

# Rekultivierungsschichten - Geltende Anforderungen, Stand der Technik und Praxiserfahrungen

Dr. habil. Stefan Melchior

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft, Karolinenstraße 6, 20357 Hamburg - [www.mplusw.de](http://www.mplusw.de)

## 1 Anforderungen an die Rekultivierungsschicht im Abfallrecht

Die technischen Verfahren zur Abdichtung und Rekultivierung von Deponien und Altlasten wurden in den letzten rund 35 Jahren entwickelt. Parallel zur technischen Entwicklung wurden auch abfallrechtliche Vorschriften für den Betrieb und die Stilllegung von Deponien geschaffen und fortgeschrieben, die zunächst als untergesetzliche Regelwerke und später als Gesetze die einzuhaltenden technischen Mindestanforderungen regelten und ihrerseits die technische Entwicklung beeinflusst haben. Während Deponien und deren Stilllegung und Rekultivierung nach dem jeweils aktuell gültigen Abfallrecht genehmigt werden, unterliegen Altlasten und viele Altdeponien formal dem Bodenschutzrecht. Die in diesem Zusammenhang gewählten technischen Lösungen orientieren sich jedoch oft auch an den Anforderungen, die nach Abfallrecht gestellt werden. Es ist zum Verständnis des Standes der Technik daher interessant, wie sich die Anforderungen an die Oberflächenabdichtung und die Rekultivierung von Deponien entwickelt haben.

Technische Anforderungen an die Abdichtung wurden zunächst für die Deponiebasis definiert. Dort wurden anfangs mineralische Dichtungen („Tondichtungen“), später Kombinationsdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Dichtung und Systeme mit Basisdrainage und Abdichtung eingesetzt. Nachdem der Bedarf nach Oberflächenabdichtung erkannt wurde, wurden die bekannten Systeme für die Basisabdichtung auf die Deponieoberfläche übertragen. In der **TA Abfall (1991)** und der **TA Siedlungsabfall (1993)** wurden entsprechende Regelsysteme verankert, die zusätzlich zu Dichtung und Entwässerungsschicht auch eine Rekultivierungsschicht samt Bewuchs aufwiesen. Die Rekultivierungsschicht sollte aus mindestens 1,0 m „kulturfähigem“ Boden bestehen (obwohl der Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen nicht das Ziel war) und mit geeignetem Bewuchs bepflanzt werden. Der Bewuchs sollte den Boden ausreichend gegen Wind- und Wassererosion schützen und unter Anwendung von Wasserhaushaltsbetrachtungen so ausgewählt werden, dass die Infiltration von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem minimiert wird. Die Rekultivierungsschicht sollte so ausgeführt werden, dass die Dichtung vor Wurzel- und Frosteinwirkungen geschützt wird.

Bereits in den 80er Jahren und insbesondere nachdem Forschungsvorhaben zeigten, dass auf dem nassen Ast eingebaute tonhaltige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten empfindlich gegenüber Austrocknung und Durchwurzelung sind (Melchior

1993, 1997, 1999), setzte geradezu ein Boom bei der Suche nach alternativen Abdichtungen ein, die besser herstellbar, langfristig wirksamer und kostengünstiger sein sollten als die mineralische Dichtung nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall.

Dabei wurde Behörden, Planern und Betreibern zunehmend deutlich, dass der in den Regelwerken geforderte Schutz des Dichtsystems vor Durchwurzelung schwer sicherzustellen ist, da der Bewuchs nicht wie ein technisches Bauteil ausgewählt oder bemessen werden kann, sondern unter den vielfältigen Randbedingungen des Standorts, der Konkurrenz der Arten und der Pflegemaßnahmen seine eigene, langfristige Dynamik entwickelt und auch kleine, oberirdisch unscheinbare Pflanzen tiefe Wurzeln bilden können. Der Einfluss der Rekultivierungsschicht, deren Gestaltung bisher kaum Aufmerksamkeit geschenkt wurde, und des Bewuchs auf den Wasserhaushalt und die Gefährdung der Dichtsysteme durch Wurzeln und Austrocknung rückten ab Mitte der 90er Jahre in den Vordergrund der wissenschaftlich-technischen Diskussion um Oberflächenabdichtungssysteme (siehe beispielsweise Brauns et al. 1996, Berger & Sokollek 1997, Melchior 1998).

Aufgegriffen wurden diese Erkenntnisse zunächst in den baurechtlichen **Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik** für alternative mineralische Dichtungen, in denen gegenüber der TA Siedlungsabfall ergänzende Hinweise zum Aufbau und zur Dimensionierung der Rekultivierungsschicht gegeben wurden. Erstmals wurde hier die Schichtmächtigkeit als wichtigste quantifizierte Anforderung an die Rekultivierungsschicht durch die nutzbare Feldkapazität (nFK, das Speichervermögen des Bodens für pflanzenverfügbares Wasser) ersetzt. Über Bentonitmatten wurde eine nFK von mindestens 200 mm gefordert und mit Hinweis auf die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG Boden 1994) der Einsatz bestimmter Bodenarten sowie ein Einbau in loser Schüttung mit einer maximalen Einbautrockendichte von 1,45 g/cm<sup>3</sup> empfohlen (siehe z.B. Anlage 4 in DIBt, 1998). Die genannten Zahlenwerte zu nFK und Einbautrockendichte wurden von der LAGA übernommen (LAGA 2000). In die 2002 verabschiedete **Deponieverordnung (DepV 2002)**, die erstmals als Gesetz und nicht nur als untergesetzliches Regelwerk in Kraft trat, haben sie jedoch keinen Eingang gefunden. Die DepV 2002 stellte in ihrem Anhang 5 im wesentlichen folgende Anforderungen:

- Bemessung der Schichtdicke im Einzelfall mit den Zielen Vermeidung der Durchwurzelung der Entwässerungsschicht und Schutz der Dichtung vor Wurzeln, Frost und Austrocknung (Mindestdicke 1 m)
- Stoffliche Qualität nach § 8 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und Klärschlammverordnung (Zulässige Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen im Anhang 5 DepV 2002)
- „Die Materialien für die Rekultivierungsschicht dürfen die langfristige Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht nicht beeinträchtigen. Sie sollen über eine hohe nutzbare Feldkapazität sowie über ausreichende Luftkapazität zur Sicherstellung eines hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats verfügen.“ Zahlenwerte wer-

den zu nFK, Luftkapazität (LK) und pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat nicht genannt (nach AG Boden ist der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat nFKWe in grundwasserfernen Böden bei einem Wert  $\geq 220$  mm als hoch einzustufen).

Da das Deutsche Institut für Bautechnik Ende der 90er Jahre von den Bundesländern nicht mehr mit der Zulassung von alternativen mineralischen Dichtungen im Deponiebau beauftragt wurde, gründete die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 2004 die **LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“**, die sich der Eignungsbeurteilung von mineralischen Abdichtungen annahm. Seither hat die LAGA Ad-hoc-AG einige Eignungsbeurteilungen erarbeitet, die gemäß neuer Deponieverordnung (DepV 2009) als bundeseinheitlicher Eignungsnachweis dieser Systeme anerkannt werden. In ihren Eignungsbeurteilungen (LAGA 2009) hat die LAGA Anforderungen an die Rekultivierungsschicht zum Schutz der jeweils beurteilten mineralischen Abdichtungskomponente gestellt: *„Die Dicke der Rekultivierungsschicht ist unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit der mineralischen Abdichtungskomponente, der meteorologischen Standortbedingungen, der möglichen Wurzeltiefe der natürlichen potenziellen Vegetation des Standortes und der eingesetzten Böden so zu dimensionieren, dass keine schädlichen Wasserspannungen auf die mineralische Abdichtungskomponente einwirken können.“* Um dies zu erreichen, müssen je nach beurteiltem System gegenüber der DepV 2002 erhöhte Mindestanforderungen durch die Rekultivierungsschicht erfüllt werden:

- Erhöhung der Mindestmächtigkeit von 1,0 m auf Werte von 1,3 m bis 1,5 m
- Forderung nach einem Mindestwert der nutzbaren Feldkapazität der gesamten Rekultivierungsschicht von  $nFK \geq 200$  mm.

2009 wurde das Abfallrecht novelliert und es trat die derzeit gültige neue **Deponieverordnung (DepV 2009)** in Kraft. In ihrem Anhang 1, Kap. 2.3.1 regelt sie die Anforderung an die Rekultivierungsschicht als Komponente des Oberflächenabdichtungssystems wie folgt:

- „1. Die Dicke, die Materialauswahl und der Bewuchs der Rekultivierungsschicht sind nach den Schutzerfordernissen der darunter liegenden Systemkomponenten (weitestgehende Vermeidung einer Durchwurzelung der Entwässerungsschicht, keine sonstige Beeinträchtigung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht, Schutz der Systemkomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung, Folgenutzungen) zu bemessen. Eine Mindestdicke von 1 m darf nicht unterschritten werden.“*
- 2. Das Material soll eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 140 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht, aufweisen.*
- 3. Durch die Auswahl eines geeigneten Bewuchses soll die Oberfläche vor Wind- und Wassererosion geschützt und eine möglichst hohe Evapotranspiration erreicht werden.“*

4. *Das eingesetzte Material muss Anhang 3 Nummer 2 entsprechen. Es muss sichergestellt sein, dass nur solches Material eingesetzt wird, dass das in der Entwässerungsschicht gefasste Wasser nach den wasserrechtlichen Vorschriften eingeleitet werden kann.“*

Neu hinzu gekommen sind Anforderungen an eine zu einer Wasserhaushaltsschicht ausgebauten Rekultivierungsschicht:

*„Wird die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht ausgeführt, gilt:*

1. *Abweichend von Nummer 2.3.1 Ziffer 1 Satz 2 muss die Mindestdicke 1,50 m betragen.*
2. *Abweichend von Nummer 2.3.1 Ziffer 2 soll die Wasserhaushaltsschicht eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 220 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Wasserhaushaltsschicht, aufweisen.*
3. *Die Durchsickerung darf höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung betragen.“*

*Sofern „eine als Wasserhaushaltsschicht ausgeführte Rekultivierungsschicht anstelle der Abdichtungskomponente, der Entwässerungsschicht und der Rekultivierungsschicht“ eingesetzt werden soll, „darf der Durchfluss durch die Wasserhaushaltsschicht im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/Jahr“ betragen.*

*„Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers bei niederschlagsarmen Standorten (weniger als 600 mm pro Jahr) Abweichungen von der nutzbaren Feldkapazität nach Ziffer 2 zulassen, wenn durch Erhöhung der Mächtigkeit nachgewiesen wird, dass eine gleichwertige Dicht- und Schutzwirkung erreicht wird.“<sup>1</sup>*

Ebenfalls neu ist in der DepV 2009 die Definition einer Methanoxidationsschicht:

*„Soll die Rekultivierungsschicht zugleich Aufgaben einer Methanoxidation von Restgasen übernehmen, sind zusätzliche Anforderungen an die Schicht mit der zuständigen Behörde abzustimmen. Wechselwirkungen der Methanoxidation und des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht sind zu bewerten.“*

Bereits die Kürze und Unbestimmtheit der Formulierung zur Methanoxidationsschicht zeigt, dass der Stand der Technik diesbezüglich noch zu entwickeln ist.

---

<sup>1</sup> Der letzte Absatz ist fachlich missglückt. Gemeint ist, dass die geforderte Gesamt-nFK auf Antrag auch auf eine größere Mächtigkeit der Wasserhaushaltsschicht als 1,5 m verteilt werden darf, so dass sich für das Material auf den Dezimeter bezogen (nicht aber für die Gesamtdicke!) eine geringere nFK ergibt.

## 2 Stand der Technik bei Rekultivierungsschichten

Die abfallrechtlichen Regelwerke definieren die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht, die im Zuge der Planung und Herstellung von Rekultivierungsschichten in die Praxis umzusetzen sind. Dabei sind bodenkundliche Grundlagen und geotechnische Zusammenhänge zu beachten, um die Rekultivierungsschicht richtig zu dimensionieren, geeignete Materialien auszuwählen und diese mit einer geeigneten Bautechnik einzubauen, so dass die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht auch in ihrem Zusammenwirken mit dem Bewuchs und den anderen Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems erfüllt werden. Hierzu hat die Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) erstmals 2000 die Empfehlung E2-31 veröffentlicht, in der der Stand der Technik zu Rekultivierungsschichten als Bestandteil von Deponieoberflächenabdichtungssystemen dokumentiert wird und auf die häufig in Ausschreibung und Qualitätsmanagementplänen Bezug genommen wird. 2006 wurde diese Empfehlung fortgeschrieben und an neue Entwicklungen angepasst. Eine erneute Fortschreibung wird 2010 veröffentlicht werden. Die Empfehlung E2-32 befasst sich mit dem Bewuchs der Rekultivierungsschicht. Beide Empfehlungen sollten bei der Planung solcher Systeme im Zusammenhang berücksichtigt werden.

Die GDA-Empfehlung E2-31 enthält im Entwurfsstand 2010 umfangreiche Hinweise zur Planung, zur Auswahl und Eignungsprüfung der Böden sowie zur Herstellung, Qualitätssicherung und Nachsorge von Rekultivierungsschichten.

Die E2-31 definiert drei unterschiedliche Anforderungsniveaus an Rekultivierungsschichten:

- Mindestanforderungen nach DepV (2009)
- Erhöhte Anforderungen bei besonderen landschaftsgestalterischen Zielen oder zum Schutz von empfindlichen Systemkomponenten (z.B. schrumpffempfindliche tonhaltige Abdichtungen oder Kapillarsperren)
- Wasserhaushaltsschichten nach DepV (2009)

Sie erläutert weiterhin die Funktionen von Rekultivierungsschichten:

- Pflanzenstandort (mechanischer Halt, Wasser, Nährstoffe)
- Schutzfunktionen für die tieferen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems (Schutz vor Erosion und mechanischen Einwirkungen, Temperaturschwankungen und Frost, Durchwurzelung und Bodentiere, ggf. Austrocknung)
- Optimierung des Wasserhaushalts des Gesamtsystems (Maximierung Verdunstung, Reduzierung und Dämpfung der Dränspende)

und leitet daraus vielfältige Anforderungen an die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht ab:

- Ausreichende Mächtigkeit

- Gute Durchwurzelbarkeit
- Hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) und ausreichende Luftkapazität ( $LK \geq 8$  Vol.-%)
- Ausreichendes Infiltrationsvermögen und Unempfindlichkeit gegen Verschlammung
- Ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung von Stauwasserbildung (Gefahr von Hangquellen, Rutschungen und Luftmangel für Pflanzenwurzeln)
- Standsicherheit (in sich und im Verbund mit den anderen Systemkomponenten)
- Beständigkeit gegen alle Formen der Erosion (Wind, Wasser, innere und äußere Erosion, Suffosion, Kontakterosion)
- Stabiles Korngerüst und Bodengefüge (nicht sackungs- oder lösungsgefährdet, kein Makroporengefüge)
- Geringes Lösungs- und Austragspotential von Stoffen, die in der Entwässerungsschicht und ggf. in einer Kapillarsperre ausfallen und deren hydraulische Funktion beeinträchtigen können
- Ausreichende Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen, günstige Bodenreaktion und Pufferung
- Aufbau aus umweltverträglichen Materialien

In der E2-31 werden die bodenkundlichen und bodenhydrologischen Grundlagen für die Bemessung ausführlich erläutert. Insbesondere werden aus der Porengrößenverteilung die maßgeblichen Parameter Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität abgeleitet, weshalb im vorliegenden Beitrag auf eine entsprechende Darstellung verzichtet wird. Hinsichtlich des pflanzenverfügbaren Bodenwassers werden die Grundlagen wie folgt zusammen gefasst:

- *„Das pflanzenverfügbare Bodenwasser in der Rekultivierungsschicht wird in erster Linie durch die für Pflanzenwurzeln erschließbare Schichtmächtigkeit sowie durch die nutzbare Feldkapazität bestimmt, die ihrerseits in erster Linie von der Bodenart abhängt.“*
- *Folgende Bodenarten zeichnen sich durch eine hohe nutzbare Feldkapazität aus: Reine Schluffe, lehmige und schluffige Sande und mit Abstrichen sandige und schluffige Lehme.*
- *Humusanteile erhöhen die nFK beträchtlich, sind jedoch nur im Oberboden - in gewissem Umfang - sinnvoll.*
- *Kies und Steine (der Grobboden) reduzieren die Luftkapazität und die (nutzbare) Feldkapazität aller Bodenarten entsprechend ihrem Volumenanteil.*
- *Die Trockendichte beeinflusst die nutzbare Feldkapazität umgekehrt proportional. Allerdings ist dieser Einfluss in natürlichen Böden weniger stark als die Einflüsse von Mächtigkeit und Bodenart.“*

Es wird weiterhin darauf verwiesen, dass insbesondere eine Verdichtung von Rekultivierungsböden beim Einbau schädliche Auswirkungen haben kann und dass Porensystem des Bodens nach Einbau einer zeitlichen Entwicklung und Reifung (Gefügebildung, Sackungen) unterliegt. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass die Luftkapazität ein guter integraler Kennwert für die bodenphysikalische Qualität der eingebauten Rekultivierungsschicht ist und kritische Verdichtungen anzeigt.

Rekultivierungsschichten sind mit Blick auf das jeweilige Anforderungsniveau und die funktionalen Ziele standortspezifisch auszulegen. Dabei können sich die nach DepV einzuhaltenden Mindestanforderungen, z. B. die geforderte Mindestdicke von 1,0 m, als nicht ausreichend erweisen. Zum Schutz von schrumpffempfindlichen tonhaltigen Abdichtungen vor Durchwurzelung empfiehlt die E2-31 beispielsweise eine Erhöhung der Schichtdicke der Rekultivierungsschicht auf mindestens rund 1,5 m bis 2,0 m (in Sonderfällen bis 3,0 m).

Hinsichtlich der Recherche und Auswahl geeigneter Böden werden unter dem Gesichtspunkt der Wasserspeicherung mit Verweis auf AG Boden (2005) vor allem die Bodenarten Schluffe, schluffige Sande, lehmige Sande, schluffiger Lehm und sandiger Lehm empfohlen. Als weitere Vorteile dieser Bodenarten wird ihre gute Durchwurzelbarkeit und geringe Schrumpffgefährdung genannt, so dass die Bildung klaffender Risse und Spalten in diesen Böden als sehr unwahrscheinlich eingestuft wird. Aufgrund ihrer Erodierbarkeit und Verschlammungsneigung wird darauf hingewiesen, dass die sehr schluffreichen Böden nicht als oberste Lage der Rekultivierungsschicht eingebaut werden sollten. Die im Zuge der Eignungsprüfung der Böden durchzuführenden Analysen werden in der E2-31 im Überblick zusammengestellt.

Der Stand der Technik wird für den Einbau der Rekultivierungsschicht in der E2-31 wie folgt beschrieben:

*„Der Abbau, die ggf. notwendige Zwischenlagerung und der Einbau des Bodenmaterials sind unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit so durchzuführen, dass schädliche Bodenverdichtungen vermieden werden. Ober- und Unterboden sind getrennt abzubauen, zu lagern und einzubauen. 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 zu starken Qualitätsverschlechterungen führen und ist entweder zu vermeiden oder zeitlich zu begrenzen und an die in DIN 18915 und DIN 19731 genannten Anforderungen zu knüpfen, wobei die zulässige Schütthöhe von Bodenmieten materialabhängig festgelegt werden und 4 m nicht überschreiten sollte. Insbesondere in den Wintermonaten sollten Bodenmieten vor Vernässung durch geeignete Maßnahmen geschützt werden. Die in den genannten Normen enthaltenen Anforderungen sind auch beim Einbau der Böden in die Rekultivierungsschicht zu beachten.*

*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 Einbauver-*

*fahren 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 Böschungstabilität.*

[...]

*Mit Ausnahme von Böden und speziellen Rekultivierungssubstraten, für die ein versuchstechnischer Nachweis zur Verdichtungsunempfindlichkeit geführt wurde, gelten folgende Hinweise zur Einbautechnik:*

- *Oberboden und Unterboden sind in jeweils einer Lage einzubauen.*
- *Alternativ kann auf eine gesonderte Oberbodenlage verzichtet und die gesamte Rekultivierungsschicht in einer Lage eingebaut werden, wenn die oberen 20 bis 30 cm durch Einarbeiten von Qualitätskompost vergütet werden. Dabei ist bei der Planung der Schichtstärke zu berücksichtigen, dass mit der Mineralisierung des Komposts eine erhebliche Volumenreduzierung des kompostvergüteten Oberbodens einhergeht.*
- *Eingebauter Unterboden darf nicht mit schwerem Gerät befahren werden.“*

Im Detail werden weitere Hinweise zur Gerätetechnik, zum Eignungsnachweis der Einbautechnik im Probefeld, zur Planung von Fahrwegen für den Materialtransport zum Einbauort, zur Berücksichtigung von Sackungen sowie zum Erosionsschutz gegeben. Der Einbau der Rekultivierungsschicht unterliegt dem im Deponiebau üblichen Qualitätsmanagement (Eignungsprüfung, Eingangsprüfung nach Anlieferung, Kontrollprüfungen bei und nach Einbau). Die eingebaute Rekultivierungsschicht ist zu unterhalten (z. B. Schutz vor schädlichen Befahrungen, Prüfung auf Schäden durch Erosion, Sackungen, Nährstoffmangel des Bewuchses)

### **3 Praxiserfahrungen bei der Eignungsprüfung und beim Einbau von Rekultivierungsschichten**

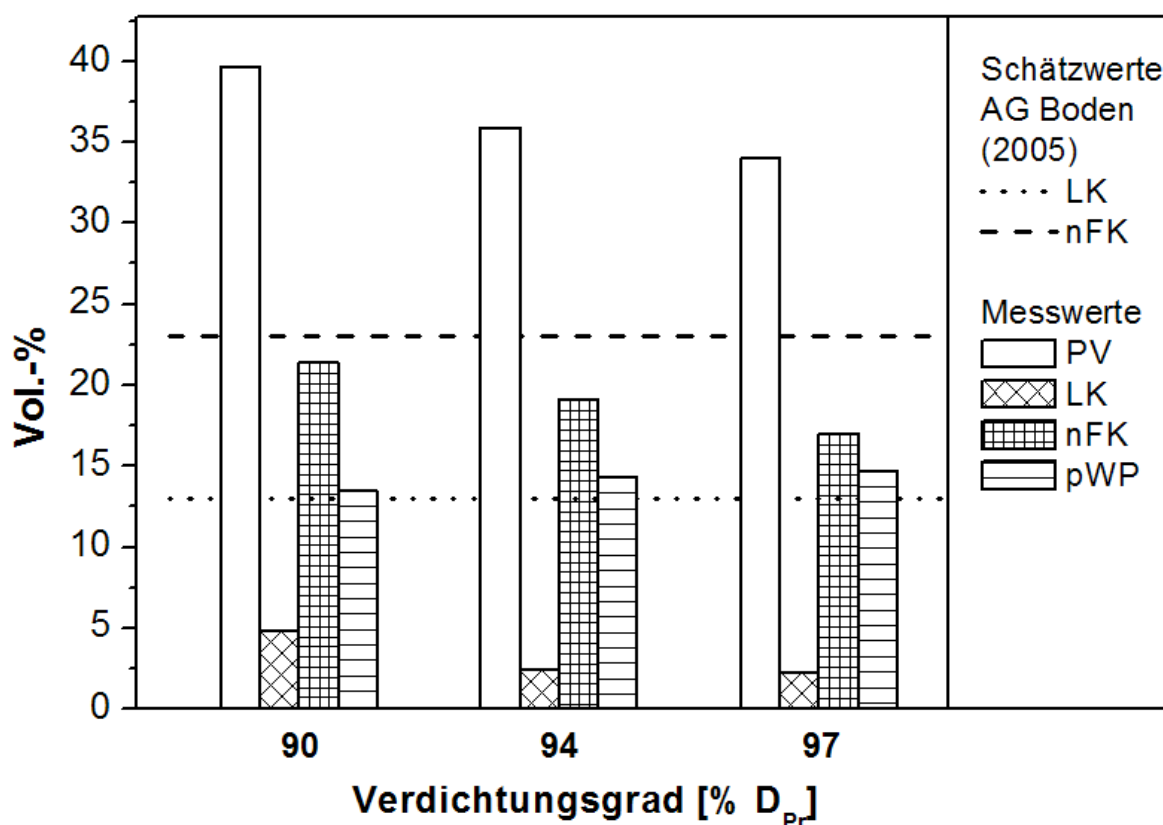
Bei der Planung und Herstellung der Rekultivierungsschicht sind in der Regel folgende Kernfragen zu klären:

- Welche Anforderungen werden projektspezifisch an die Rekultivierungsschicht gestellt?
- Welche Eigenschaften muss das Bodenmaterial für die Rekultivierungsschicht haben, um die zugewiesene Funktion zu erfüllen?



- Wo ist geeignetes Material verfügbar?
- Wie ist das Bodenmaterial einzubauen, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen?

Die melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft hat in der Funktion als Planer oder fremdüberwachende Stelle in den vergangenen 10 Jahren in mehreren Oberflächenabdichtungsprojekten Rekultivierungsschichten untersucht. In diesem Kontext haben wir zahlreiche Laborversuche zur Bestimmung der Luftkapazität und der nutzbaren Feldkapazität durchgeführt, die für unterschiedliche Böden den Einfluss der aus der Einbautechnik resultierenden Einbaudichte beschreiben. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse zu diesem Zusammenhang anhand von Fallbeispielen vorgestellt, wobei als Bezugsgröße immer die Schätzwerte von Luftkapazität und nutzbarer Feldkapazität für natürliche Böden nach AG BODEN (2005) als Linie mit verzeichnet sind.

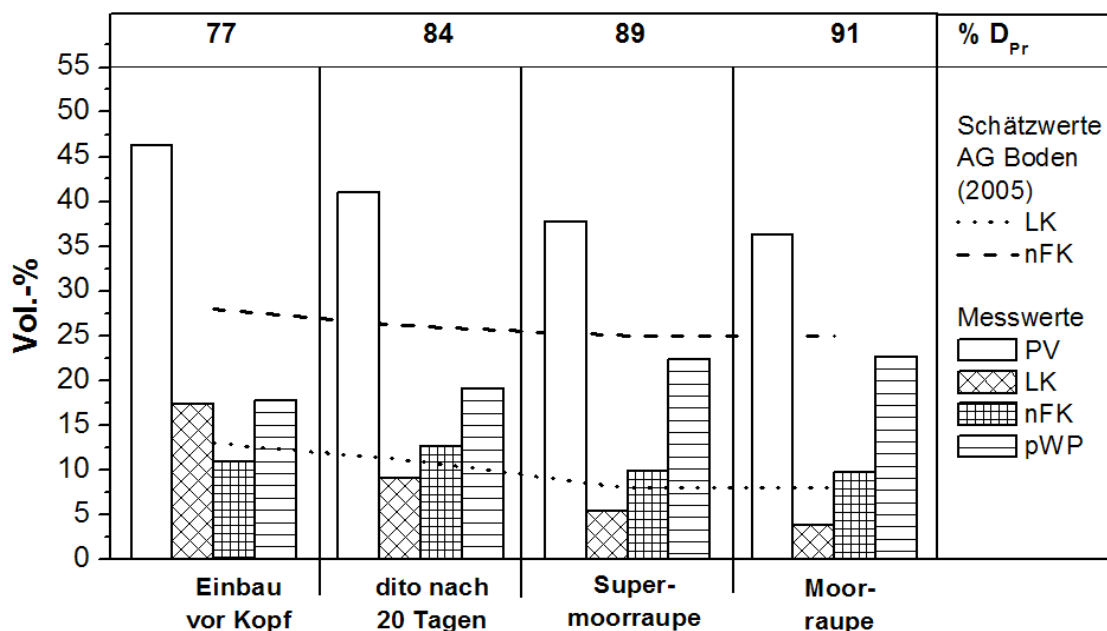


**Abbildung 1** Schluffig lehmiger Sand, humos aus Auenlehm (Boden KG): Messwerte der bodenhydrologischen Kennwerte Porenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (pWP) in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)

Das erste Beispiel in Abb. 1 zeigt einen sehr ton- und schluffreichen Auenlehm, der im Zuge der Eignungsprüfung für eine Rekultivierungsschicht im Oberflächenabdichtungssystem für eine Deponie der Klasse II nach TA Siedlungsabfall untersucht wurde. Mit

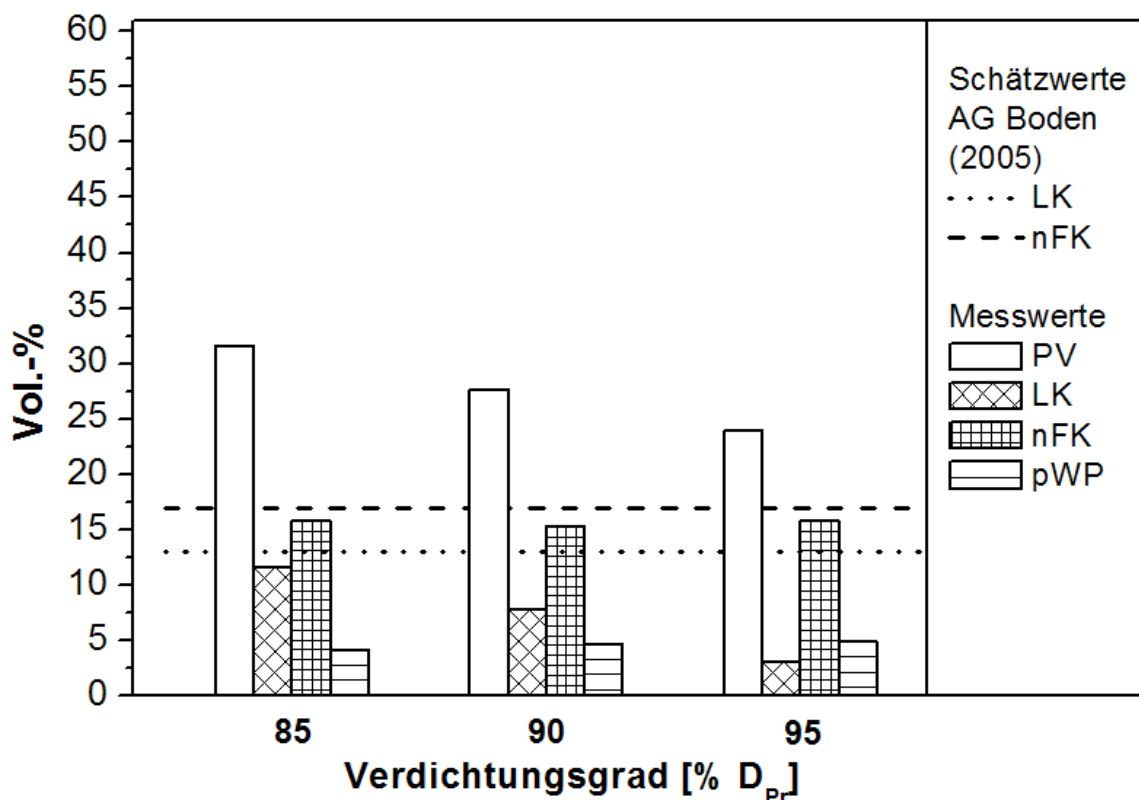
zunehmender Verdichtung sinken erwartungsgemäß sowohl das gesamte Porenvolumen als auch die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität. Die nFK entspricht bei einem Verdichtungsgrad von 90 % fast dem Erwartungswert an natürliche Böden vergleichbarer Korngrößenzusammensetzung und ist auch bei starker Verdichtung noch recht hoch, während die Luftkapazität bereits bei einem Verdichtungsgrad von 90 % bedenklich gering ist. Der Boden ist daher als empfindlich gegen Bodenverdichtung einzustufen.

Das zweite Fallbeispiel (Abb. 2) zeigt den Einfluss unterschiedlicher im Probefeld getesteter Einbautechniken auf die Kennwerte eines Lösses, der in eine Wasserhaushaltsschicht eingebaut werden sollte. Der lockere Einbau mit dem Bagger (77 % D<sub>Pr</sub>) zeigt eine hohe LK und eine für die Bodenart überraschend geringe nFK, die auf eine Bodenverdichtung am Entnahmeort zurückzuführen ist (hoher Feinporenanteil). Nach 20 Tagen Liegezeit hat die Sackung infolge Eigenlast und Befeuchtung eine deutliche Abnahme von PV und LK bei gleichzeitiger geringer Zunahme der nFK bewirkt, wenngleich die nFK für eine Wasserhaushaltsschicht aus Löss noch immer auffallend gering ist. Der Einbau mit der leichten Supermoorraupe und mit der bereits recht schweren Moorraupe zeigt aufgrund der Vorverdichtung des Bodens nur einen geringen Einfluss auf die nFK während die LK empfindlich reduziert wird. Beide Raupen sind insbesondere hinsichtlich der LK für den Einbau dieses Bodens in die Wasserhaushaltsschicht nicht geeignet.

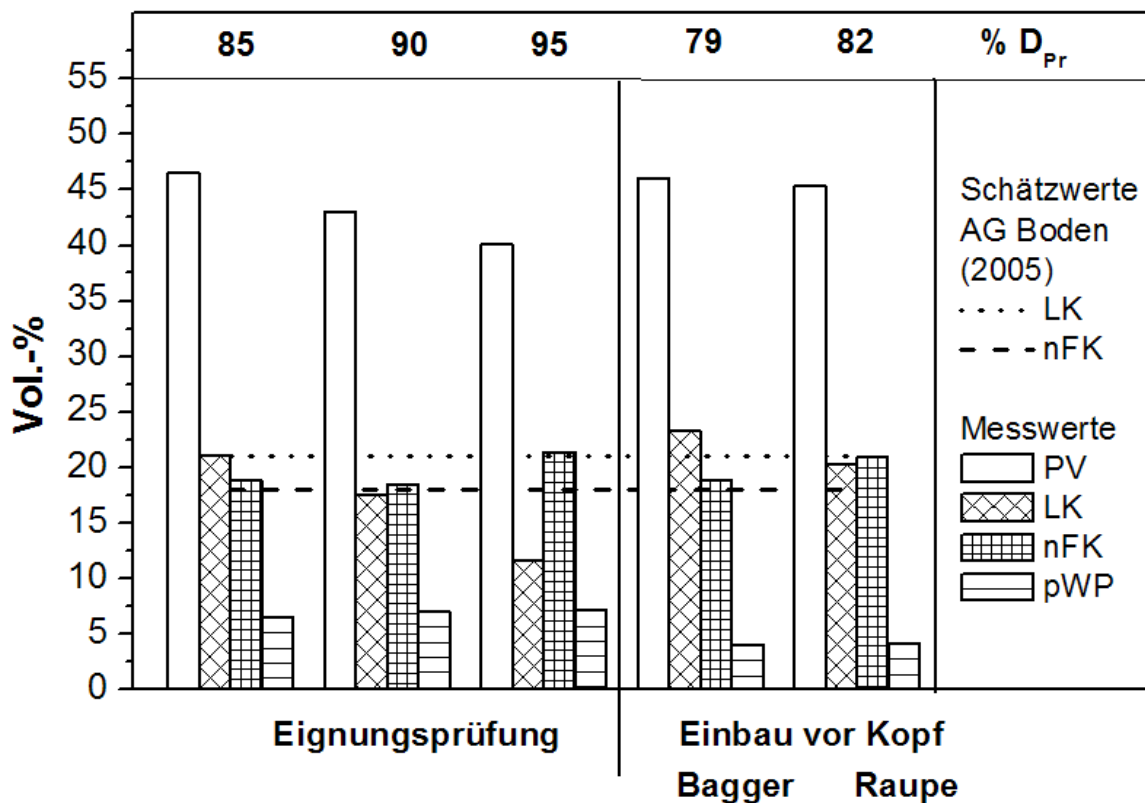


**Abbildung 2** Stark lehmiger Sand, humos aus Löss (Boden S): Messwerte der bodenhydrologischen Kennwerte Porenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (pWP) in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D<sub>Pr</sub> nach unterschiedlicher Einbautechnik im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)

Nicht bei jedem Boden führt jedoch eine Erhöhung der Einbaudichte zwangsläufig zu einem Rückgang von LK und nFK wie die Beispiele in Abb. 3 und Abb. 4 anhand zweier schwach schluffiger glazifluvialer Sande unterschiedlicher Herkunft zeigen. Bei beiden Sanden ist die nFK recht hoch und von der Einbaudichte unabhängig. Die LK sinkt in beiden Fällen mit zunehmender Einbaudichte. Beim schwach schluffigen Sand in Abb. 4 bleibt sie jedoch bis zu einer Verdichtung von 90 % bzw. 95 %  $D_{Pr}$  ausreichend hoch. Der schwach lehmige Sand in Abb. 3 weist geringere Luftkapazitäten und bei einem Verdichtungsgrad von 95 %  $D_{Pr}$  eine zu geringe LK auf. Trotz fast identischer Bodenart ist der Boden UB E2 im Beispiel 3 verdichtungsanfälliger (LK) als der Boden UB E1 im Beispiel 4, bei dem außerdem kaum Unterschiede zwischen dem lockeren Einbau vor Kopf mit dem Bagger und dem seitlichen Einschieben mit der Raupe (ohne Überfahren) auftreten. Der Boden UB E1 im Beispiel 4 ist vermutlich aufgrund seiner Kornform, geringen Kornabstufung und des geringen Tongehaltes sehr unempfindlich gegen mechanische Einwirkungen.

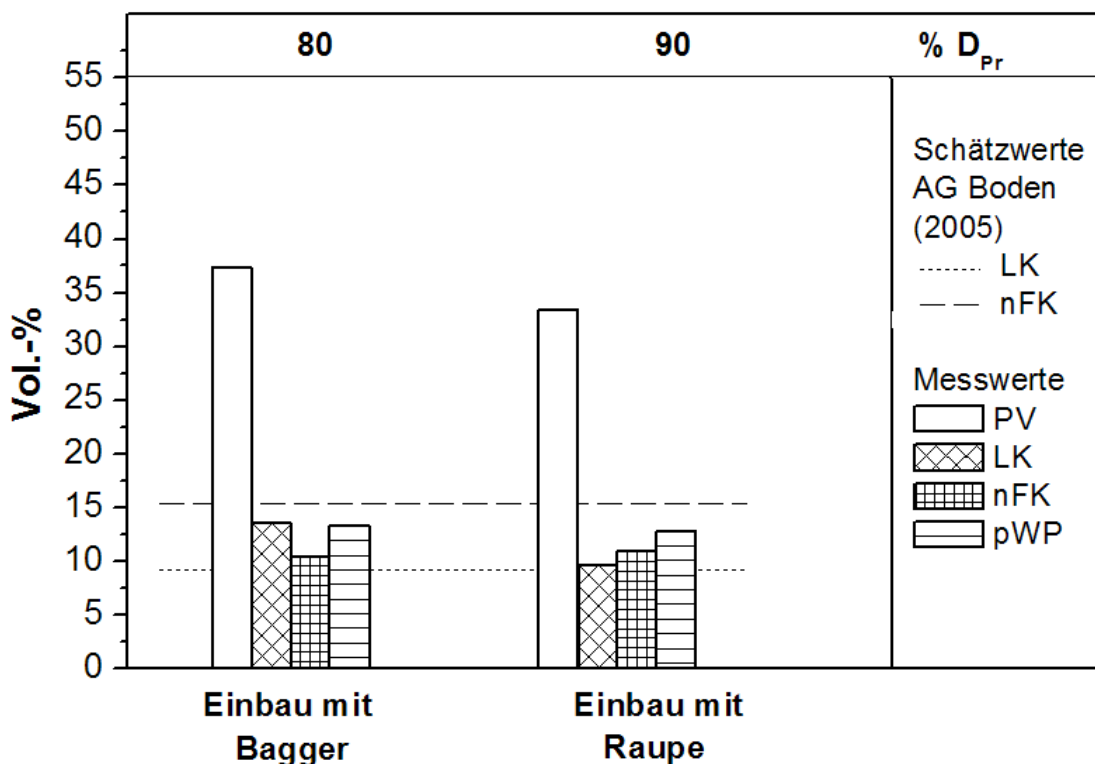


**Abbildung 3** Schwach lehmiger Sand aus glazifluvialen Sanden (Boden UB E2): Messwerte der bodenhydrologischen Kennwerte Porenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (pWP) in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)



**Abbildung 4** Schwach schluffiger Sand aus glazifluvialen Sanden (Boden UB E1): Messwerte der bodenhydrologischen Kennwerte Porenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (pWP) in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)

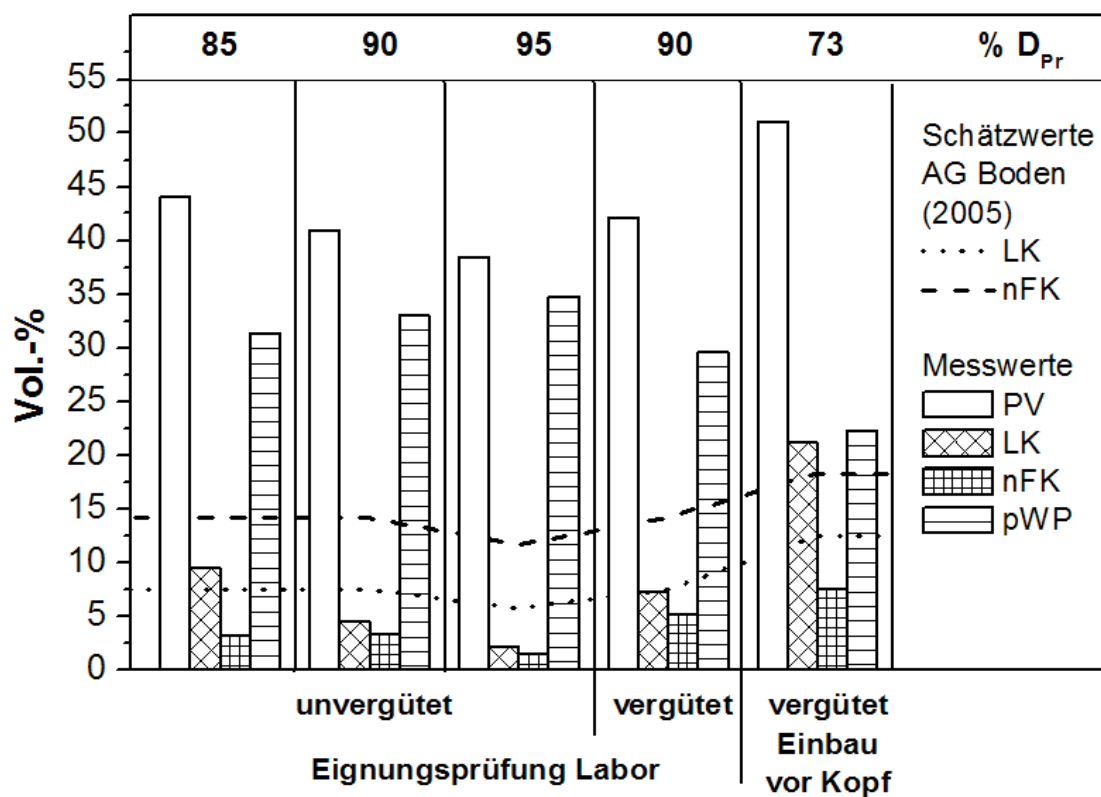
Auch das Beispiel in Abb. 5 zeigt deutlich, dass die Einbaudichte des Bodens nicht immer einen signifikanten Einfluss auf die bodenhydrologischen Kennwerte haben muss. Der in die Rekultivierungsschicht eingebaute gemischtkörnige Bodenaushub (Boden H), der z.T. auch aus der Aufbereitung von Bauschutt stammt, erfüllt die an LK und nFK in diesem Projekt gestellten Anforderungen unabhängig davon, ob der Boden locker mit dem Bagger vor Kopf gelegt wird oder lagenweise mit einer in diesem Fall sogar recht schweren Raupe eingeschoben wird (die in der heutigen DepV 2009 geforderten Mindestwerte der nFK werden jedoch nicht erreicht). Der Schätzwert der nFK für Böden vergleichbarer Korngrößenzusammensetzung wird deutlich verfehlt, was auch in diesem Beispiel auf die Vorverdichtung des Bodens im Zwischenlager zurückzuführen ist.



**Abbildung 5** Mittel lehmiger Sand, humos mit mittlerem Grobbodenanteil aus einer Halde mit gemischtkörnigem Bodenaushub unterschiedlicher lokaler Erdbaustellen mit Bauschuttanteilen (Boden H): Messwerte bodenhydrologischer Kennwerte nach lockerem Einbau vor Kopf mit dem Bagger und lagenweisem Einbau mit Überfahrungen durch die Raupe im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)

Das letzte Beispiel (Abb. 6) zeigt einen ausgesprochenen Problemboden, der sich im Besitz des Bauherrn befand, in einer sehr ausgedehnten und hohen Halde auf dem Deponiegelände lagerte und in eine Rekultivierungsschicht oberhalb einer Verbunddichtung aus KDB und Trisoplast eingebaut werden sollte. Es handelt sich um einem standorttypischen tertiären Verwitterungslehm mit mittlerem Steinanteil (Boden K). Der ehemalige Unterboden zeigte kaum Anzeichen eines Bodenlebens und war in der Halde feucht und sehr dicht gelagert. Im diesem Ausgangszustand ergaben Laborversuche mit zunehmender Einbaudichte der Proben einen sehr starken Rückgang der LK sowie extrem geringe Werte der nFK. Da das Bodenmaterial außerdem hohe Eisengehalte mit nennenswerten Anteilen an mobilisierbarem Eisen enthält, musste es nicht nur in bodenhydrologisch/bodenphysikalischer Hinsicht, sondern auch bodenchemisch aufbereitet werden. In Vorversuchen im Labor wurden durch eine Zugabe von Kalksand der pH-Wert deutlich angehoben und die Werte von LK und nFK (auf immer noch niedrigem Niveau) fast verdoppelt. Für den Einbau in die Rekultivierungsschicht wurde daher Kalksand in den Boden eingefräst und der Boden locker vor Kopf mit dem Bagger und mit Pistenraupen eingebaut (73 % DPr). Dadurch wurden kontinuierliche Grobporen geschaffen, die auch nach Sackung noch für eine

geschaffen, die auch nach Sackung noch für eine ausreichend hohe LK und eine entsprechende Durchlüftung des Bodens sorgen, um der Mobilisierung und dem Austrag von Eisen in die Entwässerungsschicht entgegen zu wirken. Auch die nFK konnte dadurch noch etwas gesteigert werden, bleibt jedoch noch immer deutlich unter den heutigen Anforderungen der DepV 2009 und unter den Werten, die für natürlich gewachsene Böden mit der gleichen Bodenart erwartet werden können und die für eine ganz normale Rekultivierungsschicht anzustreben sind. Das Fräsen des stark überverdichteten Bodens hat sich im vorliegenden Fallbeispiel als geeignete Aufbereitungstechnik erwiesen. Das ist jedoch nicht immer so. Generell gilt, dass das vorbeugende Vermeiden einer schädlichen Bodenverdichtung Vorrang hat vor der Melioration.



**Abbildung 6** Schwach sandiger bis schwach toniger Lehm, humos mit mittlerem Steingehalt aus einer Halde mit Bodenaushub mit tertiärem Verwitterungslehm (Boden K): Messwerte bodenhydrologischer Kennwerte im unvergüteten Ausgangszustand, nach Vergütung mit Kalksand sowie nach Vergütung mit Kalksand, Lockerung mit der Fräse und lockerem Einbau vor Kopf im Vergleich zu Schätzwerten natürlicher Böden nach AG Boden (2005)

## 4 Fazit

Die Rekultivierungsschicht trägt zur langfristigen Funktion von Oberflächenabdichtungssystemen wesentlich bei und muss unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Sie dient als Pflanzenstandort. Im Zusammenwirken mit dem Bewuchs steuert sie die Verdunstung zu Lasten der Versickerung. An niederschlagsarmen Standorten kann die Versickerung durch Boden und Bewuchs so minimiert werden, dass man von einer Wasserhaushaltsschicht mit abdichtender Wirkung sprechen kann. In anderen Fällen ist die Rekultivierungsschicht so zu gestalten, dass die tieferen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems vor schädlichen Einwirkungen durch Verockerung, Durchwurzelung, Austrocknung und Rissbildung geschützt werden. Neue und bisher noch unzureichend definierte Anforderungen werden an Methanoxidationsschichten gestellt. Das aktuelle Abfallrecht (DepV 2009) differenziert bezüglich dieser unterschiedlichen Anforderungen.

Bezüglich der Planung und Herstellung herkömmlicher Rekultivierungsschichten und auch zur Wasserhaushaltsschicht hat sich in den letzten rund zehn Jahren ein Stand der Technik entwickelt, der in der Empfehlung E2-31 (DGGT 2000, 2006) dokumentiert und fortgeschrieben wird. Für Methanoxidationsschichten ist dies noch nicht der Fall.

Der Wasser- und der Gashaushalt der Rekultivierungsschicht hängen wesentlich von der Porenstruktur des Bodens ab. Maßgebliche Kennwerte des Porensystems sind neben der vom Sättigungsgrad abhängigen Wasser- und Gasdurchlässigkeit die Parameter Luftkapazität (weite Grobporen) und nutzbare Feldkapazität (pflanzenverfügbares Bodenwasser). Auf den dargestellten Fallbeispielen und Praxiserfahrungen zur LK und nFK von Rekultivierungsböden aufbauend kann für die Herstellung von Rekultivierungsschichten folgendes Fazit gezogen werden:

- Die Luftkapazität spielt, verbunden mit einer guten Kontinuität der weiten Grobporen, eine wichtige Rolle für die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln, für die Vermeidung der Verockerung von Entwässerungsschichten und Dränmatten, für die Sicherung der Böschungstabilität sowie für den Wasser- und Gasaustausch und die Methanoxidation. Die Luftkapazität sollte mindestens 8 Vol.-% betragen. Sie sinkt in gemischtkörnigen Böden häufig mit zunehmendem Verdichtungsgrad. Es gibt jedoch in relativ seltenen Fällen auch natürliche Böden und aufbereitete Substrate, die diesbezüglich unempfindlich sind.
- Entgegen der weit verbreiteten Meinung ist die nutzbare Feldkapazität zwar häufig, aber nicht grundsätzlich vom Verdichtungsgrad abhängig. Die untersuchten ton- und schluffreichen Bodenmaterialien zeigen in der Regel mit zunehmender Einbaudichte die erwarteten Rückgänge bei LK und nFK, wobei die LK meist wesentlich deutlicher auf die Erhöhung der Einbaudichte reagiert als die nFK. Die untersuchten schwach schluffigen Sande wurden allerdings nur relativ gering durch die Einbaudichte beeinflusst. Auch bestimmte Arten von Bodenaushub reagieren bezüglich der genannten Parameter kaum auf die Einbaudichte.

- Sowohl für natürliche Böden als auch für Ersatzbaustoffe gilt, dass die Schätzwerte von LK und nFK, die in der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden 2005) für reife, nicht überverdichtete, natürliche Unterböden angegeben werden, für Rekultivierungsböden, die aus dem Verband gelöst, transportiert und wieder eingebaut werden, nicht zutreffen. Diese Parameter müssen möglichst frühzeitig bei der Eignungsprüfung der Böden im Labor analytisch in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad bestimmt sowie im Rahmen des Qualitätsmanagements bei der Ausführung (Probe-feld, Schüttversuche, Einbaukontrolle) überprüft werden.
- Aufgrund fehlender Erfahrung werden häufig für Wasserhaushaltsmodellierungen aus der Korngrößenzusammensetzung praxisferne und zu optimistische Annahmen zu den maßgeblichen hydrologischen Bodenkennwerten getroffen und unkritisch in die Verdingungsunterlagen der Baumaßnahme übernommen. Ein solches Vorgehen kann zu gravierenden Störungen bei der Realisierung der Maßnahme führen, wenn die verfügbaren Lieferböden die Anforderungen in der Eignungsprüfung nicht erfüllen.
- Durch gezielte Aufbereitung können auch in ihrem Ausgangszustand sehr schlecht geeignete Böden so verbessert werden, dass sie die Anforderungen an eine „normale“ Rekultivierungsschicht erfüllen. Einer Gefügeverbesserung durch Bodenlockerung oder Fräsen ist jedoch immer die zweite Wahl. Generell gilt, dass das vorbeugende Vermeiden einer schädlichen Bodenverdichtung Vorrang hat vor der Melioration.
- Das Einbauverfahren ist auf die verwendeten Böden individuell abzustimmen. Der herkömmliche, lagenweise verdichtete Einbau von Rekultivierungsböden verschenkt Potentiale und kann Schäden verursachen. Insbesondere an den Übergängen der Lagen wird die Kontinuität der Grobporen mit negativen Folgen für den Wasser- und Gastransport gestört (Stauhorizonte). Verdichtungsempfindliche Böden sollten daher vor Kopf ohne Überfahung locker eingebaut werden. Allerdings muss nicht für alle Böden generell ein lockerer Einbau gefordert werden.
- Locker eingebaute Böden unterliegen zunächst einer Sackung. Beim Einbau ist durch Überhöhung der Schichtdicke eine entsprechende Sackungsreserve einzuplanen.
- Der Oberboden der Rekultivierungsschicht muss im Sinne des Erosionsschutzes eine ausreichende Infiltrationskapazität aufweisen.
- Die in der den einschlägigen DIN-Normen genannten Hinweise zur Herstellung von Rekultivierungsschichten sind im Grundsatz richtig. Der Einbau von Rekultivierungsböden sollte unter Berücksichtigung der Konsistenz bodenschonend und unter Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen im Unterboden erfolgen. Dies muss jedoch nicht zwangsläufig zu einer Einbautechnik führen, die nur eine geringe Einbauleistung erlaubt. Es hängt vielmehr vom Rekultivierungskonzept und von der re-



gionalen Verfügbarkeit geeigneter Böden ab, welche Ziele konkret zu verfolgen sind und welche Einbautechniken für die verfügbaren Böden in Frage kommen. Eine Wasserhaushaltsschicht aus Löss, auf der ein stark wasserverbrauchender Gehölz- bewuchs etabliert werden soll, erfordert ein anders Vorgehen als eine Rekultivierungsschicht, die aus schwach bindigen Sanden über einer Kombinationsabdichtung hergestellt werden soll. Die Anforderungen an Rekultivierungsschichten über schrumpfanfälligen tonhaltigen Dichtungen und die Anforderungen an Methanoxidationsschichten sind noch zu konkretisieren.

## 5 Literatur

- AG Boden (1994, 2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. bzw. 5. Aufl., Hannover
- Berger, K. & V. Sokollek (1997): Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich? In: Egloffstein, T. & G. Burkhardt (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 103, S. 15-39
- Brauns, J., K. Kast, H. Schneider, W. Konold, P. Wattendorf & B. Leisner (1996): Erarbeitung von Regeln zur Herstellung einer Rekultivierungsschicht bei Deponien mit dem Stand der Technik entsprechenden Oberflächenabdichtungssystemen unter Beachtung fortwirtschaftlicher Belange. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- DepV – Deponieverordnung (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 10.07.2002. BGBl. I S. 2807, zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860)
- 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
- DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (1998): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-68.11-5 vom 6. März 1998: Geosynthetische Tondichtungsbahn Bentofix B 4000.
- DIN 18915 (2002): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- DIN 19731 (1998): Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial. Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000, 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)

- LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) Arbeitsgruppe "Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen" (2000): Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen. Themenbereich: Rekultivierung. in: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung & W. Bräcker (Hrsg.): AbfallwirtschaftsFakten 6, S. 18-20 (2002 fortgeschrieben in AbfallwirtschaftsFakten 6.1, S. 30- 32).
- LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2009): Beurteilungen der grundsätzlichen Eignung folgender Oberflächendichtungen: Kombikapillardichtung (Beurteilung vom 12.12.2007), METHA-Material (Beurteilung vom 16.06.2008), Trisoplast (Beurteilung vom 26.01.2009), Bentofix B4000, Bentofix BZ 6000, Bentofix NSP 4900 (alle vom 27.01.2009), Na-Bento RLN und NaBento RLC (beide vom 27.01.2009), Bentomat GDA (Vorläufige Bewertung vom 26.03.2009). (Alle Beurteilungen samt Anlagen veröffentlicht im Internet auf [www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de](http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de) -> Umweltschutz -> Kreislauf- und Abfallwirtschaft -> Deponietechnik -> LAGA Ad-hoc-AG).
- Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundl. Arb., 22, 330 S. und Anhang.
- Melchior, S. (1997): The Application of Containment Technologies on Landfills and Contaminated Sites in Europe. In: Land Contamination & Reclamation, 5, 3, 209-216.
- Melchior, S. (1998): Ansätze zur Gestaltung und Dimensionierung von Rekultivierungsschichten in Abdecksystemen für Altdeponien und Altlasten. In: Stief, K. & B. Engelmann (Hrsg.): Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien - Kostentreibende Willkür oder Notwendigkeit? Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, E. Schmidt Verlag, Berlin, Band 107, S. 161-180.
- Melchior, S. (1999): Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen. In: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hrsg.): Die sichere Deponie. 15 Fachtagung 18./19.02.1999 in Würzburg, 34. S.
- TA Abfall (1991): Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Gemeinsames Ministerialblatt, 42. Jg., Nr. 8, S. 139-214, Bonn, 12.03.1991
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger 99a, 14.05.1993