

Umweltforschung in Baden-Württemberg

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums  
Umweltforschung Baden-Württemberg 2019

18./19. März 2019  
Schwabenlandhalle Fellbach  
Guntram-Palm-Platz 1, 70734 Fellbach

## **Stand sicherheits- und Bodeneigenschaften von Rekultivierungssubstraten**

von

P. Wattendorf, O. Ehrmann, W. Konold  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Professur für Landespflege

T. Triantafyllidis, A. Bieberstein, H. Reith  
Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Förderkennzeichen: L7515003 + 15009

Die Arbeiten dieses Projekts werden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt

## 1. Ausgangslage

Rekultivierungsschichten bilden die oberste Komponente von Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Sie dienen der Einbindung der Deponie in die Landschaft und der Folgenutzung, dem Schutz der tiefer liegenden Dichtungskomponenten sowie der Regulierung des Wasserhaushalts. Da den technischen Komponenten ein altersbedingtes Nachlassen der Funktion unterstellt werden muss, ist die Rekultivierungsschicht auch für die Langzeitsicherung von Bedeutung: Ein möglichst großer Anteil des Niederschlags soll in der Rekultivierungsschicht zwischengespeichert und durch den Bewuchs verdunstet werden, damit die Absickerung geringer wird. Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts (DepV 2009) differenziert zwischen „Rekultivierungsschicht“ und „Wasserhaushaltsschicht“. Letztere kann eine Abdichtungskomponente ersetzen, wenn sie definierte Anforderungen erfüllt. Laufend aktualisierte Bundeseinheitliche Qualitätsstandards der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA Ad-Hoc AG „DEPONIETECHNIK“ 2016 und 2016a) für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten (BQS 7-1 Rekultivierungsschichten, BQS 7-2 Wasserhaushaltsschichten) konkretisieren diese Vorgaben und definieren fachliche Grundlagen zur Eignungsbewertung. Diese technischen Regeln stellen hierzu Anforderungen, die eine ganze Reihe von Bodenmaterialien praktisch nur dann erfüllen kann, wenn sie nicht oder lediglich gering verdichtet eingebaut werden.

Im Jahr 2000 wurde in interdisziplinären Forschungsvorhaben (Projekte BWSD 99003, BWD 21010 und BWU 26004) auf der Kreismüldeponie Leonberg eine umfangreiche Versuchsanlage mit zwei Großlysimeterfeldern von je 360 m<sup>2</sup> Fläche installiert. Hier wurden ein praxistaugliches, möglichst bodenschonendes Einbauverfahren exemplarisch erprobt, die Standsicherheit des verwendeten Materials nachgewiesen sowie mögliche Vorteile ohne zusätzliche Verdichtung hergestellter Rekultivierungsschichten für Boden, Vegetation und Wasserhaushalt untersucht und quantifiziert (siehe WATTENDORF et al. 2005, 2015). Die in diesem Langzeitvorhaben gewonnenen Erkenntnisse konnten seitdem in einschlägige technische Empfehlungen (DGGT 2000/2010 und 2006) sowie in die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards 7-1 und 7-2 eingebracht werden.

Die Standsicherheit des Bodenmaterials ist auf Deponien stets relevant, da Böschungen meist große Flächenanteile einnehmen. In Baden-Württemberg werden aufgrund der vergleichsweise komplexen Geologie sehr unterschiedliche Bodenmaterialien für die Rekultivierung eingesetzt. Für den unverdichteten Einbau notwendige Untersuchungen der Schereigenschaften sind aber in der Baupraxis meist nicht kurzfristig durchführbar. Daher wird Boden-

material mit unbekanntem Schereigenschaften aufgrund mangelnder Datengrundlage sicherheitshalber meist stark verdichtet oder teilweise verdichtet eingebaut. So wird die Übertragung der positiven Ergebnisse der Leonberger Versuche (vgl. BIEBERSTEIN et al. 2003) in die Baupraxis durch das Fehlen geeigneter Grundlagen zu Schereigenschaften und zum Standsicherheitsverhalten unverdichteter Bodenmaterialien erschwert.

## 2. Ziele des Vorhabens

Wichtigstes Ziel des aus zwei Teilprojekten bestehenden Vorhabens mit Laufzeit bis 31.07.2019 ist es daher, das Standsicherheitsverhalten und die Bodeneigenschaften der wichtigsten zur Rekultivierung in Frage kommenden Bodenmaterialien Baden-Württembergs zu ermitteln und für die Baupraxis bereitzustellen. Hierdurch soll zukünftig der soweit möglich unverdichtete Einbau<sup>1</sup> des Bodenmaterials unter Berücksichtigung der Standsicherheitsanforderungen in der Praxis vereinfacht werden und eine größere Verbreitung finden. Weiterhin sollen die Leonberger Großlysimeterfelder weiter betrieben werden, um den bestehenden langjährigen Datensatz, auch im Hinblick auf die Validierung von Wasserhaushaltsmodellen, zu ergänzen.

Als Arbeitsziele ergeben sich hieraus:

- Weiterbetrieb der Leonberger Lysimeteranlage und Fortschreibung des langjährigen Datensatzes zum Wasserhaushalt und zur Bodenentwicklung von Rekultivierungsschichten mit unterschiedlich verdichtetem Bodenmaterial.
- Ermittlung und Zusammenstellung der Schereigenschaften, um damit die Grundlage zur Bewertung des Standsicherheitsverhaltens im unverdichteten Zustand für eine repräsentative Auswahl von im Land Baden-Württemberg verbreiteten und für Rekultivierungen in Frage kommenden Bodenmaterialien zu schaffen. Die Kenntnis und Verfügbarkeit dieser Eigenschaften soll zukünftig dazu beitragen, zusätzliche Verdichtungen aus Standsicherheitsabwägungen auf die wirklich notwendigen Fälle zu beschränken.
- Erarbeiten einer Zusammenstellung der Bodeneigenschaften dieser Bodenmaterialien.
- Quantifizieren der Wasserhaushaltsfunktion ausgewählter Bodenmaterialien in verdichtetem und unverdichtetem Zustand im Vergleich zu dem in Leonberg verwendeten Lösslehm-Substrat mittels Wasserhaushaltsmodellierungen.
- Erstellen einer praxisbezogenen Publikation (ggfs. einschließlich Karte) zur Eignung von Bodenmaterialien für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse, bekannter ökologischer Anforderungen sowie geologischer Karten und Bodenkarten.

---

<sup>1</sup> In diesem Text wird unter „unverdichtet“ stets ein Einbau ohne beabsichtigte zusätzliche Verdichtung verstanden.

### 3. Arbeitsprogramm 2018 und Vorgehensweise

#### 3.1. Bodenprobenahme und bodenmechanische Laboruntersuchungen (zu 4.1)

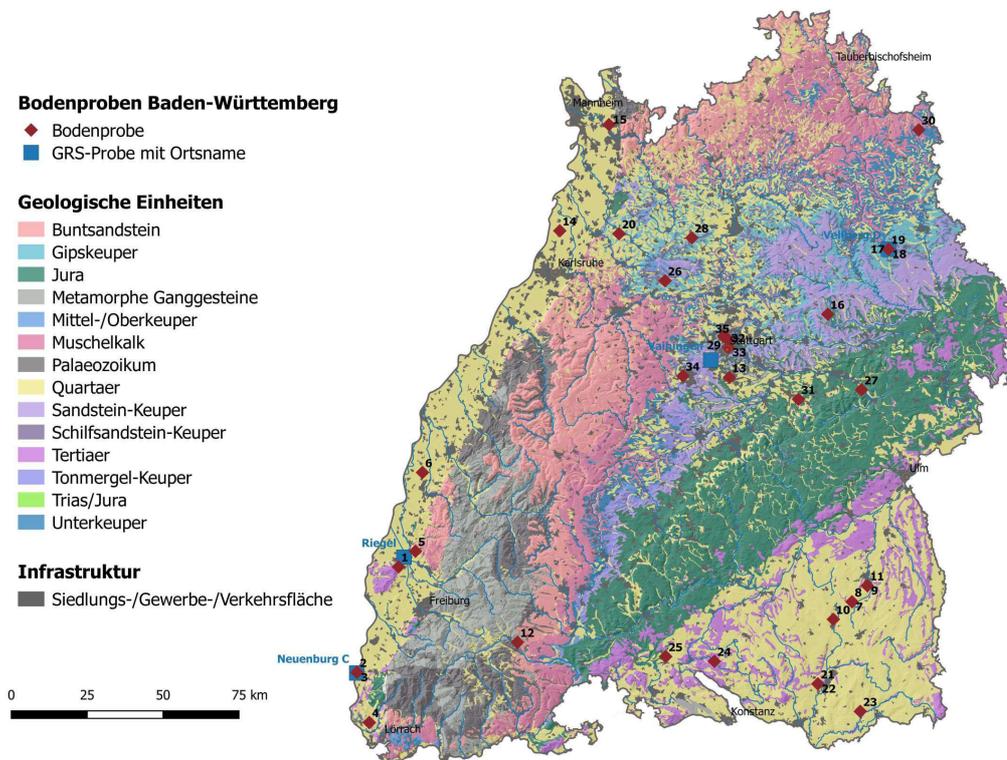


Abbildung 1: Entnahmestandorte der Bodenproben zur Ermittlung der Schereigenschaften (siehe 4.1) einschließlich des Bodenmaterials der Leonberger Lysimeterfelder (Vaihingen), das ebenfalls mit einem Großrahmen-Scherversuch (GRS) geprüft wurde.

Die Probenahme wurde abgeschlossen; aus Abbildung 1 ist die räumliche Lage der Probenahmestellen ersichtlich. Alle noch ausstehenden bodenmechanischen Untersuchungen zur Klassifizierung und Bestimmung der Schereigenschaften (klassische Scherversuche an 35 Proben sowie Scherversuche im großen Rahmenschergerät an drei Materialien) wurden durchgeführt. Die Bodenproben wurden gemäß DIN 18196 für bautechnische Zwecke klassifiziert. Hierzu wurden die Korngrößenverteilungen und die Plastizitätseigenschaften bestimmt. Die Bestimmung des Mineralbestands erfolgte im Labor des Instituts für Angewandte Geowissenschaften, Abteilung Geochemie und Lagerstättenkunde des KIT mittels Pulverdiffraktometrie.

#### 3.2. Eigenschaften bestehender Rekultivierungsschichten (zu 4.2)

##### a) Schereigenschaften einer bestehenden Rekultivierungsschicht

Ergänzend zu den Laborversuchen wurden Scherwiderstandsbeiwerte in einer bestehenden Rekultivierungsschicht mit sechs in situ-Scherversuchen ermittelt. Versuchsstandorte waren mehrere Böschungsabschnitte der Deponie Sindelfingen, in die in den Jahren 2015/2016 Bodenmaterial mit geringer Verdichtung eingebaut worden war. Bei den Scherversuchen wird der Boden stufenweise bis zum Bruch belastet. Aus Bruchlast und Bruchgeometrie kann die Widerstandskraft ermittelt werden, die sich aus den Komponenten Reibungskraft und

Kohäsion zusammensetzt (KOBLE 1982). Hierzu werden in einer etwa 1,5 m tiefen Schürfgarbe zunächst eine glatte senkrechte Grubenwand und ein horizontales Auflager profiliert. Anschließend wird mittels Totlast über eine Stahlplatte definierter Größe eine stufenweise Belastung auf das Auflager aufgebracht (siehe Abbildung 2). Die Platteneinsenkungen resultierend aus den verschiedenen Laststufen werden beobachtet. Das Ende des Versuchs ist erreicht, wenn eine Setzungszunahme ohne weitere Laststeigerung eintritt. Diese Bruchlast, die Setzungen und die Bruchfigur werden dokumentiert und die zur Berechnung erforderlichen Parameter Trockenrohdichte und Wassergehalt werden bestimmt.



Abbildung 2: Aufbau des in situ-Scherversuchs (Durchführung: Henke und Partner GmbH, Stuttgart)

### b) Wasserhaushaltskennwerte bestehender Rekultivierungsschichten

Eine vergleichende Auswertung der Wasserhaushaltskennwerte von Bodenmaterialien in Rekultivierungsschichten gegenüber den Kennwerten nach AG BODEN (2005) wurde anhand eigener Messungen sowie Angaben aus teilweise unveröffentlichten Quellen durchgeführt.

### 3.3. Ökologische Rekultivierungseignung (zu 4.2.3)

Zur Ergänzung der Einstufung von Standorteigenschaften der Probeböden (siehe WATTENDORF et al. 2018) wurde ein Aufwuchsexperiment mit Wintergerste, Winterweizen, Gelbsenf und *Phacelia tanacetifolia* durchgeführt. In Töpfen wurden die Pflanzen mit für Rekultivierungen üblicher hoher Saatstärke ausgebracht. Nach zweimonatiger Wuchszeit wurden die Pflanzen abgeerntet und die Biomasse (Frischgewicht) getrennt nach Getreide, Senf und *Phacelia* ermittelt. Als Substrate dienen das gedüngte (Mehrnährstoffdünger, ca. 90/18/60 N/P/K kg/ha) und nicht gedüngte (Unter-) Bodenmaterial von 38 der Probeböden sowie zum Vergleich vier Oberbodenproben aus drei Acker- und einem Grünlandstandort und zwei aus Boden- und Wurzelhäckselmaterial gemischte künstliche Substrate.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Bodenmechanische Eigenschaften: Ermittlung der Scherparameter (Laborversuche) und des Standsicherheitsverhaltens

In Tabelle 1 sind die aus bodenmechanischer Sicht vorliegenden Klassifizierungsergebnisse (gemäß DIN 18196) im Vergleich zur Klassifizierung gemäß Bodenkunde (nach AG BODEN 2005) sowie die erzielten bodenmechanischen Versuchsergebnisse (Plastizitätszahl und Reibungswinkel) aufgeführt.

Aus Abbildung 3, in der die Bodenarten der Bodenproben aus unterschiedlichen Regionen Baden-Württembergs in einem Diagramm zusammengestellt sind, wird deutlich, dass der überwiegende Anteil der Materialien aus mehr oder weniger gut für Rekultivierungszwecke geeigneten Bodenarten besteht. Da für Baden-Württemberg repräsentative Bodenmaterialien beprobt werden sollen, wurden auch weniger gut oder nicht geeignete tonreiche Substrate aus Keuper- und Juraschichten angemessen berücksichtigt (z.B. Proben 18, 27 und 31), zumal diese in der Rekultivierungspraxis durchaus verwendet werden.

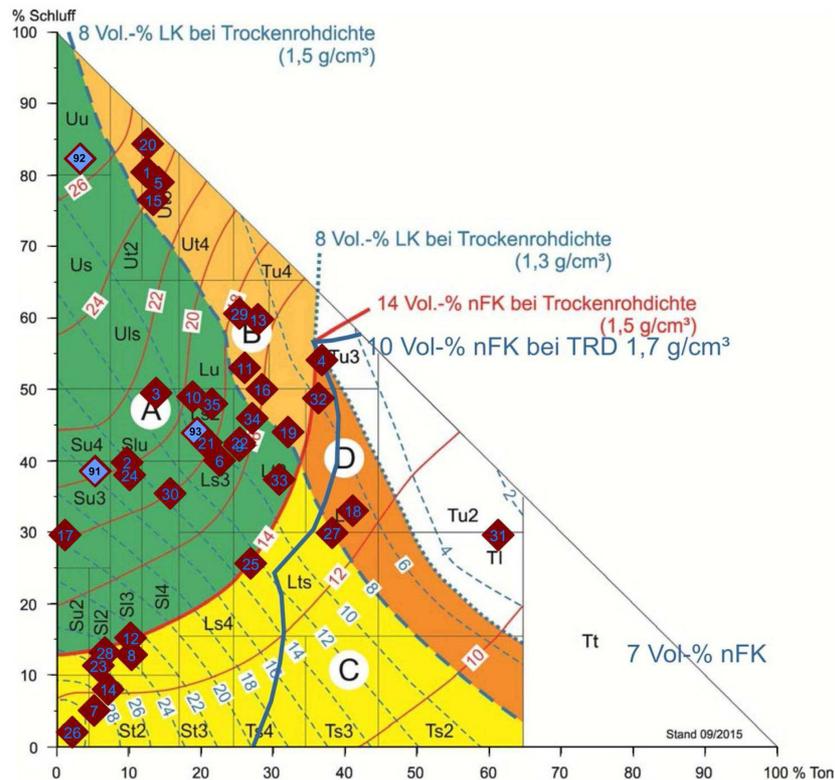


Abbildung 3: Bodenarten der Bodenproben (Grundlage: Abb. 1 aus BQS 7-2): Der überwiegende Anteil der Proben besteht aus gut geeigneten Bodenarten der Kategorien A und B.

Die Versuche zur Bestimmung der Schereigenschaften an aufbereiteten, gesättigten und dränierten Proben mittels klassischer Rahmenscherversuche gemäß DIN 18137-3 in normal-konsolidiertem Zustand sind abgeschlossen (vgl. Tabelle 1). Die Ergebnisse erbringen teilweise recht hohe Scherparameter. Bei manchen Böden, die vergleichsweise geringe Reibungswinkel aufweisen, würden sich allerdings nur entsprechend flache Böschungsneigungen realisieren lassen. Aus bodenmechanischer Sicht kann beim derzeitigen Bearbeitungs- und Kenntnisstand kein Bodenmaterial als ungeeignet gelten.

Tabelle 1: Ergebnisse der bodenmechanischen bzw. bodenkundlichen Klassifizierung sowie von bodenmechanischen Laborversuchen; n. b.: nicht bestimmt, <sup>1)</sup> muss überprüft werden, <sup>2)</sup> Werte aus Großrahmenscherversuch, GRS = Großrahmenschergerät

Nr.	Name	Klassifizierung nach			Fließgrenze $w_L$ / Ausrollgrenze $w_p$ / Plastizitätszahl $I_p$ [%]	Reibungs- winkel $\Phi$ (gem. DIN 18137-3) [°]
		AG BODEN (2005) [Feinboden ( $d < 2$ mm)]	DIN 18196 [Feinboden ( $d < 2$ mm)]	DIN 18196 [Gesamt- boden]		
1	Bahlingen	Ut3	UL	UL	23,9/22,6/1,3	25
2	Neuenburg A	SI3	UL	UL/SU*	24,0/21,3/2,7	37
3	Neuenburg B	Slu	UM	UM	35,9/26,4/9,5	36
4	Fischingen	Tu3	TM	TM	48,4/20,2/28,2	28
5	Hecklingen	Ut3	UL	UL	28,9/23,0/5,9	31
6	Ichenheim	Ls2, Ls3	TL	TL	32,5/17,3/15,2	27
7	Ingoldingen A	St2	SU*, ST*?	SU, ST?	n. b.	33 <sup>1)</sup>
8	Ingoldingen B	SI3	TM	GT	40,3/20,0/20,3	34
9	Biberach A	Lt2	TM/TL	TM/TL	35,4/19,0/16,4	34
10	Aulendorf	Ls2	TL/UL	TL/UL	31,2/22,4/8,8	36
11	Biberach B	Lu	TL	TL	33,2/19,0/14,2	32
12	Neustadt	SI3	UM, OU ?	SU*	48,7/35,6/13,1	42
13	Bernhausen	Lu	TM	TM	39,2/19,4/19,8	28
14	Linkenheim	St2	SU/SU*	SU/SU*	16,0/16,0/0	31
15	Dossenheim	Ut3	TM	TM	37,4/18,6/18,8	22
16	Welzheim	Lu, Lt2	TM	TM	39,0/19,9/19,1	27
17	Vellberg C	Su3	ST*	ST*	34,5/20,5/14,0	29
18	Vellberg B	Lt3	TM	TM	42,5/25,0/17,5	33
19	Vellberg A	Lt2	TM	TM	37,3/23,5/18,8	33
20	Kraichtal	Ut3	UL	UL	23,0/23,0/0	34
21	Ravensburg A	Ls2	TL	TL	28,7/15,4/13,3	30
22	Ravensburg B	Lt2	TL	TL	27,0/12,8/14,2	30
23	Amtzell	SI2	SU*	GU	42,8/26,9/15,9	39
24	Seelfingen	SI3	UL	UL	20,0/n. b./0	33
25	Eigeltingen	Lts	TL	TL	31,6/16,4/15,2	34
26	Illingen	Ss	SE	SE	35,4/19,5/15,9	35
27	Gingen	Lts	TM/TL	TM/TL	35,1/16,5/18,6	32 <sup>1)</sup>
28	Schwaigern	SI2	ST*/SU*	ST/SU/GT/GU	31,2/20,3/10,9	37
29	Feuerbach	Lu	TL	TL	33,2/18,5/14,7	31
30	Creglingen	SI4	TL/TM	TL/TM	34,4/19,3/15,1	30
31	Jesingen	TI	TA	TA	63,7/29,3/34,4	26 <sup>1)</sup>
32	Stuttgart A	Lt3	TM	TM	37,8/21,2/16,6	30
33	Stuttgart B	Lt2	TM	TM	42,8/24,3/18,5	33
34	Sindelfingen	Lt2	TL	TL	33,9/20,4/13,5	34
35	Stuttgart C	Ls2	TL	TL	34,0/22,4/11,6	34
91	Neuenburg C (GRS)	Su3	UL	UL	21,4/20,0/1,4	36 (25 <sup>2)</sup> )
92	Riegel (GRS)	Uu	UL	UL	23,3/21,6/1,7	35 (32 <sup>2)</sup> )
93	Vellberg D (GRS)	Ls2	TM	TM	37,2/21,9/15,3	32 (27 <sup>2)</sup> )

Die Untersuchungen zur Ermittlung von Schereigenschaften unverdichtet eingebauter Materialien unter Berücksichtigung der Aggregatstruktur mit dem Großrahmenschergerät erbringen nach wie vor gewisse Unstimmigkeiten. Während mit vergleichenden Versuchen an Sand teilweise zutreffende Ergebnisse erzielt wurden, ergaben sich an bindigen Bodenproben im Vergleich zu den klassischen Scherversuchen tendenziell und zum Teil deutlich niedrigere Werte.

Ziel ist nach wie vor, die ermittelten Schereigenschaften aus klassischem Rahmenscherversuch und dem Großrahmenschergerät ebenso wie die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen bewertend heranzuziehen und zur rechnerischen Ermittlung des Standsicherheitsverhaltens zu verwenden. Hierzu sollen noch zwei Materialien im Großrahmenschergerät untersucht werden.

Aufgrund der Bestimmung des Mineralbestands sind die Anteile wesentlicher Mineralphasen bekannt (z. B. Smektite/Interstratifikate, Illit/Muskovit, Chlorit, Kaolinit, Quarz, K-Feldspat, Na-Feldspat, Calcit, Dolomit, Hämatit und Hornblende sowie amorphe Anteile), so dass überprüft werden konnte, ob eine Korrelation zwischen den Mineralanteilen, insbesondere den Tonmineralanteilen, und den ermittelten Scherparametern der Böden besteht. Insgesamt wird deutlich, dass es keinen systematischen Zusammenhang zwischen dem Tonmineralanteil und dem Anteil an Feinstem (Partikelgröße  $< 0,002$  mm) gibt. Die Untersuchungen zeigen weiter, dass auch die Partikel größer 2 mm - soweit vorhanden - durchaus nennenswerte Anteile an Tonmineralen enthalten können.

In Abbildung 4 ist der Zusammenhang zwischen den ermittelten Reibungswinkeln im klassischen Rahmenscherversuch und dem Gesamttonmineralanteil dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass kein Zusammenhang zwischen Tonmineralgehalt und aktivierbarer Reibung gewonnen werden kann. Weitergehende Auswertungen sind vorgesehen.

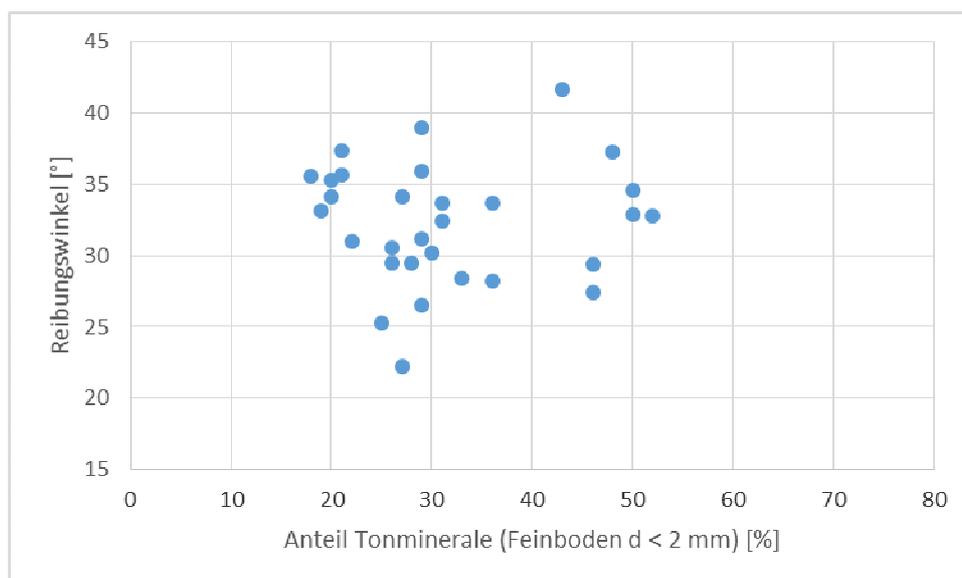


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen den ermittelten Reibungswinkeln im klassischen Rahmenscherversuch und dem Gesamttonmineralanteil

## 4.2. Eigenschaften bestehender Rekultivierungsschichten

### 4.2.1. Ermittlung der Scherparameter und des Standsicherheitsverhaltens in situ

Ziel des eingesetzten Verfahrens ist es, in bestehenden Deponieböschungen mit gewissem zeitlichem Abstand zum Bodeneinbau einen Anhaltswert für die maßgeblichen Scherparameter zu bestimmen. Das Verfahren soll es möglich machen, nachträglich zu überprüfen, in wie weit Soll- und Istwerte der Parameter voneinander abweichen.

In den sechs beprobten Profilen der Deponie Sindelfingen fand sich vorwiegend Lösslehm mit überwiegend steifer bis teilweise weicher Konsistenz sowie Gipskeuper- und verwittertes Muschelkalk-Material mit Trockendichten von 1,54 bis 1,89 g/cm<sup>3</sup> und Wassergehalten zwischen 17,6 % und 28,1 %.



Abbildung 5: Bruchform beim in situ-Scherversuch; nach dem Bruch wird die Geometrie des Bruchkörpers ausgemessen

Aus den aufgetragenen Lastwerten und den Geometrien der Bruchformen (Abbildung 5) konnten die für erdstatische Berechnungen (Gleitsicherheit/ Geländebruchsicherheit usw.) charakteristische Scherbeiwerte für die Bodenmaterialien der sechs Schürfe abgeleitet werden: Bei einem Reibungswinkel  $\varphi_k$  von 22,5° beträgt die Kohäsion  $c_k$  (unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors von 1,4) zwischen 1,2 und 3,4 kN/m<sup>2</sup>, im Mittel 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Diese Werte gelten für den gering verdichteten Teil der untersuchten Rekultivierungsschicht bis circa 1,0 - 1,2 m Tiefe.

#### 4.2.2. Wasserhaushaltskennwerte von Rekultivierungssubstraten

Hinsichtlich der Abweichungen der Wasserhaushaltskennwerte ( $F_k$  = Feldkapazität,  $nF_k$  = nutzbare Feldkapazität etc.) umgelagerter Böden in Rekultivierungsschichten von empirisch ermittelten Werten (AG BODEN 2005) finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben: Während MELCHIOR (2010) in Rekultivierungsschichten durchweg niedrigere Kennwerte fand, stellte NAJMANN (2010) teilweise höhere Werte für die nutzbare Feldkapazität fest.

Beim Vergleich von Messwerten aus Baden-Württemberg und Kennwerten nach AG BODEN am Beispiel der nutzbaren Feldkapazität zeigen sich deutliche Abweichungen (Abbildung 6). Übereinstimmungen oder geringe Abweichungen sind selten, Differenzen bis circa 4 Vol-% dagegen häufig. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 10,5 Vol-% (Bodenart Lt2 / TRD-Stufe 3). Acht Messwerte liegen unter und 13 Messwerte über den empirischen Werten, so dass anhand der vorliegenden Daten keine eindeutige Tendenz erkennbar ist.

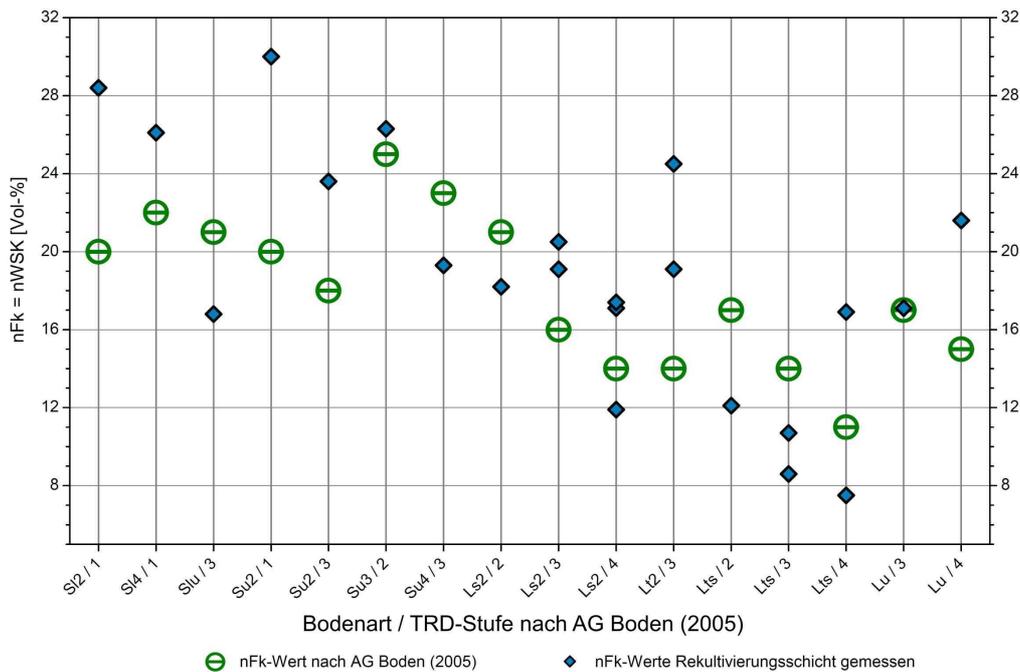


Abbildung 6: Nutzbare Feldkapazität: Empirische Werte natürlicher Böden nach AG BODEN (2005) und Messwerte aus Rekultivierungsschichten in Baden-Württemberg (unterschiedliche Quellen)

#### 4.2.3. Standorteigenschaften der Probeböden (Ansaatversuch)

Der Gefäßversuch erbrachte die folgenden wesentlichen Ergebnisse (siehe hierzu Abbildung 7 und Abbildung 8): Unter den vier ausgesäten Pflanzenarten erreichte die wärmeliebende *Phacelia* insgesamt die geringste Biomasse (Ø ungedüngt 0,1 g, Ø gedüngt 0,26 g).

Variante ohne Düngung: Die Pflanzenmischung erreichte auf vier Unterboden-Proben nur sehr geringe Biomassen (d.h. < 1 g: Probe 11, 12, 16, 21) und auf den meisten übrigen Unterboden-Proben nur mäßige Biomassen < 2 g (Ø ungedüngt 1,93 g).

Auf meist jüngeren Sedimenten mit günstiger Bodenart (z.B. Proben 3 bis 6, 23) und stärker verwitterten Keuper-Substraten (Proben 26, 28, 33, 93) wuchsen die Pflanzen überdurchschnittlich gut. Nur bei einem Bodenmaterial (Probe 12, lehmiger Sand aus Gneisverwitterung, Schwarzwald) starben mehrere Keimlinge ab.

Auf den zum Vergleich untersuchten Acker- und Grünland-Oberböden waren die Biomassen mehr oder weniger stark überdurchschnittlich (2,48 - 3,96 g).

Variante mit Düngung: Der Einfluss der Düngung ist trotz der kurzen Wachstumszeit deutlich erkennbar und führte im Mittel mehr als zu einer Verdoppelung der Gesamt-Biomasse (Ø gedüngt 4,4 g). Bei den niedrigeren Biomassen ist der Einfluss der Düngung etwas größer. Die Pflanzenmischung wuchs mit Ausnahme von Probe 12 auf allen Unterboden-Proben gut; nur bei Probe 12 war in der Summe kein Erfolg der Düngung erkennbar.

Die Rahmenbedingungen und Ergebnisse der Versuche können nicht ohne weiteres auf Rekultivierungsschichten übertragen werden. So wurde der Boden in den Gefäßen feucht gehalten, während im Freiland - vor allem im Sommer - die Keimungs- und Wuchsbedingungen weitaus ungünstiger sein können. Insbesondere bei Böden mit ungünstiger Struktur und/oder wenig Feinboden kann es witterungsbedingt Ausfälle bis zum Totalausfall geben.

Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass praktisch alle beprobten Unterböden aus Baden-Württemberg - zumindest mit Düngung - bei günstigen Feuchtebedingungen zügig begrünbar sind (Ausnahme Nr. 12). Ohne Düngung oder sonstige Nährstoffzufuhr, beispielsweise über Kompost, ist an den meisten Standorten mit Einschränkungen der Wuchserfolge zu rechnen.

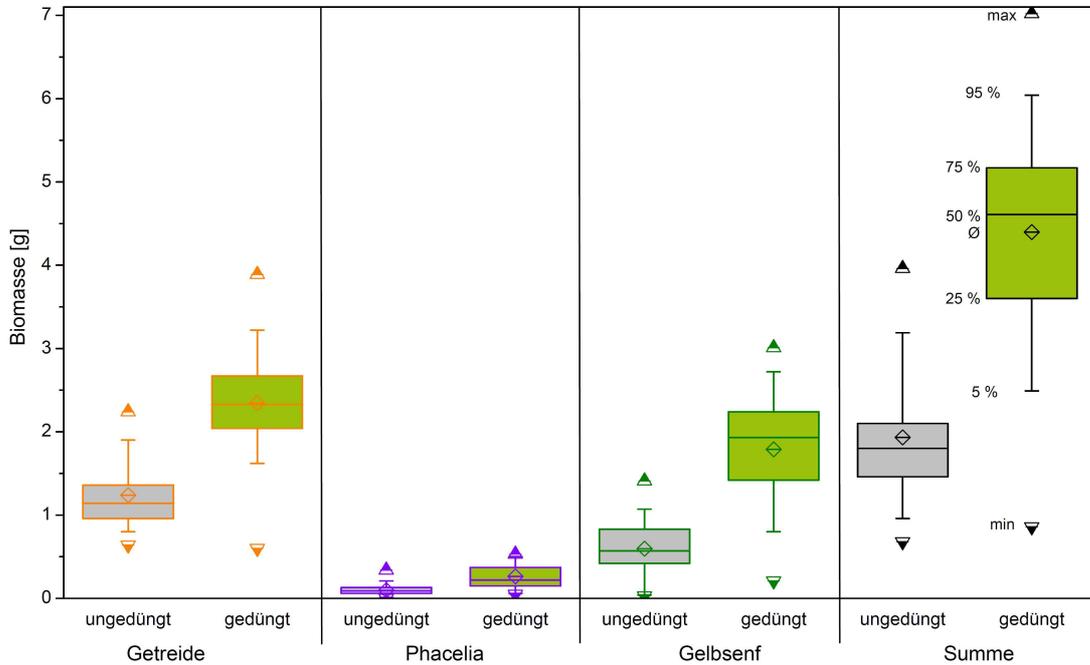


Abbildung 7: Pflanzen-Biomassen (Frischmasse) in Gefäßen mit ungedüngten und gedüngten Bodenproben (38 Unterboden-Proben, 4 Acker-/Grünland-Oberböden, 2 Kunstsubstrate) aus Baden-Württemberg nach zweimonatigem Wuchsversuch

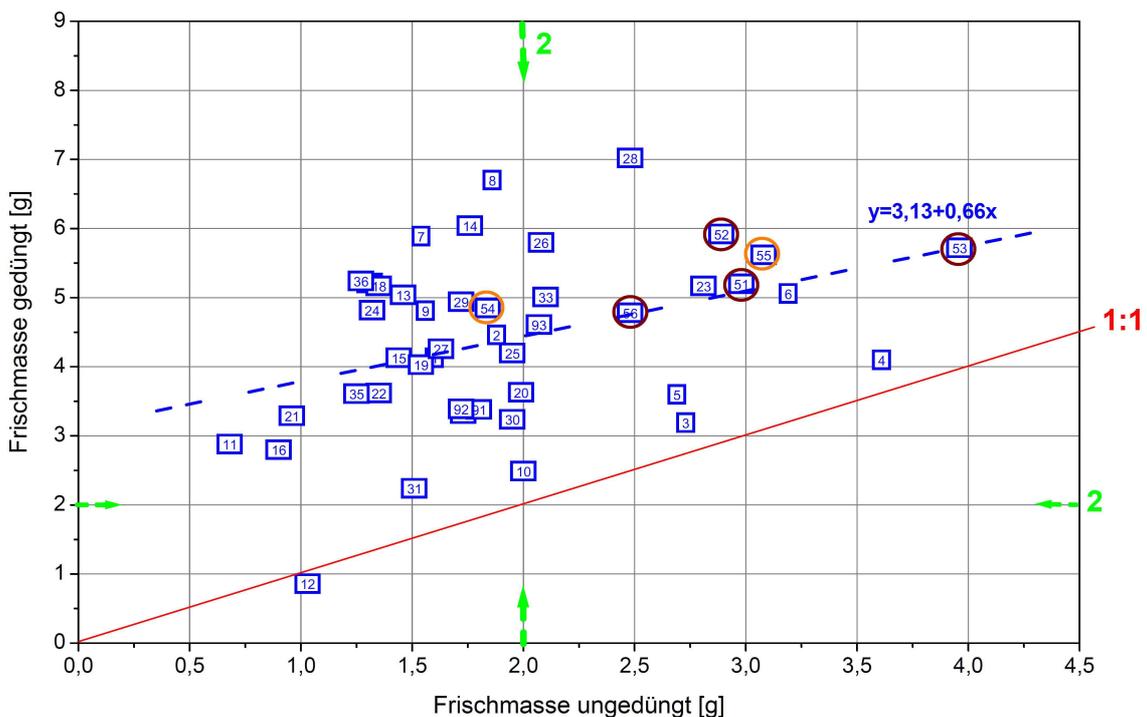


Abbildung 8: Gesamt-Biomasse (Frischmasse) der Jungpflanzen auf gedüngten und nicht gedüngten Bodenproben (Nummerierung der Proben gemäß Tabelle 1)

## Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Stuttgart, 438 S.
- BIEBERSTEIN, A., J. BRAUNS & H. REITH (2003): Standsicherheit und Setzungsverhalten unverdichtet geschütteter Rekultivierungsschichten von Oberflächenabdichtungssystemen, Bautechnik 80, H. 6: 372-379
- DGGT = DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2006): GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 83 (9), siehe auch [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)
- DGGT = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000/2010): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629; aktuelle online-Ausgabe 1/2010 auf [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)
- DIN 18196: Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke (2011)
- DIN 18137-3: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 3: Direkter Scherversuch (2002)
- KOBLER (1982): Untersuchungen über Böschungs- und Grundbruch bei begrenzten Lastflächen, Baugrundinstitut Stuttgart, Mitteilung 18
- LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (2016): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1 Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen vom 13.4.2016, 33 S., <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (2016a): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-2 Wasserhaushaltsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen vom 13.4.2016, 37 S., <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- MELCHIOR, S. (2010): Rekultivierungsschichten - Geltende Anforderungen, Stand der Technik und Praxiserfahrungen. In: Gebert, J. P., & E.M. Pfeiffer [Hrsg.]: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 63: 25-42
- NAJMANN, A. (2010): Prüfung und Beurteilung der Wirksamkeit und Funktionssicherheit eines endgültigen und eines temporären Oberflächenabdichtungssystems im Zuge von Aufgrabungen. In: KILCHERT, M. (ed.) 6. Leipziger Deponiefachtagung: B 08, 7 S.
- Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts (DepV), BGBl 2009 Teil I Nr. 22, vom 29.4.2009, S. 900 - 950
- WATTENDORF, P. (2005): Konzeption einer Wasserhaushaltsschicht für die Deponie Neuenburg (BA I), in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung Qualifizierte Rekultivierungsschichten: 130 - 145, Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41, 269 S., Freiburg
- WATTENDORF, P. & O. EHRMANN (2015): Bodenentwicklung und Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten - Ergebnisse aus 14 Jahren Langzeituntersuchungen auf der Deponie Leonberg, Veröffentlichungen des TR-LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Heft 94: 37 - 46
- WATTENDORF, P., O. EHRMANN, H. REITH & A. BIEBERSTEIN (2018): Standsicherheits- und Bodeneigenschaften von Rekultivierungssubstraten in Baden-Württemberg, Tagungsband 14. Leipziger Deponiefachtagung: 223 - 236
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN (2015): Langzeituntersuchungen von Boden, Vegetation und Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten, unveröffentlichter Forschungsbericht BWPLUS, 62 S., Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD, O. EHRMANN, T. TRIANTAFYLIDIS, A. BIEBERSTEIN & H. REITH (2018): Standsicherheits- und Bodeneigenschaften von Rekultivierungs-substraten (L 7515003 und L 7515009), unveröffentlichter Forschungsbericht BWPLUS, 10 S.

## **Zusammenfassung**

Das Forschungsvorhaben „Stand sicherheits- und Bodeneigenschaften von Rekultivierungssubstraten“ (L 7515003 und L 7515009) beschäftigt sich mit der Herstellung von Deponie-Rekultivierungsschichten als Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems unterschiedlicher Deponieklassen. Ziel des Vorhabens ist es, für Deponierekultivierungen in Frage kommende Bodenmaterialien Baden-Württembergs zu ermitteln und an repräsentativen Bodenproben die Parameter für die Stand sicherheit der Rekultivierungsschicht (Schereigenschaften) in unverdichtetem Zustand zu erheben. Weiterhin werden die Parameter, welche die Wasser- und Nährstoffversorgung der zukünftigen Vegetation beeinflussen (Bodenart, nutzbare Feldkapazität, pH-Wert und Nährstoffgehalte) ermittelt. Die Ergebnisse sollen als Kompendium der rekultivierungsrelevanten Eigenschaften baden-württembergischer Böden und praxisorientierte Handlungshilfe zum Bau unverdichteter Rekultivierungsschichten veröffentlicht werden.

Das Arbeitsprogramm 2018 umfasste das Beschaffen der letzten ausstehenden Bodenproben, bodenmechanische Labor- und in situ-Untersuchungen zur Bestimmung relevanter Stand sicherheitseigenschaften, eine Auswertung zu Wasserhaushaltskennwerten umgelagerter Bodenmaterialien sowie einen Ansaatversuch zur Beurteilung der Standorteigenschaften der Probeböden.

Das umfangreiche bodenmechanische Laborprogramm ist weitgehend abgeschlossen. An den Probenmaterialien wurden bodenmechanische Untersuchungen zur Klassifizierung sowie zur Bestimmung der Schereigenschaften (klassische Scherversuche sowie Scherversuche im großen Rahmenschergerät) durchgeführt. Darüber hinaus werden an ausgewählten Materialien die Proctordichte sowie an allen Materialien die mineralogische Zusammensetzung bestimmt. Teilweise gehen die Untersuchungen somit über das ursprünglich geplante Programm hinaus. Die bisherigen Ergebnisse zeigen die prinzipielle Eignung aller Materialien aus bodenmechanischer Sicht.

Ein Vergleich zwischen Messwerten der nutzbaren Feldkapazität von Böden in Rekultivierungsschichten und Kennwerten nach AG BODEN zeigt nur geringe Übereinstimmungen. Die Differenzen betragen bis zu 10,5 Vol-%. Anhand des vorliegenden Datenmaterials kann keine eindeutige Tendenz abgeleitet werden.

Ein Ansaatversuch mit vier Pflanzenarten in allen Bodenproben aus Baden-Württemberg zeigt, dass das beprobte Unterbodenmaterial -mit lediglich einer Ausnahme- bei günstigen Feuchtebedingungen zügig begrünbar ist, wenn eine moderate mineralische Düngung oder sonstige Nährstoffzufuhr (z.B. Kompost) erfolgt.

## Summary

The research project „stability and soil properties of recultivation substrates” (L 7515003 and L 7515009) deals with the requirements and properties of recultivation layers as one component of surface sealing systems of different landfill categories. The aim of the project is to detect eligible soils as recultivation material and to determine relevant parameters necessary for the (slope) stability analysis in an uncompacted state of representative samples. Furthermore parameters with an impact on water and nutrient supply (soil type, effective field capacity, pH-value and nutrient content) of the future vegetation are to be determined. The results together with additional instructions for the construction of uncompacted recultivation layers are to be summarized in a compendium of relevant properties of soils for recultivation purposes in Baden-Württemberg.

The 2018 work program included the procurement of the last outstanding soil samples, a series of soil mechanical experiments in laboratory and in situ to determine relevant stability characteristics, an evaluation of water balance characteristics of relocated soil materials, and a growth experiment to assess the site characteristics of the soil samples.

The extensive soil mechanical laboratory program performed on 35 soil materials is almost completed. The soil mechanical investigations were carried out for the classification of the samples and for the determination of the shear properties (classical shear tests and shear tests in the large frame shear device). In addition, the Proctor density was determined on selected materials and the mineralogical composition of all materials. In part, the examinations thus go beyond the originally planned program. The results so far show the suitability of all materials from a soil mechanical point of view.

A comparison of measured values of usable field capacity from soils of recultivation layers and the empirical data according to AG Boden shows only slight coincidences. The differences are up to 10.5% by volume. Based on the available data, no definite trend can be derived.

A growth experiment with four plant species in the soil samples from Baden-Württemberg shows that the examined subsoil material -with only one exception- can rapidly be planted under favorable humid conditions, if a moderate application of mineral fertilizers or other nutrients (e.g. compost) is used.