



## Deponieworkshop Zittau-Liberec 2017

Deponiebau – EU-Wasserrahmenrichtlinie – Stoffströme und Deponierückbau

09.-10. November 2017



# Skládkový workshop Žitava-Liberec 2017

Výstavba skládek - Směrnice EU, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky látkové proudy a odtěžování skládek

## Wasserhaushalt und Durchwurzelung von geböschten Erdbauwerken

## Vodní režim a prokořenění svažitých zemních staveb

Peter Clemenz<sup>1</sup>; Robert Pabel<sup>2</sup>; Isabelle Weber<sup>1,3</sup>; Marlieb Dedek<sup>1</sup>; Jürgen I. Schoenherr<sup>1</sup>; Jens Engel<sup>2</sup>; Volkmar Dunger<sup>3</sup>; Reiner Schulz<sup>1</sup>

### Kurzfassung

Die Standsicherheit von Böschungen hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Neben der Böschungsneigung, der Böschungshöhe und der Scherfestigkeit des Bodenmaterials, spielen insbesondere der im Erdkörper vorherrschende Wassergehalt, sowie die Durchwurzelung eine bedeutende Rolle. Im Rahmen des Nachwuchsforscherprojektes "Nachhaltige Bodenressourcennutzung", werden in speziell an die Problemstellung angepassten Pflanzkästen die komplexen Zusammenhänge zwischen klimatischen, hydrologischen und materialspezifischen Einflüssen messtechnisch erfasst. Die Bewertung der Durchwurzelung erfolgt in Abhängigkeit von der gewählten Begrünungsvariante. Vergleichsweise werden die beiden Varianten "Rohbodenbegrünung" und "Oberbodenandeckung" gegenübergestellt. Als Optimierungsversuch, wird außerdem eine Kombination aus beiden Methoden untersucht. Im weiteren Verlauf des Projektes soll aus den Ergebnissen der Pflanzkästenversuche eine optimale Begrünungsvariante abgeleitet werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Projektarbeit liegt in der interdisziplinären Charakterisierung und verfahrenstechnischen Aufbereitung von natürlichen und technogenen Substraten. Vorgestellt wird im Rahmen dieses Beitrages der Vergleich zwischen einem natürlich gewachsenen plastischen Ton und einem Ziegelmehl gleicher Kornzusammensetzung.

#### **Abstrakt**

Stabilita svahů závisí na řadě faktorů. Kromě sklonu a výšky svahu a smykové pevnosti půdního materiálu hraje významnou roli obsah vody v zemním tělese a jeho prokořenění. V rámci projektu výzkumného dorostu "Udržitelné využívání půdních zdrojů" jsou ve specifických zařízeních, upravených pro řešení tohoto úkolu, měřeny a zaznamenávány komplexní souvislosti mezi klimatickými, hydrologickými a specifickými materiálovými vlivy. Vyhodnocení prokořenění je prováděno v závislosti na zvolené variantě výsadby zeleně. Porovnávány jsou dvě varianty, "ozelenění surové půdy" a "zakrytí svrchní vrstvy půdy". Jako optimalizační zkouška je kromě toho sledována i kombinace obou metod. Během dalšího průběhu projektu by z výsledků pokusů s rostlinami měla být odvozena optimální varianta pro výsadbu. Další těžiště práce v rámci projektu spočívá v interdisciplinárním popisu a technologické úpravě přirozených a technogenních substrátů. V rámci tohoto příspěvku bude představeno srovnání přirozeného plastického jílu a cihelné moučky se stejným složením zrn.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung, Theodor-Körner-Allee 16, D-02763 Zittau;

E-Mail: Peter.Clemenz@hszg.de, Marlieb.Dedek@hszg.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069 Dresden; E-Mail: Robert.Pabel@htw-dresden.de

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Straße 12, D-09596 Freiberg; E-Mail: Isabelle.Weber@geo.tu-freiberg.de

## 1 Einleitung

Die Thematik der "Nachhaltigen Bodenressourcennutzung" gewinnt immer mehr an Bedeutung, im Besonderen für den Bau von Böschungen. Diese spezielle Problemstellung ergab sich, da es immer wieder zu Hangrutschungen, zum Beispiel an Lärmschutzwällen von Autobahnen kommt. Mit Hilfe von Pflanzkästenversuchen, die mit natürlichen und regional vorkommenden Böden in drei unterschiedlichen Varianten durchgeführt werden, sollen Erkenntnisse zum Verhalten des Bodens aus verfahrens- und geotechnischer, bodenkundlicher und hydrologischer Sicht gewonnen werden. In einem engmaschigen Netz werden Daten zu meteorologischen Parametern, der Vegetation und der Versickerung erfasst. Des Weiteren sollen auch gezielt hergestellte technogene Substrate einbezogen werden, um deren Nutzbarmachung abzuschätzen. Es wird geprüft, ob die natürlichen Bodenressourcen durch die Wiederverwertung anthropogen beeinflussten Materials eingespart werden können, oder sogar verbesserte Eigenschaften erreichbar sind. Es werden erste Ergebnisse vorgestellt.

#### 2 Aufbau der Versuchsstände

Bei den Versuchsständen handelt es sich um sechs speziell an die Problemstellung angepasste Doppelpflanzkästen (Abb. 1), in welchen der Wasserhaushalt und die Durchwurzelung von geböschten Erdbauwerken untersucht werden.



Abbildung 1: Doppelpflanzkasten im Versuchsgewächshaus in Zittau.

Der Versuchsaufbau für die Gewinnung von Referenzdaten zur späteren Ableitung von Optimierungsparametern für die oberste Bodenzone orientiert sich an in der gängigen Praxis durchgeführten Verfahren. Nach ZTV-E-StB und DIN 19731 bzw. DIN 18915 wird für die Herstellung des Unterbodens der Böschung eine optimale Verdichtung gefordert. Diese Anforderungen widersprechen jedoch den optimalen Voraussetzungen für ein gutes Pflanzenwachstum. Da eine Begrünung in jedem Falle erforderlich ist, entwickelten sich verschiedene Ansätze, die oberste, durchwurzelte Bodenschicht zu gestalten. Den oben genannten Vorschriften entsprechend, wird zum einen auf den verdichteten, aufgerauten Unterboden eine 15 cm mächtige humushaltige Oberbodenschicht aufgebracht, in welche das Saatgut aufgegeben wird. Dieses als Oberbodenandeckung (OB) bezeichnete Verfahren birgt trotz der Vorteile des Erosionsschutzes bei dafür empfindlichen Unterböden und des Nährstoffgehalts im Humus den Nachteil der Ausbildung eines "Blumentopfeffektes". Dies bedeutet, dass die Pflanzenwurzeln in der

Oberbodenschicht verbleiben, keine ausreichende Verzahnung mit der Unterbodenschicht entsteht und diese oberste Schicht bei anhaltender Durchnässung auf der Unteren, wie auf einer Gleitschicht, abrutscht.

Dem genannten Verfahren steht eine Rohbodenbegrünung (RB) gegenüber. Hier wird der verdichtete Unterboden nur in geringer Schichtstärke aufgeraut und direkt darauf angesät. Ziel ist es, das Entstehen einer abgleitenden Grenzschicht zu vermeiden und auch bei ungünstigen Begebenheiten einen robusten und stabilen Bewuchs zu etablieren. Problematisch bei diesem Verfahren ist das langsamere Entstehen einer geschlossenen Pflanzendecke, wodurch es insbesondere in der ersten Phase nach Errichtung des Erdbauwerkes verstärkt zu Verschlämmungs- und Erosionserscheinungen kommen kann.

Aus diesen beiden Begrünungsvarianten, lässt sich ein als Mischbodenbegrünung (MB) bezeichneter Optimierungsversuch ableiten, der darin besteht, den Unterboden wie bei der Rohbodenbegrünung in geringer Schichtstärke aufzurauen, eine dünne, humushaltige Oberbodenschicht aufzubringen und in die aufgeraute, leicht gelockerte Unterbodenschicht einzuarbeiten. So könnte u. U. ein schnelleres Aufgehen der Saat, und damit die Etablierung einer stabilen Außenhaut des Bauwerkes bei gleichzeitiger Vermeidung des "Blumentopfeffektes" bewirkt werden.

Diesen drei Möglichkeiten der Gestaltung der oberen Bodenzone entsprechend, wurden die Versuchsstände im Gewächshaus entwickelt und aufgebaut. Die Auswahl des Bodenmaterials erfolgte nach regionalen Gegebenheiten und Problemen hiesiger Bauunternehmen. Als Unterbodenmaterial wurde ein leicht plastischer Ton ausgewählt, welcher bei optimalem Wassergehalt und Proctordichte in die Pflanzkästen eingebaut wurde. Die Größe der Kästen richtet sich nach gängigen Durchwurzelungstiefen und einer sinnvollen Erfassungsmöglichkeit wasserhaushaltlicher Parameter. Deren Erfassung erfolgt über Messtechnik zur Bodenfeuchtemessung, Saugspannung und Bodentemperatur. Gleichzeitig werden die Klimadaten, wie Strahlung, Temperatur und relative Luftfeuchte, direkt im Gewächshaus erfasst. Niederschläge werden nach definierten zeitlichen und mengenmäßigen Vorgaben nach zwei verschiedenen Beregnungsszenarien aufgegeben. Gegenübergestellt werden ein normales (durchschnittliches) und ein trockenes Jahr. Die Parameter Oberflächenabfluss, Erosion von Bodenmaterial und Sickerwasser werden hierbei jeweils erfasst. Die folgende Abbildung (Abb. 2) stellt den Versuchsaufbau schematisch dar.



Abbildung 2: Schematische Darstellung der Versuchsstände zur Untersuchung von Durchwurzelung und Wasserhaushalt von geböschten Erdbauwerken.

Für die Ansaat der Versuchsböschungen wurde eine zertifizierte Regiosaatgutmischung für Böschungen und Straßenbegleitgrün verwendet, um die ab 2020 geforderten neuen Richtlinien zum Ausbringen von Saatgut in der freien Landschaft mit zu berücksichtigen. Mittel- und langfristig, sollen die Entwicklung des Bewuchses (Deckung), Durchwurzelungstiefen und Durchwurzelungsdichten, sowie die Gefügeentwicklung bzw. Aggregatstabilität der obersten Bodenzone

beobachtet und ermittelt werden. Daraus sollen weitere Möglichkeiten der Materialbehandlung und Ressourcenoptimierung abgeleitet werden.

#### 3 Klimatische und hydrologische Aspekte

Die Pflanzkästenversuche finden in einem Gewächshaus statt, um definierte, aber trotzdem realitätsnahe Witterungsbedingungen einstellen zu können. Dazu erfassen eine meteorologische Messstation im Gewächshaus und eine weitere außerhalb kontinuierlich Parameter. Die klimatischen Daten, wie zum Beispiel Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, werden durch automatisches Öffnen und Schließen der Gewächshausfenster an die realen Umgebungsbedingungen angepasst. Die Globalstrahlung ist durch die Glasscheiben des Gewächshauses etwas gedämpft und wird in der Auswertung ebenfalls berücksichtigt. Das Ziel ist die Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes durch die meteorologischen Messwerte, die Vegetation und die pedologischen Parameter in den einzelnen Pflanzkästen, wobei auch eine realitätsnahe, im Folgenden näher erläuterte Beregnung, durchgeführt wird.

Für die Beregnung ist aus hydrologischer Sicht eine meteorologische Datengrundlage von mindestens 30 Jahren für die Betrachtung eines Untersuchungsgebietes heranzuziehen. Aus den Einzelwerten, zum Beispiel Tageswerten, werden Mittelwerte berechnet, die die durchschnittlichen meteorologischen Größen des Gebietes repräsentieren. Für die Pflanzkästenversuche erwiesen sich die Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst, Station Görlitz, unter anderem mit den Parametern Niederschlag, Globalstrahlung, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte, als geeignet [1]. Für die Beregnungsmengen wurde die aktuelle Reihe von 1981-2010 verwendet. Darauf aufbauend wurde jedes hydrologische Jahr (November des Vorjahres bis Oktober des Untersuchungsjahres) auf dessen Gesamt-Niederschlagsmenge, die innerjährliche Verteilung sowie auf tägliche Extremereignisse hin untersucht. Danach wurden ein durchschnittliches, normales Jahr und ein trockenes Jahr ausgewählt. Das hydrologische Jahr 2016 wurde als normales Jahr festgelegt, da es eine relativ durchschnittliche Gesamtniederschlagsmenge und die beste innerjährliche Niederschlagsverteilung der gesamten Datenreihe aufweist. Es wurde anhand der täglichen Niederschlagsmengen überprüft und diese entsprechend auf die Fläche der Pflanzkästen angepasst. Um einen weiteren, wichtigen Aspekt zu betrachten, wurde das trockenste, hydrologische Jahr der gesamten Aufzeichnungsreihe, 2015, ausgewählt, um eine in Zukunft auftretende Erscheinung der Trockenheit auf Böschungen zu erforschen. Auch in dieser Beregnungssituation wurde auf eine gute innerjährliche und tägliche Verteilung der Niederschläge geachtet.

Für die angepasste Beregnung der Pflanzkästenversuche ist auch die Regenintensität zu beachten. Dazu wurden die Starkregenwerte aus dem KOSTRA-Atlas herangezogen [2]. Für die Station Görlitz gibt es Tabellenwerte, in welcher Zeit, welche Regenmengen für die jeweilige Wiederkehrszeit des Niederschlages auftreten. Die Daten wurden als maximale Gießgeschwindigkeit für die täglichen Beregnungsmengen angenommen. Anhand der Messdaten, wie Oberflächenabfluss, Bodenwassergehalt und Restdurchsickerung in Kombination mit der Entwicklung des Bewuchses, den meteorologischen und den pedologischen Parametern, soll ein Vergleich der verschiedenen Pflanzkästenversuche erfolgen.

### 4 Erste Ergebnisse der Pflanzkästenversuche

Nachdem Mitte Mai 2017 alle Vorbereitungen des Bodens in den Pflanzkästen entsprechend oben beschriebenen Aufbaus für die Aufnahme des Saatgutes abgeschlossen waren, wurde am 23.05.2017 das Regiosaatgut für Böschungen und Straßenbegleitgrün in gleichmäßiger, wie vom Hersteller vorgegebener, Schichtstärke von 5 g/cm² ausgesät, leicht angedrückt, befeuchtet und mit einer Mulchabdeckung von 100 g/Pflanzfach abgedeckt (Abb. 3).



Abbildung 3: Ansaat des Regiosaatgutes in den Pflanzkästen im Versuchsgewächshaus in Zittau.

Für eine Woche wurde die Ansaat gleichmäßig feucht gehalten und anschließend entsprechend der entwickelten Gießpläne für die Niederschlagsverteilung eines normalen bzw. trockenen Jahres bewässert. Die für das jeweilige Szenario ermittelten Niederschlagsmengen werden nach definierten zeitlichen und mengenmäßigen Vorgaben manuell aufgegeben. Im wöchentlichen Abstand wurde die Entwicklung der Vegetation durch Schätzung des prozentualen Deckungsgrades (Bodenfläche, die durch Blätter bedeckt wird) und Messung der Wuchshöhe beurteilt.

Das Saatgut ging in allen Kästen gleichmäßig schnell und gut auf. Nach einem Monat konnten schon Deckungsgrade zwischen 20 und 30 % erreicht werden. Die folgende Abbildung (Abb. 4) stellt die durchschnittliche Entwicklung der Deckungsgrade und der maximalen Wuchshöhen aller Versuchsansätze dar.

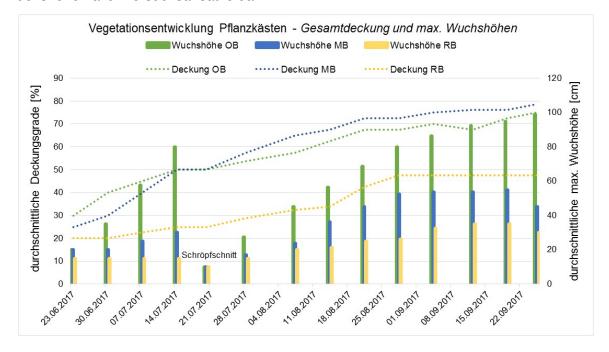


Abbildung 4: Durchschnittliche Vegetationsentwicklung der verschiedenen Versuchsansätze OB, RB und MB unabhängig vom jeweiligen Beregnungsszenario im Vergleich.

Da sich über den beobachteten Zeitraum bisher noch keine deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Niederschlagsszenarien abgebildet haben, wurde aus den vier Ansätzen der jeweiligen Begrünungsvariante (OB, RB, MB) der Mittelwert gebildet.

Mit dem eingebrachten Oberboden eingeschlepptes Saatgut kam ebenfalls zur Entwicklung. Dadurch wurden im Misch- bzw. reinen Oberboden unter Ausbildung einer Dominanz gegenüber ausgesäten Kräutern der Saatgutmischung höhere Deckungsgrade festgestellt. Mitte Juli 2017 zeigten der Oberboden- und Mischbodenansatz bereits eine Gesamtdeckung von 50 %, wohingegen bei der Rohbodenvariante erst ein Deckungsgrad von ca. 25 % erreicht wurde. Auch die maximalen Wuchshöhen zeigten deutliche Unterschiede. Im Oberboden hatten vereinzelte Gräser Wuchshöhen von 80 cm erreicht, im Mischboden betrug die max. Wuchshöhe ca. 25 cm und im Rohboden nur knapp über 10 cm. Zum betrachteten Zeitpunkt wurde bei allen Pflanzkästen ein Schröpfschnitt (21.07.2017) durchgeführt, um die starkwüchsigen (Fremd-)arten zu hemmen und der eigentlichen Ansaat eine weitere Entwicklung zu ermöglichen. Im Laufe der nächsten zwei Monate nahmen das Längenwachstum und die Gesamtdeckungsgrade weiter zu (Abb. 4), jedoch in verschiedenem Maße. Die Pflanzkästen mit der starken Oberbodenschicht erreichten bald hohe Gesamtdeckungsgrade von 70 - 80 %, jedoch mit teilweise sehr unterschiedlich starker Ausprägung innerhalb eines Kastens. Der Oberhang der Versuchsböschungen weist in der Regel eine 100%ige Deckung auf, der Unterhang blieb teilweise fast ohne Deckung, weshalb im August nachgesät wurde. Ein Aufgehen dieser Neuansaat gelingt auch nur stellenweise, da Kräuter des Oberhanges durch ihren Massewuchs den Unterhang stellenweise mit abdecken. Arten, die besonders dominant und massewüchsig auftreten, sind Gemeiner Stechapfel, Gewöhnliche Hühnerhirse, Kahle Fingerhirse, Kleines Knopfkraut, Große Brennnessel, Schöllkraut und Raps. Die Brennnesseln, der Gemeine Stechapfel und der Raps wurden entfernt, die anderen, etwas weniger hohe Deckungsgrade einnehmenden Pflanzen, wurden belassen, um die Konkurrenzwirkung zum ausgebrachten Saatgut zu beobachten. Von den ausgesäten Kräutern konnten sich nur Spitzwegerich, Wilde Möhre, Klee und Gewöhnliche Scharfgarbe neben den starkwüchsigen Arten des Oberbodens behaupten. Am Hangfuß mit geringer Deckung wachsen auch Labkraut, Weiße Lichtnelke und Kleiner Wiesenknopf.

Auf dem gegenteiligen Versuchsansatz, dem Rohboden, entwickelte sich die Vegetation hingegen sehr gleichmäßig. Zwar sind die Gesamtdeckungsgrade immer noch erst bei ca. 50 %, jedoch wesentlich gleichmäßiger über die gesamte Böschung verteilt. Nur an einigen Stellen des Unterhangs gibt es Kahlstellen mit leichten Erosionserscheinungen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist das Höhenwachstum der Gräser und Kräuter. Die Wuchshöhe der Gräser erreicht 10 bis 15 cm, Kräuter erzielen im Durchschnitt max. Wuchshöhen von 30 cm. Von den ausgesäten 40 Kräuterarten sind elf aufgegangen und zum Teil zur Blüte übergegangen. Beispiele sind verschiedene Kleearten, Gewöhnliches Ferkelkraut, Gewöhnliche Schafgarbe, Scharfgarbe, Kornblume und Mohn.

Die Vegetationsentwicklung auf dem Mischboden nimmt eine mittlere Stellung ein. Die Gesamtdeckungsgrade ähneln denen der Oberbodenvariante, jedoch sind die Arten wie beim Rohboden wesentlich gleichmäßiger über die gesamte Böschung verteilt. Die maximalen Wuchshöhen liegen ebenfalls zwischen denen der bereits genannten Varianten. Arten der ausgesäten Mischung entwickeln sich gut neben den etwas dominanteren Arten, die durch den Oberboden auch hier mit eingebracht wurden. Die folgende Abbildung (Abb. 5) zeigt die Vegetationsentwicklung auf Oberboden, Rohboden und Mischboden ca. 3 Monate nach der Ansaat.







Abbildung 5: Vegetationsentwicklung auf OB, RB und MB (von links nach rechts) drei Monate nach der Ansaat.

Die oben aufgezeigten Vor- und Nachteile der jeweiligen Begrünungsvarianten scheinen sich in den ersten Beobachtungen zu bestätigen und sollen nach der vollständigen Vegetationsperiode sowie im Folgejahr abschließend bewertet werden. Die beiden unterschiedlichen Niederschlagsszenarien zeichnen sich momentan noch kaum in der oberirdischen Vegetationsentwicklung ab, weshalb auch die im Diagramm (Abb. 4) dargestellten Werte jeweils Mittelwerte aller vier Pflanzfächer der entsprechenden Begrünungsvariante darstellen. Es ist zu erwarten, dass sich die unterschiedlichen Niederschlagsmengen erst im Laufe eines längeren Beobachtungszeitraums in der Vegetationsentwicklung abbilden werden.

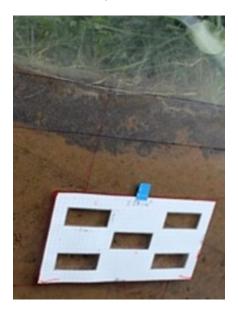


Abbildung 6: Schablone zur Erfassung des Wurzelwachstums nach BESTE.

Neben der oberirdischen Vegetationsentwicklung wird über die seitlich eingebauten Sichtfenster außerdem das Wurzelwachstum beobachtet. Mittels einer Messschablone von 50 cm² (fünf Fenster zu je 10 cm²) werden jeweils am Ober- und Unterhang gestaffelt in Schritten von 10 cm in der Vertikalen die Wurzeln ausgezählt und anschließend die Wurzeldichte (Wurzeln/cm²) errechnet (Abb. 6). Diese Methode orientiert sich an der Vorgehensweise nach BESTE [3].

Da das Wurzelwachstum am Rand eines Pflanzkastens von dem im Inneren des Bodenkörpers abweichen kann, dient die derzeitige Beobachtung nur einer orientierenden Bewertung. Nach Öffnen der Kästen kann die Wurzeldichte direkt bestimmt werden. Aufgrund der Datenfülle werden hier nur drei Diagramme abgebildet, die einen vergleichenden Einblick zum

Wurzelwachstum jeweils am Oberhang der verschiedenen Begrünungsvarianten ca. 4 Monate nach der Ansaat geben (Abb. 7, Abb. 8 und Abb. 9).

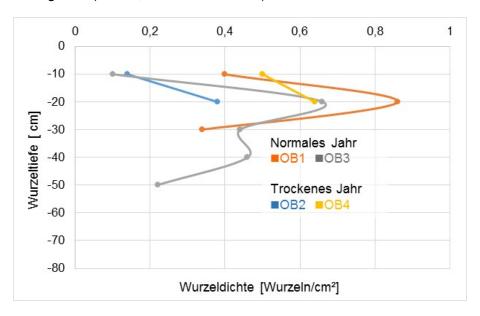


Abbildung 7: Wurzeldichte und Wurzeltiefe im Oberhang des Oberbodens am 25.09.2017.

Im Oberboden wird ersichtlich, dass einheitlich in allen Kästen momentan die höchste Durchwurzelungsdichte in 20 cm Tiefe erreicht wird. Dies ist die Grenzschicht zwischen Oberboden und Unterboden. Jedoch werden in OB1 und OB3 auch größere Wurzeltiefen als 20 cm erreicht. Diese beiden Versuchsansätze werden mit normalen Niederschlagsmengen begossen. Die Kästen OB2 und OB4 mit den Niederschlagsmengen des trockenen Jahres erreichen derzeit nur Durchwurzelungstiefen von max. 20 cm. Die auch von außen zu beobachtende, etwas verstärkte horizontale Ausrichtung der Wurzeln in dieser Tiefe, könnte evtl. auf die Ausbildung des "Blumentopfeffektes" hinweisen. Doch wie bereits erwähnt, ist eine abschließende Beurteilung erst nach einer längeren Versuchsdauer und dem Öffnen der Pflanzkästen möglich.

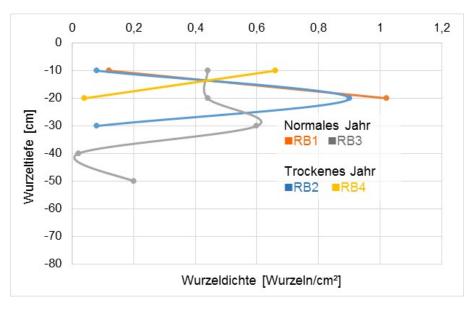


Abbildung 8: Wurzeldichte und Wurzeltiefe im Oberhang des Rohbodens am 25.09.2017.

In den Kästen der Rohbodenbegrünung ist die an der Glaswand zu beobachtende Wurzelentwicklung noch recht unterschiedlich, so dass sich noch keine klaren Aussagen ableiten

lassen. Außer bei RB3 liegen die höchsten Durchwurzelungsdichten zwischen 20 und 30 cm Tiefe, die maximalen Durchwurzelungstiefen reichen von 20 bis 50 cm. Von den Kästen der normalen Bewässerung hat RB1 die höchste Wurzeldichte, RB3 hingegen eine tiefere Durchwurzelung.

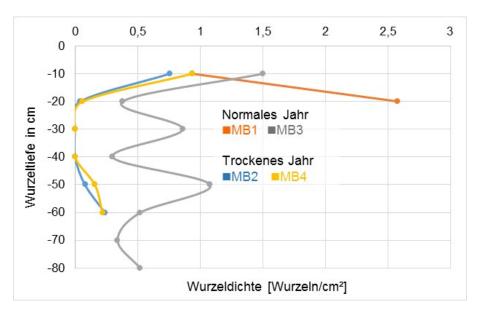


Abbildung 9: Wurzeldichte und Wurzeltiefe im Oberhang des Mischbodens am 25.09.2017.

Im Mischboden werden von allen Versuchsansätzen zurzeit die größten maximalen Durchwurzelungstiefen erreicht. Wobei sich gerade hier die beiden Kästen des normalen Niederschlagregimes sehr gegensätzlich verhalten. Während in MB1 bei sehr hoher Wurzeldichte nur eine Wurzeltiefe von 20 cm erreicht wird, konnte in MB3 eine Wurzeltiefe von 80 cm ermittelt werden. Einige Wurzeln haben bereits die Drainageschicht erreicht. Auch hier ist die Wurzeldichte relativ hoch. Die beiden Kästen der trockneren Bewässerung verhalten sich fast gleich. Die höchste Wurzeldichte ist in der obersten Bodenzone zu finden. Jedoch werden beide Pflanzkästen mit noch geringer Dichte, aber schon bis in 60 cm Tiefe durchwurzelt.

Wie bei der oberirdischen Vegetationsentwicklung scheint die Mischbodenvariante auch für das Wurzelwachstum ein guter Ansatz zu sein. Jedoch muss in jedem Falle die gesamte Versuchsdauer abgewartet werden.

#### 5 Vergleich von natürlichen und technogenen Bodensubstraten

Unter dem Begriff "Technogene Substrate" werden all diejenigen Substrate zusammengefasst, die nicht natürlichen Ursprungs sind, sondern ein Resultat anthropogener Verarbeitungs-, Veränderungs- oder Umlagerungsprozesse. Dazu zählen neben ausgewählten Kornfraktionen natürlicher Böden, auch unterschiedliche mineralische Reststoffe, wie Schlacken, Aschen, Schlämme oder RC-Materialien. Viele dieser Substrate unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften mitunter stark von natürlich gewachsenen Böden. Für die Verwertung derartiger Substrate, welche aus industriellen oder technischen Prozessen hervorgehen, stellt sich auch die Frage, inwiefern sie sich als Rohböden für eine anschließende Begrünung eignen [4]. Nachfolgend wird ein für die Ziegelherstellung geeigneter Lößlehm mit einem aus Ziegelbruch hergestellten Substrat gleicher bzw. sehr ähnlicher Körnung verglichen. Die entsprechenden Korngrößenverteilungssummenkurven sind in Abb. 10 dargestellt.

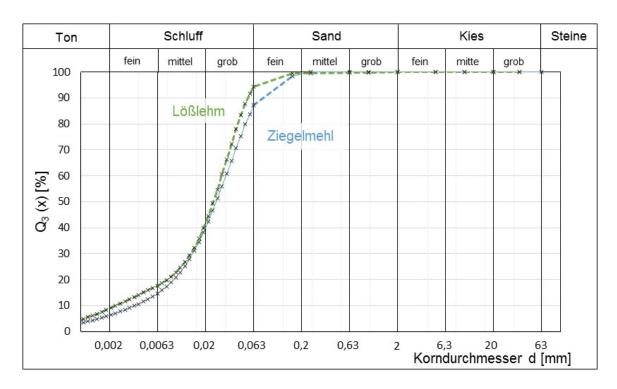


Abbildung 10: Korngrößenverteilung Lößlehm und Ziegelmehl.

Beide Substrate bestehen überwiegend aus Schluff. Nach DIN EN ISO 14688-1 können sowohl der Lößlehm, als auch das Ziegelmehl, als toniger, feinsandiger Schluff eingestuft werden und wären somit in den Bereich der feinkörnigen Böden einzuordnen [5]. Insbesondere ein im Feinkornanteil enthaltener Tonmineralgehalt nimmt großen Einfluss auf einige relevante geotechnische Materialeigenschaften, wie beispielsweise Wasserdurchlässigkeit, Scherfestigkeit, Plastizität oder Verdichtungsverhalten [6]. Die Korngrößenverteilung allein gibt nur unzureichend Aufschluss über das Verhalten eines Bodens bzw. die Eignung eines Substrates für Anwendungen im Erdbau.

Zur besseren Klassifizierung bindiger Böden werden daher zusätzlich zur Korngrößenverteilung die Zustandsgrenzen nach DIN 18122 bestimmt. Der Lößlehm konnte daraufhin als leicht plastischer Ton (TL) eingestuft werden. Für das Ziegelmehl konnten die definierten Versuche aus folgendem Grund nur teilweise durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Fließgrenze nach CASAGRANDE (DIN 18122), wird ein Teil der aufbereitenden Probe mit einem Spatel in eine Messingschale gestrichen. Anschließend wird mit einem speziellen Furchenzieher senkrecht zur Schale eine Furche in die Probe gezogen. Die Messingschale wird daraufhin leicht angehoben und wieder fallengelassen, bis die Furche auf einer Länge von 10 mm wieder geschlossen ist. Der Wassergehalt, bei dem sich die Furche nach 25 Schlägen dementsprechend wieder geschlossen hat, wird als Fließgrenze bezeichnet. Zulässig sind nach DIN 18122 jedoch nur Wassergehalte, bei denen mind. 5, aber höchstens 40 Schläge erreicht werden [7]. Ein solcher Wassergehalt ließ sich für das Ziegelmehl nicht einstellen. Erst ab einem Wassergehalt von ca. 40 % war es überhaupt möglich, eine Furche in das Material zu ziehen, ohne dabei die gesamte Probe zu zerstören. Geschlossen hat sich diese Furche jedoch bereits nach wenigen Schlägen. Auch die Ausrollgrenze konnte nicht sicher bestimmt werden, da das Material auch bei hohem Wassergehalt sofort anfängt zu bröckeln. Damit unterscheidet sich das Ziegelmehl hinsichtlich seiner plastischen Eigenschaften sehr stark vom Lößlehm. Trotz der sehr ähnlichen Korngrößenverteilung verhält sich das Ziegelmehl im Gegensatz zum Lößlehm nicht wie ein bindiges Material. Als mögliche Ursachen für das gegensätzliche Verhalten kommen große Unterschiede bei der Kornform, sowie unterschiedliche chemische Bindungseigenschaften in Betracht.

Da die Verdichtungsfähigkeit bindiger Böden sehr stark vom Wassergehalt abhängt, wurde im Weiteren für beide Materialien der Proctorversuch nach DIN 18127 durchgeführt. Die Proctordichte bezeichnet die höchste erreichbare Dichte eines Bodens, welche sich unter definierter Verdichtungsarbeit beim dazugehörigen optimalen Wassergehalt einstellt [8]. Das folgende Diagramm (Abb. 11) stellt die Proctorkurven der beiden Materialien gegenüber.

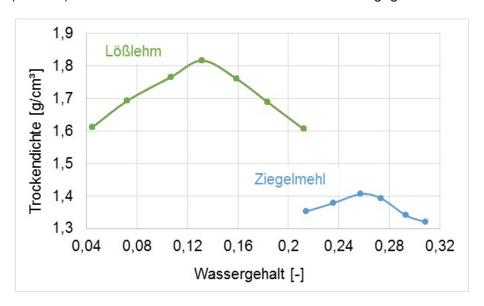


Abbildung 11: Proctorkurve Lößlehm und Ziegelmehl.

Bei einem Wassergehalt von ca. 13 % lässt sich der Lößlehm im Proctorversuch bis zu einer Trockendichte von reichlich 1,8 g/cm³ verdichten. Beim Ziegelmehl liegt der optimale Wassergehalt mit ca. 26 % wesentlich höher. Erreichbar ist bei diesem Wassergehalt eine Trockendichte von 1,4 g/cm³. Die Ursache für den deutlich höheren optimalen Wassergehalt könnte im Abbinden von Wasser, bedingt durch den höheren Kalkgehalt des Ziegelmehls, liegen. Während für den Lößlehm nach SCHEIBLER (DIN 18129) nur ein mittlerer Kalkgehalt von 0,3 % bestimmt wurde, liegt der mittlere Kalkgehalt des Ziegelmehls bei 7,6 %. Die Geschwindigkeit, mit welcher Wasser unter dem Einfluss der Schwerkraft in einem Boden versickert, wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert kf beschrieben. Einen wesentlichen Einfluss auf den kf-Wert nehmen die Korngröße, die Korngrößenverteilung sowie die Lagerungsdichte. Zum Vergleich der beiden Substrate wurde das Material bei mittlerer Lagerungsdichte entsprechend der Einstufung nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 auf seine hydraulische Wasserdurchlässigkeit hin untersucht. Die Ergebnisse des Laborversuchs zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach DIN 19683-9 sind in der folgenden Tabelle (Tab. 1) zusammengefasst.

Tabelle 1:  $k_r$ -Wert Lößlehm und Ziegelmehl bei definierter Trockendichte.

| Substrat       | Trockendichte nach<br>DIN EN ISO 11272 | Durchlässigkeitsbeiwert<br>nach<br>DIN 19683-9 |
|----------------|--|--|
| Lößlehm        | 1,30 g/cm <sup>3</sup>                 | 7,3 x 10 <sup>-7</sup> m/s                     |
| Ziegelmeh<br>I | 1,39 g/cm³                             | 5,9 x 10 <sup>-7</sup> m/s                     |

Im Hinblick auf ihre hydraulische Durchlässigkeit unterscheiden sich die beiden Materialien nur unwesentlich voneinander. Sowohl der Lößlehm, als auch das Ziegelmehl, sind nach KA5 als "gering wasserleitfähig" einzustufen [9].

Um zu beurteilen, inwiefern sich technogener und natürlich gewachsener Schluff im Hinblick auf Pflanzenwachstum und Wasserhaushalt unterscheiden, wurden beide Substrate bei optimalem Wassergehalt und mittlerer Lagerungsdichte in spezielle Mitscherlich-Pflanzgefäße eingebaut und mit Messtechnik zur Erfassung von Saugspannung und Wassergehalt ausgestattet. Um gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen, wurden beide Substrate zu Beginn des Versuches durch Wasserzugabe komplett aufgesättigt.

Nach der Aufsättigung wurde mit jeweils 20 Körner eines schnell keimenden Ammengrases (Roggentrespe) angesät. In der darauffolgenden Zeit wurden die Versuchsansätze durch tägliche Wasserzugabe gleichmäßig feucht gehalten. Nach acht Tagen konnte sowohl auf Lößlehm, als auch auf Ziegelmehl, ein gleichermaßen gutes Aufgehen des Saatgutes beobachtet werden. In der weiteren Entwicklung kam es jedoch auf dem Lößlehm zu einem stärkeren Längenwachstum des Grases. Die folgende Abbildung (Abb. 12) zeigt die beiden Versuchsansätze sechs Wochen nach der Ansaat.



Abbildung 12: Lößlehm (links) und Ziegelmehl (rechts) in Mitscherlich-Pflanzgefäßen sechs Wochen nach der Ansaat mit Roggentrespe.

Nach Aufsättigung der beiden Substrate zu Beginn des Versuches, konnte im Ziegelmehl ein Wassergehalt von 50 Vol-% gemessen werden, im Lößlehm hingegen nur ein Wassergehalt von knapp 44 Vol-% (Abb. 13).



Abbildung 13: Vergleich des volumetrischen Wassergehaltes von Lößlehm und Ziegelmehl.

In den darauffolgenden drei Wochen blieb der volumetrische Wassergehalt in beiden Substraten unter täglicher Wasserzugabe nahezu unverändert. Bei Ziegelmehl ist der Wassergehalt jedoch bezogen auf den Sättigungszustand anfangs stärker abgefallen, bevor er sich in etwa auf einem Level eingepegelt hat. Drei Wochen nach Versuchsbeginn wurde das tägliche Aufgeben von Wasser eingestellt, um daraufhin das Austrocknungsverhalten der beiden Substrate vergleichsweise beobachten zu können. Dabei konnte wiederum beim Ziegelmehl eine anfangs deutlich schnellere Wasserabgabe beobachtet werden, und zwar von 49 Vol-% auf ca. 41 Vol-% innerhalb der ersten drei Wochen nach Beenden des Gießens. Im Lößlehm blieb der Wassergehalt während dieser drei Wochen mit ungefähr 42 Vol-% weitestgehend konstant. Der weitere Austrocknungsverlauf wird beobachtet.

#### 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bewertung der obersten Bodenzone von Erdbauwerken unter Verwendung regionaltypischer Bodenmaterialien und einer nachfolgenden Ableitung optimierender Verfahren zur nachhaltigen Bodenressourcennutzung, wurden in einem automatischen Gewächshaus Versuchsböschungen in speziell gefertigte Pflanzkästen eingebaut. Unter gleichen klimatischen Bedingungen werden die Entwicklung der Vegetation, das Wurzelwachstum und die Bodenentwicklung in drei verschiedenen Varianten der Gestaltung jener Bodenzone über den Zeitraum einer bzw. zwei Vegetationsperioden beobachtet und beurteilt. Weiterhin werden Daten zur Wasserbewegung im Boden aufgenommen, deren Auswertung in Zukunft unter Einbeziehung der im Gewächshaus erfassten klimatischen Parameter und des unterschiedlichen Niederschlagsregimes erfolgen soll.

Zum jetzigen Zeitpunkt des Versuchsverlaufes lassen sich als erste Ergebnisse der Vegetationsentwicklung darstellen, dass sich bei der Variante zur Gestaltung der obersten durchwurzelbaren Bodenzone mittels Oberbodenabdeckung eine massewüchsige Vegetationsschicht vor allem durch eingeschlepptes Saatgut herausbildet. Die Rohbodenbegrünung stellt sich als günstige Variante für ein gleichmäßiges Aufgehen des speziell vorgesehenen Saatgutes dar. In einer Mischbodenvariante kann dies durch den Humusgehalt der dünnen eingearbeiteten Oberbodenschicht optimiert werden. Das Wurzelwachstum erscheint, soweit von außen durch die Sichtfenster beurteilbar, auch hier optimale Bedingungen zu finden und diese Bodenzone gut zu stabilisieren. Aber auch im Ansatz der Rohbodenbegrünung kommt es trotz ungünstiger Bedingungen im verdichteten Boden durchaus zu einem Wurzelwachstum bis in tiefere Schichten. Die Ausbildung des "Blumentopfeffektes" beim Aufbringen einer stärkeren Oberbodenschicht auf dem verdichteten Unterboden, lässt sich aufgrund des horizontalen Wurzelwachstums am Sichtfenster vermuten. Die abschließende Beurteilung dessen steht noch für den Zeitpunkt des Öffnens der Pflanzkästen aus.

Der Vergleich zwischen Lößlehm und einem mittels Stiftmühle hergestellten Ziegelmehls sehr ähnlicher Korngrößenverteilung hat gezeigt, dass sich die beiden Materialien in den durchgeführten Versuchen mitunter sehr gegensätzlich verhalten. Besonders das vom Wassergehalt abhängige Verdichtungsverhalten von Ziegelmehl unterscheidet sich sehr stark von dem des natürlich gewachsenen Materials. Bei Lößlehm wird im Proctorversuch bei geringerem optimalem Wassergehalt eine deutlich höhere Lagerungsdichte erreicht. Ein interessanter Aspekt ist in dem unterschiedlichen Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten zu sehen. Ziegelmehl ist in der Lage, kurzfristig mehr Wasser aufzunehmen, welches jedoch bei anschließender Austrocknung wieder schnell an die Umgebung abgegeben wird.

Die hydraulische Leitfähigkeit der beiden Substrate unterscheidet sich hingegen nur unwesentlich voneinander. Auch eine Ansaat mit schnellwachsender Roggentrespe ließ sich auf beiden Substraten gleichermaßen realisieren.

## 7 Danksagung

Die vorliegende Veröffentlichung entstand im Rahmen des Verbundforschungsprojektes "Nachhaltige Umweltingenieurtechnik – Teilprojekt 1: Nachhaltige Bodenressourcennutzung", welches durch Mittel aus dem Europäischen Sozialfonds gefördert wird

(Antragsnummer 100270155, Projektlaufzeit 01.07.2016 bis 30.06.2019). Das Projekt wird am Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (iTN) der Hochschule Zittau/Görlitz, der HTW Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur, sowie in Kooperation mit der TU Bergakademie Freiberg, durchgeführt.

## Literaturverzeichnis

- [1] DEUTSCHER WETTERDIENST (HRSG.): Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. jwww.rekis.org., Recherchiert am 05.05.2017
- [2] BARTELS, H.; DIETZER, B.; MALITZ, G.; ALBRECHT, F.M.; GUTTENBERGER, J.: KOSTRA-DWD-2000: Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000). Fortschreibungsbericht des Deutschen Wetterdienstes, Abteilung Hydrometeorologie. Selbstverlag, Offenbach a. M., 2005
- [3] BESTE, A.: Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Justus-Liebig-Universität Gießen, Mainz, 2002
- [4] BLOEMER, S.: *Möglichkeiten der Begrünung technogener Bodensubstrate.* Fachzeitschrift für Garten-, Landschafts-, Spiel- und Sportplatzbau, Nr. 09, S.51 ff., 2012
- [5] DIN EN ISO 14688-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung Bennenung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden. 2013
- [6] HILTMANN, W.; STRIBRNY, B.: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 5 Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer, Berlin, 1998
- [7] DIN 18 122-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Zustandsgrenzen. 1997
- [8] DIN 18 127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Proctorversuch. 2012
- [9] AD-HOC-AG BODEN (HRSG.): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. E. Schweitzerbart'sche, Hannover, 2005