aus Rekultivierungsmaterial mit einem Gefälle von 25° auch im kritischen Zustand halten sollte. [...] Silvio“

Anhang 100: Email Strehle - Informationen zur Deponie Wetro 2 (STREHLE 2019b)

30.10.2019 08:46

An: Penckert, Paula;

„Hallo Frau Penckert,
die Gesamtfläche der rekultivierten Oberfläche der Deponie Wetro Ostfeld beträgt 218830 m².
[...] Mit freundlichen Grüßen René Strehle

Anhang 101: Email Schmidtchen - Größe Deponie Cröbern (SCHMIDTCHEN 2019)

29.10. 2019 13:25

An: Penckert, Paula

„Hallo Paula,
[...] Im untersetzten Fenster ist die 3-dimensionale Fläche in der Zeile „3D-DGM“ mit
436975,68 m² angegeben. [...]Viele Grüße Christian“

9 Erklärung

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. Dr. -Ing. habil. Christina Dornack
- Dr. -Ing. Axel Zentner
- Ines Friederich und Martin Penckert (Korrekturlesen)

3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist – sofern es sich nicht um eine kumulative Dissertation handelt – auch noch nicht veröffentlicht worden.

5. Sofern es sich um eine kumulative Dissertation gemäß § 10 Abs. 2 handelt, versichere ich die Einhaltung der dort genannten Bedingungen.

6. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

Åsa (Schweden), den 28.02.2020

Paula Penckert

Übereinstimmungserklärung

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Rekultivierung von Deponien unter Betrachtung des Einsatzes von Klärschlammkompost“

wird hiermit bestätigt.

Åsa (Schweden), den 28.02.2020

.....

Unterschrift (Paula Penckert)