

# Bautechnische und hydrologische Anforderungen an Rekultivierungsschichten

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft, Rödingsmarkt 43, 20459 Hamburg - [www.mplusw.de](http://www.mplusw.de)

## 1 Einleitung

Im Rahmen des ersten MiMethox-Workshops 2010 wurde über die geltenden Anforderungen an Rekultivierungsschichten, den Stand der Technik sowie Praxiserfahrungen berichtet (Melchior 2010). Der vorliegende Beitrag baut darauf auf und ergänzt ihn unter weitgehendem Verzicht auf Wiederholungen in folgenden Themen:

- Fortschreibung des Standes der Technik von Rekultivierungsschichten durch den Bundeseinheitlichen Qualitätsstandard 7-1 der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“
- Aktuelle Fallbeispiele zur Erläuterung des Zusammenhangs von Einbautechnik und bodenhydrologischen Kennwerten der Rekultivierungsschicht
- Konsequenzen für die Planung und Herstellung von Rekultivierungsschichten

## 2 Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard Rekultivierungsschicht

Die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ definiert als Grundlage für die Durchführung der DepV (2009) den Stand der Technik für die Komponenten von Deponieabdichtungssystemen in bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS). Der BQS 7-1 befasst sich mit Rekultivierungsschichten und wurde am 23.05.2011 beschlossen und im August 2011 veröffentlicht.

Der BQS 7-1 legt die Anforderungen an die Systemkomponente Rekultivierungsschicht dar und befasst sich mit folgenden Themen:

- Materialanforderungen
- Entwurf und Bemessung
- Eignungsprüfungen
- Gewinnung, Herstellung und Lagerung des Rekultivierungsmaterials
- Einbau des Rekultivierungsmaterials
- Maßnahmen zum Schutz der Rekultivierungsschicht
- Qualitätsmanagement und Abnahme (mit detaillierten Prüfkatalogen im Anhang)
- Technische Bezugsdokumente (Normen, Regelwerke, Literatur)

Der BQS enthält folgende bodenhydrologische Anforderungen:

- Nutzbare Feldkapazität (nFK) von mindestens 140 mm über die Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht
- Luftkapazität (LK) von mindestens 8 Vol.-% nach Fertigstellung
- Ausreichendes Infiltrationsvermögen zur Erosionsvorbeugung
- In Ober- und Unterboden durchgängig ausreichende Wasserdurchlässigkeit zur Verhinderung von Stauwasserbildung (Gefahr von Hangquellen, Rutschungen und Luftmangel für Pflanzenwurzeln) und Vermeidung von Stauschichten
- Verhinderung der hydraulischen Überlastung der Entwässerungsschicht
- Optimierung des Wasserhaushalts des Gesamtsystems (Förderung der Verdunstung durch optimierte Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers, Reduzierung und Dämpfung der Dränspende, Vermeidung schädlicher Wasserspannungen über schrumpfungsempfindlichen Abdichtungskomponenten)

In Abschnitt 7 befasst sich der BQS mit Bezug auf die GDA-Empfehlung E2-31 (DGGT 2006) mit dem Einbau des Rekultivierungsmaterials.

*„Damit die Rekultivierungsschicht die in Nr. 1 genannten Funktionen erfüllen kann, sind bei deren Einbau nachfolgende Anforderungen zu berücksichtigen.*

*Die in den DIN 18915 und DIN 19731 enthaltenen Anforderungen sind beim Einbau der Böden in die Rekultivierungsschicht zu beachten. Entsprechende Dokumente zum Nachweis der Eignung oder zu notwendigen Änderungen des Bauverfahrens sind von der Baufirma vorzulegen.*

*Das Bodenmaterial ist so einzubauen, dass Bodenverdichtungen weitestmöglich vermieden werden. Die im Einzelfall zu wählenden Einbauverfahren und Baugeräte müssen dieses berücksichtigen: Einbau durch Langarmbagger, Teleskopbagger oder Bandabsetzer, Einsatz von Kettenfahrzeugen mit niedriger Bodenpressung (bis 15 kN/m<sup>2</sup>) wie z. B. Pistenbully oder Supermoorraupe. Die geforderten Mindestmächtigkeiten sind unter Berücksichtigung der zu erwartenden Sackungen einzuhalten (Endmächtigkeiten).*

*Die für Rekultivierungsschichten geeigneten Böden sind in hohem Maße verdichtungsempfindlich, insbesondere, wenn sie mit zu hohem Wassergehalt eingebaut werden.*

*Es gelten daher folgende Anforderungen:*

- Böden der Kategorie „A“ in Abbildung 1 müssen mit halbfester Konsistenz eingebaut werden ( $I_C > 1$ ).
- Böden der Kategorie „B“ in Abbildung 1 müssen mit mindestens steifer Konsistenz eingebaut werden ( $I_C > 0,75$ ).

Die Herstellbarkeit der Rekultivierungsschicht als Teil des Abdichtungssystems ist durch den Bau von Probefeldern gemäß DepV Anhang 1 Nr. 2.1 Abs. 2 nachzuweisen. Sofern aufgrund der Verdichtungsunempfindlichkeit keine besonderen Anforderungen an den Einbau zu stellen sind, gelten folgende Hinweise zur Einbautechnik:

- Oberboden und Unterboden sollen jeweils getrennt in einer Lage eingebaut werden.
- Alternativ kann auf eine gesonderte Oberbodenlage verzichtet und die gesamte Rekultivierungsschicht in einer Lage eingebaut werden, wenn die oberen 10 bis maximal 30 cm z. B. durch Einarbeiten von Qualitätskompost vergütet werden. Bei der Planung der Schichtstärke ist dabei zu berücksichtigen, dass mit der Mineralisierung des Komposts eine Volumenreduzierung des kompostvergüteten Oberbodens einhergeht.
- Eingebauter Rekultivierungsboden darf nicht mit Gerät mit Flächenpressungen befahren werden, die zu schädliche Verdichtungen führen können.“

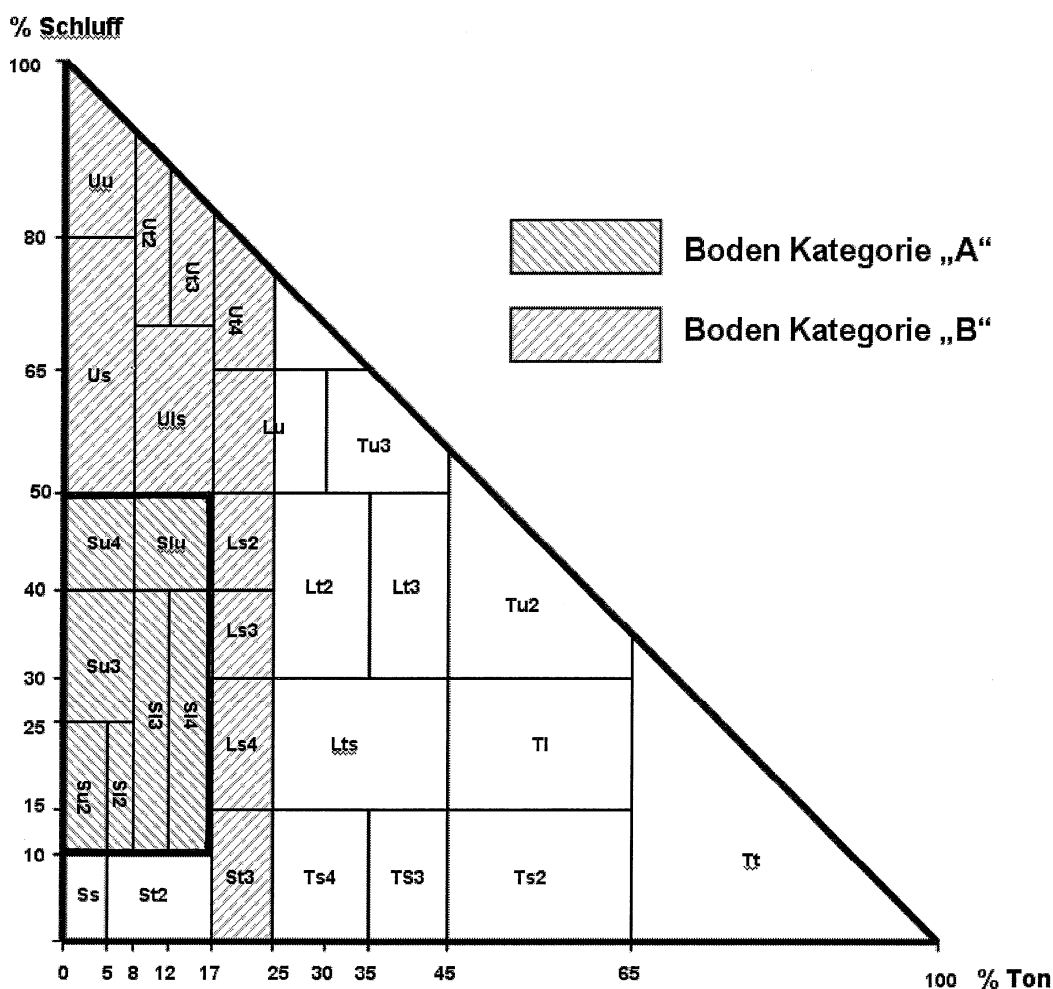


Abbildung 1: Orientierung für die Auswahl von Böden als Rekultivierungsmaterial (Grundlage: Bodenkundliche Kartieranleitung - Feinbodenarten nach AG Boden (2005) (aus LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ 2011)

Die GDA-Empfehlung E2-31 formuliert in ihrer noch nicht veröffentlichten Fassung die Anforderungen an die Bautechnik noch etwas detaillierter:

*„Die Empfindlichkeit von Rekultivierungsböden gegen Bodenverdichtung ist unterschiedlich und hängt wesentlich von ihrer Bodenart, von ihrer aktuellen Konsistenz sowie von ihrer Vorbelastung am Herkunftsort ab [...]. Die im Einzelfall zu wählenden Einbauverfahren und Baugeräte müssen dieses berücksichtigen. Bodenverdichtung kann in ton- und schluffhaltigen Böden die nutzbare Feldkapazität, vor allem aber die Luftkapazität in schädlicher Weise beeinträchtigen. Diesbezüglich empfindliche Böden dürfen nicht lagenweise mit schiebenden und die eingebauten Lagen überfahrenden Baugeräten eingebaut werden, da Schäden durch zu niedrige Luftkapazitäten, eine unzureichende Porenkontinuität und niedrige Wasserdurchlässigkeiten im Unterboden kaum reversibel sind und mehrere unerwünschte Folgen haben können: Sauerstoffmangel für die Pflanzen, Staunässebildung mit Mobilisierung von Eisen und Mangan unter anaeroben Verhältnissen (damit verbunden die Gefahr der Verockerung für die Entwässerungsschicht), Bildung von Hangquellen mit Erosion, im schlimmsten Fall eine Reduzierung der Böschungsstabilität.“*

Um die gewünschte Qualität der eingebauten Rekultivierungsschicht zu sichern, ist das Rekultivierungsmaterial bereits bei der Gewinnung, Herstellung und Lagerung bautechnisch fachgerecht zu behandeln. Hierzu vermerkt der BQS 7-1 in Abschnitt 6:

*„Bodenmaterial ist so abzubauen und zwischenzulagern, dass Bodenverdichtungen weitestmöglich vermieden werden. Ober- und Unterboden sind getrennt abzubauen und zu lagern. Die Materialien sollten trocken bis feucht (halbfest bis steif) und keinesfalls sehr feucht bis nass (weich bis breiig) bearbeitet werden.*

*Die Zwischenlagerung des Materials kann generell zu starken Qualitätsverschlechterungen führen und ist entweder zu vermeiden oder zeitlich zu begrenzen. Dabei sind die in der DIN 18915 und DIN 19731 genannten Anforderungen zu berücksichtigen, wobei die zulässige Schütthöhe von Bodenmieten materialabhängig festgelegt wird und 4 m nicht überschreiten soll.“*

### **3 Fallbeispiele zum Zusammenhang von Bautechnik und bodenhydrologischen Eigenschaften**

Der Beitrag zum ersten MiMethox-Workshop (Melchior 2010) enthält bereits einige Fallbeispiele zum Einfluss der Einbautechnik und Verdichtung auf die Parameter nutzbare Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK). Sie werden nachfolgend durch ausgewählte Ergebnisse ergänzt, um einige aktuelle Thesen zum Zusammenhang zwischen Bautechnik und bodenhydrologischen Eigenschaften zu erörtern.

### 3.1 Einfluss der Verdichtung auf nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität und Wasserdurchlässigkeit in einem mittel lehmigen Sand

Das erste Fallbeispiel in Tab. 1 zeigt die für schluffreiche, weiche Rekultivierungsböden typischen Auswirkungen der Verdichtung auf die bodenhydrologischen Kennwerte. Nicht die nutzbare Feldkapazität leidet, wie früher oft angenommen, unter der Verdichtung. Es sind vielmehr die weiten Grobporen, die bei zunehmender Verdichtung zusammengedrückt werden. In der Folge sinkt die Luftkapazität bei einem Verdichtungsgrad von knapp 90 %  $D_{Pr}$  auf unzureichend niedrige 3 % und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit erreicht mit nur noch  $1,3 \cdot 10^{-9}$  m/s einen so niedrigen Wert, dass der Boden mühelos die Anforderung an die Dichtwirkung einer mineralischen Dichtung erfüllt. Ein solcher Boden muss möglichst bodenschonend eingebaut werden, um eine Schadverdichtung zu vermeiden. Dafür ist eine vorausschauende Bauablaufplanung erforderlich, um die Bodenanlieferung zum Einbauort auf der Gesamtfläche fachgerecht durchführen zu können.

Tabelle 1 Bodenhydrologische Kennwerte eines humosen Rekultivierungsbodens bei unterschiedlicher Verdichtung

Bodenart Uls, h4, I <sub>c</sub> 0,59	Einheit	Verdichtungsgrad in % $D_{Pr}$		
		71	79	87
Trockendichte	g/cm <sup>3</sup>	1,160	1,288	1,425
Porenvolumen	%	56	51	46
Luftkapazität	Vol.-%	19	11	3
nutzbare Feldkapazität	mm/dm	19	20	20
gesättigte Wasserdurchlässigkeit	m/s	$6,9 \cdot 10^{-05}$	$5,6 \cdot 10^{-06}$	$1,3 \cdot 10^{-09}$

### 3.2 Vergleich Unterbodeneinbau mit Langarmbagger und Raupe

Die technische Fachdiskussion um die erforderlichen Eigenschaften von Rekultivierungsschichten begann sehr viel später als die Festlegung von Anforderungen an die anderen Komponenten der Abdichtungssysteme. Im Jahr 2000 nahm sie durch die Veröffentlichung der Erstfassung der GDA Empfehlung E2-31 (Erstfassung zu DGGT 2006) Fahrt auf. In dieser Erstfassung wurde anhand der Kennwerte, die für natürliche Böden in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (4. Auflage zu AG Boden 2005) genannt werden, herausgearbeitet, dass die nutzbare Feldkapazität mit steigender Trockendichte abnimmt. Obwohl dieser Analogieschluss von natürlichen Böden auf technisch eingebaute Böden so nicht zutrifft (siehe unten) verbreitet sich seither die Erkenntnis, dass der verdichtete Einbau von Rekultivierungsschichten möglichst zu vermeiden ist. Da der

unverdichtete Einbau z.B. mit Langarmbaggern jedoch logistisch anspruchsvoller und langwieriger als beispielsweise der Einbau mit Raupen ist, stellt sich die Frage, ob dieses aufwändigere Einbauverfahren bei jedem Boden erforderlich ist.

Unsere in den letzten rund zehn Jahren bei der Qualitätssicherung von Rekultivierungsschichten erhobenen Daten zeigen, dass der verdichtete Einbau weniger, wie ursprünglich angenommen, die nutzbare Feldkapazität beeinflusst als vielmehr die als integrierender Parameter für die Qualität einer Rekultivierungsschicht nicht weniger wichtige Luftkapazität. In der Regel steigt die nutzbare Feldkapazität sogar leicht mit zunehmender Verdichtung (siehe hierzu auch Anlauf et al. 2011). Die Luftkapazität kann demgegenüber, wie im vorherigen Fallbeispiel gezeigt, bei der Verdichtung ton- und schluffreicher Rekultivierungsböden sehr drastisch unter den erforderlichen Mindestwert absinken. Nicht jeder Boden reagiert diesbezüglich jedoch ähnlich empfindlich. Insbesondere sandige Rekultivierungsschichten mit Schluffgehalten von ca. 10 bis 15 % und Tongehalten unter 12 % sind aufgrund ihres Korngerüsts mit vielen Korn-zu-Korn-Kontakten diesbezüglich robuster und können daher eher mit konventioneller und leistungsfähigerer Erdbautechnik eingebaut werden. Das folgende Fallbeispiel belegt die geringere Verdichtungsempfindlichkeit ton- und schluffarmer Rekultivierungsböden für einen Unterboden aus lehmigem Sand (SI3 mG3 14 nach AG Boden 2005 mit 9 % Ton, 17 % Schluff, 60 % Sand und 14 % Kies). Der Wassergehalt des Bodens lag auf dem trockenen Ast der Proctorkurve. Tab. 2 listet die bei verschiedenen Einbauversuchen mit diesem Boden erzielten Ergebnisse auf.

Tabelle 2 Bodenhydrologische Kennwerte eines Unterbodens nach lockerem Einbau mit Bagger und verdichtetem Einbau mit der Raupe

Unterboden SI3 mG3	Einheit	Einbau mit Lang- armbagger ohne Überfahrt	Einbau mit Raupe (Bodendruck 34 kPa)	
			8 Überfahrten	14 Überfahrten
Trockendichte	g/cm <sup>3</sup>	1,306	1,606	1,620
Verdichtungsgrad	% D <sub>Pr</sub>	65	80	81
Porenvolumen	%	52	43	42
Luftkapazität	Vol.-%	33	20	20
nutzbare Feldkapazi- tät	mm/dm	11	12	11
gesättigte Wasser- durchlässigkeit	m/s	1,5 · 10 <sup>-04</sup>	1,3 · 10 <sup>-05</sup>	5,8 · 10 <sup>-06</sup>

Die Daten zeigen nach Befahren des Bodens mit der Raupe eine deutlich höhere Trockendichte als beim lockeren Einbau. Allerdings bleibt der Verdichtungsgrad mit 80 % D<sub>Pr</sub> im Vergleich zu Rekultivierungsböden mit höheren Ton- und Schluffgehalten

und ggf. ungünstiger Konsistenz moderat. Die nutzbare Feldkapazität verändert sich durch die Verdichtung nicht. Sie ist mit rund 11 % relativ niedrig, was durch einen entsprechend leistungsfähigen Oberboden oder ggf. durch eine ausreichende Mächtigkeit ausgeglichen werden muss, um die Standardanforderung der DepV von  $n_{FK} \geq 140$  mm sicher einzuhalten. Die Luftkapazität sinkt zwar durch die Verdichtung um gut 10 %, bleibt jedoch ebenso wie die Wasserdurchlässigkeit so hoch, dass sie erheblich über den zulässigen Mindestwerten liegt. Die Wasserdurchlässigkeit ist hoch genug, damit auch die Dränspende von 25 mm/d, auf die die Entwässerungsschicht üblicherweise bemessen wird, durch die Rekultivierungsschicht ohne Stauwasserbildung sickern kann. Dies war im vorliegenden Fall besonders wichtig, da die Rekultivierungsschicht auf sehr steilen Böschungen eingebaut wurde und Standsicherheitsprobleme durch Stauwasser in der Rekultivierungsschicht unbedingt zu vermeiden waren. Der untersuchte Boden konnte bei den gegebenen Wassergehalten auch mit schweren Raupen fachgerecht als Teil der Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Der lockere Einbau mit dem Bagger war bei diesem Boden nicht erforderlich. Beim Raupeneinbau ist jedoch auch bei solchen Böden darauf zu achten, dass die Raupe den Boden nicht dünnlagig mit vielen Überfahrten einbaut, sondern den Boden möglichst auf der späteren Oberfläche der Schicht fahrend in der Fläche verteilt. Diese Oberfläche kann bei Bedarf nach Ende des Einbaus oder vor Beginn des Oberbodeneinbaus wieder gelockert werden, um eine Stauwirkung zu verhindern.

### **3.3 Bodenreifung eines locker eingebauten bindigen Unterbodens**

Der Oberboden einer begrüneten Rekultivierungsschicht unterliegt in der Regel einer raschen Bodenreifung, da Frost, Austrocknung und Wiederbefeuchtung des Bodens sowie die Durchwurzelung und die Aktivität von Bodentieren nahe der Bodenoberfläche entsprechend schnell und unmittelbar einwirken. Auf diese Weise werden ggf. beim Einbau erzeugte Bodenverdichtungen im Oberboden sehr viel eher revidiert als dies im Unterboden der Fall ist (siehe z.B. Ehrmann 2005).

Im Unterboden verlaufen die Alterungsprozesse und die Bodenreifung mit zunehmendem Abstand zur Bodenoberfläche sehr viel langsamer. Es ist aus natürlichen Böden bekannt, dass verdichtete Stauschichten im Unterboden u.U. über Jahrhunderte oder noch längere Zeiträume keine Gefügebildung erfahren, die die Stauwirkung wirksam beheben würde. Solche Stauschichten sollten daher in Rekultivierungsschichten vermieden werden.

Relativ wenig ist hingegen zum Alterungsverhalten von locker eingebauten Unterböden dokumentiert (die Arbeit von Ehrmann 2005 zählt auch diesbezüglich zu den wenigen Beispielen). Es wird erwartet und beobachtet, dass sie im Zuge ihrer Befeuchtung und Durchsickerung sowie infolge ihrer Eigenlast sacken. Gelegentlich wird die Sinnhaftigkeit des lockeren Einbaus daher in Frage gestellt, wenn der mit Absicht und unter Inkaufnahme von damit verbundenen Erschwernissen locker eingebaute Unterboden augenscheinlich nach Einbau aufgrund von Sackungen wieder verdichtet wird. Vor diesem

Hintergrund ist ein Fallbeispiel von Interesse, bei dem die Gelegenheit bestand, einen locker mit einem Langarmbagger ohne Befahrung eingebauten Unterboden nach fünf Jahren nochmals zu untersuchen.

Es handelt sich bei diesem Fallbeispiel um einen humusfreien tonigen Schluff (Ut3 nach AG Boden 2005 mit 16 % Ton, 77 % Schluff, 4 % Sand und 3 % Kies), der seinerzeit mit einer Sackungsreserve von 20 cm in einer Mächtigkeit von 90 cm eingebaut wurde. Beim Einbau wies der Boden eine Luftkapazität von rund 18 Vol.-% und einen nutzbare Feldkapazität von rund 8 mm/dm auf. Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der Dichte und der Durchlässigkeit des Bodens nach Einbau mit den Werten, die nach fünf Jahren Liegezeit gemessen wurden (die Versuche zur Bestimmung der Luftkapazität und der nutzbaren Feldkapazität sind leider noch nicht abgeschlossen).

Tabelle 3 Dichte und Durchlässigkeit eines Unterbodens nach lockerem Einbau und nach fünf Jahren Bodenreifung

<b>Unterboden Ut3</b>	Einheit	nach Einbau	nach fünf Jahren Liegezeit
Mächtigkeit	cm	90	68
Trockendichte	g/cm <sup>3</sup>	1,181	1,572
Verdichtungsgrad	% D <sub>Pr</sub>	69	91
Wasserdurchlässigkeit (Feldversuch bei 10 hPa Wasserspannung) Mittelwert Spannweite	m/s	4,5 · 10 <sup>-06</sup> 3,6 bis 5,4 · 10 <sup>-06</sup>	5,4 · 10 <sup>-06</sup> 4,8 bis 5,8 · 10 <sup>-06</sup>

Die Daten zeigen, dass der Boden tatsächlich im Mittel um die erwarteten rund 20 cm gesackt ist. Dabei hat seine Trockendichte erheblich zugenommen. Der Verdichtungsgrad ist von rund 70 % auf rund 90 % D<sub>Pr</sub> gestiegen. Trotz dieser erheblichen Zunahme der Verdichtung ist die Wasserdurchlässigkeit nahezu unverändert geblieben. Der Boden zeigte auch nach der Sackung trotz der Verdichtung und trotz seines sehr hohen Feinkornanteils keine hydromorphen Merkmale oder andere Hinweise auf Stauwassereinflüsse. Offenbar weist der Boden auch nach der Sackung noch eine ausreichende Anzahl kontinuierlicher wasserleitender Poren auf. Aus den vorliegenden Daten zu Trockendichte und Schichtdicke kann auf eine Halbierung der Luftkapazität infolge der Sackung auf nunmehr rund 9 Vol.-% geschlossen werden. Das Fallbeispiel zeigt, dass nicht der absolute Zahlenwert der Trockendichte für die Funktion der Rekultivierungsschicht maßgeblich ist, sondern die Präsenz einer ausreichenden Zahl von für die Durchlüftung und Stauwasservermeidung wesentlichen, zusammenhängenden Grobporen. In locker eingebauten Böden sind solche Grobporen auch nach Sackung über



die gesamte Schicht kontinuierlich vorhanden. In lagenweise verdichtet eingebauten Böden ist das meist nicht der Fall, so dass der Wasser- und Gastransport behindert wird.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Der Stand der Technik für die Herstellung von fachgerechten Rekultivierungsschichten im Deponiebau wird im bundeseinheitlichen Qualitätsstandard 7-1 der LAGA Ad-hoc-AG (2011) auf der GDA-Empfehlung E2-31 aufbauend umfangreich beschrieben.

Nicht jeder Boden muss locker eingebaut werden. Es gibt ton- und schluffarme Rekultivierungsböden, die aufgrund ihres Korngerüsts relativ unempfindlich gegen Verdichtung sind (Fallbeispiel 2). Die Verdichtungsunempfindlichkeit kann jedoch nicht allein aus der Korngrößenverteilung des Bodens abgeleitet werden. Sie muss durch Versuche im Einzelfall nachgewiesen werden, bei denen die Luftkapazität, die nutzbare Feldkapazität und die Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sowie ggf. von der Konsistenz untersucht wird.

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) reagiert, anders als früher im Analogieschluss zu natürlichen Böden erwartet, relativ wenig auf die Verdichtung, wenn der Boden beim Einbau eine günstige Konsistenz aufweist, da die Verdichtung in der Regel zu Lasten der weiten Grobporen und mithin der Luftkapazität geht (siehe hierzu Fallbeispiele 1 und 2 sowie Anlauf et al. 2011). In locker geschütteten Rekultivierungsböden ist die nFK bei Betrachtung der Zahlenwerte in mm/dm sogar meist etwas niedriger als in verdichteten Rekultivierungsböden, da in letzteren pro Volumenausschnitt Boden eine höhere Masse an Boden mit Mittel- und engen Grobporen vorliegt als im lockeren Boden. Baut man den locker geschütteten Boden jedoch mit einer gewissen Sackungsreserve (ca. 20 %) überhöht ein, so ist die nFK im Gesamtprofil im lockeren, etwas mächtigeren Profil meist in etwa gleich hoch wie im dünneren, verdichteten Profil.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass die nFK von Rekultivierungsschichten grundsätzlich von der Bodenverdichtung unabhängig ist. Je schluff- und tonreicher und je niedriger die Konsistenzzahl des Bodens ist, desto wahrscheinlicher ist eine Bodenschadverdichtung mit der Umwandlung von Mittelporen in Feinporen, in deren Folge die nFK sehr weit unter dem Erwartungswert liegen kann, den man für vergleichbare natürliche Böden aus der Kartieranleitung (AG Boden 2005) entnehmen kann. Auch Böden aus tiefen Baugruben oder solche, die bei der Entnahme häufig überfahren oder in sehr hohen Haufwerken zwischengelagert wurden, weisen aufgrund ihrer Vorverdichtung eine oft enttäuschend niedrige nFK auf. Solche Böden sind hinsichtlich ihrer nFK auch durch eine technische Lockerung nicht nennenswert zu meliorieren, da durch die Lockerung weite Grobporen, nicht aber die für die nFK maßgeblichen Mittel- und engen Grobporen gebildet werden. Fräsen ist z.B. häufig kontraproduktiv. Im schlimmsten Fall werden hinsichtlich ihrer nFK ausgezeichnet geeignete Böden mit einem natürlich über Jahrhunderte entwickelten Bodengefüge durch nicht fachgerechten Umgang unbrauchbar (Boden zu nass und weich, maschinelle Bearbeitung zu hoher Bodenpressung).

Die Luftkapazität (LK) reagiert meist sehr viel empfindlicher auf mechanische Belastung und Verdichtung als die nFK. Während ein Mangel durch eine zu niedrige nFK durch eine entsprechende Erhöhung der Schichtmächtigkeit kompensiert werden kann, ist das bei der LK nicht der Fall. Eine geringe oder sehr geringe LK kann den Wasser- und Bodenlufthaushalt sowie die Begrünung und die Langzeitbeständigkeit des Entwässerungssystems empfindlich stören. Stauwasserbildung mit ggf. Gefahren für die Standsicherheit, Luftmangel für die Pflanzenwurzeln, Mobilisierung und Verlagerung von Eisen und Mangan in das Entwässerungssystem (Verockerung) können die Folge sein. Die LK ist daher ein weitaus besserer, integrierender Qualitätsmaßstab für die Rekultivierungsschicht als die nFK. Wenige Böden weisen nach Verdichtung noch eine ausreichende LK auf (z. B. Fallbeispiel 2). Die LK sinkt in Rekultivierungsböden mit Schluffgehalten über ca. 20 % bei Einbau mit konventionellen Raupen schnell auf kritische Werte, wenn der Boden nicht mindestens eine halb feste Konsistenz aufweist (z. B. Fallbeispiel 1). In solchen Böden ist ein bodenschonender Einbau für eine ausreichend hohe LK sowie für eine ausreichende Anzahl von über die gesamte Schicht kontinuierlichen Grobporen unverzichtbar. Bei einer ausreichenden Kontinuität der wasser- und luftleitenden Grobporen bleiben die gewünschten Bodeneigenschaften auch nach Sackung der locker eingebauten Rekultivierungsschicht erhalten.

Häufig übersehen wird die Bedeutung der Wasserdurchlässigkeit von Rekultivierungsschichten auf steilen Böschungen für die Standsicherheit. Aus Felduntersuchungen ist bekannt, dass insbesondere die Niederschläge im späten Winterhalbjahr zu erheblichen Versickerungsraten aus Rekultivierungsschichten („Dränspenden“) führen können. Die Entwässerungsschicht ist daher auf eine Dränspende von mindestens 25 mm/d zu dimensionieren. Wenn die Rekultivierungsschicht weniger durchlässig ist als 25 mm/d ( $= 3 \cdot 10^{-7}$  m/s), ist ggf. mit einer Stauwasserbildung in der Rekultivierungsschicht zu rechnen. Auf steilen Böschungen ist eine solche Stauwasserbildung entweder zu vermeiden oder es ist im Standsicherheitsgutachten nachzuweisen, dass sie die Standsicherheit der Böschung nicht gefährdet. Da die Durchlässigkeit der eingebauten Rekultivierungsschicht durch Sackung nach Einbau noch abnehmen kann, muss der zu fordernde und nachzuweisende Mindestwert der Wasserdurchlässigkeit mit entsprechender Sicherheitsreserve, z. B. Faktor 10, über dem Wert von 25 mm/d liegen.

Die Bedeutung der LK nimmt bei der Planung und Herstellung von Methanoxidationsschichten (MOS) noch zu, da hier noch wesentlich höhere LK erforderlich werden als in üblichen Rekultivierungsschichten. MOS können vermutlich nur durch Schütten mit Baggern oder Bandabsetzern und nicht durch den Einbau mit Raupen hergestellt werden.

Die Qualitätsanforderungen an die Rekultivierungsschicht müssen bereits in der Planung und im Bauvertrag formuliert und auch in Bezug auf den Bauzeitenplan (Jahreszeit, erforderliche Prüfzeiten etc.) und die örtlichen Randbedingungen der Baustelle (Standsicherheit, Bodenverfügbarkeit, Infrastruktur für Bodenanlieferung und ggf. Zwischenlagerung) abgestimmt und erläutert werden. Wenn grundsätzliche Qualitätsdis-

kussionen erst bei der Bauausführung geklärt werden müssen, ist Streit vorprogrammiert.

Ein bodenschonender Einbau muss durch die ausführende Firma vorausschauend geplant werden. Die Anlieferung des Bodens muss für den Bodeneinbau auf der gesamten Fläche des Oberflächenabdichtungssystems organisiert werden, indem z. B. der Unterbau der späteren Wirtschaftswege genutzt wird oder temporäre Baustraßen angelegt und rückgebaut oder integriert werden. Auch die Auswahl und Anmietung der Baugeräte braucht ggf. einen gewissen Vorlauf, da es auf dem Markt leider nur wenige Raupen gibt, die noch leistungsfähig genug sind und über geringe Betriebsgewichte und breite Kettenfahrwerke verfügen. Die wenigen Geräte sind zudem „in festen Händen“.

Aus der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt der Böden kann das für den jeweiligen Boden fachgerechte Einbauverfahren leider noch nicht abgeleitet werden. Die Bodenauswahl und die Entwicklung des Einbauverfahrens sollte daher durch Fachleute prüfend begleitet werden. Dabei sind mehrere, z. T. gegenläufige Ziele untereinander abzustimmen und die Verfahren entsprechend zu optimieren: Einhaltung der abfallrechtlichen Anforderungen, Ermöglichung von aus wirtschaftlicher Sicht ausreichend hoher Flächenleistung, optimaler Erosionsschutz, Vorbereitung der Bewirtschaftung (z. B. Befahrbarkeit für Mähfahrzeuge) oder Nachnutzung.

Die Qualitätsprüfung von Rekultivierungsschichten wird dadurch erschwert, dass die Parameter LK und nFK nur von wenigen Prüflaboren bestimmt werden können, die zudem oft wenig bautechnische Erfahrung haben, und die Prüfung, insbesondere der nFK, aufgrund erforderlicher Be- und Entwässerungszeiten lange dauert. Der Anhang des BQS 7-1 enthält einige wertvolle Hinweise, wie das Vorgehen bei der Qualitätsprüfung des Einbaus optimiert werden kann: Qualitätslenkung durch Durchführung der zeitaufwändigen Versuche vor allem in der Eignungsprüfung und im Probefeld, Einbaukontrollen anschließend durch schneller auf der Baustelle zu ermittelnde Parameter.

## 5 Literatur

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover

Anlauf, R., P. Rehrmann & T. Nagel (2011): Einfluss der Einbaudichte auf Kennwerte der Wasserbindung in Deponie-Rekultivierungsschichten. Bodenschutz, 4, S. 102 – 108.

DepV – Deponieverordnung (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager. (= Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009). BGBl. I, Nr. 22, S. 900, zuletzt geändert durch Artikel 1 vom 17. Oktober 2011 (BGBl. I, Nr. 52, S. 2066)

DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2006): Geotechnik der Deponien und Altlasten (GDA) - Empfehlung E2-31 Rekultivierungsschichten. Veröffentlicht im Internet unter [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de) (Fortschreibung 2010 im Druck)

Ehrmann, O. (2005): Bodeneigenschaften und Bodenleben in unterschiedlich aufgebauten Rekultivierungsschichten. In: Wattendorf, P. (Hrsg.): Qualifizierte Rekultivierungsschichten. Fachtagung 07.12.2005 in Böblingen, S. 36 – 53.

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ ( 2011): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1. Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen vom 23.05.2011. Veröffentlicht im August 2011 ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)).

Melchior, S. (2010): Rekultivierungsschichten – Geltende Anforderungen, Stand der Technik und Praxiserfahrungen. In : Gebert, J. & E.-M. Pfeiffer (Hrsg): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 63, S. 25-42.