

E 2-31 Rekultivierungsschichten

Stand: Bautechnik 2006

1 Allgemeines

Oberflächenabdichtungssysteme bzw. Oberflächenabdeckungen dienen zur Sicherung von Deponien und Altablagerungen. Ein Oberflächenabdichtungssystem nach E 2-4 besteht grundsätzlich aus den folgenden Elementen:

- Bewuchs
- Rekultivierungsschicht
- Entwässerungsschicht
- Abdichtungsschicht
- Ausgleichsschicht

Oberflächenabdeckungen bestehen häufig nur aus der Rekultivierungsschicht und dem Bewuchs.

Rekultivierungsschicht und Bewuchs beeinflussen sich wechselseitig und erfüllen ihre Aufgaben im Verbund. Deshalb müssen die Empfehlungen E 2-31 "Rekultivierungsschichten" und E 2-32 "Gestaltung des Bewuchses auf Deponien" gemeinsam betrachtet werden.

Die Rekultivierungsschicht und der Bewuchs erfüllen wesentliche Aufgaben in einem Oberflächenabdichtungssystem bzw. einer Oberflächenabdeckung. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass die Sickerwasserneubildung auch langfristig weitgehend reduziert wird. Dies ist besonders wichtig bei Deponien ohne Basisabdichtung oder wenn mit der alterungsbedingten Abnahme der Wirksamkeit der Abdichtungsschichten zu rechnen ist. In Abhängigkeit von der Sicherungsfunktion, die das Oberflächenabdichtungssystem oder die Oberflächenabdeckung zu erfüllen haben, und von den Standortgegebenheiten können unterschiedlich strenge Anforderungen an die Rekultivierungsschicht und den Bewuchs zu stellen sein.

Die in den GDA-Empfehlungen, der Deponieverordnung (DepV), in der TA Abfall und TA Siedlungsabfall sowie in sonstigen Regelwerken an die Rekultivierungsschicht gestellten Anforderungen werden in dieser Empfehlung durch umfassende und detaillierte Hinweise zum standortgerechten Entwurf und zur Ausführung ergänzt.

Im Sinne des geotechnisch orientierten GDA-Baustein-Systems

- E2 – Entwurfsgrundsätze
- E3 – Eignungsprüfungen
- E4 – Herstellungsverfahren
- E5 – Qualitätsmanagement

ist die Empfehlung E 2-31 in die Abschnitte 2 bis 5 gegliedert. Im Abschnitt 6 wird die Unterhaltung der Rekultivierungsschicht angesprochen. Die Gestaltung des Bewuchses wird in E 2-32 behandelt.

Die Empfehlung ist das Ergebnis interdisziplinärer Zusammenarbeit von Fachleuten u.a. der Geotechnik, der Bodenkunde und der Deponietechnik.

2 Entwurf der Rekultivierungsschicht

2.1 Funktionen und Anforderungen

Die Rekultivierungsschicht hat folgende Funktionen:

Pflanzenstandort

Die Rekultivierungsschicht bietet den Pflanzen mechanischen Halt und versorgt sie ausreichend mit Wasser und Nährstoffen.

Optimierung des Wasserhaushalts des Gesamtsystems

Die Rekultivierungsschicht beeinflusst den Wasserhaushalt des Gesamtsystems maßgeblich. In Abhängigkeit von den klimatischen Standortgegebenheiten und den Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem oder die Oberflächenabdeckung ergeben sich z.B. die folgenden Ziele:

- Maximierung der Evapotranspiration durch optimierte Speicherung des pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum in Kombination mit dem Bewuchs
- Reduzierung und Dämpfung der Dränspende, um die Entwässerungsschicht oder eine ggf. vorhandene Kapillarsperre nicht zu überlasten

Schutzfunktionen

Die Rekultivierungsschicht schützt die tieferen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems (Entwässerungsschicht, Abdichtung) vor schädlichen Einflüssen:

- Schutz der tieferen Schichten vor mechanischen Einwirkungen
- Dämpfung der atmosphärischen Temperaturschwankungen und Frostschutz
- Schutz von schrumpfungsempfindlichen Abdichtungsschichten vor Wasserverlust
- Vorbeugung gegen das Einwachsen von Pflanzenwurzeln in die Entwässerungsschicht und in die Abdichtung
- Schutz der Entwässerungsschicht und der Abdichtung vor Tieren
- Schutz vor Erosion

Bei einer Oberflächenabdeckung verhindert die Rekultivierungsschicht den direkten Kontakt mit den Schadstoffen.

Um die genannten Funktionen erfüllen zu können, sind folgende generelle Anforderungen an die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht zu stellen:

- Ausreichende Mächtigkeit
- Gute Durchwurzelbarkeit
- Hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität
- 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, wenig durchgängige Makroporen)
- Geringes Lösungs- und Austragspotential von Stoffen, die in der Entwässerungsschicht oder ggf. in einer Kapillarsperre ausfallen und deren hydraulische Funktion beeinträchtigen können (siehe Anhang 1)
- Ausreichende pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte, günstige Bodenreaktion und Pufferung
- Aufbau aus umweltverträglichen Materialien

Im Sinne des Bodenschutzes ist bei der Materialwahl ressourcenschonenden Lösungen der Vorzug zu geben.

2.2 Aufbau und Kenngrößen der Rekultivierungsschicht

2.2.1 Schichtaufbau

Im Regelfall besteht die Rekultivierungsschicht aus mindestens zwei Lagen: dem humushaltigen Oberboden mit einer Schichtdicke von höchstens 30 cm und dem Unterboden mit einer Schichtdicke von mindestens 70 cm, der wenig organische Substanz enthalten sollte. Im Bedarfsfall kann eine dritte, am Übergang zur Entwässerungsschicht als Filterschicht ausgebildete Lage vorgesehen werden.

Gelegentlich werden zusätzlich verdichtete Mineralböden oder andere technische Komponenten als Wurzelsperrschichten im Unterboden vorgeschlagen. Da bislang jedoch keine Nachweise darüber vorliegen, ob solche Schichten langfristig wirksam sind und welche unerwünschten Begleiterscheinungen (z.B. Stauwasserbildung) sie mit sich bringen, können zurzeit keine Empfehlungen zum Einbau gegeben werden.

2.2.2 Pflanzenverfügbares Bodenwasser und bodenhydrologische Kennwerte

Die Wasserversorgung der Pflanzen und der Wassertransport im Boden hängen neben dem Klima des Standorts entscheidend von der Porenstruktur des Bodens ab. In engen Porenabschnitten wird das Wasser durch Kapillarkräfte stark gebunden. Weite Porenabschnitte können das Wasser nur schwach gegen die Schwerkraft halten und sind daher meist luftgefüllt. Konventionell werden die Porenabschnitte in Porengrößenklassen eingeteilt, aus denen die Kennwerte der Wasserbindung anhand der in den Porenabschnitten herrschenden Saugspannungen abgeleitet werden (siehe Tabelle 2-31.1).

Bei Rekultivierungsschichten spielt der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser keine Rolle, das pflanzenverfügbare Bodenwasser ist in den engen Grobporen und den Mittelporen gespeichert und entspricht der nutzbaren Feldkapazität, bezogen auf die wirksame Durchwurzelungstiefe. Die nFK wird aus der Differenz der Wassergehalte bei Feldkapazität (FK) und beim permanenten Welkepunkt (PWP) errechnet. Liegt der Wassergehalt oberhalb der Feldkapazität, versickert das Wasser in den weiten Grobporen zu schnell, um den Pflanzenwurzeln längerfristig zur Verfügung zu stehen. Dieser Porenbereich ist aber für die Durchlüftung des Bodens wichtig (Luftkapazität, LK). Unterhalb des permanenten Welkepunktes ist das Wasser mit zu hohen Kräften gebunden, um von den Pflanzen aufgenommen zu werden (Totwasser).

Tabelle 2-31.1: Porengrößenklassen und Kennwerte der Wasserbindung
(nach AG Boden 2005)

Bezeichnung der Poren	Äquivalentdurchmesser der Poren	Saugspannungsbereich		Speicherkapazität	Bodenwasser
		cm WS (Wassersäule)	pF-Wert (log cm WS)		
weite Grobporen	> 50	< 60	< 1,8	Luftkapazität (LK)	Sickerwasser
<i>Feldkapazität (FK)</i>					
enge Grobporen	50 – 10	60 – 300	1,8 – 2,5	nutzbare Feldkapazität (nFK)	Haftwasser
Mittelporen	10 – 0,2	300 – 15000	2,5 – 4,2		
<i>permanenten Welkepunkt (PWP)</i>					
Feinporen	< 0,2	> 15.000	> 4,2	Totwasser	

1 cm WS entspricht 1 hPa

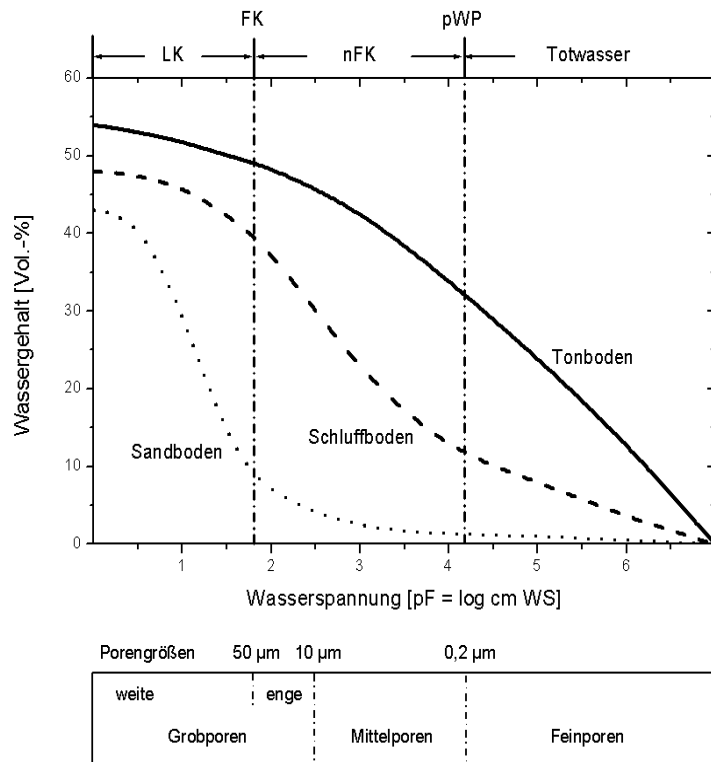


Bild 2-31.1: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurve), Kennwerte der Wasserbindung und Porengrößenverteilung (für drei idealisierte Böden nach Scheffer/Schachtschabel, 2002)

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser kann für Rekultivierungsschichten (bzw. für Oberflächenabdichtungssysteme, wenn die Wurzeln tiefer reichen) gemäß der folgenden Gleichung berechnet werden (in Anlehnung an AG BODEN, 2005; kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser spielt keine Rolle; vereinfacht):

$$W_{\text{pfl}} = n\text{FK} \cdot w = \sum n\text{FK}_i \cdot w_i \quad (1)$$

mit W_{pfl} = pflanzenverfügbares Bodenwasser [mm]
 $n\text{FK}$ = nutzbare Feldkapazität (gemittelt über w) [mm/m]
 w = wirksame Durchwurzelungstiefe [m]
 i = Index der Schicht oder Lage

Die wirksame Durchwurzelungstiefe ist die maximale Tiefe, bis zu der dem Boden Wasser durch Pflanzenwurzeln entzogen werden kann (siehe Kapitel 2.2.5). Die Pflanzen eines Standorts wurzeln unterschiedlich tief – u.a. können auch Tiefwurzler auftreten –, und sie zeigen unterschiedliche Wurzelverteilungen mit der Tiefe. Darüber hinaus steigt Wasser kapillar aus tieferen Bereichen zu den Wurzeln auf.

Die Mächtigkeit des Bereichs, aus dem dies in berücksichtigungswerten Mengen geschieht, hängt von der Bodenart und der Verdichtung ab. Die Festlegung einer wirksamen Durchwurzelungstiefe zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenswassers ist daher mit Unwägbarkeiten behaftet.

Die umfangreichste Datenbasis zu den Eigenschaften natürlicher Böden bietet die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN, 2005). Insbesondere erlauben die Tabellenwerte der Bodenkundlichen Kartieranleitung Rückschlüsse von der Bodenart (definiert durch die Korngrößenverteilung) auf bodenhydrologische Kennwerte wie die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität.

Tabelle 2-31.2 illustriert die Spanne der bodenhydrologischen Kennwerte nFK und LK einiger Bodenarten. Den bodenkundlich orientierten Bodenarten der AG Boden sind näherungsweise die geotechnisch orientierten Bodenarten nach DIN 4022 und DIN 18196 zugeordnet.

Tab. 2-31.2: Bodenhydrologische Kennwerte einiger Bodenarten
(nach AG Boden, 2005)

Bezeichnung	Kurzzeichen			Kornfraktionen [Masse-%]			nFK [mm/m]		LK [mm/m]	
	AG Boden	DIN 4022	DIN 18196	Ton	Schluff	Sand	ρt 1-2	ρt 3	ρt 1-2	ρt 3
reiner Sand	Ss	S	SE, SW	0-5	0-10	85-100	90	70	360	320
reiner Schluff	Uu	U	UL, UM	0-8	80-100	0-20	300	260	100	70
reiner Ton	Tt	T, u, s	TL, TM	65-100	0-35	0-35	150	130	40	30
mittel-lehmiger Sand	Sl3	S, u, t'	SU*	8-12	10-40	48-82	220	180	180	150
schluffig-lehmiger Sand	Slu	S+U,t'	UL, UM	8-17	40-50	33-52	230	210	140	100
sandig-toniger Lehm	Lts	S, t, u	ST*	25-45	15-30	25-60	170	140	100	60
lehmiger Ton	Tl	T, \bar{u} , s	TL, TM	45-65	15-30	5-40	150	130	50	40

- ρt 1: sehr geringe Trockendichte ($< 1,25 \text{ g/cm}^3$)
 ρt 2: geringe Trockendichte ($1,25 - 1,45 \text{ g/cm}^3$)
 ρt 3: mittlere Trockendichte ($1,45 - 1,65 \text{ g/cm}^3$)
 ρt 4: hohe Trockendichte ($1,65 - 1,85 \text{ g/cm}^3$)
 ρt 5: sehr hohe Trockendichte ($> 1,85 \text{ g/cm}^3$)

(Die Trockenrohddichte ρt nach AG Boden, 2005, entspricht der Trockendichte nach DIN 18125)

Die Auswertung dieser und weiterer Daten der bodenkundlichen Kartieranleitung lässt hinsichtlich der bodenhydrologischen Parameter nFK und LK folgende Bewertung zu:

- 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 (siehe Tab. 2-31.2): Reine Schluffe, lehmige und schluffige Sande und mit Abstrichen sandige und schluffige Lehme.
- Humusanteile erhöhen die nFK beträchtlich (siehe Tabelle 72 der Bodenkundlichen Kartieranleitung), 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.

Die Porengrößenverteilung von Böden unterliegt einer zeitlichen Entwicklung. In einem jungen Boden hängt sie zunächst von der Bodenart, vom Humusgehalt und von seiner Trockendichte ab (Primärporen). Mittel- und langfristig werden durch Frost, Quellung und Schrumpfung sowie durch Organismen (Pflanzenwurzeln, Bodenfauna und Mikroorganismen) Sekundärporen gebildet. Die nFK-Werte natürlicher Böden werden in frisch eingebauten Rekultivierungsschichten folglich in der Regel nicht erreicht, weil diese noch kein reifes Bodengefüge aufweisen und Sekundärporen in der Größe von Mittelporen und engen Grobporen weitgehend fehlen.

Außerdem verändern sich die bodenhydrologischen Eigenschaften locker eingebauter Rekultivierungsschichten durch Sackungen, die durch Niederschläge stark gefördert werden (siehe Kapitel 4).

Eine Verdichtung von Rekultivierungsböden hat erhebliche Auswirkungen auf das Porensystem. Ergebnisse aus der Qualitätssicherung zeigen einen starken Einfluss der Verdichtung auf die Luftkapazität, während die nutzbare Feldkapazität nicht bei allen Böden von der Verdichtung abhängt. Insbesondere Verdichtungen des Unterbodens sind kritisch (Sauerstoffmangel für Pflanzen, Eisenfreisetzung, potentielle Gleitfugen bei lagenweisem Einbau) und können langfristig negative Folgen haben, da es – wenn überhaupt möglich – viele Jahrzehnte dauern kann, bis die Überverdichtung durch Gefügebildung kompensiert oder zumindest abgemildert

werden kann. In zu hoch verdichteten bindigen Böden kann die Sekundärporenbildung außerdem unerwünschte Wasserleitbahnen (Schrumpfrisse) erzeugen, die das Wasser schnell in die Entwässerungsschicht abführen.

Die nutzbare Feldkapazität als eine wesentliche Zielgröße bei der Dimensionierung von Rekultivierungsschichten kann somit durch die Wahl der Bodenart (einschließlich Humusgehalt) unter Berücksichtigung des Kornanteils > 2 mm (Kies- und Steingehalt), durch die Schichtmächtigkeit und den Verdichtungsgrad beim Einbau beeinflusst werden.

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser kann durch die Erhöhung der Schichtmächtigkeit nur begrenzt erhöht werden, da nur das im Wurzelraum gespeicherte Wasser für die Pflanzen tatsächlich erreichbar ist.

Auf Deponieoberflächenabdichtungssystemen wachsen ausdauernde Pflanzen, die im Zuge ihrer Entwicklung auch tiefere Bodenschichten durchwurzeln. Häufig finden sich Arten, die als Tiefwurzler bekannt sind.

Bild 2-31.2 zeigt, dass rund 15 % der auf einer Deponieabdeckung angetroffenen Pflanzenarten nach Literaturangaben Wurzeltiefen von 2,0 m bis 4,0 m erreichen können. Dabei ist jedoch die Durchwurzelungsintensität sehr unterschiedlich und mit der Tiefe stark abnehmend. In Bild 2-31.3 ist die Tiefenverteilung der Durchwurzelungsintensität als Ergebnis von zwölf Aufgrabungen in drei Oberflächenabdichtungssystemen, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung drei bis elf Jahre alt waren, dargestellt. Die dort angetroffenen Pflanzen decken ihren Wasserbedarf überwiegend aus dem oberen Meter der Rekultivierungsschicht. Unterhalb von 1,0 m ist die Durchwurzelungsintensität bei nährstoffarmen Mineralböden in der Regel schwach. Hier dienen die Wurzeln in erster Linie der Überbrückung sommerlicher Trockenphasen. Die in der Literatur genannten maximalen Wurzeltiefen wurden in den beprobten Systemen noch nicht erreicht.

Zur möglichst weitgehenden Ausnutzung der potentiellen Evapotranspiration sollte die Rekultivierungsschicht gut und gleichmäßig durchwurzelbar sein.

2.2.3 Rekultivierungsschichten über schrumpfungsempfindlichen Abdichtungen

Untersuchungen an Großlysimetern und Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungen haben die bekannte bodenphysikalisch bedingte Schrumpfung bindiger Böden (NEFF, 1988) bestätigt. Es hat sich gezeigt, dass bindige mineralische Oberflächenabdichtungen bereits nach wenigen Jahren Schrumpfrisse durch Austrocknung aufweisen können (MAIER-HARTH & MELCHIOR, 2001; MELCHIOR, 1993; MELCHIOR, 1999a), welche die hydraulische Wirksamkeit der Abdichtung stark herabsetzen. Auch bei geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD) wurden austrocknungsbedingte, teilweise irreversible Gefügeveränderungen festgestellt (EGLOFFSTEIN, 1999; MELCHIOR, 1999b).

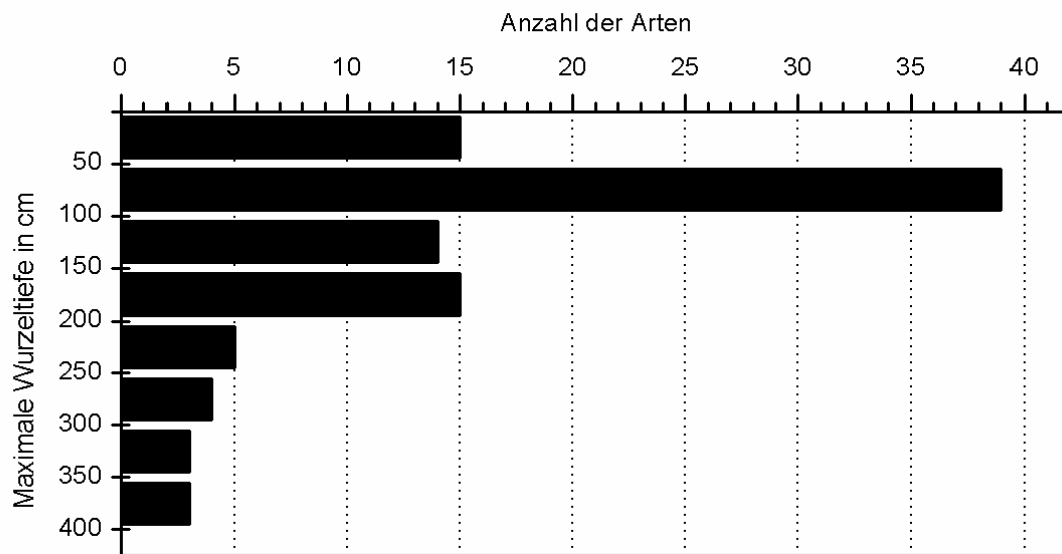


Bild 2-31.2: Häufigkeitsverteilung der maximalen Wurzeltiefen (aus Literaturangaben zu den auf einer Deponieabdeckung angetroffenen Arten; aus MELCHIOR, 2000)

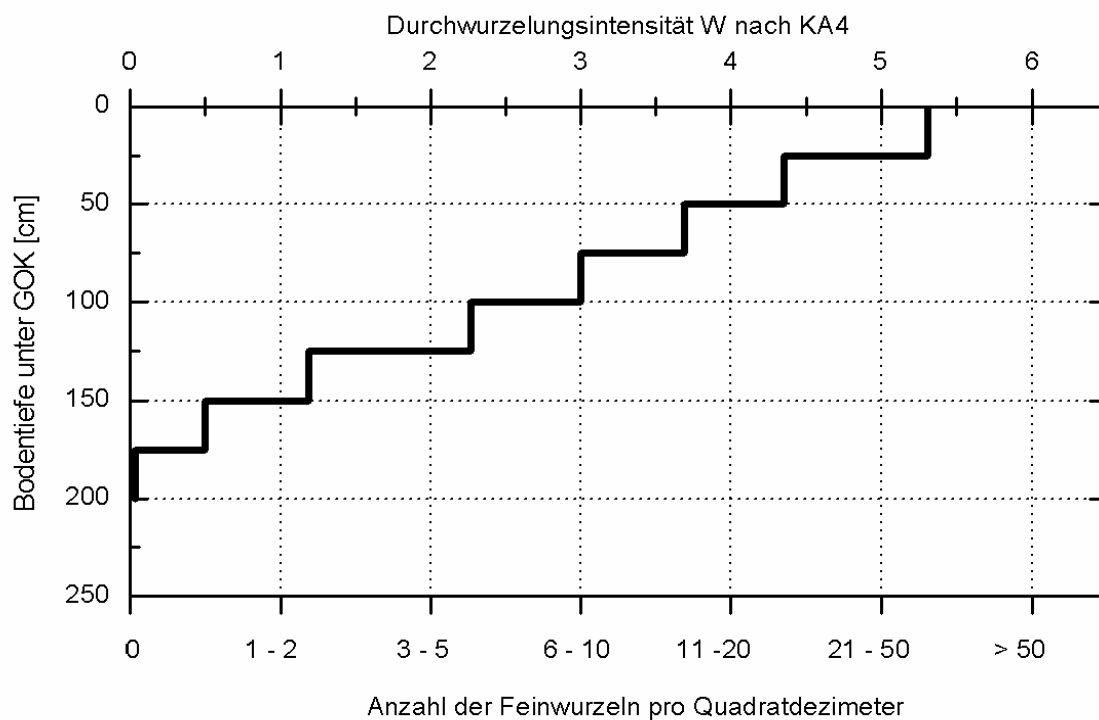


Bild 2-31.3: Tiefenverteilung der Durchwurzelung (Mittelwerte aus 12 Aufgrabungsprofilen in 3 Oberflächenabdichtungen; aus MELCHIOR, 2000)

Der Kenntnisstand zum Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen ist in RAMKE ET AL., 2002 zusammengestellt.

Bereits geringe Abnahmen des Wassergehaltes verursachen in der bindigen mineralischen Abdichtung sehr hohe Wasserspannungen (Kapillarkräfte), die als Zugspannungen auf die Bodenpartikel wirken und ein Reißen des Abdichtungsmaterials an den Orten der geringsten Kohäsion bewirken können, so dass ein Absonderungsgefüge mit feinen Rissen zwischen Bodenaggregaten entsteht. Solche Risse stehen fortan als bevorzugte Wasserleitbahnen und als leicht zu erschließender Wurzelraum für die Pflanzenwurzeln zur Verfügung, während die Bodenaggregate von den Pflanzen nur sehr schwer genutzt werden können.

Für den bodenphysikalisch bedingten Wasserverlust der bindigen mineralischen Abdichtungsschichten gibt es mehrere Ursachen.

In den Sommermonaten tritt eine Austrocknung des Oberbodens infolge Verdunstung auf. In der Rekultivierungsschicht treten demzufolge im Sommer sehr viel höhere Wasserspannungen als in der Abdichtung auf. Da das Gesamtsystem bestrebt ist, diesen Energieunterschied auszugleichen, gibt die Abdichtungsschicht Wasser an die trockenen Deckschichten ab. Die aufwärts gerichtete Wasserbewegung kann in flüssiger Form (kapillarer Aufstieg von Wasser) und in dampfförmiger Form (durch diffusiven und konvektiven Transport von Wasserdampf) erfolgen und bewirkt steigende Wasserspannungen in der Abdichtungsschicht.

Insbesondere in trockenen Sommermonaten mit hohen Verdunstungsraten, in denen der Wassergehalt auch im unteren Teil der Rekultivierungsschicht bis in den Bereich des permanenten Welkepunkts absinkt, leiden Pflanzen an Wassermangel. Die Pflanzenwurzeln können auf der Suche nach Wasser große Tiefen und damit die mineralische Abdichtung erreichen, der so direkt Wasser entzogen wird. Bei einem Eindringen von Wurzeln in die Abdichtungsschicht muss von einer Schädigung der Abdichtungsschicht ausgegangen werden.

Bei der Planung müssen diese Einflüsse, bezogen auf die örtlichen Gegebenheiten und die Anordnung der Schichten mit ihren spezifischen Materialeigenschaften, berücksichtigt werden:

- Entscheidend für die Beeinflussung der Durchwurzelung ist ein ausreichendes Dargebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser in der Rekultivierungsschicht und insbesondere die Wahl eines Bodens mit hoher nutzbarer Feldkapazität (siehe auch Abschnitt 2.2.2).
- Weitere wesentliche Voraussetzungen sind ausreichende Luftkapazität und Nährstoffgehalte, so dass die Wurzeln in der Rekultivierungsschicht und hier möglichst im oberen Bereich verbleiben.

Bei mangelndem Dargebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser kann erst bei Rekultivierungsschichten mit einer Schichtdicke von 3,5 m bis 4,0 m zuverlässig von langfristiger Wurzelfreiheit ausgegangen werden. Diese Schichtdicke wird auch bei Aufforstungen in jedem Fall für ausreichend gehalten (BRAUNS et al., 1997).

Bei dieser Schichtdicke ist ferner davon auszugehen, dass auch ohne kapillarbrechende Dränschicht der kapillare Aufstieg von der mineralischen Abdichtung in die Rekultivierungsschicht nicht zu einer schädigenden Wirkung in der mineralischen Dichtung führt.

Wurzelsperren zur Unterbindung der Durchwurzelung mineralischer Abdichtungen haben sich bisher – bis auf Kunststoffdichtungsbahnen – nicht als wirksam erwiesen (LINERT, 1995; WATTENDORF/EHRMANN, 2002).

Bei der Anordnung einer Entwässerungsschicht aus Kies ist zu beachten, dass diese zwar einerseits den kapillaren Aufstieg aus der mineralischen Abdichtungsschicht verhindert, andererseits aber die Effekte des diffusiven und konvektiven Wasserdampftransports gefördert werden können. Hier sind konstruktive Lösungen zu wählen, die eine ständige Durchlüftung der Entwässerungsschicht verhindern.

2.2.4 Rekultivierungsschichten über frostempfindlichen Abdichtungen

Die Rekultivierungsschicht ist so auszuführen, dass die darunter liegende frostempfindliche mineralische Abdichtungsschicht vor Frosteinwirkungen geschützt wird.

Die erforderliche Mindestmächtigkeit der Überdeckung der mineralischen Abdichtungsschicht zum Schutz vor Frosteinwirkungen ergibt sich aus der maximalen Frosteindringtiefe. Die Frosteindringtiefe bei Oberflächenabdichtungen wird durch die lokalen klimatischen Bedingungen sowie durch Bodenart und -zustand der Rekultivierungs- und Entwässerungsschichten bestimmt.

Die besondere Exposition von Deponien (Hänge, freie Kuppen) und die damit verbundene mögliche größere Auskühlung sind bei der Festlegung der Mindestmächtigkeit zu berücksichtigen. In Hinblick auf die erforderliche Langzeitwirksamkeit des Abdichtungssystems kann die anfängliche Wärmeentwicklung im Deponiekörper nicht als frostmindernd angesetzt werden.

2.2.5 Auslegung der Rekultivierungsschicht und Nachweise

Die Dimensionierung der Rekultivierungsschicht erfolgt – orientiert an den spezifischen Schutzfunktionen der Rekultivierungsschicht innerhalb eines Oberflächenabdichtungssystems oder einer Oberflächenabdeckung – auf folgenden Grundlagen:

- Witterungsbedingungen am Standort (im Durchschnitt und in Extremjahren): Niederschlagshöhe und -verteilung, Starkregenhäufigkeit und -ergiebigkeit, maximale Frosteindringtiefe, Jahresverlauf von potentieller Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz
- Wasserverbrauch der Vegetation über deren Entwicklungszeit bis zum Zielzustand
- Tiefenentwicklung der Pflanzenwurzeln
- Eigenschaften verfügbarer Böden
- Schrumpfnegung der mineralischen Abdichtungsschicht (sofern kein wirksamer Austrocknungsschutz vorhanden ist).

Die Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht (bei locker eingebauten Böden ist die Sackung vor Erreichen der Endmächtigkeit zu berücksichtigen) wird in der Regel durch das erforderliche Wasserspeichervermögen, die maximale Wurzeltiefe und die maximale Frosteindringtiefe bestimmt.

Wasserspeichervermögen

Vor dem Hintergrund des Gesamtsystems (klimatische Standortbedingungen, angestrebter Bewuchs, Anforderungen der jeweiligen Abdichtung an den Wasserhaushalt, z.B. Schutz vor Austrocknung oder Verhinderung von Überlastung bei starker Zusickerung) ist die erforderliche nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes festzulegen. Im zweiten Schritt ist dann zu prüfen, welche nutzbare Feldkapazität die verfügbaren Böden aufweisen und in welchen Schichtdicken sie bei einer technisch herstellbaren Dichte eingebaut werden müssen, um die erforderliche Speicherkapazität sicherzustellen. Die bei der Auslegung des Wasserspeichervermögens angesetzte Schichtmächtigkeit muss unter Berücksichtigung des kapillaren Wasseraufstiegs für die Wasseraufnahme des Bewuchses auch erschließbar sein. Hierbei ist die Durchwurzelungstiefe des vorgesehenen oder geplanten Bewuchses zu berücksichtigen.

Sofern noch keine Böden bereit stehen, können entsprechende Vorgaben für die Ausschreibung der Materialien formuliert werden. Dabei sind die Auswirkungen der mechanischen Beanspruchungen des Bodens bei dessen Umlagerung und Einbau auf die nutzbare Feldkapazität zu berücksichtigen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass junge Rekultivierungsböden die gleichen Werte der nFK erreichen wie reife, mechanisch nicht beanspruchte Böden. Bei der Auslegung der Rekultivierungsschicht ist dies durch Abschläge gegenüber den Tabellenwerten der AG BODEN, 2005, rechnerisch zu berücksichtigen.

Die Auslegung der Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht (mit hohen

Anforderungen an die nFK) ist nur dort sinnvoll, wo diese unter den gegebenen klimatischen Standortbedingungen einen wirksamen Beitrag zur weitgehenden Verminderung der Sickerwasserneubildung leisten kann. Bei der Planung der Rekultivierungsschicht sollte mit Wasserhaushaltsmodellen (siehe E 2-30) ein sinnvoller Anforderungsrahmen ausgelotet werden (siehe RAMKE, 2005).

Luftkapazität

Der Anteil weiter Grobporen, mithin die Höhe der Luftkapazität, ist in frisch hergestellten, sekundärporenrmen Rekultivierungsböden stark von der Einbautechnik und der Bodenart abhängig. Um negative Folgen durch das Fehlen von weiten Grobporen auf das Redoxpotential und die Wasserleitfähigkeit des Bodens zu vermeiden, sollte die Luftkapazität möglichst nicht weniger als 8 Vol.-% betragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Sackung von locker eingebauten Rekultivierungsschichten meist im Wesentlichen zu Lasten der Luftkapazität erfolgt.

Durchwurzelungstiefe

Die Wurzeltiefen mitteleuropäischer Grünlandpflanzen sind von KUTSCHERA/LICHTENEGGER, 1982/1992 aufgenommen worden. Diese Wurzelbilder zeigen, dass viele Arten, die auf Deponien vorkommen und oberirdisch wenig Biomasse aufweisen, umfangreiche und tief reichende Wurzelsysteme ausbilden. Das Wurzelbild einer Pflanze und ihre maximale Tiefe sind jedoch nur bedingt genetisch festgelegt. Beide werden vielmehr auch stark durch die Standort- und Konkurrenzverhältnisse, insbesondere durch den Bodenwasserhaushalt, bestimmt.

Tabelle 2-31.3 gibt in Ergänzung zu den Bildern 2-31.2 und 2-31.3 Anhaltswerte für die Wurzeltiefen ausgewählter Pflanzenarten, die auf rekultivierten Deponien häufig anzutreffen sind.

KÖSTLER et al., 1968 und KUTSCHERA/LICHTENEGGER, 2002 haben Wurzelbilder von Waldbäumen aufgenommen. Auch diese Darstellungen zeigen, dass gleiche Arten je nach Standort- und Konkurrenzverhältnissen sehr unterschiedliche Wurzeltiefen erreichen. Bäume wurzeln dabei nicht grundsätzlich tiefer als manche Ackerunkräuter und Grünlandarten, bilden jedoch wesentlich dickere und verholzte Wurzeln aus.

Tabelle 2-31.3 zeigt, dass die oft ausgeführte Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 1,0 m im Regelfall nicht ausreicht, um die Entwässerungsschicht und die Abdichtungsschicht weitgehend wurzelfrei zu halten. Hierfür sind meist 1,5 bis 3,0 m Endmächtigkeit erforderlich. Bei Standorten, auf denen langfristig bei fehlender dauerhafter Pflege mit der Entwicklung eines Baumbewuchses zu rechnen ist, ist die Rekultivierungsschicht von vornherein auf diesen Bewuchs auszulegen.

Ausführliche Hinweise zu den besonderen Anforderungen an die Rekultivierungsschicht bei forstlicher Nutzung (Baumbewuchs), die auch Standsicherheitsaspekte berücksichtigen, geben BRAUNS et al., 1997.

Tabelle 2-31.3: Anhaltswerte für die Spanne üblicher Wurzeltiefen ausgewählter Pflanzenarten (nach KUTSCHERA/LICHTENEGGER, 1982/1992 und KONOLD et al., 1995)

Pflanzenart	Wurzeltiefe [cm]
Grünlandvegetation (Gräser, Kräuter, Stauden)	
Wiesen-Hornklee	30 – 120
Gemeine Kratzdistel	bis 200
Wiesenrispengras	70 - 200
Glatthafer	100 - 200
Löwenzahn	70 - 240
Ackerkratzdistel	40 – 300
Mehlige Königskerze	bis 320
Krauser Ampfer	70 – 320
Gehölzvegetation (Sträucher, Bäume)	
Kratzbeere	bis 200
Scheinakazie	über 200
Silberweide	bis 300

Vegetationskartierungen und Aufgrabungen (z.B. Bild 2-31.2 und Tabelle 2-31.3) lassen erwarten, daß sich die wirksame Durchwurzelungstiefe einer mehrere Jahre alten Grünlandvegetation in Tiefen bis zu 2,0 m einstellen wird, wenn der Pflanzenwasserbedarf unter den lokalen klimatischen Bedingungen dies erfordert.

Frosteindringtiefe

Die Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht in Hinblick auf die Frostsicherheit der mineralischen Abdichtung ergibt sich aus der maximalen Frosteindringtiefe abzüglich der Schichtdicke der Entwässerungsschicht. Die maximale Frosteindringtiefe in Rekultivierungsschichten kann mit dem Ansatz von HAIN für Einschichtsysteme abgeschätzt werden (Erläuterung und Beispiel in FGStV, 1994).

Anhaltswerte für die Frosteinwirkung (Frostindizes) gibt die Karte der Frosteinwirkungszonen, die bei der Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen verwendet wird (RStO 01, 2001). Bei der Anwendung der Karte der Frosteinwirkungszonen sind die Erläuterungen zur Berücksichtigung örtlicher Besonderheiten, die sinngemäß auch für deponietechnische Zwecke gelten, zu beachten.

Empirische Werte für die Frosteindringtiefe können durch die regional erforderlichen

Überdeckungshöhen für Wasserversorgungsleitungen gewonnen werden, die in vielen Regionen zwischen 0,80 und 1,20 m liegen.

Für die unter diesen Aspekten dimensionierte Rekultivierungsschicht mit ihren definierten Eigenschaften sind im Einzelnen die folgenden Nachweise zu erbringen:

Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht

Durch Wasserhaushaltsberechnungen ist die Höhe des jährlich die Rekultivierungsschicht durchsickernden Niederschlagswassers abzuschätzen. Es ist nachzuweisen, dass die Ziele, die mit der Auslegung der Rekultivierungsschicht in Hinblick auf den Wasserhaushalt angestrebt werden, erreicht werden (siehe Kapitel 2.1).

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob auch in Trockenperioden ausreichend pflanzenverfügbares Wasser in der Rekultivierungsschicht zur Verfügung steht. Sollte das gewählte System die Anforderungen nicht erfüllen, ist durch Variation der Bodenart (und damit der nutzbaren Feldkapazität) und der Schichtdicke die Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwassers zu optimieren.

Ferner ist bei schrumpfungsempfindlichen Abdichtungen zu prüfen, ob auch in Trockenperioden eine ausreichende Sicherheit zur Vermeidung von schädlichen Austrocknungsprozessen gegeben ist. Ansätze hierzu werden bei z.B. bei RAMKE ET AL., 2002 und WITT ET AL., 2004 aufgeführt.

Die Berechnungen zum Wasserhaushalt erfolgen nach E 2-30 (Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien). Weitergehende Hinweise gibt BERGER, 2001 und 2002.

Ableitung des Oberflächenwassers

Das Oberflächenwasser ist schadlos abzuleiten. Die Erosionsgefährdung der Rekultivierungsschicht durch Wasser kann nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 2005) abgeschätzt werden. Die Elemente des Oberflächenentwässerungssystems (Bermen- und Randgräben, Absturzbauwerke etc.) sind unter Beachtung von E 2-20 und E 2-30 zu bemessen.

Geotechnische Nachweise

Die erforderlichen geotechnischen Nachweise sind unter Berücksichtigung von E 2-1 (Geotechnische Entwurfsbearbeitung für Deponien) und E 2-4 (Kombiniertes Oberflächenabdichtungssystem) zu führen. Im Rahmen der Erstellung eines Gesamtsicherheitskonzeptes ist die E 2-17 (Sicherheitsbetrachtungen bei Abdichtungssystemen) zu beachten. Die Böschungsstabilität ist in ihrer Gesamtheit zu betrachten (Gleitsicherheit, Gefahr der Rutschung nasser Böden, Erosion). Der Nachweis der Gleitsicherheit der Rekultivierungsschichten ist nach E 2-7 (Gleitsicherheit der Abdichtungssysteme) zu führen. Hierbei ist auch der

Einbauzustand der locker eingebauten Rekultivierungsschichten zu betrachten.

3 Auswahl geeigneter Böden und Eignungsprüfungen

3.1 Auswahl geeigneter Böden

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. Wenn eine dem Umfeld entsprechende Vegetationsdecke angestrebt wird, muss auch das Rekultivierungssubstrat der Umgebung entsprechen.

Unter dem Gesichtspunkt der Wasserspeicherung sind vor allem Bodenarten (gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung) in der Reihenfolge Schluffe, schluffige Sande, lehmige Sande, schluffiger Lehm, sandiger Lehm geeignet. Weitere Vorteile dieser Bodenarten sind ihre gute Durchwurzelbarkeit und ihre geringe Schrumpffähigkeit, so dass die Bildung klaffender Risse und Spalten in diesen Böden sehr unwahrscheinlich ist und die Dränspende vergleichmäßig wird. Die Nährstoffversorgung sollte angesichts der 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 Gefügestabilität.

Reine Sande sind für Rekultivierungsschichten kaum geeignet, da sie zum Teil erosionsanfällig sind (reine Feinsande), wenig Wasser pflanzenverfügbar speichern und den Pflanzen mechanisch wenig Halt bieten.

Tonreiche Böden sind ebenfalls kaum geeignet, da sie vergleichsweise wenig pflanzenverfügbares Wasser enthalten, 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 (> 4 Gew-%) an organischer Substanz im Unterboden sind zu vermeiden, da sie mittelfristig abgebaut werden und dieser Abbau zu unerwünschten Effekten, z.B. zu Sauerstoffmangel im Wurzelraum und zur Belastung des Sickerwassers mit Nährstoffen, führen kann. Bei niedrigen Redoxpotentialen kann zusätzlich Eisen mobilisiert und in die Entwässerungsschicht verlagert werden. 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 Anhang 1 werden mögliche Umsetzungsprozesse und Stoffverlagerungen in Rekultivierungsschichten ausführlich erläutert.

Im Hinblick auf eine zielgerichtete Rekultivierung und die Schonung natürlicher Böden muss bereits im Vorfeld der Ausführung mit der Recherche und Sicherung geeigneten Bodenmaterials begonnen werden. Die Verwertung von Abfällen in der Rekultivierungsschicht ist möglich, sofern die Stoffe oder die mit diesen Komponenten hergestellten Gemische für die Aufgabe geeignet sind und die Anforderungen des Anhangs 5 der Deponieverordnung erfüllen.

3.2 Eignungsprüfungen

Die erforderlichen geotechnischen und bodenkundlichen Eignungsprüfungen sind in Tabelle 2-31.4 zusammengestellt. Ausführliche Hinweise geben DIN 18915 und DIN 19731.

Tabelle 2-31.4: Eignungs- und Kontrollprüfungen für Böden von Rekultivierungsschichten

Parameter	Prüfvorschrift	Eignungsprüfung	Kontrollprüfung
Korngrößenverteilung (Bodenart)	DIN 18123 DIN 4220 DIN 19682-2	L	F/L
Zustandsgrenzen/Konsistenz, Wasseraufnahme	DIN 18122	L	F/(L)
Trockendichte	DIN 18125	L	L
Proctorversuch/Verdichtungsgrad	DIN 18127	L	(L)
Wasserdurchlässigkeit, Infiltrationsvermögen	DIN 18130 DIN 19682-7	L	(F)/(L)
Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität	DIN ISO 11274	L	L
pH-Wert (in KCl oder CaCl ₂)	DIN ISO 10390	L	(F)/(L)
Gehalt an organischem Material/ Humusgehalt	DIN 18128	L	F/L
Carbonatgehalt, Eisengehalte und -fraktionen	DIN 18129 DIN 19682-13 DIN 19684-6 DIN 19684-7	L	(F)/(L)
Gehalte an löslichen Nährstoffen (P, K, Mg, NO ₃ , NH ₄)	VDLUF (1991/2001)	(L)	
Schadstoffgehalte in Feststoff und Eluat	LAGA (1997)	(L)	(L)
Bodenfremde Bestandteile (Bauschutt, Straßenaufbruch etc.)	visuell	F	
Vernässungsmerkmale (Nassbleichung, Rostflecken)	AG Boden (2005)	F	

L: Laboruntersuchung, F: Feldtest, (): bei Bedarf

Zusätzlich sind die geotechnisch erforderlichen Eignungsprüfungen nach E 3-1 durchzuführen. Dies gilt insbesondere bei der Rekultivierung von Deponieböschungen für die Eignungsprüfungen zur Beurteilung des Spannungs-Verformungsverhaltens (Scherparameter).

Im Rahmen der Eignungsprüfung ist ferner die Gefahr der Lösung und Verlagerung von Stoffen (Metalloxide, -hydroxide und -salze, Carbonate, Schwefelverbindungen, organische Inhaltsstoffe und Huminstoffe, Ton) zu betrachten (siehe Anhang 1).

Erfahrungen mit dem Erosionsverhalten der ausgewählten Böden sind in die Eignungsprüfung einzubeziehen.

Bei der Verwendung von Abfallstoffen und mit Abfallstoffen aufbereiteten Böden können zusätzliche Eignungsprüfungen erforderlich sein, um die Materialien anwendungsspezifisch zu optimieren.

4 Herstellung der Rekultivierungsschicht

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. 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 (Fallbeispiele hierzu in MELCHIOR, 2005). 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.

Es gibt verschiedene Einbautechniken, mit denen eine schädliche Bodenverdichtung vermieden werden kann: Einbau durch Langlöffelbagger, Teleskopbagger oder Bandabsetzer, Einsatz von Kettenfahrzeugen mit niedriger Bodenpressung (bis 15 kN/m^2) wie Pistenbully oder Supermoorraupe.

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 2 bis 3 dm durch Einarbeiten von durchgerottetem Grünschnittkompost mit Humus vergütet werden.
- Eingebauter Unterboden darf nicht mit schwerem Gerät befahren werden.

Generell sind die Fahrwege im Einbaufeld so zu planen, dass möglichst kurze und wenige Überfahrten notwendig sind. Es ist empfehlenswert, Baustraßen auf der Trasse der späteren Deponieversorgungswege anzulegen. Bei großen Einbauflächen sollten Fahrstraßen in der Fläche durch eine Überhöhung hergestellt und anschließend rückwärts fahrend mit einem Bagger aufgelockert und rückgebaut werden (seitliches Verteilen des Bodens).

Die geforderten Mindestmächtigkeiten müssen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Sackungen eingehalten werden (Endmächtigkeiten). Durch Überfahren der endgültigen Oberfläche mit Pistenraupen oder Supermoorraupen kann ein Teil der Sackungen durch Vorverdichten vorweggenommen werden.

Durch Aufrauen oder gezieltes Befahren der Oberfläche mit Kettenfahrzeugen (Befahren in der Falllinie erzeugt horizontale Kettenstegrillen) und Auf-/Einbringen von Grobkompost kann der Oberflächenabfluss minimiert werden. Auch ein sandig-kiesiger Anteil im Oberboden unterstützt die Versickerung, sofern sie gewollt ist (z.B. in niederschlagsarmen Regionen).

In einem ausreichend großen Probefeld ist die Eignung des vorgesehenen Geräteeinsatzes unter Berücksichtigung der Böschungsneigungen zu überprüfen und ggf. an die Herstellungsziele gemäß Entwurf und Eignungsprüfung anzupassen. Die ausführende Firma ist aufzufordern, hierzu vorab ein Ausführungskonzept vorzulegen.

Im Zuge der Herstellung sind die Lieferböden vor ihrem Einbau einer Eingangskontrolle zu unterziehen, bei der die Übereinstimmung des Materials mit dem eignungsgeprüften Boden festgestellt und geprüft wird, ob der Bodenzustand zum Zeitpunkt der Anlieferung einen qualitätsgerechten Einbau mit der im Probefeld ermittelten Einbautechnik zulässt.

Da sich die bodenphysikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht in der Zeit zwischen Einbau und Abnahme verändern können (Bodenreifung, Sackungen) sollten Bauvertrag und Qualitätssicherungsplan eindeutige Vorgaben enthalten, zu welchem Zeitpunkt die geforderten Eigenschaften der fertig hergestellten Rekultivierungsschichten nachzuweisen sind.

5 Qualitätsmanagement des Einbaus der Rekultivierungsschicht

Die maßgebenden Eigenschaften der Ausgangsmaterialien sind vor Einbau, ggf. bereits am Entnahmeort oder im Zwischenlager, zu überprüfen. Einzelheiten sind im projektspezifischen Qualitätssicherungsplan festzulegen. Gleiches gilt für Art und Umfang der Prüfungen der eingebauten Schicht.

Die erforderlichen Kontrollprüfungen im Rahmen der Qualitätssicherung sind in Tabelle 2-31.4 zusammengestellt.

Der Qualitätssicherungsplan ist unter sinngemäßer Berücksichtigung von E 5-2 sowie der Anforderungen der DIN 18915 und DIN 19731 aufzustellen.

6 Unterhaltung der eingebauten Rekultivierungsschicht

Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen, die mit Befahrungen verbunden sind, sowie aus anderen Gründen erforderliche Befahrungen dürfen nur bei ausreichend trockenem oder hinreichend tief gefrorenem Boden durchgeführt werden, um den Rekultivierungsboden und die Bepflanzung zu schonen. Sinnvoll ist es, bereits bei der Planung der Deponieoberfläche spätere Pflege- und Reparaturmaßnahmen zu berücksichtigen (z.B. sollten mit Hilfe von Bermenwegen die Böschungslängen bzw. mit Betriebswegen die Zwischenabstände so gewählt werden, dass bei eventuellen Reparaturmaßnahmen ohne Befahren der Rekultivierungsschicht mit Langarmbaggern gearbeitet werden kann).

Nach der Herstellung der Rekultivierungsschicht ist diese bis zum Erreichen einer geschlossenen Vegetationsdecke mehrmals jährlich auf Erosionsschäden zu prüfen, die ggf. zu beseitigen sind. Anschließend sollten jährlich, vorzugsweise in der Vegetationsperiode, Begehungen erfolgen, um Bewuchs und Bodenoberfläche durch Inaugenscheinnahme zu überprüfen. Im Rahmen dieser Begehungen sollten die Bioindikationseigenschaften der Vegetation genutzt werden, um z.B. Bodenverdichtungen oder Staunässe zu erkennen (ELLENBERG et al. 1992).

In Abhängigkeit von den Ergebnissen dieser Überprüfungen wird über ggf. erforderliche Maßnahmen entschieden.

Anhang 1: Umsetzungsprozesse und Stoffverlagerungen in Rekultivierungsschichten

A1.1 Prozesse

In Böden enthaltene Feststoffe unterliegen Abbau- bzw. Lösungsprozessen, der Verlagerung durch Einwirkung von freiem Wasser und der Wiederausfällung bzw. Neubildung an anderem Ort. Das sind pedogenetische Prozesse, die durch die Faktoren der Bodenbildung (Ausgangsgestein, Relief, Klima, Wasser, Organismen und Zeit) beeinflusst werden.

Ausgangsstoffe sind die natürlicherweise im Boden enthaltenen Feststoffe oder künstlich zugemischte bzw. aufgebrachte Zusätze. Zu den natürlichen Stoffen gehören die organische Substanz, Tonminerale, Oxide und Hydroxide sowie Salze. Zu künstl. Substraten zählen u.a. Kompost, Dünger, Klärschlamm und „Reststoffe“.

Die Mechanismen, die die Lösung, Verlagerung und Ausfällung steuern, sind das Dargebot von Wasser, der pH-Wert, die Temperatur, die mikrobielle Aktivität, das Redoxpotential, das elektrokinetische Potential und die stoffabhängigen Lösungsgleichgewichte. Somit ist die Mobilität verschiedener Inhaltsstoffe je nach Randbedingungen sehr unterschiedlich einzuschätzen.

Unter dem Einfluss unseres humiden Klimabereiches werden Inhaltsstoffe durch Niederschlag gelöst und mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenschichten verlagert. Dort werden sie meist wieder ausgefällt. Die Höhe der Auswaschung ist abhängig von der Nährstoffkonzentration im Sickerwasser und der Sickerwassermenge. Von den Kationen werden in Böden humider Klimate Calcium-Ionen am stärksten ausgewaschen. Von den Anionen sind auf Ackerstandorten bzw. auf gedüngten Flächen die Nitrat- und die Chlorid-Auswaschung meist am höchsten.

Die Auswaschung von Kationen ist im alkalischen bis schwach sauren pH-Bereich gering, weil hier eine starke Adsorption oder eine Festlegung in Form schwerlöslicher Verbindungen stattfindet. Die Auswaschung steigt mit abnehmendem pH-Wert. Durch wasserlösliche Komplexbildner wird die Mobilisierung der meisten Kationen (vor allem Metalle) gefördert und deren Auswaschung erhöht, bei Eisen und Mangan auch durch anaerobe Verhältnisse und Reduktionsprozesse.

Die Bodenart beeinflusst die Geschwindigkeit der Auswaschung. Bei gleicher Sickerwassermenge und sonst gleichen Bedingungen erreichen die verlagerten Stoffe eine bestimmte Tiefe umso später, je höher die Feldkapazität und damit das Wasserspeichervermögen des Bodens ist.

Es empfiehlt sich, vor Auswahl oder Einsatz von Böden für Rekultivierungszwecke bestimmte Inhaltsstoffe zu untersuchen, um Auswirkungen einschätzen und evtl. nachteilige Folgen begrenzen zu können.

A 1.2 Eisen, Schwefel

Eisen ist im Boden in dreiwertiger Form (Fe^{III}) als Oxid / Hydroxid oder in zweiwertiger Form (Fe^{II}) im Kristallgitter von Tonmineralen oder Festgestein (Silikaten) enthalten. Im Zuge der natürlichen Verwitterung von Silikaten wird zunächst Fe^{2+} freigesetzt. Fe^{2+} ist unter Sauerstoffabschluss löslich, farblos und mit Wasser verlagerbar. Unter Luftzutritt oxidiert es, fällt aus und bildet meist rostbraunes, festes Eisen(hydro)oxid. Unter Sauerstoffabschluss gebildetes Eisensulfid (FeS_2 , Pyrit) ist schwerlöslich, und, wenn im Boden feinverteilt vorliegend, schwarz.

Einige Böden oder Substrate weisen erhöhte Eisengehalte im Feststoff auf. Eine Lösung und Freisetzung von Eisen im Zuge natürlicher Verwitterungsprozesse kann wegen evtl. begleitender chemischer Prozesse, sofern sie unbeachtet bleiben, problematisch werden. Dies kann bei Geschiebemergel und -lehm, Lössen, tertiären (pyrithaltigen) Sanden, lehm-/tonhaltigen Böden, geschiebehaltigen Sanden sowie unter subhydrischen Bedingungen gebildeten Substraten der Fall sein.

Bei der aeroben Verwitterung von FeS_2 oxidiert das zweiwertige Eisen zum dreiwertigen Eisen(oxid). Das Sulfid oxidiert dabei zu Sulfat bzw. bei geringer Pufferkapazität des Bodens zu Schwefelsäure. Die daraus resultierende pH-Wert-Absenkung kann durchaus vegetationsfeindliche Größenordnungen, im Extremfall bis pH 2, erreichen.

Das bedeutet, dass manche vermeintlich organikhaltige – weil dunkle – Böden auf keinen Fall als Oberboden eingesetzt werden dürfen, weil die nachfolgende extreme Versauerung kaum mehr Pflanzenwachstum zulässt. Beispiele für Erdstoffe, die hinsichtlich des Schwefelgehaltes zu prüfen wären: subhydrische Schlämme, Moorböden, als Hamburger Lokalvorkommen: tertiärer Glimmerton.

Ein weiteres Beispiel für extremes Versauerungspotential sind pyrithaltige Sande oder Bergehalden als Reste des Kohle- oder Erzbergbaues.

In gut gepufferten Substraten wie silikatreichen Lehmen oder Tönen tritt vorerst keine pH-Absenkung durch Verwitterungsprozesse ein. Eisen und Sulfate verlagern sich oder fallen in luftführenden Porenräumen aus. Je nach vorherrschendem Lösungsgleichgewicht bleibt bei Sulfat ein Teil in Lösung, ein anderer Teil fällt als (Calcium)Sulfat aus.

In unterlagernden Dränschichten, die meist in den oberen Bereichen luftführend sind, können Ausfällungen von Eisenoxiden sichtbar rostbraune Umhüllungen der Mineralkörner oder harte Inkrustationen hervorrufen. Sulfate bilden eher weißliche Kristalle (Anhydrit / Gips, CaSO_4) oder werden mit dem Dränabfluss abgeführt.

Je nach wasserrechtlichen Randbedingungen sind Direkt- oder Indirekteinleitergrenzwerte zu beachten. Sulfat als Wasserinhaltsstoff lässt sich mit vertretbaren Mitteln nicht eliminieren.

A 1.3 Calcium, Carbonate

Von den Kationen werden in Böden humider Klimate Calcium-Ionen am stärksten ausgewaschen, vor allem in CaCO_3 -haltigen Böden infolge Carbonatauflösung und bei hoher Zufuhr von Anionen (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}). In CaCO_3 -haltigen Böden findet die Auswaschung von Ca zu beträchtlichen Anteilen als Hydrogencarbonat $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ statt. Die Zufuhr von Anionen als Mineraldünger, wie z.B. von Chlorid bei der Kaliumdüngung, führt im Austausch gegen K^+ -Ionen zu einer Desorption und Auswaschung vor allem von Ca^{2+} -Ionen.

In tieferen Bodenschichten kann Calcium z.B. aufgrund wieder erhöhten pH-Wertes oder Erreichen der Sättigungskonzentration in der Bodenlösung wieder ausfallen. Es entstehen je nach den begleitenden Anionen Ca-Carbonate und Ca-Sulfate. Beide sind unter neutralen pH-Verhältnissen schwer löslich und können Porenräume verengen oder verstopfen. In technischen Bauwerken, z.B. in für bestimmte Dränkapazitäten gerechneten Dränschichten, können CaCO_3 und $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)$ als Inkrustation zur Herabsetzung des Fließquerschnittes führen.

A 1.4 Stickstoff

Stickstoffverbindungen sind wichtige Nährstoffe. Sie können jedoch für die Umwelt auch problematisch sein, wenn sie im Übermaß in der Wasserphase (Ammonium NH_4^+ , Nitrat NO_3^-) ausgewaschen oder in der Gasphase (z.B. Ammoniak NH_3) emittiert werden. Stickstoff unterliegt im Boden vielfachen Umwandlungen, er kann zur Eutrophierung von Gewässern beitragen und Qualitätsprobleme bei Grundwasser für Trinkwasserzwecke verursachen. Nitrat unterliegt daher als Inhaltsstoff in Dränabflüssen wasserrechtlichen Beschränkungen (Direkt-/ Indirekteinleiter-Verordnungen).

Die N-Auswaschung aus dem Wurzelraum erfolgt überwiegend als Nitrat. Die Konzentration ist im Wesentlichen vom jahreszeitlich bedingten Ausmaß der Mineralisierung, Art der Bodennutzung bzw. des Pflanzenbestandes und der Düngung abhängig.

A 1.5 Kompost

Kompost ist heutzutage ein qualitätsgesichertes Produkt aus der Bio- oder Grünabfallbehandlung. Er ist durch einen sehr hohen Anteil von Nährstoffen, die durch den Kompostierungsprozess im Grunde aufkonzentriert werden, gekennzeichnet. Kompost wird entweder in der Landwirtschaft oder in der Garten- und Erdenwirtschaft als Bodenverbesserer und Dünger eingesetzt.

Kompost führt dem Boden Nährstoffe zu und verbessert die Gefügestabilität. Die Zugabe muss überlegt dosiert sein. Die Inhaltsstoffe von Kompost bewirken eine hohe punktuelle Nährstoffkonzentration, die bei zu hoher Gabe auch kontraproduktiv sein kann. Die Vegetation „verbrennt“. Theoretisch darf die Zugabe nur so hoch sein,

wie sie von der Vegetation zuverlässig aufgenommen werden kann. Überschüssige Nährstoffe geraten in Lösung und verlagern sich mit dem Niederschlagswasser in den Dränabfluss. Die Zugabe von Kompost bei gemischten Substraten sollte sich auf die oberen, durchwurzelten Schichten beschränken. Kompost, der nicht durch die Vegetation umgesetzt wird, kann bei hohen Konzentrationen auch Faulprozesse im Boden hervorrufen.

Literatur zu E 2-31:

- AG BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover
Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- BERGER, K., 2001: Dimensionierung und Optimierung von Rekultivierungsschichten mit dem HELP-Modell zur Minimierung des Sickerwasseranfalls. Bayerische Abfall- und Deponietage 2001, 16./17.05.2001, KUMAS, Augsburg.
Ergänzte Fassung:
<http://www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/dimreku.pdf>
- BERGER, K., 2002: Anwendung des HELP-Modells für die Simulation des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen.
In: Handbuch der Altlastensanierung, Kennzahl 5588, 30. Erg.-Lfg. 2. Aufl., August 2002
- BRAUNS, J.; KAST, K.; SCHNEIDER, H.; KONOLD, W.; WATTENDORF, P. & LEISNER, B., 1997: Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfall-konformer Oberflächenabdichtung
Handbuch Abfall, Band 13, Karlsruhe
- EGLOFFSTEIN, TH., 1999: Statistische Auswertung der Durchlässigkeitsversuche aus den Aufgrabungen von Bentofix-Dichtungsbahnen
in: EGLOFFSTEIN, TH., BURKHARDT, G., CZURDA, K. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten '99. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 116, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- ELLENBERG, H.; WEBER, H.E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W.; PAULISEN, D., 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN E.V. (FGStV), 1994: Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen
Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, Arbeitsausschuß „Frost“, Heft 105
Kirschbaum Verlag, Bonn

- KONOLD, W.; LEISNER, B.; WATTENDORF, P., 1995: Anforderungen an die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel Wald
in: EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G. (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 103, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- KÖSTLER, J.N.; BRÜCKNER, E.; BIEBELSRIETHER, H., 1968: Die Wurzeln der Waldbäume
Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGGER, G., 1994: Bodenkunde
5. Auflage, UTB, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E., 1982: Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band I: Monocotyledoneae
Verlag Gustav Fischer, Stuttgart, New York
- KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E., 1992: Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band II: Pteridophyta und Dicotyledoneae (Magnoliopsida), Teil 1: Morphologie, Anatomie, Ökologie, Verbreitung, Soziologie, Wirtschaft
Verlag Gustav Fischer, Stuttgart, Jena, New York
- KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E., 2002: Wurzelatlas europäischer Waldbäume und Sträucher, Leopold Stocker Verlag, Graz, Stuttgart
- LINERT, U., 1995: Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen – Ursachen und Möglichkeiten der Optimierung
in: EGLOFFSTEIN, TH., BURKHARDT, G. (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten – Abdichtung oder Abdeckung, Schriftenreihe Angewandte Geologie, Band 37, Universität Karlsruhe
- MAIER-HARTH, U.; MELCHIOR, S., 2001: Überprüfung der Wirksamkeit der 10 Jahre alten mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen.
In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. 4. Deponieseminar des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Eigenverlag, Mainz

- MELCHIOR, S., 1993: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdeckungssysteme für Deponien und Altlasten
Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg
Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 22
- MELCHIOR, S., 1998: Ansätze zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten in Abdeckungssystemen von Deponien und Altlasten
in: STIEF, K.; ENGELMANN, B. (Hrsg.): Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 107, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- MELCHIOR, S., 1999a: Felduntersuchungen und Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen
in: Landesamt für Umweltschutz Bayern (Hrsg.): Neue Erkenntnisse zur Austrocknung und Durchwurzelung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Seminar am 21.10.1998 in Wackersdorf
- MELCHIOR, S., 1999b: Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen
in: Landesamt für Umweltschutz Bayern (Hrsg.): Neue Erkenntnisse zur Austrocknung und Durchwurzelung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Seminar am 21.10.1998 in Wackersdorf
- MELCHIOR, S., 2000: Materialwahl, Schichtaufbau und Dimensionierung der Rekultivierungsschicht
in: RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (Hrsg.): Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten, Tagung am 08.09.2000, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 47
- MELCHIOR, S., 2005: Praxiserfahrungen und Ergebnisse der Qualitätssicherung bei der Rekultivierung von Deponien.
in: KRANERT, M. (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik 2005. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft 84.
- NEFF, H. K., 1988: Der Wasseraufnahmeversuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte
Bautechnik

- RAMKE, H.-G.; GARTUNG, G.; HEIBROCK, G.; LÜKEWILLE, W.; MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BOHNE, K.; MAIER-HARTH, U.; WITT, K.-J., 2002: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Status-Workshop. Höxteraner Berichte zur angewandten Umweltwissenschaften.
- RAMKE, H.-G., 2005: Anforderungen an die Gestaltung von Rekultivierungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen in: 9. Münsteraner Abfallwirtschaftstage
Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 8
Labor für Abfallwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft, Umweltchemie
Fachhochschule Münster
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P., 2002: Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin
- WATTENDORF, P.; EHRMANN, O., 2002: Erprobung von Wurzelsperren zum Schutz von Drainage- und Abdichtungsschichten vor Durchwurzelung,
in: EGLOFFSTEIN, TH.; BURKHARDT, G.; CZURDA, K. (Hrsg.):
Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2002,
Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 125, Erich Schmidt Verlag,
Berlin
- WITT, K. J.; ZEH, M., FABIAN, F., 2004: Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen
Müll und Abfall, Heft 11

Regelwerke:

- DEPONIEVERORDNUNG (DEPV), 2002: Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 24. Juli 2002, Fundstelle: BGBl I 2002, 2807
- DIN 4022, 1987: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels
Beuth Verlag, Berlin/Köln
- DIN 18196, 1988: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
Beuth Verlag, Berlin/Köln

- DIN 18915, 1990: Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten
Beuth Verlag, Berlin/Köln
- DIN 19731, 1998: Verwertung von Bodenmaterial
Beuth Verlag, Berlin/Köln
- LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall), 1997: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln
In: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft (LAGA), Heft 20/1
Erich Schmidt Verlag, Berlin
- RSTO 01: Richtlinien für Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
Ausgabe 2001
- TA ABFALL, 1991: Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen
vom 12. März 1991, Fundstelle: GMBI. S. 139, ber. S. 469
- TA SIEDLUNGSABFALL, 1993: Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen
vom 14. Mai 1993, Fundstelle: BAnz. Nr. 99a
- VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten), 1991/2001: Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik, Band I: Die Untersuchung von Böden, 1. und 2 Teillieferung 1991, 3. Teillieferung 2001
Selbstverlag, Darmstadt