

Ansätze zur Gestaltung und Dimensionierung von Rekultivierungsschichten in Abdecksystemen für Altdeponien und Altlasten

Dr. Stefan Melchior

1 Einleitung

1.1 Rekultivierungsschichten in der Deponietechnik

Die Hausmülldeponie alter Prägung erhielt früher nach ihrer Stilllegung eine Abdeckung aus Bauschutt oder unqualifiziertem Bodenaushub, der möglichst kostengünstig verfügbar war. In den 80er Jahren setzte sich das Erfordernis einer Oberflächenabdichtung durch. Nach dem Vorsorgeprinzip wurde besonderen Wert auf technische Dichtsysteme gelegt, die möglichst unbegrenzt haltbar und redundant aufgebaut sein sollten. Konzepte, die sich in der Basisdichtung bewährt hatten, fanden als Standardaufbau für die Oberflächenabdichtung Eingang in die Technischen Anleitungen Abfall (1991) und Siedlungsabfall (1993). Die Dichtsysteme aus Entwässerungsschicht über mineralischer Dichtung oder Kombinationsdichtung wurden durch eine Rekultivierungsschicht ergänzt. In den genannten Technischen Anleitungen werden die Dichtungen und Dränagen als zentrale Komponenten der Oberflächenabdichtung sehr detailliert festgeschrieben und ihre Eigenschaften und qualitätsgesicherte Herstellung mit einer Vielzahl von Anforderungen belegt. In der Umsetzung der genannten Regelwerke wird diese strikte Reglementierung von technischen Regelaufbauten mittlerweile als sehr einengend empfunden, da die Regelaufbauten z.T. technisch veraltet sind und jede Abweichung aufwendig begründet werden muß. Diese Kritik an den Regelungen der Technischen Anleitungen trifft bei der Rekultivierungsschicht nicht zu. Erfreulicherweise werden hier die Ziele der Rekultivierungsschicht definiert und weniger ihr technischer Aufbau.

Die Rekultivierungsschicht soll:

- mit einem „geeigneten Bewuchs“ bepflanzt werden,
- im Zusammenwirken mit dem unter Anwendung von Wasserhaushaltsbetrachtungen ausgewählten Bewuchs die „Infiltration von Niederschlag in das Entwässerungssystem minimieren“,
- die Dichtung vor Wurzel- und Frosteinwirkungen schützen.

Technische Details, wie beispielsweise die Dichtung vor Durchwurzelung zu schützen ist, bleiben offen. Einzig die Mindestmächtigkeit des „kulturfähigen Bodens“ wird mit 1 m zahlenmäßig festgelegt.

Damit räumen die Technischen Anleitungen einen breiten Spielraum ein, in dem die Rekultivierungsschicht, von den Anforderungen und Randbedingungen des Einzelfalls ausgehend, gestaltet werden kann.

1.2 Bisherige Praxis bei der Ausschreibung von Rekultivierungsschichten

Die Ansprüche, die in Leistungsbeschreibungen an Rekultivierungsschichten gestellt werden, fallen in der Regel sehr knapp aus. Meist wird nur ein recht breites Körnungsband ausgeschrieben, das einen Mindestanteil an bindigen Komponenten sichert und den Einsatz fetter, schlecht verarbeitbarer Tone begrenzt. Im Oberboden wird außerdem oft ein gewisser Gehalt an organischer Substanz gefordert. Anders als z.B. Entwässerungsschichten werden Rekultivierungsschichten nicht bemessen. Bodenkundliche und vegetationskundliche Kenntnisse werden kaum berücksichtigt.

1.3 Neue Tendenzen

Derzeit erhält die Rekultivierungsschicht vor dem folgenden Hintergrund verstärkt Aufmerksamkeit:

- In-situ-Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungen und theoretische Wasserhaushaltsbetrachtungen haben verdeutlicht, daß die Verdunstung die wesentliche Größe des Wasserhaushalts ist, die die Absickerung von Niederschlagswasser zur Dichtung begrenzt und somit wesentlich zur Langzeitsicherung der abgedeckten Deponie oder Altlast beiträgt. Zur Maximierung der Verdunstung ist eine hohe Wasserspeicherkapazität des durchwurzelten Bodens Voraussetzung.
- Erfahrungen aus der Überwachung ausgeführter Systeme haben gezeigt, daß dieses Potential meist nicht genutzt wird, da weder die Rekultivierungsschicht noch der Bewuchs im Sinne einer Maximierung der Verdunstung gestaltet werden.
- Großflächige Lysimeter- oder Testfelduntersuchungen sowie Aufgrabungen ausgeführter Systeme haben ergeben, daß Dichtungen aus tonhaltigen Baustoffen (bindige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten) gegen Austrocknung und Durchwurzelung sehr empfindlich sind und durch Rißbildung irreversibel geschädigt werden können. Entsprechend gestaltete Rekultivierungsschichten können diesen schädlichen Einwirkungen entgegenwirken.

- Die wirtschaftliche Lage hat sich verändert. Abfallentsorgung und Altlastensanierung stehen unter einem erheblichen Kostendruck. Von den Kostenpflichtigen für Stilllegungs- oder Sanierungsmaßnahmen wird daher hinterfragt, ob die aufwendigen Entwässerungs- und Dichtungsschichten nicht durch eine optimierte Rekultivierungsschicht mit geeignetem Bewuchs kostengünstig ersetzt werden können.
- Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz hat dazu geführt, daß für eine Vielzahl von organischen und mineralischen Stoffen Verwertungsmöglichkeiten, z.B. als Rekultivierungssubstrat in Abdecksystemen, gesucht werden.
- Bis zum Abklingen der „Hauptsetzungen“ kann nach der TA Siedlungsabfall eine temporäre Abdeckung aufgebracht werden, die die „Sickerwasserbildung minimieren und Deponiegasmigration verhindern soll“. Die Gestaltung und die Funktionsdauer solcher „temporären Abdeckungen“ bleibt offen.
- Kontrovers wird diskutiert, ob eine abdichtende Abdeckung auf Altdeponien nicht kontraproduktiv ist, indem sie den von Feuchtigkeit abhängigen mikrobiellen Abbau reaktiver Stoffe behindert.
- Im Rahmen der Gefahrenabwehr ist in jedem Einzelfall zu hinterfragen, ob eine abdichtende Abdeckung angesichts der von der Altlast ausgehenden Gefahr erforderlich und zur Abwehr der Gefahr geeignet ist.

Aus den genannten Gesichtspunkten ist die zielgerichtete Gestaltung von Rekultivierungsschicht und Bewuchs eine aktuelle Aufgabe, die an planende Büros herangetragen wird. Für eine solche standortgerechte und zielgerichtete Gestaltung des Systems aus Rekultivierungsschicht und Vegetation sind drei Leistungsbereiche abzudecken:

- Wasserhaushaltsbetrachtung zur Ermittlung der standortabhängigen Zielvorgaben für die Gestaltung der Rekultivierungsschicht (Welche witterungsbedingten Trockenklemmen müssen im Extremfall überbrückt werden? Welche Starkregenintensitäten sind zu erwarten? Wie hoch ist der Wasserverbrauch der Vegetation? Welche maximale Frosteindringtiefe ist gegeben?)
- Festlegung der am Standort gewünschten Nutzung und der im Zielzustand geplanten Pflanzengesellschaft (einschließlich der Erstellung eines Begrünungsplanes, der sämtliche Maßnahmen von der Ansaat und Pflanzung bis zur Pflege enthält, die bis zur Entlassung der Anlage samt ihres dann etablierten Bewuchses aus der Nachsorge erforderlich sind).
- Festlegung der für die Entwicklung der Zielvegetation notwendigen bodenchemischen und bodenphysikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht sowie Beschreibung und Auswahl geeigneter Baustoffe und geeigneter Einbauverfahren.

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit dem letzten der oben genannten Punkte: Zunächst werden die maßgeblichen bodenhydrologischen Kennwerte am Beispiel

einer ausgeführten Rekultivierungsschicht erläutert. Anschließend wird, von den Anforderungen an die Rekultivierungsschicht ausgehend, die Auslegung der Rekultivierungsschicht im Zuge der Planung dargestellt. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Beschreibung und Auswahl geeigneter Materialien gelegt.

2 Bodenhydrologische Grundlagen

Die Rekultivierungsschicht ist die oberste Bodenschicht eines Abdecksystems. Ihr Porenraum stellt den wesentlichen Wasserspeicher dar, aus dem die Pflanzenwurzeln Wasser entnehmen, verdunsten und somit der Versickerung in die Tiefe entziehen.

Niederschlag fällt zum Teil auf die Pflanzenoberflächen und kann von dort nach Niederschlagsende wieder verdunsten (Interzeption), ohne in den Boden zu gelangen. Der überwiegende Teil des Niederschlags tropft jedoch durch den Vegetationsbestand durch, fließt an der Vegetation zur Bodenoberfläche ab oder fällt direkt auf die Bodenoberfläche. Dieses Wasser infiltriert in den Boden, solange nicht mehr Wasser auf die Bodenoberfläche gelangt als der Boden aufnehmen kann und folglich Oberflächenabfluß einsetzt. Oberflächenabfluß spielt jedoch im Jahreswasserhaushalt auf dicht bewachsenen Böden in der Regel nur eine untergeordnete Rolle. In die Rekultivierungsschicht eingesickertes Wasser erhöht deren Wasservorrat. Es kann von der Bodenoberfläche wieder als Evaporation verdunsten. Es kann von Pflanzen aufgenommen und verdunstet werden (Transpiration). An Hängen kann ein kleiner Teil seitlich in der Rekultivierungsschicht abfließen (Interflow). Der Rest wird als Haftwasser im Porensystem des Bodens gegen die Schwerkraft gehalten und verteilt sich im Boden unter dem Einfluß von Kapillarkräften und der Gravitation. Erst wenn die feinen, mittleren und ein Teil der groben Porenabschnitte des Bodens durch infiltrierendes Niederschlagswasser soweit aufgesättigt sind, daß die sogenannte Feldkapazität (FK) überschritten wird, setzt eine schnelle Versickerung entlang der Schwerkraft ein, so daß Wasser in tiefere Bodenschichten, in der Regel also in die Entwässerungsschicht versickert (Dränspende).

Bild 1 zeigt Meßergebnisse zum Wasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht als Wochenwerte über drei Jahre. Der Wasservorrat in der Rekultivierungsschicht schwankt im Jahresverlauf in charakteristischer Weise. In den Sommermonaten überwiegt die Verdunstung gegenüber dem Niederschlag, so daß der Bodenwasservorrat aufgezehrt wird. Im Sommer 1989 wird der Vorrat durch die Pflanzen fast völlig verbraucht und der sogenannte permanente Welkepunkt (pWP) erreicht, bei dem der Boden das Wasser mit so hohen Bindungskräften hält, daß die meisten Pflanzen, von einigen Spezialisten abgesehen, dieses Wasser nicht mehr

aufnehmen können. Der herbstliche Niederschlagsüberschuß führt wieder zu einer Zunahme des Bodenwasservorrats. Vertikale Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht treten nur dann auf, wenn ein bestimmter Wasservorrat, die Feldkapazität (hier rund 130 mm), überschritten wird.

Bild 1 Bilanz aus Niederschlag und aktueller Verdunstung, Wasservorrat in der Rekultivierungsschicht und vertikale Versickerung aus der Rekultivierungsschicht (Testfeld S1 Deponie Hamburg-Georgswerder, aus Melchior 1993)

Das Wasserspeichervermögen des Bodens steuert die Wasserversorgung der Vegetation und die Höhe der Dränspende. Es hängt entscheidend von der Struktur des Porensystems ab. Das Bodenwasser wird durch Adsorptions- und Kapillarkräfte in den Poren als Haftwasser gehalten. Je feiner die Poren, desto höher sind

die in den Kapillaren wirkenden Bindungskräfte. Die unterschiedlichen Porengrößenanteile eines Bodens werden in der Bodenkunde konventionell durch einen Laborversuch ermittelt, bei dem ungestörte Bodenproben über mehrere Druckstufen entwässert werden. Vereinfachend werden die Porenabschnitte im Boden als Kapillaren mit kreisrundem Querschnitt betrachtet („Äquivalentdurchmesser“). Von der Wasserabgabe des Bodens zwischen zwei Druckstufen kann dann auf das Volumen der Porenabschnitte im Boden geschlossen werden, die entsprechende Durchmesser aufweisen, um das Wasser zwischen diesen Druckstufen kapillar zu halten. Tabelle 1 zeigt die in der Bodenkunde übliche Einteilung der Porengrößenbereiche und listet die zugehörigen Äquivalentdurchmesser und Entwässerungsdrücke auf.

Tab. 1: Einteilung der Porengrößenbereiche

Porengrößenbereiche	Äquivalent- durchmesser [µm]	Entwässerungsdruck	
		hPa	pF = log cm WS
Weite Grobporen (wGP)	> 50	< 60	< 1,8
Enge Grobporen (eGP)	10 - 50	60 - 300	1,8 - 2,5
Mittelporen (MP)	0,2 - 10	300 - 15.000	2,5 - 4,2
Feinporen (FP)	< 0,2	> 15.000	> 4,2

Die maßgeblichen bodenhydrologischen Kennwerte sollen am Beispiel einer ausgeführten Oberflächenabdichtung gezeigt werden. In den Bildern 2 bis 4 werden jeweils die Rekultivierungsschicht (gesondert nach Oberboden und Unterboden) mit den Eigenschaften der Entwässerungsschicht und der mineralischen Dichtung des Systems verglichen. Bild 2 zeigt die Korngrößenverteilung als Summenkurve, Bild 3 ein Balkendiagramm mit der Aufteilung des Bodenvolumens in die Anteile, die durch die Festsubstanz und die jeweiligen Porengrößenbereiche eingenommen werden, und Bild 4 die sogenannte „pF-Kurve“ der Schichten.

Bild 2 Korngrößenverteilung von Rekultivierungsschicht, Entwässerungsschicht und mineralischer Dichtung (Testfelder Deponie Hamburg-Georgswerder, aus Melchior 1993)

Die Bilder 3 und 4 verdeutlichen, daß die mineralische Dichtung aufgrund ihres verdichteten Einbaus das geringste Porenvolumen aufweist, das zudem stark von Feinporen dominiert wird, in denen das Wasser mit hohen Kräften gebunden wird und nicht für Pflanzen verfügbar ist („Totwasser“ $< p_{WP}$). Die grobkörnige Entwässerungsschicht hat ein größeres Porenvolumen und enthält fast ausschließlich weite Grobporen ($> FK$), in denen das Wasser sehr schnell abfließen kann und daher für Pflanzen ebenfalls nicht ausschöpfbar ist. Der Porenanteil der weiten Grobporen wird daher auch als Luftkapazität bezeichnet. Nur die Rekultivierungsschicht enthält größere Anteile an Mittelporen und engen Grobporen, die Wasser mit Bindungskräften zwischen 60 hPa und 15.000 hPa (oder pF 1,8 bis pF 4,2) halten. Dieser Wasservorrat wird konventionell als pflanzenverfügbares Wasser oder nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet.

Bild 3 Substanzvolumen (SV) und Porengrößenverteilung (Legende vgl. Tab. 1)

Bild 4 pF-Kurven der Abdeckschichten (Testfelder Deponie Hamburg-Georgswerder, FK: Feldkapazität, pWP: permanenter Welkepunkt, LK: Luftkapazität, nFK: nutzbare Feldkapazität)

3 Auslegung der Rekultivierungsschicht

3.1 Anforderungen an die Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht hat folgende Hauptfunktionen:

1. Sie soll Pflanzen als Standort dienen.
2. Sie soll dazu beitragen, den Wasserhaushalt des Gesamtsystems zu optimieren.
3. Sie soll ggf. die tieferen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems (Entwässerungsschicht, Dichtung) vor schädlichen Einflüssen schützen.
4. Sie soll mit dazu beitragen, den direkten Kontakt von Menschen, Tieren und Pflanzen mit Schadstoffen zu verhindern.

Im einzelnen bedeutet dies:

ad (1) Die Rekultivierungsschicht muß den Pflanzen mechanischen Halt bieten und sie ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgen.

ad (2) Die Rekultivierungsschicht kann auf folgenden Wegen zur Optimierung des Wasserhaushalts des Gesamtsystems beitragen:

- Maximierung der Verdunstung durch optimierte Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers im durchwurzelteten Boden.
- Reduzierung und Vergleichmäßigung der Dränspende, um die Entwässerungsschicht nicht zu überlasten und die potentielle Einsickerung in Deponie oder Altlast zu minimieren.
- Reduzierung des Oberflächenabflusses durch ausreichendes Infiltrationsvermögen, um der Erosion vorzubeugen und den Aufwand für die Fassung des Oberflächenflusses zu verringern.

ad (3) Die Rekultivierungsschicht soll die tieferen Schichten vor Abtrag schützen.

Sie soll die in der Atmosphäre auftretenden Temperaturschwankungen dämpfen und insbesondere die Entwässerungsschicht und die Dichtung vor Frost schützen.

Sie soll durch ihren Aufbau einem Einwachsen von Pflanzenwurzeln in die Entwässerungsschicht vorbeugen.

Sie muß wühlenden Bodentieren ausreichend Raum bieten oder deren Drang in die Tiefe begrenzen, damit sie die Entwässerungsschicht und die Dichtung nicht beschädigen.

Sofern eine Dichtung eingesetzt wird, die nicht wurzelfest ist oder durch Pflanzenwurzeln indirekt, d.h. durch Austrocknung beeinträchtigt werden kann, ist die Rekultivierungsschicht so zu gestalten, daß ein Eindringen von Wurzeln in die Dichtung verhindert wird.

Bei anderen Dichtungen, die hydraulisch nicht überlastet werden dürfen (z.B. Kapillarsperren), soll die Rekultivierungsschicht zu einer Vergleichmäßigung und Begrenzung der Zusickerung dienen.

Über schrumpfungsgefährdeten Dichtungsschichten (z.B. bestimmte bindige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten) soll sie ausreichend Wasser speichern, damit die Abdichtungen auch in Trockenzeiten vor kritischen, Schrumpfrisse erzeugenden Wasserspannungen geschützt werden.

Bei gegenüber den genannten Einwirkungen unempfindlichen Dichtungen kann die Rekultivierungsschicht entsprechend weniger aufwendig gestaltet werden.

ad (4) Die Rekultivierungsschicht muß aus umweltverträglichen Materialien bestehen, sowie ausreichend mächtig, standsicher und langzeitbeständig sein, um die genannte Funktion zu erfüllen.

Um die genannten Funktionen erfüllen zu können, sind zahlreiche Anforderungen an die Rekultivierungsschicht zu stellen und langfristig zu erfüllen:

- Ausreichende Mächtigkeit und Durchwurzelbarkeit
- Unempfindlichkeit gegen Frost
- Hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität
- Ausreichende pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte und günstige Bodenreaktion
- Beständigkeit gegen alle Formen der Erosion (Wind, Wasser, innere und äußere Erosion, Suffosion, Kontakterosion)
- Ausreichendes Infiltrationsvermögen und Unempfindlichkeit gegen Verschlammung
- Stabiles Korngerüst und Bodengefüge (nicht sackungs- oder lösungsgefährdet)

- Kein Austrag von Stoffen, die in der Entwässerungsschicht ausfällen und deren Durchlässigkeit verringern können
- Standsicherheit (in sich und im Verbund mit den anderen Systemkomponenten)
- Ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung von Stauwasserbildung (Gefahr von Hangquellen, Rutschungen und Luftmangel für Pflanzenwurzeln)
- Aufbau aus umweltverträglichen Stoffen

3.2 Planungsgrundlagen

Der erste Planungsschritt ist die Ermittlung der standortspezifischen hydrologischen Grundlagen und die Ableitung von Zielgrößen, wie z.B. die erforderliche Mindest-nFK, der Rekultivierungsschicht aus Wasserhaushaltsbetrachtungen und aufgrund sonstiger, im jeweiligen Anwendungsfall an die Rekultivierungsschicht gestellter Anforderungen.

Im Rahmen der Wasserhaushaltsbetrachtung sind für den Standort repräsentative, langjährige Wetterdaten (Niederschlagsverteilung, Jahresverlauf der potentiellen Verdunstung, Starkregenhäufigkeit und -ergiebigkeit, maximale Frosteindringtiefe) für durchschnittliche und extreme Jahre auszuwerten und der Wasserverbrauch der Vegetation über deren Entwicklung bis zur Zielgesellschaft abzuschätzen. Wertvolle Hinweise zu möglichen Berechnungsverfahren gibt DVWK (1996). Eine Arbeitsgruppe der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik befaßt sich gegenwärtig mit der Eignungsprüfung von verfügbaren Simulationsmodellen für diesen Anwendungszweck (z.B. HELP) und wird entsprechende Empfehlungen geben.

Daneben ist ein Begrünungsplan zu entwickeln, der auf der Grundlage der gewünschten Nutzung die Entwicklung und die Pflege des Bewuchses beschreibt.

Nachdem die Zielgrößen und Randbedingungen für die Rekultivierungsschicht definiert sind, können geeignete Materialien ausgewählt und der Aufbau der Rekultivierungsschicht festgelegt werden.

3.3 Schichtaufbau

Im Regelfall besteht die Rekultivierungsschicht aus zwei Lagen: dem humushaltigen Oberboden und dem Unterboden, der meist sehr wenig oder keine organische Substanz enthält (vgl. E DIN 19731, E DIN ISO 11074-1, DIN 18915). Gelegentlich werden zusätzlich verdichtete Mineralböden als Wurzelsperrschichten im Unterboden vorgeschlagen. Da bislang jedoch keine Nachweise darüber vorliegen, daß solche Schichten langfristig wirksam sind und keine negativen Ne-

benwirkungen aufweisen (Stauwasserbildung), werden sie im folgenden nicht weiter betrachtet. Sie sind ggf. gesondert zu untersuchen.

3.4 Wahl der Baustoffe

Die Rekultivierungsschicht wird aus Mineralböden aufgebaut und soll im Oberboden organische Substanz enthalten. In der Regel werden entweder Lieferböden aus entsprechenden Gruben oder Bodenaushub, der im Rahmen von Baumaßnahmen angefallen ist, eingesetzt. Gelegentlich werden verschiedene Mineralböden oder auch Reststoffe und ggf. Kompost oder andere organische Grundstoffe gemischt. Direkt nach dem Einbau sind die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht sehr stark vom Einbau geprägt, und es dominieren Primärporen, deren Durchmesser von der Korngrößenverteilung und der Trockendichte des Materials abhängig sind. Mittel- und langfristig greifen insbesondere unter dem Einfluß von Frost und von Organismen (Pflanzenwurzeln, Bodenfauna und Mikroorganismen) bodenbildende Prozesse, wie sie auch in natürlichen Böden wirken. Die Gefügebildung wird zu einem zunehmendem Anteil an Sekundärporen und zu einer Annäherung der Bodeneigenschaften an natürliche Bodenverhältnisse führen.

Bild 5 (Daten aus AG Boden 1994)

Die umfangreichste Datenbasis zu den Eigenschaften natürlicher Boden bietet die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG Boden 1994). Bei aller berechtigten Kritik, die an der 4. Auflage der Kartieranleitung innerhalb der Bodenkunde geübt wird, stellt sie dennoch eine Datenbasis und ein Instrumentarium zur Beschreibung von hydrologischen Bodeneigenschaften dar, wie es in keiner anderen Disziplin verfügbar ist.

Insbesondere erlauben die Tabellenwerte der Kartieranleitung Rückschlüsse von der Bodenart¹ auf die bodenhydrologischen Kennwerte, wie beispielsweise die nutzbare Feldkapazität.

Die wesentlichen Kenndaten können folgenden Kapiteln, Abbildungen und Tabellen der Kartieranleitung entnommen werden:

- Bodenart: Kapitel 5.8.14, Abbildung 13, Tabelle 26
- Trockendichte („Rohdichte trocken“): Tabelle 19
- Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität in Abhängigkeit von Bodenart, organischer Substanz und Trockendichte: Tabellen 56 und 58

In den Bildern 5 und 6 wurden ausgewählte Daten der Kartieranleitung graphisch aufbereitet, um einige wesentliche Zusammenhänge zu verdeutlichen.

¹ Unter dem Begriff Bodenart wird in bodenkundlicher Definition die Korngrößenzusammensetzung verstanden. Neben den Hauptfraktionen Ton, Schluff und Sand und ihren Untergruppen mit entsprechenden Beimengungen werden Lehme als Dreikornmenge definiert, die alle drei Hauptfraktionen in deutlichen Anteilen enthalten. In Tabelle 26 der bodenkundlichen Kartieranleitung sind alle Bodenartenuntergruppen quantitativ beschrieben.

Bild 5 zeigt die nutzbare Feldkapazität für ausgewählte Bodenarten bei einer Schichtmächtigkeit von 1 m in Abhängigkeit von der Trockendichte. Je lockerer der Boden gelagert ist, desto höher ist der Anteil der Mittel- und engen Grobporen, in denen pflanzenverfügbares Wasser gespeichert wird.

Bild 6 zeigt für die gleichen Bodenarten die Abhängigkeit der nutzbaren Feldkapazität von der Profilmächtigkeit bei mittlerer Trockendichte. Aus dieser Darstellung wird deutlich, daß die Festlegung der Rekultivierungsschichtmächtigkeit allein die bodenhydrologische Qualität der Schicht nur unzureichend definiert. Bei gleicher Schichtmächtigkeit haben Schluffe, schluffig-lehmige Sande und lehmige Sande eine rund doppelt so hohe nFK als reine Sande, Tone oder „fette“ Böden wie sandig-toniger Lehm oder lehmiger Ton.

Bild 6 (Daten aus AG Boden 1994, Abkürzungen siehe Legende Bild 5)

Die Schichtmächtigkeit ist für die hydrologische Auslegung der Rekultivierungsschicht mithin nicht allein entscheidend. Die Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist zudem wesentlich von der maximalen Frosteindringtiefe und der erwarteten maximalen Wurzeltiefe der Vegetation abhängig zu machen. Bei schrumpfunggefährdeten Dichtungen und Kapillarsperren kann ggf. eine höhere Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht erforderlich sein, um die Entstehung kritischer Wasserspannungen in der Dichtung bzw. eine Überlastung der Kapillarsperre zu verhindern. Hierzu sind gesonderte Betrachtungen anzustellen.

Die Auswertung der Daten der bodenkundlichen Kartieranleitung erlaubt folgende Rückschlüsse für die Materialwahl und den Einbau der Böden in die Rekultivierungsschicht:

- Die nutzbare Feldkapazität der Rekultivierungsschicht wird hauptsächlich durch die Bodenart und die Schichtmächtigkeit bestimmt.
- Hohe nutzbare Feldkapazitäten haben vor allem folgende Bodenarten: Schluffe, lehmige und schluffige Sande und mit Abstrichen sandige und schluffige Lehme. Humusanteile erhöhen die nFK beträchtlich.
- Die Trockendichte beeinflußt die nutzbare Feldkapazität umgekehrt proportional. Allerdings ist dieser Einfluß in natürlichen Böden weniger stark als die Einflüsse von Schichtmächtigkeit und Bodenart.

Leider gelten die Kennwerte der Kartieranleitung nur für natürliche Böden. In Rekultivierungsschichten werden die Böden jedoch technisch eingebaut. Eine Überverdichtung erfolgt zugunsten von Feinporen, die Totwasser enthalten, und zu Lasten von engen Grob- sowie Mittelporen, die Wasser pflanzenverfügbar speichern können. Unter Umständen kann es viele Jahrzehnte dauern, bis eine solche Überverdichtung durch die Gefügebildung, mit der eine Lockerung einhergeht, kompensiert oder zumindest abgemildert wird.

Bild 7 zeigt dieses anhand eines Beispiels. Dargestellt sind die Porenanteile der bereits in den Bildern 2 bis 4 gezeigten Rekultivierungsschicht (getrennt in Ober- und Unterboden) und mineralischen Dichtung. Die jeweils oberen Balken zeigen die aus der Bodenart unter Berücksichtigung der Humusanteile abgeleiteten Schätzwerte der bodenkundlichen Kartieranleitung, die mittleren Balken geben die Meßwerte nach dem Einbau der Schicht an. 1995 wurden erneut Proben entnommen und analysiert (untere Balken). Es zeigt sich, daß der Oberboden locker geschüttet wurde und sogar etwas mehr weite Grobporen enthält als geschätzt. Der Unterboden ist jedoch stärker verdichtet als bei natürlichen Böden mit vergleichbarer Korngrößenzusammensetzung zu erwarten wäre. Das Gesamtporenvolumen ist folglich geringer. Die Verdichtung hat insbesondere die nFK (Mittel-

und enge Grobporen) verringert, während der für Pflanzen uninteressante Feinporanteil zugenommen hat. Nach rund acht Jahren haben die Porenvolumina von Ober- und Unterboden um ca. 5 % bzw. 3 % zugenommen. Die durch Wurzeln und Tiere gebildeten Sekundärporen erhöhten den Anteil der weiten Grobporen, die nFK blieb nahezu unverändert gering.

Diese Zusammenhänge zeigen, daß die Daten der bodenkundlichen Kartieranleitung für eine Dimensionierung von Rekultivierungsschichten nur mit Einschränkungen nutzbar sind. Es existiert jedoch keine vergleichbare Datenbasis für technologische Böden, auf die zurückgegriffen werden könnte.

Bild 7 Porengrößenverteilung in Abdeckschichten: Aus der Bodenart nach der bodenkundlichen Kartieranleitung geschätzt (obere Balken), nach Einbau 1987 gemessen (mittlere Balken) und bei einer Aufgrabung 1995 gemessen (untere Balken)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß unter dem Gesichtspunkt der Wasserspeicherung vor allem Bodenarten in der Reihenfolge Schluffe, schluffige Sande, lehmige Sande, schluffiger Lehm, sandiger Lehm geeignet sind. Weitere Vorteile dieser Bodenarten sind ihre gute Durchwurzelbarkeit und ihre geringe Schrumpfungsfähigkeit, so daß die Bildung klaffender Risse und Spalten in diesen Böden sehr unwahrscheinlich ist und die Dränspende vergleichmäßig wird. Die Nährstoffversorgung sollte angesichts des bindigen und der organischen Bestandteile im Oberboden bei diesen Bodenarten ausreichend sein. Unter den Aspekten

der Erodierbarkeit und der Verschlammungsneigung sollten Schluffe, schluffige Sande und schluffige Lehme nicht als oberste Lage der Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Lehmige Sande, insbesondere mit Kies- oder Steinanteilen, eignen sich hier besser, organische Substanz im Oberboden erhöht allgemein die Stabilität.

Reine Sande sind für Rekultivierungsschichten kaum geeignet, da sie erosionsanfällig sind, wenig Wasser pflanzenverfügbar speichern und den Pflanzen mechanisch wenig Halt bieten. Ihre relativ geringe Wasserspeicherkapazität und die im Vergleich zu bindigen Bodenarten hohe Wasserleitfähigkeit nahe Sättigung haben ungünstige Folgen: Die Dränspende ist insgesamt hoch, es müssen bei Einzelereignissen hohe Zusickerungsraten in der Entwässerungsschicht schadlos abgeführt werden, die Austrocknungsgefährdung für ggf. schrumpfeempfindliche Dichtungen ist relativ hoch, Pflanzen werden versuchen, ihren Wasserbedarf in Trockenphasen aus tieferen Bodenschichten zu decken und können dann ggf. zusätzlich zur Austrocknung von Dichtungen beitragen.

Tonreiche Böden sind ebenfalls kaum geeignet, da sie verdichtungsanfällig sind, bei Austrocknung schrumpfen und Schrumpfrisse sowie verhärtete Aggregate bilden, die schlecht durchwurzelbar sind. Starke Quell- und Schrumpfvorgänge im Boden können Pflanzenwurzeln empfindlich schädigen.

Hohe Anteile an organischer Substanz im Unterboden sind zu vermeiden, da sie mittelfristig abgebaut werden und dieser Abbau zu unerwünschten Effekten, z.B. Freisetzung von Schwefelwasserstoff, führen kann. Ebenso ist darauf zu achten, daß keine Materialien eingesetzt werden, die zuvor unter reduziertem Milieu lagerten und Eisensulfide enthalten, da deren Oxidation Sulfat freisetzen und bei fehlender Pufferung zu einer sehr starken Bodenversauerung führen kann.

In einem die bodenhydrologische Bemessung ergänzenden bodenkundlichen Gutachten sind folgende Fragen der Bodenentwicklung in der Rekultivierungsschicht zu bewerten:

- Nährstoffhaushalt
- Bodenreaktion und Pufferung
- Erodierbarkeit und Verschlammungsneigung
- Gefügeentwicklung (Vermeidung eines Makrogroßgefüges)
- Gefahr der Lösung und Verlagerung von Stoffen (Tonverlagerung, Abbau organischer Substanz und Verlagerung von Huminstoffen, Entkalkung, Verlagerung von Metalloxiden und -hydroxiden) und der Sackungsverdichtung
- Sonderfragen, wie z.B. Benetzbarkeit der organischen Substanz im Fall einer technischen Beimischung von Kompost o.ä. Stoffen.

Die Standsicherheit der Oberflächenabdichtung einschließlich Rekultivierungsschicht ist in einem gesonderten Gutachten nachzuweisen.

Die Verwertung von Reststoffen in der Rekultivierungsschicht ist im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu befürworten, sofern die Stoffe oder die mit diesen Komponenten hergestellten Gemische für die Aufgabe geeignet sind und keine unzulässige Umweltbelastung mit ihrem Einsatz verbunden ist. Der Einsatz solcher Stoffe ist durch die LAGA, die LABO und E DIN 19731 geregelt.

3.5 Anforderungen an die Herstellung der Rekultivierungsschicht

Aus den Ausführungen zum Einfluß der Bodenverdichtung auf die bodenhydrologischen Kennwerte folgt, daß der Einbau der Rekultivierungsschicht sehr sorgfältig erfolgen muß. Der Abbau, die ggf. notwendige Zwischenlagerung und der Einbau des Bodenmaterials ist unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit so durchzuführen, daß Verdichtungen auf das unvermeidbare Maß beschränkt 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 zu vermeiden oder zumindest zeitlich zu begrenzen und an die in E DIN 19731, S.11 genannten Anforderungen geknüpft. Unter- und Oberboden sind in einem Arbeitsgang ohne Befahrung einzubauen. Sind Befahrungen unvermeidlich, so sollen sie nicht mit Radfahrzeugen, sondern mit Kettenfahrzeugen mit möglichst geringer Pressung erfolgen. Ggf. sind zum Schutz von Dichtung und Entwässerungsschicht temporäre Fahrdämme einzurichten, die später rückgebaut oder zumindest aufgelockert werden müssen.

3.6 Qualitätssicherung des Einbaus

Die maßgebenden Eigenschaften der Ausgangsmaterialien (Korngrößenverteilung, Humusgehalt, Stoffgehalte, pH-Wert, natürlicher Wassergehalt, Proctordichte und optimaler Wassergehalt u.a.) sind vor Einbau, ggf. bereits am Entnahmestort oder im Zwischenlager, zu überprüfen. Einzelheiten sind im projektspezifischen Qualitätssicherungsplan festzulegen. Gleiches gilt für Art und Umfang der Prüfungen der eingebauten Schicht (Trockendichte, Porengrößenverteilung, Infiltrationsvermögen, Durchlässigkeitsbeiwert, Scherparameter u.a.).

3.7 Nachsorge der eingebauten Rekultivierungsschicht

Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen, die mit Befahrungen verbunden sind, sowie aus anderen Gründen erforderliche Befahrungen dürfen nur bei ausreichend trockenem Boden durchgeführt werden.

Nach der Herstellung der Schicht sollten die maßgebenden Bodeneigenschaften in mehrjährigen Abständen stichprobenhaft und durch Inaugenscheinnahme überprüft werden. In Abhängigkeit von den Ergebnissen dieser Überprüfungen kann über ggf. erforderliche Pflegemaßnahmen (z.B. Gefügestabilisierung oder Stabilisierung der Bodenreaktion durch Kalkung, Düngung, Bodenlockerung) entschieden werden. Hierbei sollten die Bioindikationseigenschaften der Vegetation genutzt werden, um z.B. Bodenverdichtungen, Staunässe, Nährstoffmangel oder -überschuß zu erkennen.

4 Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden die Anforderungen an Rekultivierungsschichten dargestellt und im wesentlichen herausgearbeitet, welche bodenhydrologischen Eigenschaften für die Materialwahl entscheidende Bedeutung haben. Ergänzende Fragen der Auslegung der Rekultivierungsschicht (z.B. der Nährstoffhaushalt) sind in der Regel weniger relevant und wurden nur genannt oder am Rande beleuchtet.

Die Rekultivierungsschicht ist immer im Zusammenhang mit dem Nutzungsziel, der Vegetation, den klimatischen Verhältnissen am Standort und auch dem Aufbau der Abdeckung unterhalb der Rekultivierungsschicht zu betrachten. Ein qualifizierter Aufbau der Rekultivierungsschicht wird die Kosten für die Schicht erhöhen, wobei die Kosten sehr stark von der Verfügbarkeit geeigneter Baustoffe abhängig sind. Ein optimierter und standortgerechter Aufbau von Rekultivierungsschicht und Bewuchs bietet jedoch ein Reihe von Chancen, die bisher kaum genutzt wurden:

- Ein solcher verzichtet werden.
- Aufbau erhöht die Redundanz eines Oberflächenabdichtungssystems. Während technische Sicherungselemente eine zeitlich begrenzte Lebensdauer haben, kann von einem standortgerechten System Boden/Pflanze eine relativ lange Beständigkeit erwartet werden (wenngleich auch natürliche Systeme einer gewissen Dynamik und möglichen Katastrophenereignissen unterliegen). Es erscheint dem Autor im Regelfall wahrscheinlicher, daß der Ausfall eines über viele Jahrzehnte gealterten, technischen Dichtelements durch die dann maximale Verdunstung eines voll ausgebildeten mehrstufigen Baum- und Strauch-

bestandes zumindest zum Teil kompensiert werden kann, als daß zu diesem Zeitpunkt noch technische Kontrollen durchgeführt und geeignete Reparaturmaßnahmen eingeleitet werden.

- Einige Altdeponien und Altlasten, die üblicherweise mit einer Kombinationsdichtung abgedichtet würden, können infolge einer Optimierung von Rekultivierungsschicht und Bewuchs vermutlich mit einer kostengünstigeren Einfachdichtung ausgestattet werden, so daß sich trotz erhöhter Kosten für die Rekultivierungsschicht insgesamt eine Kostenersparnis ergeben kann.

Unter klimatisch günstigen Randbedingungen (geringe Niederschläge mit auch in Extremjahren gleichmäßiger Verteilung, hohe Verdunstung, wenig Schneeniederschlag) und in Fällen, in denen z.B. aufgrund der Gefährdungssituation keine vollständig abdichtende Wirkung der Oberflächenabdeckung gefordert ist, kann nach Optimierung von Rekultivierungsschicht und Bewuchs ggf. auf Entwässerungsschicht und Dichtung verzichtet werden.

5 Quellen

AG Bodenkunde (1994):

Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., Hannover, 392 S.

DIN 18915 (1990):

Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten.

DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1996):

Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblatt 238, Bonn, 135 S.

E DIN ISO 11074-1 (1993):

Bodenbeschaffenheit - Begriffe und Definitionen aus dem Bereich Bodenschutz und Bodenkontamination

E DIN 19731 (1995):

Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial

LABO - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (1995):

Anforderungen an die Verwertung von kultivierbarem Bodenmaterial - Technische Regeln

LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1995):

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln

Melchior, S. (1993):

Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 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, ISSN 0939-4729, Bonn 12. März 1991

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger 99a, 14. Mai 1993,