



Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme

Konkretisierungen und Empfehlungen zur
Deponieverordnung

[LANUV-Arbeitsblatt 13](#)



**Technische Anforderungen und Empfehlungen für
Deponieabdichtungssysteme**

Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung

LANUV-Arbeitsblatt 13

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2010

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361-305-0 Telefax 02361-3053215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Autoren	Dipl.-Ing. Ilse Polednik Dr.-Ing. Michael Tiedt Dipl.-Ing. Michael Trapp (alle LANUV NRW)
Titelfoto	Errichtung des Oberflächenabdichtungssystems auf einer Deponie (Foto: LANUV NRW)
ISSN	1864-8916 LANUV-Arbeitsblätter

Informations-
dienste: Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschafts-
dienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (02 01) 71 44 88

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von
Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet.
Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
Einführung	6
1 Standort und Geologische Barriere	7
1.1 Standort	7
1.2 Geologische Barriere	8
1.2.1 Technische Anforderungen für die einzelnen Deponieklassen	8
1.2.2 Technische Maßnahmen bei einer unvollständigen geologischen Barriere	9
1.2.3 Errichtung einer künstlichen geotechnischen Barriere	12
1.3 Dichtwandsysteme	12
1.4 Überlagerung stillgelegter Deponieabschnitte	13
2 Abdichtungssysteme	15
2.1 Allgemeine Anforderungen	15
2.1.1 Langfristige Funktionserfüllung	15
2.1.2 Herstellbarkeit	15
2.1.3 Standsicherheit	16
2.1.4 Qualitätsmanagement	16
2.2 Nachweis der Eignung	16
2.2.1 Geokunststoffe	16
2.2.2 Sonstige Abdichtungskomponenten	17
2.3 Basisabdichtungssystem	17
2.3.1 Allgemeines	17
2.3.2 Anforderungen	18
2.3.2.1 Kunststoffdichtungsbahn	18
2.3.2.2 Deponieasphalt	19
2.3.2.3 Mineralische Abdichtung	20
2.3.2.4 Wasserglasvergütete Mineralgemische	20
2.3.2.5 Bentokies	21
2.3.2.6 CHEMOTON	22
2.3.2.7 DYWIDAG-Mineralgemisch	23
2.3.3 Entwässerungsschicht	24
2.4 Oberflächenabdichtung	24
2.4.1 Allgemeines	24
2.4.2 Geokunststoffe	26
2.4.2.1 Kunststoffdichtungsbahn	26
2.4.2.2 Geogitter	27
2.4.2.3 Dränelemente	28
2.4.2.4 Schutzschichten	31
2.4.3 Serienmäßige / Standardisierte Produkte	32
2.4.3.1 Geosynthetische Tondichtungsbahnen	32
2.4.3.2 Mineralische Dichtungsbahn	33
2.4.3.3 Kombikapillarsperre	34
2.4.3.4 Kapillarblockbahn	34

2.4.3.5	METHA-Material	34
2.4.3.6	TRISOPLAST®	35
2.4.3.7	Dichtungselement aus Deponieasphalt	36
2.4.3.8	Boden-Natur-Dichtung (BND)	38
2.4.3.9	Wasserglasvergütete Mineralgemische	39
2.4.3.10	Bentokies	40
2.4.3.11	CHEMOTON	41
2.4.3.12	DYWIDAG-Mineralgemisch	41
2.4.4	Sonstige Dichtungssysteme	42
2.4.4.1	Mineralische Abdichtung.....	42
2.4.4.2	Kapillarsperre.....	42
2.4.4.3	Abdichtungskomponente aus mineralischen Abfällen (Deponieersatzbaustoffe).....	44
2.4.5	Entwässerungsschicht	44
2.4.6	Dichtungskontrollsysteme	45
2.4.6.1	Elektrische Dichtungskontrollsysteme	45
2.4.6.2	Kapillarsperre als Kontrollsystem	46
2.4.6.3	Kontrolldränschichten	46
2.4.6.4	Kontrollfelder.....	47
2.4.7	Ausnahmeregelungen für die Nachbehandlung des Abfallkörpers.....	48
2.4.7.1	Voraussetzungen.....	48
2.4.7.2	Abdichtungssysteme bei erfolgreicher Nachbehandlung.....	49
3	Rekultivierung/Folgenutzung	50
3.1	Rekultivierungsschicht.....	50
3.1.1	Funktionen der Rekultivierungsschicht	50
3.1.1.1	Trägersubstrat	50
3.1.1.2	Durchwurzelungsschutz.....	51
3.1.1.3	Sickerwasserverminderung	52
3.1.1.4	Schutz gegen Austrocknung.....	53
3.1.1.5	Schutz gegen Temperaturschwankungen und Frost	54
3.1.1.6	Schutz gegen Wühltiere.....	54
3.1.2	Bemessung.....	55
3.1.2.1	Idealzusammensetzung.....	55
3.1.2.2	Anforderungen	56
3.1.2.3	Schutzniveau 1 (Mindestschutzfunktion)	57
3.1.2.4	Schutzniveau 2 (mittlere Schutzfunktion)	58
3.1.2.5	Schutzniveau 3 (hohe Schutzfunktion)	59
3.2	Wasserhaushaltsschicht	60
3.3	Methanoxidationsschicht	61
3.4	Empfehlungen zum Einbau und zur Qualitätssicherung	62
3.4.1	Material	63
3.4.2	Einbau.....	64
3.4.3	Qualitätssicherung	66
3.5	Rekultivierungsmaßnahmen bei besonderen Standorten.....	67
3.6	Anpflanzung von Bäumen auf Rekultivierungsschichten	67
3.7	Technische Funktionsschichten.....	70
3.7.1	Allgemeine Anforderungen an technische Funktionsschichten	70
3.7.2	Asphaltbetondecke	71

3.7.2.1	Entkoppelte Funktionen	71
3.7.2.2	teil-entkoppelte Funktionen.....	72
3.7.2.3	gekoppelte Funktionen	73
3.7.2.4	Anforderungen an die Asphaltbetondichtung einer Funktionsschicht.....	74
3.7.3	Mineralische Abdeckung.....	74
3.7.4	Deckschicht aus Pflastersteinen oder Platten	74
Literatur	.....	76
Verzeichnis der Abbildungen	.....	81
Verzeichnis der Tabellen	.....	82
Stichwortregister	.....	83
Anhang	.....	85
A 1	Hinweise zur Permeabilitätsberechnung der geologischen Barriere	86
A 2	Schutz mineralischer Dichtungskomponenten.....	89
A 3	Meteorologische Informationen	101
A 4	Wurzeltiefen mitteleuropäischer Baumarten	105

Einführung

Mit dem Inkrafttreten der neuen Deponieverordnung am 16. Juli 2009 haben sich die Anforderungen an Deponieabdichtungskomponenten gegenüber den früheren Vorgaben der Deponieverordnung und den Technischen Anleitungen TA Abfall und TA Siedlungsabfall deutlich verändert. Insbesondere wird seitdem auf die Vorgabe eines Regelaufbaus verzichtet, der früher ohne Nachweis der grundsätzlichen Eignung als genehmigungsfähig anzusehen war. Stattdessen werden nun alle Dichtungssysteme gleichbehandelt und werden an einheitlichen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Beständigkeit gemessen.

Gleichzeitig sind in den vergangenen Jahren mehrere alternative Technologien entwickelt worden, die zunehmend Eingang in den Deponiebau finden. Somit steht im Regelfall für den Bau einer Deponieabdichtung eine Palette möglicher technischer Lösungen zur Verfügung, aus der die technisch und ökonomisch günstigste Variante auszuwählen ist.

Dieses Arbeitsblatt soll einen Überblick über die derzeit angebotenen bzw. verfügbaren Dichtungssysteme geben und damit die Entscheidungsfindung bei der Planungsarbeit erleichtern. Es richtet sich sowohl an Deponiebetreiber und Planungsbüros als auch an Genehmigungsbehörden. Das Arbeitsblatt fasst bestehende technische Anforderungen an Deponieabdichtungssysteme zusammen und ergänzt sie mit Empfehlungen zur Bemessung und Ausführung. Das Arbeitsblatt soll regelmäßig aktualisiert und ergänzt werden, um den sich wandelnden Stand der Technik zeitnah wiederzugeben.

1 Standort und Geologische Barriere

1.1 Standort

Die Eignung des Standortes ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass das Wohl der Allgemeinheit durch eine Deponie nicht beeinträchtigt wird. Die folgenden Standortkriterien sind bei der Wahl eines Deponiestandortes besonders zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass bei der Wahl eines Standortes für eine neue Deponie im Regelfall die in Anhang 1 Nr. 1 DepV. aufgeführten Kriterien einzuhalten sind. Im Ausnahmefall ist unter strenger Abwägung der verschiedenen Beweggründe jedoch auch eine Abweichung davon zulässig, wenn das Wohl der Allgemeinheit dadurch nicht beeinträchtigt wird.

Geologische / hydrogeologische Bedingungen

Der Untergrund muss alle bodenmechanischen Belastungen aus der Deponie aufnehmen können, so dass keine schädlichen Setzungen am Basisabdichtungssystem einschließlich des Entwässerungssystems eintreten können.

Er soll darüber hinaus eine mögliche Schadstoffausbreitung aus der Deponie maßgeblich behindern können (geologische Barriere). Karstgebiete und Gebiete mit stark klüftigem Untergrund weisen natürlicherweise nur unzureichende Eigenschaften einer Schadstoffrückhaltung auf.

Grundwasserabstand / Grubenlage

Der Abstand der Oberkante der geologischen Barriere soll permanent (also auch nach Abklingen der Untergrundsetzungen) einen Abstand von mindestens 1 m zum höchsten zu erwartenden Grundwasserspiegel einhalten.

Bei Haldendeponien soll das Planum eine entsprechende Höhenlage aufweisen.

Bei Grubendeponien sind höhere Grundwasserdruckspiegel zulässig, wenn durch die Einbindung in eine grundwassersperrende Schicht und/oder ein Dichtwandsystem das anstehende Grundwasser nicht beeinträchtigt wird. Das bedeutet, dass Sickerwasser nicht in das anstehende Grundwasser übertreten kann und das anstehende Grundwasser nicht in den Deponiekörper eindringt. Siehe hierzu auch Kapitel 1.3

Das gesammelte Sickerwasser soll in freiem Gefälle abfließen können. Bei Grubendeponien ist eine Abweichung zulässig, wenn sichergestellt ist, dass das anfallende Sickerwasser dauerhaft aus dem Deponiekörper gehoben werden kann.

Abstand von Schutzgebieten

Deponien dürfen nicht in Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten und entsprechenden Reserveflächen errichtet werden, wenn nicht im Einzelfall auf Grund besonderer Gegebenheiten die Eignung des Standortes nachgewiesen werden kann.

Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete und Biotopflächen sind zu meiden.

Zu Gebieten mit sensibler Nutzung, z.B. Wohngebieten und Erholungsflächen ist ein ausreichender Schutzabstand einzuhalten. Der Runderlass des *Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW* vom 6.6.2007 sieht für oberirdische Deponien aus Gründen des Lärmschutzes einen Mindestabstand von reinen und allgemeinen Wohngebieten von 500 m sowie von Misch-, Dorf- und Kerngebieten von 300 m vor.

Gefahr von Schadensereignissen

Gebiete, in denen in Folge von Erdbeben, tektonisch aktiven Störungszonen, Bodensenkungen, Bergsenkungen, Tagebrüchen, Erdfällen, Hangrutschungen oder Lawinen solch starke Bodenbewegungen eintreten können, dass die Standsicherheit oder Funktionsfähigkeit der Deponie beeinträchtigt wird, sind für die Errichtung einer Deponie nicht geeignet.

Bei Standorten in Überschwemmungsgebieten sind die möglichen Auswirkungen auf die Standsicherheit und den Betrieb der Deponie zu berücksichtigen.

1.2 Geologische Barriere

Sofern der Untergrund unter der Deponie sowie im weiteren Umfeld auf Grund seiner geringen Durchlässigkeit, seiner Mächtigkeit und Homogenität sowie seines Schadstoffrückhaltevermögens in der Lage ist, die Ausbreitung ggf. aus der Deponie austretender Schadstoffe maßgeblich zu behindern, liegt eine natürliche geologische Barriere vor.

Eine vollständige, natürliche geologische Barriere liegt vor, wenn die Anforderungen nach DepV Anhang 1 Nr. 1.2 erfüllt sind.

Tonmineralien wirken sich günstig auf das Schadstoffrückhaltevermögen einer geologischen Barriere aus und sollten daher in einem bestimmten Mindestmaß enthalten sein. Die Bestimmung des Tonmineralgehalts ist allerdings aufwändig. Die Abschätzung des Tonmineralgehalts über den Tongehalt nach der Schlämmanalyse erscheint daher vertretbar und wird im Folgenden zu Grunde gelegt.

1.2.1 Technische Anforderungen für die einzelnen Deponieklassen

Die im Folgenden aufgelisteten Mindestanforderungen an die Mächtigkeit und Durchlässigkeit der geologischen Barriere sind dem Anhang 1 der Deponieverordnung entnommen und zwingend einzuhalten.

Die darüber hinaus formulierten Anforderungen an das Schadstoffrückhaltevermögen sind dagegen als konkretisierende Empfehlungen zur quantitativen Festlegung des Schadstoffrückhaltevermögens zu verstehen. Sie orientieren sich an den Maßgaben des Merkblattes Nr. 12 des *Landesumweltamtes NRW* zur Anwendung der TA Siedlungsabfall und sind an die Anforderungen der Deponieverordnung angepasst.

Tabelle 1 Anforderungen und Empfehlungen für die geologische Barriere
 GT: Gesamttongehalt der Barriere über die gesamte Mächtigkeit

Eigenschaft	Anforderung	Regelwerk
Deponieklasse 0		
Mächtigkeit	$d \geq 1 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Durchlässigkeit	$k \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Schadstoffrückhalte- vermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die Mindestmächtigkeit von 1 m ¹⁾
Tongehalt	$c_t \geq 5 \text{ Gew.-%}$	
Gesamttongehalt	$GT \geq 65 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse I		
Mächtigkeit	$d \geq 1 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Durchlässigkeit	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Schadstoffrückhalte- vermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die Mindestmächtigkeit von 1 m ¹⁾
Tongehalt	$c_t \geq 20 \text{ Gew.-%}$	
Gesamttongehalt	$GT \geq 260 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse II		
Mächtigkeit	$d \geq 1 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Durchlässigkeit	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Schadstoffrückhalte- vermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die Mindestmächtigkeit von 1 m ¹⁾
Tongehalt	$c_t \geq 20 \text{ Gew.-%}$	
Gesamttongehalt	$GT \geq 260 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse III		
Mächtigkeit	$d \geq 5 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Durchlässigkeit	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tab. 1
Schadstoffrückhalte- vermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die Mindestmächtigkeit von 5 m ¹⁾
Tongehalt	$c_t \geq 20 \text{ Gew.-%}$	
Gesamttongehalt	$GT \geq 1.300 \text{ kg/m}^2$	

¹⁾ Soweit die Mächtigkeit der technischen Maßnahmen die o.g. Mindestmächtigkeit überschreitet, können die Anforderungen an das Schadstoffrückhaltevermögen rechnerisch entsprechend verringert werden.

1.2.2 Technische Maßnahmen bei einer unvollständigen geologischen Barriere

Vom Vorhandensein einer natürlichen geologischen Barriere ist dann auszugehen, wenn in einer flächig verbreiteten, homogenen geologischen Schicht über eine Mächtigkeit von mehreren Dezimetern die hydraulische Leitfähigkeit einen Wert von $k \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ nicht überschreitet und deren Tongehalt eine nicht nur unmaßgebliche Schadstoffrückhaltung bewirkt.

Soweit die natürlichen Eigenschaften den Anforderungen des Anhangs 1 DepV nicht vollständig genügen, kann die vorhandene geologische Barriere durch technische Maßnahmen vervollständigt, verbessert oder ganz durch eine geotechnische Barriere ersetzt werden.

Die Anforderungen an die technischen Maßnahmen ergeben sich mit Ausnahme der Mindestmächtigkeit aus den Anforderungen in Tabelle 1. Die Mindestmächtigkeit beträgt in diesem Fall 0,5 m. Die weiteren Anforderungen sind entsprechend der tatsächlich im Einzelfall gewählten Mächtigkeit umzurechnen (z. B. Durchlässigkeit). Gegebenenfalls ergeben sich aus den Anforderungen an den Gesamttongehalt (insb. für DK III) in der Praxis höhere Mindestmächtigkeiten als 0,5 m.

Tabelle 2 Anforderungen und Empfehlungen für geotechnische Barrieren
 Anforderungen an die künstliche Vervollständigung oder Verbesserung einer geologischen/geotechnischen Barriere
 GT: Gesamttongehalt der Barriere über die gesamte Mächtigkeit

Eigenschaft	Anforderung	Regelwerk
Deponieklasse 0		
Mächtigkeit	$d \geq 0,5 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 1.2 Nr. 3 Satz 3
Durchlässigkeit	$k \leq 9 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^{1)}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tabelle 1
Schadstoffrückhaltevermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die gesamte Mächtigkeit
Gesamttongehalt	$GT \geq 65 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse I		
Mächtigkeit	$d \geq 0,5 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 1.2 Nr. 3 Satz 3
Durchlässigkeit	$k \leq 9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^{1)}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tabelle 1
Schadstoffrückhaltevermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die gesamte Mächtigkeit
Gesamttongehalt	$GT \geq 260 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse II		
Mächtigkeit	$d \geq 0,5 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 1.2 Nr. 3 Satz 3
Durchlässigkeit	$k \leq 9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^{1)}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tabelle 1
Schadstoffrückhaltevermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die gesamte Mächtigkeit
Gesamttongehalt	$GT \geq 260 \text{ kg/m}^2$	
Deponieklasse III		
Mächtigkeit	$d \geq 0,5 \text{ m}$	DepV Anh. 1 Nr. 1.2 Nr. 3 Satz 3
Durchlässigkeit	$k \leq 6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^{1)}$	DepV Anh. 1 Nr. 2.2 Tabelle 1
Schadstoffrückhaltevermögen		empfohlene Werte, bezogen auf die gesamte Mächtigkeit
Gesamttongehalt	$GT \geq 1.300 \text{ kg/m}^2$	

¹⁾ Der k-Wert wurde bei einem hydrostatischen Überstau von 0,03 m (DK I - III) bzw. 0,10 m (DK 0) so auf die Mindestmächtigkeit von 0,5 m umgerechnet, so dass die Durchsickerungsmenge im Bezugszeitraum (DK I und II: 300 Jahre, DK III: 500 Jahre) dem Regelaufbau entspricht.

Für die technischen Maßnahmen zur Nachbesserung oder Vervollständigung kommen in Anlehnung an die *GDA-Empfehlung E 2-38* als natürliche Erdstoffe in erster Linie Lehm bzw. Ton und schluffiger Ton der Bodengruppen TA (ausgeprägt plastisch) und TM (mittelplastisch) nach DIN 18 196 in Betracht.

Mit den nachstehenden Formeln lässt sich der Gesamttongehalt einer mineralischen Schicht aus den spezifischen Materialangaben umrechnen:

$$GT \left[\text{kg} / \text{m}^2 \right] \cong 10 \cdot c_t \left[\text{Gew.} - \% \right] \cdot \rho_d \left[\text{t} / \text{m}^3 \right] \cdot d \left[\text{m} \right]$$

GT: Gesamttongehalt über die betrachtete Mächtigkeit

c_t : spezifischer Tongehalt

ρ : Trockendichte

d : Dicke der geotechnischen Barriere

$$10 \cdot 15 \text{ Gew.} - \% \cdot 1,65 \text{ g} / \text{cm}^3 \cdot 1,0 \text{ m} = 247 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ (Rechenbeispiel)}$$

Insbesondere bei den Deponieklassen II und III kann sich die erforderliche Mächtigkeit der Nachbesserung einer geologischen Barriere – unter Beachtung einer Mindestmächtigkeit von 0,5 m – aus den Anforderungen an den Tongehalt ergeben. Die Mächtigkeit ist dann so zu bemessen, dass der Wert für GT nach Tabelle 2 erreicht wird.

Beispiel:

Am Standort einer Deponie soll ein weiterer Deponieabschnitt der Klasse III errichtet werden. Die vorhandene geologische Barriere weist eine Mächtigkeit von 0,70 m und einen Tongehalt von 18 Gew.-% auf. Daraus ergibt sich bei einer Trockendichte von 1,3 t/m³ ein Gesamttongehalt GT von 164 kg/m². Für den erforderlichen Gesamtwert von 1.300 kg/m² sind durch die technische Vervollständigung weitere 1.136 kg/m² zu ergänzen. Das für die Nachbesserung zur Verfügung stehende Material hat einen spezifischen Tongehalt von 30 Gew.-%. Die für das Schadstoffrückhaltevermögen erforderliche Mächtigkeit der Vervollständigungsschicht beträgt demnach:

$$d = \frac{1.136 \text{ kg} / \text{m}^2}{10 \cdot 30 \cdot 1,3} = 2,91 \text{ m}$$

Die vorhandene geologische Barriere wäre in diesem Fall mit einer zusätzlichen Schicht in einer Mächtigkeit von mindestens 2,91 m zu vervollständigen, so dass sich eine Gesamtmächtigkeit von 3,61 m ergäbe. Die zusätzlichen Anforderungen an die hydraulische Leitfähigkeit sind hier nicht betrachtet worden.

Hinweis: Würde die natürliche geologische Barriere ganz fehlen, müsste die geotechnische Barriere gemäß DepV in voller Mächtigkeit von 5 m nach den Maßgaben der Tabelle 1 errichtet werden.

1.2.3 Errichtung einer künstlichen geotechnischen Barriere

Soweit keine geologische Barriere vorliegt, die die Anforderungen nach Anhang 1 Nr. 1.2 Ziffer 2. erfüllen kann, d.h. der Untergrund

- eine höhere Durchlässigkeit als $k = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s aufweist oder
- nicht mit einer Mächtigkeit von mehreren Dezimetern flächig verbreitet ist oder
- Inhomogenitäten aufweist, die die Wirkung als geologische Barriere vermindern oder
- einen Tonmineralgehalt aufweist, der nur eine unmaßgebliche Schadstoffrückhaltung bewirkt,

muss eine geotechnische Barriere künstlich errichtet werden, die die in Tabelle 1 aufgeführten Anforderungen erfüllt. Eine Verminderung der Mächtigkeit gegenüber den Anforderungen des Anhangs 1 Nr. 2.2 Tabelle 1 ist in diesem Fall **nicht zulässig**.

1.3 Dichtwandsysteme

Die vollständige oder teilweise Umschließung einer Deponie kann im Ausnahmefall unter Abwägung der Standortkriterien nach Anhang 1 Nr. 1. DepV eine geeignete Maßnahme sein, die Schutzziele der Deponieverordnung zu erreichen.

Das belastete Sickerwasser muss in diesem Fall oberhalb des Basisabdichtungssystems gefasst und abgeleitet werden. Das von außen zuströmende Grundwasser gelangt nicht in den Deponiekörper sondern wird außerhalb des Basisabdichtungssystems gefasst und kann im Regelfall als unbelastetes Grundwasser ohne Behandlung abgeleitet werden. Voraussetzung ist die Funktionstüchtigkeit des Basisabdichtungssystems und der Sickerwasserfassung sowie eine kontinuierliche Überwachung des Grundwassers. Die geologische Barriere hat hier die Funktion der Begrenzung des Grundwasserzutritts von außen bzw. unten, die die Absenkung des Grundwasserspiegels und damit die lokale Umkehr der Strömungsverhältnisse ermöglicht.

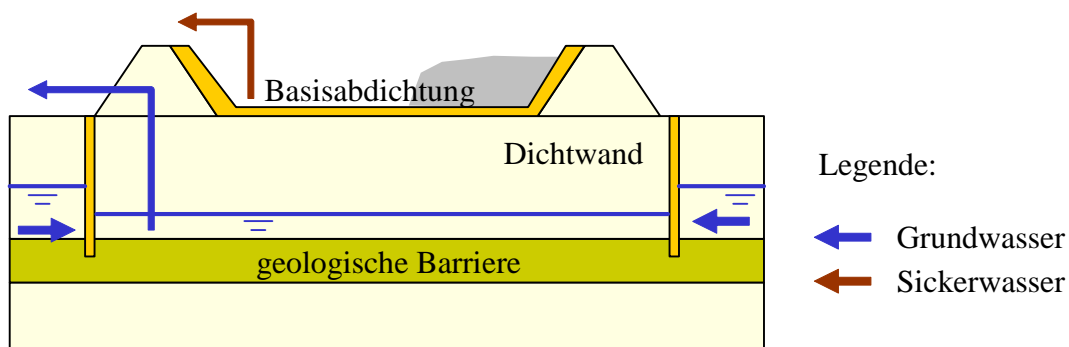


Abbildung 1 Dichtwandensystem bei einer Deponie in Haldenlage

Folgende Anforderungen sollen dabei gestellt werden:

- Im Untergrund ist eine geologische Barriere vorhanden, in die die Dichtwände wirksam einbinden; die Einbindetiefe richtet sich nach den bautechnischen Erfordernissen.
- Auf dem Deponieplanum ist ein regelkonformes Basisabdichtungssystem zu errichten.
- Die hydraulischen Maßnahmen werden technisch und organisatorisch dauerhaft sichergestellt.

Bei Grundwasserdruckspiegeln, die wenigstens 1 m unterhalb der Oberkante der geologischen Barriere liegen, richtet sich die festzulegende Begrenzung des Grundwasserzustromes nach wasserwirtschaftlichen Erfordernissen.

Höhere Grundwasserdruckspiegel sollten nur dann akzeptiert werden, wenn der Zutritt von Grundwasser in den Deponiekörper auf ein - nach den technischen Möglichkeiten - unvermeidbares Mindestmaß reduziert wird. Als Orientierungswert für einen akzeptablen Zustrom kann die Anforderung an die Durchlässigkeit der geologischen Barriere angelegt werden. Die hydraulischen Maßnahmen dürfen die hauptsächliche Wirkung der Dichtungselemente nur ergänzend unterstützen und diese nicht überwiegen.

1.4 Überlagerung stillgelegter Deponieabschnitte

Mit der Zielsetzung den Flächenverbrauch zu minimieren, kann es sinnvoll sein, neue Deponien oder Deponieabschnitte auf bereits stillgelegten Deponieabschnitten zu errichten. Rechtlich ist die Überlagerung einer stillgelegten Deponie bzw. eines Deponieabschnitts grundsätzlich zulässig. Auf die sich im Einzelnen ergebenden verfahrensrechtlichen Fragen wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

Zu den technischen Voraussetzungen gehören insbesondere:

- Durch die Überlagerung werden keine Einrichtungen oder Bauteile längerfristig oder dauerhaft unzugänglich gemacht, die noch betrieben, gewartet oder ggf. repariert werden müssen.
- Die Setzungen des unteren Deponiekörpers müssen so weit abgeklungen sein, dass das Basisabdichtungssystem des überlagernden Deponiekörpers keine schädlichen Verformungen erfahren kann.
- Die durch die weitere Ablagerung von Abfällen zu erwartende Auflasterhöhung darf keine Verformungen des unteren Deponiekörpers verursachen, die zu schädigenden Einwirkungen auf die Dichtungssysteme oder andere deponietechnische Einrichtungen führen können (z.B. Drainage, Gasfassung). Hierzu zählen auch Zugkräfte, die auf Dichtungskomponenten wirken. Die ggf. vorhandenen baulichen Einrichtungen müssen eine hinreichende Tragfähigkeit aufweisen, um die zusätzliche Auflast aufzunehmen.

Soweit die rechtlichen und technischen Voraussetzungen erfüllt sind, kann auf der Oberfläche eines bestehenden Deponiekörpers eine neue Deponie oder ein neuer Deponieabschnitt errichtet werden. Für die Kombination von Oberflächenabdichtung des unteren Deponiekörpers und geotechnischer Barriere und Basisabdichtungssystem des oberen Deponiekörpers gilt, dass die unterschiedlichen Funktionen der Komponenten beider Systeme ganz oder

teilweise in gemeinsamen Komponenten zusammengefasst werden dürfen, wenn dies unter Wahrung der funktionalen Eigenschaften technisch möglich ist. Die technischen Anforderungen an solche multifunktionalen Komponenten richten sich bei konkurrierenden Regelungen nach den jeweils strengeren Vorgaben. Die Rekultivierungsschicht entfällt in dieser Konstellation; die Schutzfunktionen der Rekultivierungsschicht (z. B. gegen Frost und Austrocknung) werden durch die überlagernde Ablagerung erbracht und die weiteren Funktionen durch die Rekultivierungsschicht der Oberflächenabdichtung des überlagernden Deponiekörpers.

Tabelle 3 zeigt ein solches Anforderungsprofil für ein typisches Beispiel der Überlagerung eines alten Abschnittes der Deponieklasse II mit einem neuen Abschnitt der Deponieklasse I.

Tabelle 3 Anforderungen an eine bifunktionale Zwischenabdichtung
Beispiel für die Überlagerung eines DK II-Abschnittes durch einen DK I-Abschnitt

Funktion für unteren Deponiekörper (DK II)	Komponente	Funktion für oberen Deponiekörper (DK I)
	<i>Abfall DK I</i>	<i>Ablagerung</i>
Rekultivierungsschicht	-	
Entwässerungsschicht Oberfläche	Kiesdränage 16/32 mm oder ähnlich Sickerrohre	Entwässerungsschicht Basis
1. Abdichtungskomponente	Kunststoffdichtungsbahn d ≥ 2,5 mm	1. (und einzige) Abdichtungskomponente
2. Abdichtungskomponente	Tonmineralische Dichtungsschicht d ≥ 1 m bzw. 0,5 m ¹⁾ k ≤ 1* 10 ⁻⁹ m/s	geotechnische Barriere
Ausgleichs-/Gasdränschicht	Ausgleichsschicht	Tragschicht
<i>Ablagerung</i>	<i>Abfall DK II</i>	

¹⁾ Die Anforderungen an die Mächtigkeit richten sich nach den Vorgaben des Anhangs 1 Nr. 1.2 Ziffern 3. und 4.

Aufgrund der bifunktionalen Wirkung der Systemkomponenten und der stärkeren Restriktionen für Basisabdichtungssysteme sind der Auswahl alternativer Abdichtungskomponenten hier enge Grenzen gesetzt (im Wesentlichen: Deponieasphalt statt Kunststoffdichtungsbahn).

Die Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem des überlagernden Deponieabschnittes richten sich ausschließlich nach den für dessen Deponieklasse geltenden Festlegungen.

Hinsichtlich der Verwendung von Deponieersatzbaustoffen gelten für die Tragschicht unterhalb der Zwischendichtung die Anforderungen gemäß Anhang 3 Tabelle 1 Nr. 3 DepV (Maßnahmen im Deponiekörper), für die übrigen Komponenten die Anforderungen der Nrn. 1 und 2 (Betrachtung als geologische Barriere und Basisabdichtung).

2 Abdichtungssysteme

2.1 Allgemeine Anforderungen

2.1.1 Langfristige Funktionserfüllung

Die Herstellung von Abdichtungskomponenten muss gemäß Anhang 1 Nr. 2.1.1 DepV hinsichtlich der Wahl der Materialien und der Einbautechnik so erfolgen, dass die Funktionserfüllung der Abdichtungssysteme unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren gegeben ist. Die langfristige Funktionserfüllung ist hinsichtlich der folgenden Kriterien im Einzelfall oder im Zuge einer Zulassung bzw. Eignungsbeurteilung nachzuweisen.

- Dichtigkeit, Begrenzung der Durchflussrate
- Widerstand gegenüber mechanischen und hydraulischen Einwirkungen (Auflast, Verkehrslasten, Suffosion, Erosion, Verformungen, Setzungen)
- Widerstand gegenüber chemischen und biologischen Einwirkungen (Sickerwasser, Mikroorganismen)
- Widerstand gegenüber Witterungseinflüssen (Frost, Wärme)
- Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten Materialveränderungen (Oxidation, Versprödung, Diffusion)

2.1.2 Herstellbarkeit

Die Herstellbarkeit von Abdichtungskomponenten und des gesamten Abdichtungssystems wird durch die Anlage von Probefeldern nachgewiesen, auf denen der Einbau unter Baustellenbedingungen probeweise ausgeführt wird.

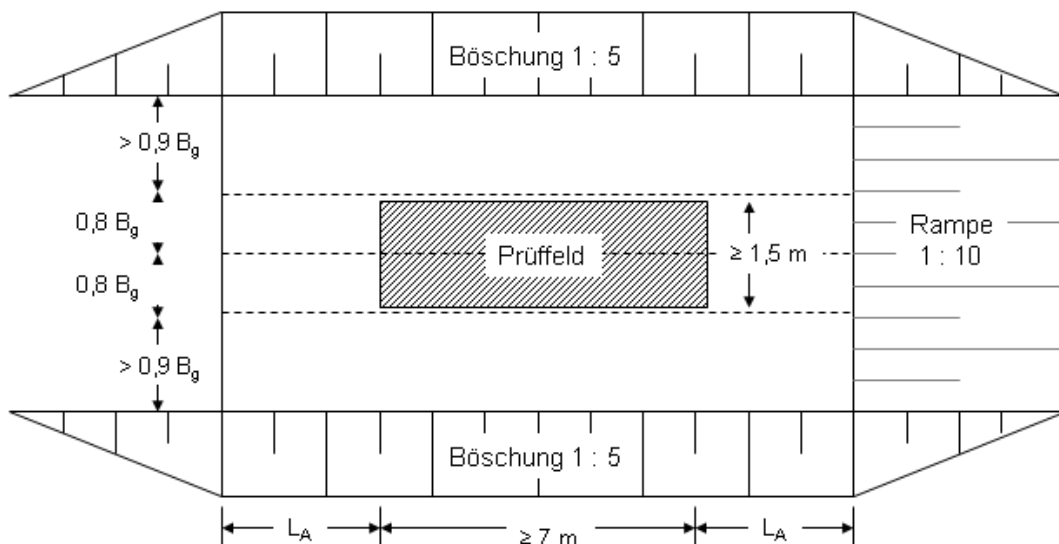


Abbildung 2 Abmessungen für ein Probefeld

- B_g : Gerätebreite
 L_A : Beschleunigungs- und Verzögerungstrecke

Hinweise zur Anlage eines Probefeldes bei mineralischen Abdichtungen gibt das Arbeitsblatt Nr. 6 des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW [34].

2.1.3 Standsicherheit

Sämtliche Bauteile einer Deponie sind standsicher zu errichten. Zu den wesentlichen Fragen der Standsicherheit einer Deponie gehört die Gleitsicherheit der Schichten in Böschungsflächen.

Zu beachten ist, dass zu den Kriterien für eine mögliche Entlassung aus der Nachsorge die Frage der dauerhaften Standsicherheit gehört. Bauteile aus synthetischen Materialien, die zur Standsicherheit des Bauwerkes beitragen, unterliegen Alterungsprozessen, die die Funktionserfüllung nicht dauerhaft sicherstellen. Dies gilt insbesondere für Geogitter und geosynthetische Tondichtungsbahnen, die in Böschungen eingesetzt werden.

2.1.4 Qualitätsmanagement

Für die Herstellung von Abdichtungssystemen ist ein Qualitätsmanagementplan nach den „Grundsätzen des Qualitätsmanagements“ des Arbeitskreises 6.1 – *Geotechnik der Deponiebauwerke* – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) e.V. aufzustellen [12].



[www.gdaonline.de/empfehl.php \(E5-01.pdf\)](http://www.gdaonline.de/empfehl.php (E5-01.pdf))

2.2 Nachweis der Eignung

Um sicherzustellen, dass die vorgenannten Anforderungen erfüllt werden, sind für den Einsatz von Abdichtungssystemen Maßgaben für die Feststellung der Eignung getroffen worden.

2.2.1 Geokunststoffe

Geokunststoffe sowie serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme bedürfen einer Zulassung oder Eignungsfeststellung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Hierunter fallen:

- Kunststoffdichtungsbahnen
- Kunststoffgewebe oder -vliese als Schutzschichten
- Dränelemente aus Kunststoffen (Dränmatten)
- Bewehrungselemente aus Kunststoffen (Geogitter)
- Polymere (z.B. auch zur Vergütung mineralischer Materialien)
- serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme (z.B. elektronische Leckageortungssysteme)

2.2.2 Sonstige Abdichtungskomponenten

Für andere Abdichtungskomponenten und Baustoffe als Geokunststoffe (siehe 2.2.1) ist ein Einzelnachweis gegenüber der zuständigen Genehmigungsbehörde zu führen, soweit nicht eine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung der Länder vorliegt. Bestehende Eignungsbeurteilungen der Länder sowie Zulassungen der *Bundesanstalt für Materialforschung (BAM)* und –prüfung gelten dabei fort, soweit deren Befristung nicht abgelaufen oder die Zulassung nicht für ungültig erklärt worden ist. Diese Fortgeltung betrifft insbesondere die durch die *LAGA ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen* (jetzt: *Deponietechnik*) erstellten Eignungsbeurteilungen für verschiedene Systeme.

Für den Nachweis der Eignung sind die in Anhang 1 Nr. 2.1.1. DepV aufgeführten Kriterien der langfristigen Funktionserfüllung zu beachten. Eine Konkretisierung dieser Kriterien bieten die Allgemeinen Grundsätze für die „Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme“ der *LAGA ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen* [39]. Konkretisierte Anforderungen werden von der *LAGA ad-hoc-AG Deponietechnik* für verschiedene Dichtungssysteme als bundeseinheitliche Qualitätsstandards erarbeitet und veröffentlicht.



www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de

☞ *Umweltschutz*

☞ *Kreislauf- und Abfallwirtschaft*

☞ *Deponietechnik*

☞ *LAGA ad-hoc-AG Deponietechnik*

2.3 Basisabdichtungssystem

2.3.1 Allgemeines

Gemäß Anhang 1, Nummer 2.2 DepV ist im Ablagerungsbereich ein Basisabdichtungssystem nach Tabelle 1 Nummern 2 bis 4 zu errichten. Danach besteht das Abdichtungssystem aus Systemkomponenten, deren jeweiliges Erfordernis sich nach den unterschiedlichen Deponieklassen richtet.

Bei Deponien der Klasse 0 ist eine Abdichtung an der Basis nicht erforderlich. Die bezweckte Schutzwirkung wird hier durch die geologische Barriere mit aufliegender mineralischer Entwässerungsschicht erreicht.

Bei Deponien der Klasse I ist eine einzige Abdichtungskomponente erforderlich. Diese kann als mineralische Dichtung oder als Konvektionssperre hergestellt werden.

Bei Deponien der Klassen II und III wird am bewährten Konzept der Kombinationsabdichtung festgehalten. Diese soll aus einer Konvektionssperre über einer mineralischen Komponente bestehen.

Eine Übersicht der möglichen Abdichtungskomponenten ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Übersicht über mögliche Abdichtungssysteme (Basis)

- Einsatz möglich
- ⊙ in Kombination mit einer weiteren Dichtungskomponente
- * Es liegen nicht mehr gültige Zulassungen oder Empfehlungen vor.

Dichtungssysteme	I	II	III	Feststellung der Eignung
Kunststoffdichtungsbahn	●	⊙	⊙	Zulassung BAM
Abdichtungskomponente aus Deponeiasphalt	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
Mineralische Abdichtung	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis
Wasserglasvergütete Mineralgemische	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis
Bentokies	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis
CHEMOTON	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
DYWIDAG-Mineralgemisch	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *

2.3.2 Anforderungen

2.3.2.1 Kunststoffdichtungsbahn

Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungskomponenten für Deponien werden aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) in einer Dicke von 2,5 mm hergestellt. Sie sind gas- und wasserdicht. Die Kunststoffdichtungsbahn ist eine Konvektionssperre im Sinne der Deponieverordnung.

PEHD ist gegenüber chemischen Einwirkungen äußerst widerstandsfähig. Allein oxidativer Abbau kann über lange Zeiträume hinweg zu nachteiligen Materialveränderungen führen. Bei ausreichendem Schutz gegen UV-Licht kann der oxidative Abbau auf ein sehr geringes Maß reduziert werden. Die Beständigkeit von BAM-zugelassenen und fachgerecht eingebauten Kunststoffdichtungsbahnen ist für Zeiträume von deutlich mehr als 100 Jahren nachgewiesen worden [2].

Kunststoffdichtungsbahnen dürfen nur von erfahrenen Verlegebetrieben mit qualifiziertem Personal verlegt werden. Es dürfen dabei nur solche Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt werden, die über eine Zulassung gemäß der Zulassungsrichtlinien der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung verfügen [6].

Kunststoffdichtungsbahnen können eingesetzt werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als Konvektionssperre über einer mineralischen Abdichtungskomponente in den Deponieklassen II und III.

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Dicke	d ≥ 2,5 mm

Kunststoffdichtungsbahnen dürfen nur mit einer Zulassung durch die *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)* eingesetzt werden. Eine Liste der Zulassungen ist unter der folgenden Internet-Adresse abrufbar:

	www.bam.de Service Amtliche Mitteilungen Abfallrecht
---	---

2.3.2.2 Deponieasphalt

Asphaltbeton (Deponieasphalt) besteht aus Mineralstoffen bestimmter Art und Körnung sowie Bitumen bestimmter Sorten als Bindemittel. Hinsichtlich der Zusammensetzung und der Eigenschaften des Deponieasphalts wird unterschieden zwischen Deponieasphalt zur Verwendung für Tragschichten (DAT) und Deponieasphalt zur Verwendung für die Dichtungsschicht (DAD). Die Zusammensetzung und Eigenschaften des Mischgutes sind in der einstmals erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festgelegt.

Asphaltbetonabdichtungen können eingesetzt werden:


- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als Konvektionssperre über einer mineralischen Abdichtungskomponente in den Deponieklassen II und III.

Für Asphaltabdichtungen liegt eine nicht mehr gültige, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des *Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)* vor. Der Anwendungsbereich der *DIBt*-Zulassung erstreckte sich auf ein Dichtungselement aus Deponieasphalt in einem Basisabdichtungssystem der Deponieklasse II. Die Bestimmungen sahen für eine Basisabdichtung der Deponieklasse II Folgendes vor:

Die Deponieasphalt-Tragschicht ist einlagig direkt auf der mineralischen Dichtungsschicht einzubauen; die Deponieasphalt-Dichtungsschicht ist zweilagig direkt auf der Deponieasphalt-Tragschicht einzubauen. Das Dichtungselement aus Deponieasphalt ersetzt dann die Kunststoffdichtungsbahn in Kombinationsabdichtungen. Bei Deponien der Klasse I ist die Dichtung aus Deponieasphalt die einzige Abdichtungskomponente.

Anforderungen gemäß ehem. bauaufsichtlicher Zulassung des DIBt

Deponieklassen II	
Tragschicht	
Lagen	1
Mächtigkeit	8 cm
Dichtungsschicht	
Lagen	2
Mächtigkeit	12 cm

	Für Dichtungselemente aus Deponieasphalt liegt keine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung vor. Weitere Informationen können der nicht mehr gültigen, allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des <i>DIBt</i> entnommen und in einem Einzelfallnachweis verwendet werden.
---	--

2.3.2.3 Mineralische Abdichtung

Mineralische Abdichtungskomponenten aus natürlichen, mineralischen Materialien (z. B. Ton, Schluff, Lehm), deren Wirkung auf der Begrenzung des Porenvolumens und der hydraulischen Leitfähigkeit beruht, können eingesetzt werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in den Deponieklassen II und III.

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	2
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$



Für mineralische Abdichtungen werden bundeseinheitliche Qualitätsstandards von der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnik erarbeitet.

Die Anforderungen der Deponieverordnung werden durch das *LANUV-Arbeitsblatt 6 Mineralische Deponieabdichtungen* [34] konkretisiert. Hinweise für die Beurteilung der Langzeitbeständigkeit natürlicher mineralischer Dichtungen gibt der LANUV-Fachbericht „Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen“.

2.3.2.4 Wasserglasvergütete Mineralgemische

Die abdichtende Wirkung von wasserglasvergüteten Mineralgemischen besteht darin, dass die Wasserglaslösung im Boden kondensiert und die Poren durch Bildung eines Gels ausfüllt. Der für die Konvektion beanspruchte Porenraum steht damit nur noch in geringem Maße zur Verfügung und reduziert so die Durchlässigkeit des Mineralgemisches. Die Wirkung hängt vom verfügbaren Porenvolumen und von der Konzentration der Wasserglaslösung ab. Es können Durchlässigkeiten von $k = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ erreicht werden. Durch die zum Teil langsam ablaufenden Kondensationsprozesse werden die endgültigen k-Werte erst nach einiger Zeit erreicht.

System Kügler

Das *System Kügler* geht vom Grundsatz her von der Vergütung eines natürlich anstehenden Materials (z.B. Lößlehm) mit Wasserglas aus. Die Herstellung des Abdichtungsmaterials erfolgt auf der Basis eines kornabgestuften Mineralgemisches. Der abdichtende Effekt beruht auf einer Verklebung und Verstopfung der Bodenporen durch die aus dem Wasserglas gebildeten Kieselsäuresole und -gele. Das pulverförmige Wasserglas löst sich durch das Bodenwasser langsam auf und verteilt sich im Porenraum.

System Dynagrout

Von der Firma *HÜLS AG Troisdorf* wurde ein System zur Wasserglasvergütung entwickelt, bei dem ausgewählte Zuschlagstoffe wie Kiese, Sande sowie nicht-quellbare Tonminerale verwendet werden. Der noch verbleibende mineralisierte Porenraum in der verdichteten Masse wird mit einem speziell angepassten Hydrosilikatgel als Binder verfüllt.

DWR-A ist eine wässrige Phosphatlösung, die zusammen mit *DWR-B* (Alkylalkoxysilan) und Wasserglas (Natrium-Silikatlösung) zur Bildung eines schrumpfungsarmen Hydrosilikatgels führt. Durch die Oberflächenreaktivität von *DWR-B* werden die Mineraloberflächen der Zuschlagstoffe chemisch modifiziert. Die Veränderung der Grenzflächen- und Kapillareigenschaften des Dichtungsmaterials verhindert bzw. erschwert ein Eindringen und Durchströmen von Schadstoffen.

Wasserglasvergütete Mineralgemische können eingesetzt werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in den Deponieklassen II und III.

Anforderung gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	2
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Der Einbau wasserglasvergüteter Mineralgemische führt zu einem erhöhten Bauaufwand und erfordert den Einsatz erfahrener Fachfirmen.



Für wasserglasvergütete Mineralgemische liegen keine bundeseinheitlichen Qualitätsstandards vor.

2.3.2.5 Bentokies

Durch die Zugabe von Tonmehlen können gemischtkörnige Mineralgemische, die für sich nicht die Anforderungen an die Dichtigkeit einhalten, vergütet werden. Hierfür können gemischtkörnige Materialien in Betracht kommen, deren Kornabstufung in etwa der Fuller-Kurve entspricht, z.B. anstehende sandige Kiese, wenn zur Porenfüllung quellfähige Tonmehle zugemischt werden.

Mit Tonmehlen vergütete gemischtkörnige Mineralgemische können eingesetzt werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in den Deponieklassen II und III.

Anforderung gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	2
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Für die Erstellung einer Bentokiesabdichtung ist ein erhöhter Bauaufwand erforderlich.



Für Abdichtungskomponenten aus Bentokies liegt keine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung vor.

2.3.2.6 CHEMOTON

CHEMOTON ist ein Dynagrout-Hydrosilikatgel-vergütetes Mineralgemisch, für das das DIBt eine *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung* erteilt, die inzwischen abgelaufen und nicht mehr gültig ist. In der abgelaufenen Zulassung kommt als Mineralgemisch ein Kies-Ton-Gemisch (GT*) bzw. Sand-Ton-Gemisch (ST*) zur Anwendung, für welches drei alternative Kornverteilungen nach dem Fullerprinzip festgelegt sind.

Die Mineralstoffe können aus

- Natursand
- Edelbrechsand
- Kies
- Edelsplitt

bestehen. Als Tonmehl ist ein kaolinitisches Tonmehl eines bestimmten Herstellers zu verwenden (siehe allgemeine bauaufsichtliche Zulassung).

Das gelbildende Vergütungsmittel setzt sich in definierten Anteilen zusammen aus

- Wasserglas (40%-ige wässrige Natriumsilikatlösung)
- Dynagrout DWR-A
- Dynagrout DWR-B.

CHEMOTON kann eingesetzt werden

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in der Deponieklasse II und III.

Anforderung gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	2
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Die Eignung ist mit einem Einzelnachweis zu belegen. Gutachten und Nachweise, die bereits im Rahmen der u.g. bauaufsichtlichen Zulassung vorgelegt wurden, können in den Eignungsnachweis einbezogen werden, wenn sie den Anforderungen der Allgemeinen Eignungsgrundsätze entsprechen. Bei Veränderungen des Produkts ist die Übertragbarkeit der gutachterlichen Aussagen zu belegen.

i *Für Abdichtungskomponenten aus CHEMOTON liegt keine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung vor. Weitere Informationen können der abgelaufenen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt entnommen werden.*

2.3.2.7 DYWIDAG-Mineralgemisch

Das *DYWIDAG-Mineralgemisch 16/32* ist ein gemischtkörniger Boden, toniger Kies und besteht aus Mineralstoffen bestimmter Art und Körnung sowie Bentonit als Feinanteil. Das DIBt erteilte eine *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung*, die inzwischen abgelaufen ist.

Das *DYWIDAG-Mineralgemisch 16/32* kann eingesetzt werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in der Deponieklasse II und III.

Anforderung gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	2
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Die Eignung ist mit einem Einzelnachweis zu belegen. Gutachten und Nachweise, die bereits im Rahmen der o. g. bauaufsichtlichen Zulassung vorgelegt wurden, können in den Eignungsnachweis einbezogen werden, wenn sie den Anforderungen der Allgemeinen Eignungsgrundsätze entsprechen. Bei Veränderungen des Produkts ist die Übertragbarkeit der gutachterlichen Aussagen zu belegen.

i *Für Abdichtungskomponenten aus dem DYWIDAG-Mineralgemisch 16/32 liegt keine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung vor. Weitere Informationen können der nicht mehr gültigen, allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt entnommen werden.*

2.3.3 Entwässerungsschicht

Die wesentliche Funktion der Entwässerungsschicht besteht in der Fassung und Ableitung von Deponiesickerwasser, um einen Einstau in den Deponiekörper zu verhindern. Die Anforderungen an die mineralische Entwässerungsschicht ergeben sich aus Anhang 1, Tabelle 1 DepV und der DIN 19667. Die DIN 19667 gilt ausdrücklich für Entwässerungssysteme im Basisabdichtungssystem. Sie bestimmt, dass die Basisentwässerung aus einer flächigen mineralischen Entwässerungsschicht mit integrierten Sickerleitungen (Sickerrohre) herzustellen ist [18].

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklasse 0	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,30 \text{ m}$
Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,50 \text{ m}$

Wenn nachgewiesen wird, dass es langfristig zu keinem Einstau von Wasser im Deponiekörper kommt, kann mit Zustimmung der zuständigen Behörde bei Deponien der Klassen I, II und III die Entwässerungsschicht mit einer geringeren Schichtstärke oder anderer Körnung hergestellt werden.

2.4 Oberflächenabdichtung

2.4.1 Allgemeines

Der Aufbau des Abdichtungssystems richtet sich nach der jeweiligen Deponieklasse (s. Deponieverordnung, Anhang 1, Tabelle 2).

Ausgleichsschicht

Eine Ausgleichsschicht ist ggf. erforderlich, um Unebenheiten der Oberfläche des abgelagerten Abfalls auszugleichen oder bestimmte Tragfähigkeiten herzustellen, um die weiteren Systemkomponenten ordnungsgemäß einbauen zu können. Sie schützt die restlichen Oberflächenabdichtungskomponenten gegen Durchdringungen aus dem Deponiekörper. Die Ausgleichsschicht ist ausreichend zu dimensionieren. Dies ist in der Regel bei einer Mächtigkeit von 0,50 m gegeben.

Nach Abklingen der Setzungen muss zur Sicherstellung der Oberflächenentwässerung ein ausreichendes Gefälle ($\geq 5\%$) vorhanden sein.

Bei ausreichender Gasdurchlässigkeit und Dicke kann sie die Funktion der Gasdränschicht mit erfüllen. Die durch Druck- oder Temperaturdifferenzen ausgelösten konvektiven Gas- oder Wasserdampfströmungen in der Gasdränschicht können zur Austrocknung einer aufliegenden mineralischen Dichtungsschicht führen. In diesen Fällen soll die mineralische Dichtung nicht unmittelbar auf der Gasdränschicht aufliegen, sondern eine zusätzliche Ausgleichsschicht mit geringem Porenvolumen und –durchmesser angeordnet werden.

Abdichtungskomponente

Die Deponieverordnung gibt nur die Zahl und die erforderliche Leistungsfähigkeit der Abdichtungskomponenten vor. Im Fall von zwei erforderlichen Abdichtungskomponenten sollen diese möglichst aus verschiedenen Materialien bestehen und auf die verschiedenen Einwirkungen unterschiedlich reagieren, um so einen höheren Schutz zu bieten.

Bei der Kombination verschiedener dünnlagiger Dichtungskomponenten (z. B. Kunststoffdichtungsbahn und geosynthetische Tondichtungsbahn) sind besondere organisatorische Vorkehrungen gegen mechanische Perforation während der Bauphase zu treffen.

Wird auf eine Konvektionssperre ganz verzichtet, ist ein Kontrollfeld zu errichten (siehe hierzu 2.4.6.4).

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über mögliche Abdichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungssystemen. Die Aufzählung ist nicht abschließend, deckt aber die gängigen Bauarten ab.

Tabelle 5 Übersicht über mögliche Abdichtungskomponenten (Oberfläche)

- Einsatz möglich
- ⊙ in Kombination mit einer weiteren Dichtungskomponente
- mit Einschränkungen
- * Es liegen nicht mehr gültige Zulassungen oder Empfehlungen vor.

Dichtungskomponente	I	II	III	Feststellung der Eignung
Kunststoffdichtungsbahn	●	⊙	⊙	Zulassung BAM
Dichtungselement aus Deponieasphalt	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
geosynthetische Tondichtungsbahn	●	⊙	-	Eignungsbeurteilung LAGA
Mineralische Abdichtung	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
Trisoplast	●	⊙	⊙	Eignungsbeurteilung LAGA
METHA-Material	●	⊙	-	Eignungsbeurteilung LAGA
Kapillarsperre	●	⊙	○	Einzelfallnachweis
Kombikapillarsperre	●	●	- ○	Eignungsbeurteilung LAGA Einzelfallnachweis
BND-System	●	●	-	Eignungsbeurteilung NRW
Wasserglasvergütete Mineralgemische	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
Bentokies	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
CHEMOTON	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
DYWIDAG-Mineralgemisch	●	⊙	⊙	Einzelfallnachweis *
Wasserhaushaltsschicht	○	-	-	in NRW i. d. R. nicht möglich

2.4.2 Geokunststoffe

2.4.2.1 Kunststoffdichtungsbahn

Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungskomponenten für Deponien werden aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) in einer Dicke von 2,5 mm hergestellt. Sie sind gas und wasserdicht. Die Kunststoffdichtungsbahn ist eine Konvektionssperre im Sinne der Deponieverordnung.

Kunststoffdichtungsbahnen weisen ein sehr günstiges Verformungsverhalten auf, das es ermöglicht, begrenzten Setzungen auch nach langer Zeit noch schadlos zu folgen. Die Kunststoffdichtungsbahn ist im unversehrten Zustand wurzel- und nagetiersicher.

PEHD ist gegenüber chemischen Einwirkungen äußerst widerstandsfähig. Allein oxidativer Abbau kann über lange Zeiträume hinweg zu nachteiligen Materialveränderungen führen. Bei ausreichendem Schutz gegen UV-Licht kann der oxidative Abbau auf ein sehr geringes Maß reduziert werden. Die Beständigkeit von BAM-zugelassenen und fachgerecht eingebauten Kunststoffdichtungsbahnen ist für Zeiträume von deutlich mehr als 100 Jahren nachgewiesen worden [2].

Kunststoffdichtungsbahnen dürfen nur von erfahrenen Verlegebetrieben mit qualifiziertem Personal verlegt werden. Es dürfen dabei nur solche Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt werden, die über eine Zulassung gemäß der Zulassungsrichtlinien der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung verfügen [6]. Eine Liste mit Zulassungen ist unter der folgenden Internet-Adresse abrufbar:



www.bam.de

☞ Service ☞ Amtliche Mitteilungen ☞ Abfallrecht

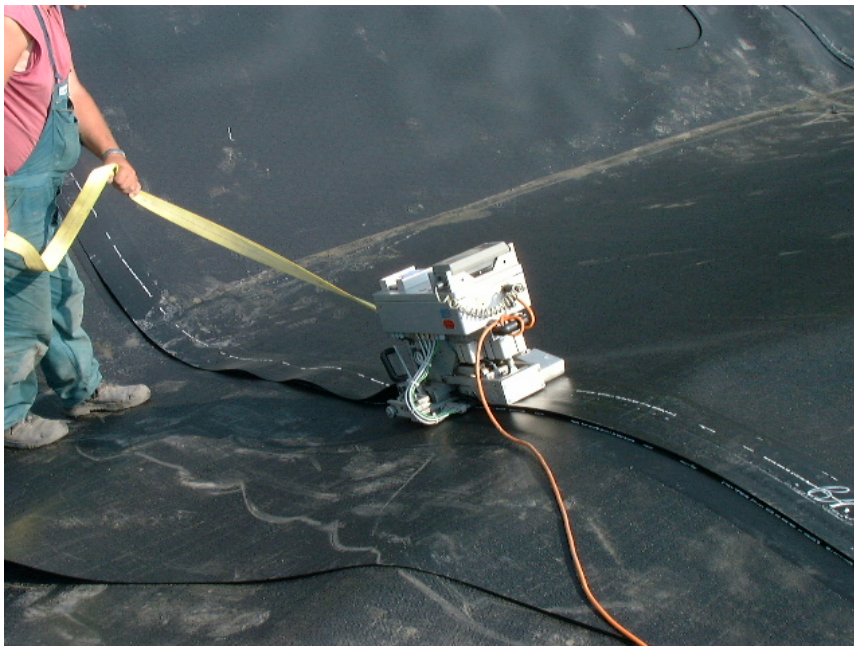


Abbildung 3 Verschweißen zweier Kunststoffdichtungsbahnen

2.4.2.2 Geogitter

Geogitter werden im Deponiebau zur Stabilisierung von steilen Böschungen eingesetzt. Ihre Wirkung besteht darin, dass sie die Zugspannungen aufnehmen, die sich aus dem Eigengewicht der Rekultivierungsschicht und der Entwässerungsschicht ergeben und damit den Aufbau einer unverträglichen Schubspannung auf die unterliegenden Komponenten verhindern. Die Zugkräfte werden in einen Einbindegraben auf dem Plateaubereich abgetragen.

Geogitter werden aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) Polypropylen (PP), Polyester (z.B. PET) oder Polyvinylalkohol (PVA) hergestellt. Als Bautypen werden gestreckte, gewebte und gelegte Geogitter unterschieden. Bei gestreckten (gereckten) Geogittern werden die Moleküle im Produktionsprozess durch Streckung in Belastungsrichtung ausgerichtet, so dass sich bei der späteren Belastung im Einbauzustand keine Anfangsdehnung einstellt; gleiches gilt für gelegte Geogitter aus vorgestreckten Bändern oder Stäben.



Abbildung 4 gelegtes Geogitter in einer steilen Böschung

Foto: Bezirksregierung Düsseldorf

Es dürfen nur solche Geogitter eingesetzt werden, die eine Zulassung der *Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung* (BAM) haben.

Geogitter haben zwar eine lange aber letztlich endliche Beständigkeit und Funktionsdauer. Nach Erreichen der Langzeitbeständigkeit droht Materialversagen und damit i. d. R. der Verlust der Standsicherheit der Böschungsf lächen. Dies ist bei der Entscheidung über die Entlassung aus der Nachsorge zu berücksichtigen.



www.bam.de

☞ Service ☞ Amtliche Mitteilungen ☞ Abfallrecht

2.4.2.3 Dränelemente

Ein Kunststoff-Dränelement ist ein überwiegend aus Kunststoff vorgefertigtes, flächenartiges Entwässerungselement. Solche Elemente können als Matten oder als Rollenware verlegt werden. Sie werden in Form von Gittern, grobstrukturierten Partikeln oder Wirrgelegen angeboten, die zwischen zwei Filtertextilen oder Filtervliesen eingebunden sind (Geokomposits). Das Grundmaterial besteht in der Regel aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP).

Synthetische Dränelemente können als Entwässerungsschichten auf Deponien eingesetzt werden, wenn die folgenden Eigenschaften gegeben sind:

- ausreichendes Wasserableitvermögen
- ausreichende Filterstabilität gegenüber den angrenzenden Schichten
- ausreichende Sicherheit gegen Funktionsversagen infolge Durchwurzelung
- Langzeitbeständigkeit
- Standsicherheit

Der Nachweis dieser Eigenschaften ist im Zuge der Bemessung des Dränelementes zu führen.

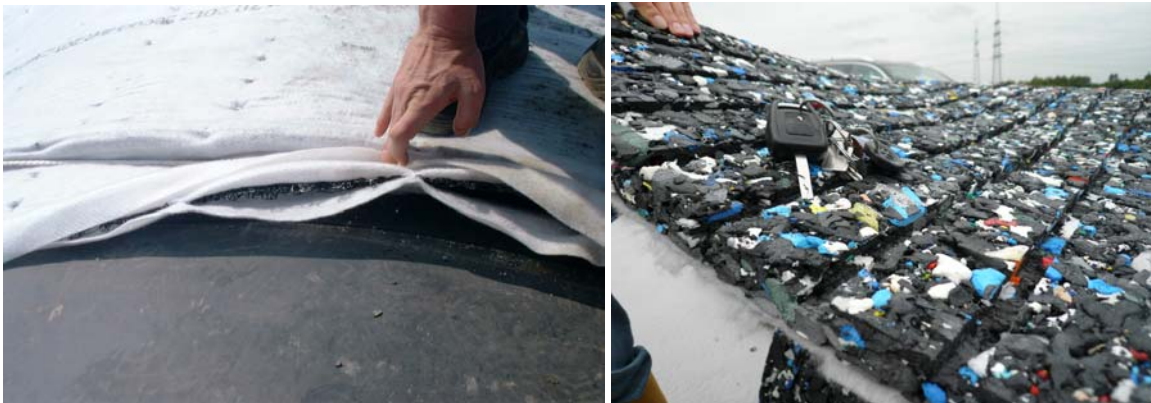


Abbildung 5 Dränmatten in unterschiedlicher Bauweise
links: Wirrgelege, rechts: Schaumstoffelemente

Es dürfen nur Dränmatten mit einer Zulassung der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) eingesetzt werden.



www.bam.de

☞ Service ☞ Amtliche Mitteilungen ☞ Abfallrecht

Die Bemessung soll nach der *Empfehlung E 2-20 des Arbeitskreises 6.1 Geotechnik der Deponiebauwerke* erfolgen. Die Abminderungsfaktoren sind entsprechend der Empfehlung E 2-20 zu verwenden.

Tabelle 6 Sicherheitsbeiwerte für die Bemessung von Dränmatten
nach GDA-Empfehlung E 2-20 (Entwurf)

Beiwert	Einfluss	Wert
AM ₁	Streuung der Messdaten	1,3
AM ₂	Überlappungen, Anschlüsse	1,2
A ₁	biologische und chemische Ausfällungen, Eindringen von Bodenbestandteilen und Wurzeln (siehe Tabelle 7)	1,1-2,0
A ₂	Materialbeanspruchungen beim Einbau	1,2
Y _s	Ungenauigkeiten bei den hydraulischen Lastannahmen (s. u.)	≥ 1,1

Demnach ergibt sich der Eingangswert des Langzeit-Wasserleitvermögens zu:

$$q_{LZ,d} = \frac{q_{LZ}}{AM_1 \cdot AM_2 \cdot A_1 \cdot A_2}$$

Der Abminderungsfaktor A₁ für Querschnittseinengung durch Durchwurzelung und Ausfällungen ist abhängig von der Gestaltung der Rekultivierungsschicht. Für die Bemessung werden folgende Orientierungswerte empfohlen:

Tabelle 7 empfohlener Abminderungsfaktor A₁ zur Bemessung von Dränelementen

Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht	weitere Voraussetzungen	A ₁
1,0 m	Pflanzenauswahl nach Wurzeltiefe	2,0
1,5 m	Pflanzenauswahl nach Wurzeltiefe sonst	1,5 1,75
2,0 m	Vermeidung tiefwurzelnder Bäume	1,2
2,5 m	Vermeidung tiefwurzelnder Bäume	1,1

Der Rekultivierungsboden sollte grundsätzlich so aufgebaut sein, dass der Austrag von Feinpartikeln weitgehend unterbunden ist. Ansonsten besteht die Gefahr, dass sich langfristig Kolmationserscheinungen am Deckvlies einstellen, die den Eintritt des Sickerwassers in das Dränelement erschweren oder (im Extremfall) verhindern und so zu Standsicherheitsproblemen in Böschungen führen.

Eine zusätzliche Dränkapazität kann durch den gezielten Aufbau der Rekultivierungsschicht erreicht werden, wenn die untere Zone der Rekultivierungsschicht (siehe Abbildung 6) durch Auswahl eines durchlässigen Bodenmaterials ein zusätzliches laterales Wasserleitvermögen aufweist ($k \geq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s). Dies kann dann sinnvoll sein, wenn der Boden der Rekultivie-

rungsschicht eine hohe Feinkornmobilität aufweist und der Eintritt des Sickerwassers durch das Deckvlies der Dränmatte erheblich beeinträchtigt werden kann (s. o.). Die Anforderungen an die nutzbare Feldkapazität für die gesamte Rekultivierungsschicht sind dabei einzuhalten.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_s für Unsicherheiten bei den hydraulischen Lastannahmen kann zu 1,1 gewählt werden, wenn die Eintrittswassermenge (Dränspende) auf Grund von spezifischen Untersuchungen des örtlichen Niederschlagsverhaltens ermittelt wurde. Er ist entsprechend höher anzusetzen, wenn die Eintrittswassermenge aus der Übertragung von anderen Standorten (je nach Vergleichbarkeit und räumlicher Nähe) oder aus allgemeinen Ansätzen übernommen wurde. Er ist ggf. auch höher anzusetzen, wenn das Vorhandensein bevorzugter Fließwege durch Wühltiergänge zu erwarten ist.

Die *GDA-Empfehlung E 2-20* empfiehlt für die Vorbemessung der Dränmatten einen Wert von $q_s = 10$ mm/d (für bindige Böden) und als maximale Dränspende $q_s \leq 25$ mm/d (für sandige Böden). Diese Werte können auch in Nordrhein-Westfalen in großen Bereichen angesetzt werden. Allerdings gibt es Gebiete ausgeprägter Starkniederschläge in der Eifel, im Bergischen Land und im Sauerland, in denen von höheren Vorbemessungsansätzen ausgegangen werden sollte. In Abbildung 26 sind die 72 h-Niederschlagssummen für Nordrhein-Westfalen für eine 100-jährliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit dargestellt. Ab einer Niederschlagssumme von 120 mm sollten bei der Vorbemessung die Werte $q_s = 15$ mm/d und als maximale Dränspende $q_s \leq 40$ mm/d angesetzt werden. Die Bemessungseintrittswassermengen sollten dann auch auf der Grundlage örtlicher hydrologischer Auswertungen ermittelt werden.

Beim Einsatz einer Dränmatte ist grundsätzlich zu beachten, dass der Auslaufbereich am Böschungsfuß so gestaltet wird, dass ein möglichst guter Übertritt des Dränwassers in die Entwässerungseinrichtungen gewährleistet ist. Dies kann über die Einbindung des Fußbereichs in eine ausreichend bemessene Kiespackung mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit, ggf. mit Öffnung der Decktextilien, erreicht werden.



Abbildung 6 Rekultivierungsschicht mit Zoneneinteilung
Gestuffer Aufbau der Rekultivierungsschicht auf Geogitter, Dränmatte und Kunststoffdichtungsbahn
Foto: HYDR.O. Geologen und Ingenieure

Grundlagen für den Entwurf, die Bemessung und den Bau von geotextilen Entwässerungsschichten hat die *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)* in den Empfehlungen E 2-9 [12] und E 2-20 [13] veröffentlicht.



www.gdaonline.de  *Empfehlungen*

2.4.2.4 Schutzschichten

Neben mineralischen Schutzschichten werden Geotextilien oder Kombinationen aus Geotextilien und mineralischen Materialien verwendet. Geotextilien dürfen als Schutzschicht nur dann eingesetzt werden, wenn sie über eine Zulassung oder Eignungsbeurteilung der *Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung* verfügen. Eine Liste mit Zulassungen ist unter der folgenden Internet-Adresse abrufbar:



www.bam.de
 *Service*  *Amtliche Mitteilungen*  *Abfallrecht*

2.4.3 Serienmäßige / Standardisierte Produkte

Die von der LAGA ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen erstellten Eignungsbeurteilungen sind unter der folgenden Internet-Adresse abrufbar:

	<p>www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de</p> <ul style="list-style-type: none">☞ Umweltschutz☞ Kreislauf- und Abfallwirtschaft☞ Deponietechnik☞ LAGA ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen (bis 2009) bzw. LAGA ad-hoc-AG Deponietechnik (ab 2010)
---	---

2.4.3.1 Geosynthetische Tondichtungsbahnen

Geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) sind serienmäßig hergestellte Geotextilien, die mit einer Einlage von Bentonitmehl oder –granulat befüllt sind. Die dichtende Wirkung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen beruht auf der Quellfähigkeit des Bentonits, die bei Zutritt von Feuchtigkeit und hinreichend großer Auflast zu einer inneren Verdichtung des Bentonits und Schließung fließwirksamer Poren führt. Die damit erzielte, geringe hydraulische Leitfähigkeit erlaubt es, geosynthetische Tondichtungsbahnen in sehr geringen Baudicken einzusetzen.

In Böschungen kommt der geosynthetischen Tondichtungsbahn neben der Dichtungswirkung auch die Funktion der Übertragung der Schubkräfte aus der überlagernden Entwässerungsschicht und Rekultivierungsschicht zu. Bentonit hat selbst einen sehr geringen Reibungswinkel, so dass es eine Schubkraftübertragung in Böschungsfächen nicht sicherstellen kann. Diese Aufgabe übernehmen die synthetischen Fasern und Filamente der geosynthetischen Tondichtungsbahn. Deren Beständigkeit bestimmt in Böschungsfächen die Funktionsdauer einer geosynthetischen Tondichtungsbahn. Laborversuche im Rahmen der Eignungsbeurteilungen der haben gezeigt, dass die Beständigkeit für deutlich mehr als hundert Jahre nachgewiesen werden kann.

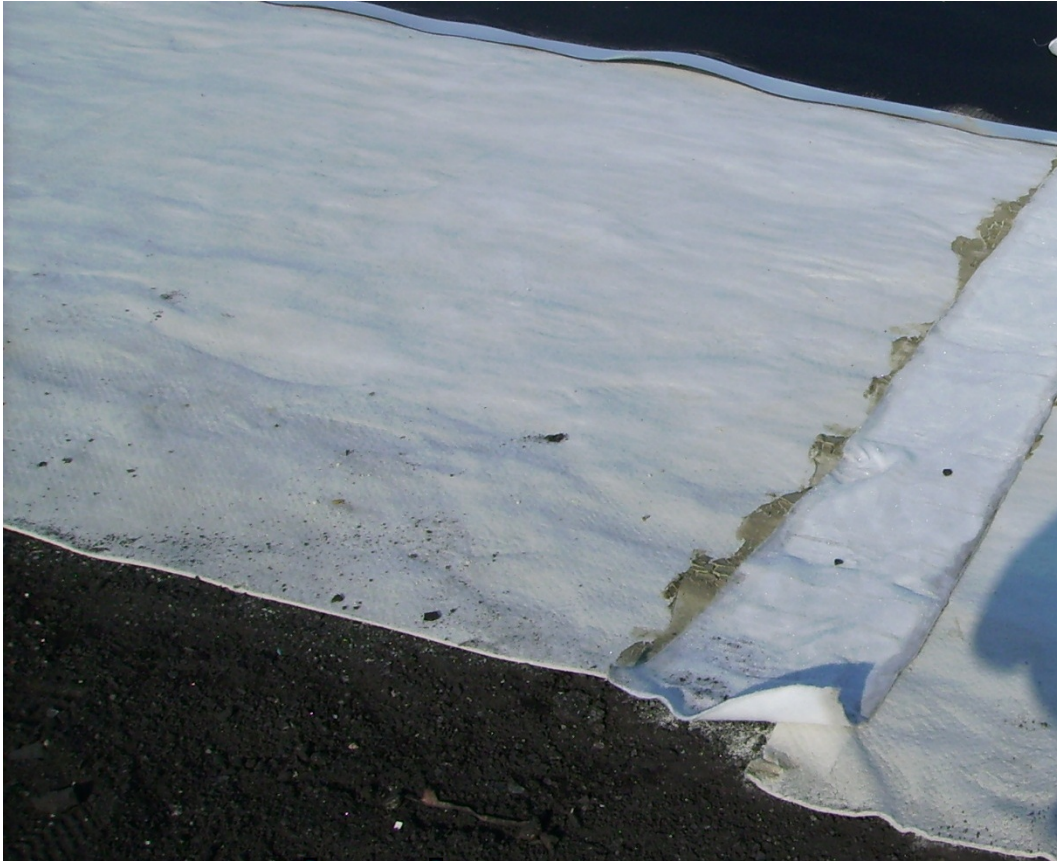


Abbildung 7 geosynthetische Tondichtungsbahn
 Überlappungszone (Querstoß) mit aufgetragener Bentonitpaste
 Foto: Naue GmbH & Co. KG

Anforderungen

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	-
Anzahl der erforderlichen Lagen	1



Für mehrere Produkte liegen Eignungsbeurteilungen der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen bzw. Deponietechnik vor.

2.4.3.2 Mineralische Dichtungsbahn

Eine mineralische Dichtungsbahn besteht aus einer Hülle aus synthetischem Gewebe und einer Füllung aus einem Sand-Bentonit-Gemisch, das die Dichtungsfunktion übernimmt. Die mineralische Dichtungsbahn wirkt funktional ähnlich der geosynthetischen Tondichtungsbahn. Die mineralische Dichtungsbahn wird als Bahnenware vertrieben, deren Überlappungskanten abgeschrägt werden. Die Dichtungseigenschaften des Sand-Bentonit-Gemisches ähneln funktional dem Baustoff *TRISOPLAST*.

Auf Grund des hohen Sandanteils und des höheren inneren Reibungswinkels sind gegenüber der geosynthetischen Tondichtungsbahn Vorteile in der Standsicherheit in Böschungsflächen zu erwarten.



Eine Eignungsbeurteilung wird derzeit bei der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnik erarbeitet.

2.4.3.3 Kombikapillarsperre

Die Kombikapillarsperre ist eine Bauvariante der klassischen Kapillarsperre, die in eine Kombinationsdichtung mit einer Kunststoffdichtungsbahn integriert ist. Die Kunststoffdichtungsbahn wird zwischen der Kapillarschicht und dem Kapillarblock angeordnet. Die Kapillarschicht ist dabei gleichzeitig die Entwässerungsschicht der Oberflächenabdichtung. Während der Funktionsfähigkeit der Kunststoffdichtungsbahn übernimmt der Kapillarblock keine Funktion. Nach Eintreten von Schäden oder alterungsbedingten Funktionseinbußen in der Kunststoffdichtungsbahn wirkt der Kapillarblock im Zusammenspiel mit der Kapillarschicht als klassische Kapillarsperre.



Für die Kombikapillarsperre liegt eine Beurteilung der grundsätzlichen Eignung der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen vor. Der abschließende Eignungsnachweis erfolgt nach der Bemessung des Systems im Einzelfall.

2.4.3.4 Kapillarblockbahn

Die sogenannte Kapillarblockbahn ist ein geosynthetisches Bauelement, das die Funktion des Kapillarblocks einer Kapillarsperre übernimmt. Die Kapillarblockbahn wird als Bahnware vertrieben. Die Füllung aus Feinkies oder Grobsand wird durch die beidseitige Umhüllung mit einem synthetischen Gewebe eingeschlossen. Die Körnung der Füllung muss auf die Körnung der Kapillarschicht abgestimmt werden.



Eine Eignungsbeurteilung wird derzeit bei der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnik erarbeitet.

2.4.3.5 METHA-Material

Der **METHA**-Schlick fällt bei der Aufbereitung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen an. Es wird mittels **ME**chanischer **T**rennung und **E**ntwässerung von **HA**fensedimenten (**METHA**) in Sand und Schlick getrennt und die Schlickfraktion entwässert. Die Schlickfraktion kann als Baustoff für mineralische Deponieabdichtungen verwendet werden. Auf Grund seines hohen Anteils an Feinkorn weist das Material nach dem Einbau eine geringe hydraulische Leitfähigkeit auf.

Um die volle Dichtungswirkung des Systems zu erreichen, ist eine Auflastspannung von 35 kN/m² erforderlich; das entspricht in etwa einer Überdeckung von 2,0 m.

Anforderungen

Deponieklassen I, (II)	
Mindestmächtigkeit	0,80
Anzahl der erforderlichen Lagen	2

Obwohl das Material größtenteils natürlichen Ursprungs ist, ist es auf Grund seiner Entstehung und Gewinnung als Abfall einzustufen (Baggergut). Es weist einen relativ hohen Anteil organischer Substanz auf und ist mit anthropogenen Schadstoffen belastet. Daher ist in jedem Einzelfall die Zulässigkeit des Einbaus hinsichtlich der Anforderungen des Anhangs 3 DepV an die Schadstoffbelastung zu prüfen.



Für das METHA-Material liegt eine Eignungsbeurteilung der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen vor, die die technische Eignung für die Deponiekategorie I feststellt. Die Eignung für die Deponiekategorie II ist noch nicht vollständig nachgewiesen.

2.4.3.6 TRISOPLAST®

TRISOPLAST ist ein mineralisches Abdichtungsmaterial für Oberflächenabdichtungssysteme. Es besteht aus den Komponenten Sand (oder einem anderen mineralischen Zuschlagstoff), natrium-aktivierten Bentonit und einem Polymer.

Die Dichtungswirkung dieses Gemischs entfaltet sich bei Zutritt von Feuchtigkeit durch das starke Aufquellen des Bentonits, das in Folge der bestehenden Auflast eine innere Verdichtung der Matrix bewirkt wird, die die fließwirksamen Poren verschließt. Dem Polymer kommt dabei die Funktion zu, das Bentonit am Korngerüst zu fixieren. Auf diese Weise wird eine sehr hohe Dichtigkeit erreicht, die es ermöglicht, TRISOPLAST in relativ geringer Mächtigkeit als Dichtungsschicht zu verwenden.

Anforderungen

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	0,08 m
Anzahl der erforderlichen Lagen	1

Die Einbauversuche an mehreren Baustellen haben gezeigt, dass der visuell rissfreie Einbau von TRISOPLAST mit Schwierigkeiten verbunden ist (z.B. Walzrisse). Es wird daher empfohlen, mit der Ausführung eine mit dem Einbau von TRISOPLAST erfahrene Baufirma zu beauftragen und die Herstellung im Versuchsfeld hinreichend zu erproben.



Abbildung 8 Verdichtung einer TRISOPLAST-Dichtungsschicht



Für TRISOPLAST liegt eine Eignungsbeurteilung der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnische Vollzugsfragen vor.

2.4.3.7 Dichtungselement aus Deponieasphalt

Asphaltbeton (Deponieasphalt) besteht aus Mineralstoffen bestimmter Art und Körnung sowie Bitumen bestimmter Sorten als Bindemittel. Hinsichtlich der Zusammensetzung und der Eigenschaften des Deponieasphalts wird unterschieden zwischen Deponieasphalt zur Verwendung für Tragschichten (DAT) und Deponieasphalt zur Verwendung für die Dichtungsschicht (DAD). Das Dichtungselement aus Deponieasphalt setzt sich aus beiden Bauelementen zusammen. Die dichtende Wirkung beruht auf der Versiegelung des Porenvolumens durch die Bitumenmatrix, die eine konvektive Strömung vollständig verhindert. Eine Abdichtung aus Deponieasphalt ist eine Konvektionssperre im Sinne der Deponieverordnung.



Abbildung 9 Einbau von Deponieasphalt mit einem Fertiger

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Mischgutes sind in der nicht mehr gültigen bauaufsichtlichen Zulassung des *DIBt* festgelegt.

Gemäß der Empfehlung der *LAGA-Arbeitsgruppe Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und –abdeckungen* können bei Oberflächenabdichtungen die Zahl oder Dicke der Lagen der Asphaltichtung oder einer darunter angeordneten mineralischen Dichtung gegenüber den Festlegungen der bauaufsichtlichen Zulassung reduziert werden. Hieraus wird bis zur Festlegung bundeseinheitlicher Qualitätsstandards folgende Empfehlung formuliert:

Empfehlungen

Deponieklasse	I	II	III
Tragschicht			
Mächtigkeit	8 cm	8 cm	8 cm
Dichtschicht			
Lagen	1	1	2
Mächtigkeit	6 cm	6 cm	12 cm



*Für Dichtungselemente aus Deponieasphalt liegt keine bundeseinheitliche Eignungsbeurteilung vor. Es liegt eine Empfehlung der LAGA-Arbeitsgruppe ‚Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und –abdeckungen‘ aus dem Jahr 2000 vor. Weitere Informationen können der nicht mehr gültigen, allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des *DIBt* entnommen und für den Einzelfallnachweis verwendet werden.*

2.4.3.8 Boden-Natur-Dichtung (BND)

Die Wirkung des BND-Systems setzt sich zusammen aus der Speicherfunktion der Rekultivierungsschicht und der Dichtungsfunktion der mineralischen Dichtungsschicht.

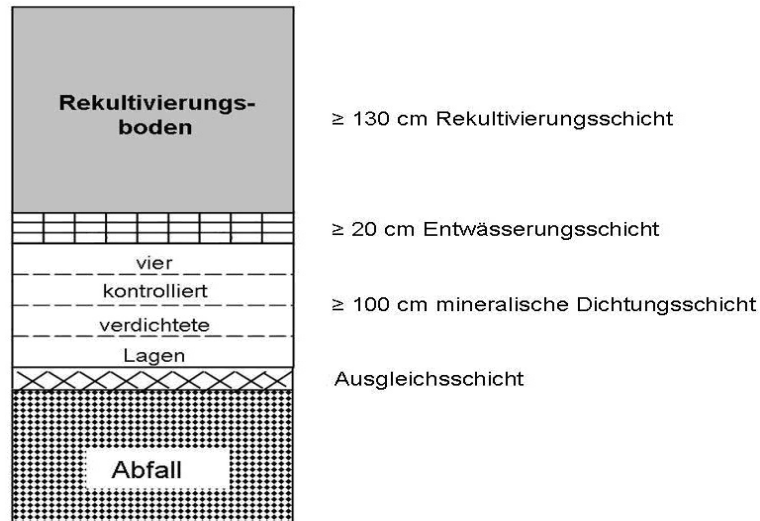


Abbildung 10 Aufbau Boden-Natur-Dichtung aus [58]

Die Rekultivierungsschicht wirkt durch ihre Speicherkapazität gleichzeitig als dauerhafter Schutz gegen schädliche Wassergehaltsänderungen in der mineralischen Dichtungsschicht. Dieser Schutz gegenüber Austrocknung wird durch die Ausgestaltung der Entwässerungsschicht unterstützt. Diese verhindert einen kapillaren Aufstieg von Porenwasser aus der mineralischen Dichtung. Durch den im Vergleich zu konventionellen Entwässerungsschichten geringen Hohlraumgehalt und -durchmesser wird der Transport von Wasser in der Dampfphase durch konvektive Luftströmungen in der Entwässerungsschicht praktisch unterbunden.

Anforderungen an die mineralische Abdichtungsschicht

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	1,00 m
Anzahl der erforderlichen Lagen	4
Durchlässigkeit jeder Lage	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
Durchlässigkeit im harmonischen Mittel aller Lagen	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

Die konkreten Anforderungen an das Gesamtsystem sind der Eignungsbeurteilung zu entnehmen.



Für das BND-System liegt eine auf Nordrhein-Westfalen begrenzte Eignungsbeurteilung des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW vor.
www.lanuv.nrw.de/abfall/deponierung/BND.htm

2.4.3.9 Wasserglasvergütete Mineralgemische

Wasserglas ist ein Sammelbegriff für technisch hergestellte Alkalisilikate, die in einem Schmelzprozess aus Quarzsand und Soda gewonnen werden. Je nach Wassergehalt kann Wasserglas als Glas, als Pulver oder als Lösung vorliegen. Wasserglasvergütete mineralische Abdichtungen bestehen aus feinkörnigen oder gemischtkörnigen, natürlichen Materialien, denen in einem gesteuerten Prozess Silikat beigemischt wird, um die erforderlichen Eigenschaften zu erreichen. Die abdichtende Wirkung von wasserglasvergüteten Systemen besteht darin, dass die Wasserglaslösung im Boden kondensiert und die Poren durch Bildung eines Gels ausfüllt. Der für die Konvektion beanspruchte Porenraum steht damit nur noch in geringem Maße zur Verfügung und reduziert so die Durchlässigkeit des Mineralgemisches. Die Wirkung hängt vom verfügbaren Porenvolumen und von der Konzentration der Wasserglaslösung ab. Es können Durchlässigkeiten von $k = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s erreicht werden. Durch die z.T. langsam ablaufenden Kondensationsprozesse werden die endgültigen k -Werte erst nach einiger Zeit erreicht.

Anforderungen

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	0,50 m
Anzahl der erforderlichen Lagen	2

Der Einbau wasserglasvergüteter Dichtungsmaterialien führt zu einem erhöhten Bauaufwand und erfordert den Einsatz erfahrener Fachfirmen.

Wasserglasvergütete, weitgestufte Mineralgemische weisen einen hohen Widerstand gegen Durchwurzelung auf, da die zugänglichen Poren nach kurzer Zeit mit Wasserglas ausgefüllt und verschlossen sind.

Für alle Systeme einer wasserglasvergüteten Abdichtung sind entsprechende Eignungsnachweise zu erbringen, die u. a. die Frage der Rissanfälligkeit darlegen.



Für wasserglasvergütete Mineralgemische liegt keine Eignungsbeurteilung vor. Bundeseinheitliche Qualitätsstandards für vergütete mineralische Dichtungen sind zur Zeit in der Bearbeitung durch die LAGA ad-hoc-AG Deponietechnik.

System Kügler

Das *System Kügler* besteht im Grundsatz in der Vergütung eines natürlich anstehenden Materials (z.B. Lößlehm) mit Wasserglas. Die Herstellung des Abdichtungsmaterials erfolgt auf der Basis eines kornabgestuften Mineralgemisches. Der abdichtende Effekt beruht auf einer Verklebung und Verstopfung der Bodenporen durch die aus dem Wasserglas gebildeten Kieselsäuresole und -gele. Das pulverförmige Wasserglas löst sich durch das Bodenwasser langsam auf und füllt den Porenraum aus.

System Dynagrout

Von der Firma *HÜLS AG Troisdorf* wurde ein System zur Wasserglasvergütung entwickelt, bei dem ausgewählte Zuschlagstoffe wie Kiese, Sande sowie nicht-quellbare Tonminerale verwendet werden. Der noch verbleibende mineralisierte Porenraum in der verdichteten Masse wird mit einem speziell angepassten Hydrosilikatgel als Binder verfüllt.

DWR-A ist eine wässrige Phosphatlösung, die zusammen mit *DWR-B* (Alkylalkoxysilan) und Wasserglas (Natrium-Silikatlösung) zur Bildung eines schrumpfungsaarmen Hydrosilikatgels führt. Durch die Oberflächenreaktivität von *DWR-B* werden die Mineraloberflächen der Zuschlagstoffe chemisch modifiziert. Die Veränderung der Grenzflächen- und Kapillareigenschaften des Dichtungsmaterials verhindert bzw. erschwert ein Eindringen und Durchströmen von Schadstoffen.

2.4.3.10 Bentokies

Durch die Zugabe von Tonmehlen können gemischtkörnige Mineralgemische, die für sich nicht die Anforderungen an die Dichtigkeit einhalten, vergütet werden. Hierfür können gemischtkörnige Materialien in Betracht kommen, deren Kornabstufung in etwa der Fuller-Kurve entspricht, z.B. anstehende sandige Kiese, wenn zur Porenfüllung quellfähige Tonmehle zugemischt werden.

Wesentliche Vorteile dieses Systems sind:

- Es können steile Böschungen standsicher ausgeführt werden, weil das Dichtungsmaterial eine hohe Scherfestigkeit aufweist.
- Die mögliche Verwendung örtlicher Baumaterialien kann zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen führen.
- Die Dichtung ist relativ schrumpfungsunempfindlich und damit durch Austrocknungsprozesse weniger gefährdet.

Für die Erstellung einer *Bentokies*-Abdichtung ist ein erhöhter Bauaufwand erforderlich.

Anforderungen

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	0,50 m
Anzahl der erforderlichen Lagen	2

Die Eignung ist gegenüber der zuständigen Behörde mit einem Einzelfallnachweis zu belegen. Die Vorteile der Bauweise können unter günstigen Randbedingungen durch eine Abminderung der Schichtstärke berücksichtigt werden. Eine Mindeststärke von 0,30 m darf in keinem Fall unterschritten werden.



Für Bentokies liegt keine Eignungsbeurteilung vor.

2.4.3.11 CHEMOTON

CHEMOTON ist ein *Dynagrout*-Hydrosilikatgel-vergütetes Mineralgemisch zur Herstellung mineralischer Dichtungselemente in (Basis- oder) Oberflächenabdichtungen von Deponien. Als Mineralgemisch kommt ein Kies-Ton-Gemisch (GT*) bzw. Sand-Ton-Gemisch (ST*) zur Anwendung, für welches drei alternative Kornverteilungen nach dem Fullerprinzip in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festgelegt sind.

Die Mineralstoffe können aus Natursand, Edelbrechsand, Kies oder Edelsplitt bestehen. Als Tonmehl ist ein kaolinitisches Tonmehl eines bestimmten Herstellers zu verwenden (siehe allgemeine bauaufsichtliche Zulassung).

Das gelbildende Vergütungsmittel setzt sich in definierten Anteilen zusammen aus

- Wasserglas (40%-ige wässrige Natriumsilikatlösung)
- *Dynagrout DWR-A*
- *Dynagrout DWR-B*.

Anforderungen

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	0,30 m
Anzahl der erforderlichen Lagen	2

Die Eignung ist gegenüber der zuständigen Behörde mit einem Einzelfallnachweis zu belegen. Gutachten und Nachweise, die bereits im Rahmen der u. g. bauaufsichtlichen Zulassung vorgelegt wurden, können in den Eignungsnachweis einbezogen werden, wenn sie den Anforderungen der *Allgemeinen Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme* [39] entsprechen. Der Nachweis soll u.a. die Frage der Rissanfälligkeit behandeln.



Für CHEMOTON liegt keine Eignungsbeurteilung vor. Weitere Informationen können der nicht mehr gültigen, allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt entnommen werden.

2.4.3.12 DYWIDAG-Mineralgemisch

Das *DYWIDAG-Mineralgemisch 16/32* ist ein gemischtkörniger Boden, toniger Kies und besteht aus Mineralstoffen bestimmter Art und Körnung sowie Bentonit als Feinanteil. Es dient zur Herstellung der mineralischen Dichtungsschicht in Basis- oder Oberflächenabdichtungen von Deponien.

Anforderungen

Deponieklassen I, II	
Mindestmächtigkeit	0,20 m
Durchlässigkeit	$k \leq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$
Anzahl der erforderlichen Lagen	1

Die Durchlässigkeit des Gemisches darf bei einem hydraulischen Gradienten von $i=30$ einen Wert von $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ nicht überschreiten.



Für das DYWIDAG-Mineralgemisch DMG 16/32 liegt keine Eignungsbeurteilung vor. Weitere Informationen können der nicht mehr gültigen, allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt entnommen werden.

2.4.4 Sonstige Dichtungssysteme

2.4.4.1 Mineralische Abdichtung

Tonmineralische Abdichtungskomponenten werden aus natürlichen, mineralischen Materialien hergestellt, deren Wirkung auf der Begrenzung des Porenvolumens und der hydraulischen Leitfähigkeit beruht.

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen	I, II	III
Anzahl der erforderlichen Lagen	2	
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Die Anforderungen der Deponieverordnung werden durch das LANUV-Arbeitsblatt 6 „Mineralische Deponieabdichtungen“ [34] konkretisiert. Hinweise für die Beurteilung der Langzeitbeständigkeit natürlicher mineralischer Dichtungen gibt der Fachbericht „Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen“ des LANUV NRW.

2.4.4.2 Kapillarsperre

Eine Kapillarsperre besteht aus zwei Lagen nicht-bindigen Bodenmaterials unterschiedlicher Körnung, deren Porengrößen so auf einander abgestimmt sind, dass die überlagernde Kapillarschicht das Wasser lateral abführt, ohne dass es zu einem relevanten Wassereintrag in den unterlagernden Kapillarblock kommt. Dabei überlagert eine feinkörnige Kapillarschicht (KS) einen grobkörnigen Kapillarblock (KB). Eine funktionierende Kapillarsperre kann in Verbindung mit einer geeigneten Rekultivierungsschicht nahezu 100 % des Niederschlagswassers zurückhalten und abführen. Bei außergewöhnlich starken Niederschlägen kann - insbesondere bei einer gering dimensionierten Rekultivierungsschicht - eine zeitweise Überlastung auftreten, die zu einem kurzzeitigen Versagen führt, nach der das System jedoch seine volle Funktionsfähigkeit zurückerlangt.



Abbildung 11 Einbau einer Kapillarsperre

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen	I, II	III
Durchsickerungsmenge im 5-jährigen Mittel	20 mm/a	10 mm/a

Die Dimensionierung der Kapillarsperre, insbesondere der Kapillarschicht, muss durch eine Einzelbeurteilung auf der Grundlage einer hydraulischen Bemessung erfolgen. Wesentlicher Faktor der Dimensionierung ist die ausreichende Neigung, damit die anfallenden Wassermengen trotz geringerer ungesättigter Wasserleitfähigkeit lateral abgeführt werden können. Als Mindestgefälle wird ein Wert von 1:7 empfohlen; bis zu Neigungen von 1:2,5 lassen sich einfache Kapillarsperren problemlos ausführen. Die Mächtigkeit des Kapillarblocks muss nur so hoch sein, dass die (sehr geringe) Kapillarhöhe deutlich überschritten wird, um den Kapillarsprung sicherzustellen. Mit zunehmender Mächtigkeit des Kapillarblocks erhöht sich die Sicherheit gegenüber hydraulischen Brücken.



Für Kapillarsperren liegen in Kürze bundeseinheitliche Standards der LAGA-ad-hoc-AG Deponietechnik vor. Diese verweisen voraussichtlich auf die GDA-Empfehlung E2-33.

2.4.4.3 Abdichtungskomponente aus mineralischen Abfällen (Deponieersatzbaustoffe)

Abdichtungskomponenten aus mineralischen Abfällen als Deponieersatzbaustoffe können verwendet werden:

- als einzige Abdichtungskomponente in der Deponieklasse I, oder
- als mineralische Abdichtungskomponente unterhalb einer Konvektionssperre in der Deponieklasse II und III.

Die Anforderungen an die Zahl der Lagen und der Durchlässigkeit der Abdichtungsschichten entsprechen denen an natürliche tonmineralische Dichtungen (siehe 2.4.4.1).

Es sind ausschließlich mineralische Abfälle zugelassen, und dies nur in einer Menge, die für die Baumaßnahme erforderlich ist. Sie müssen neben den bautechnischen Anforderungen die Zuordnungskriterien nach Anhang 3 DepV einhalten.

Die Eignung eines Ersatzbaustoffes ist in jedem konkreten Einzelfall zu beurteilen, da die Herkunft, die Zusammensetzung und die Eigenschaften der zur Verwendung vorgesehenen Abfälle erheblich variieren können.

i *Für Abdichtungskomponenten aus mineralischen Abfällen liegen Grundsätze für die Eignungsbeurteilung unter Verwendung von Abfällen hergestellter mineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der LAGA-ad-hoc-AG ‚Deponietechnische Vollzugsfragen‘ vor.*

2.4.5 Entwässerungsschicht

Für die Entwässerungsschicht gelten die Anforderungen in Anhang 1 Nr. 2.3 Tabelle 2 der Deponieverordnung.

Anforderungen gemäß Deponieverordnung

Deponieklassen I, II, III	
Mindestmächtigkeit	$d \geq 0,30 \text{ m}$
Durchlässigkeit	$k \geq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Gefälle	$\geq 5 \%$

Abweichungen von den Anforderungen an die Entwässerungsschicht sind möglich, wenn die hydraulische Leistungsfähigkeit und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht dauerhaft gewährleistet sind.

Unmittelbare Überlagerung einer mineralischen Dichtungsschicht

Wenn die Entwässerungsschicht unmittelbar eine mineralische Abdichtungsschicht oder eine geosynthetische Tondichtungsbahn überlagert, ist sicherzustellen, dass es nicht durch kapil-

laren Aufstieg oder Zirkulation von Luftströmungen zu einer schädlichen Wassergehaltsänderung in der darunter liegenden Dichtungsschicht kommt.

Die Entwässerungsschicht muss in diesen Fällen zum einen als kapillarbrechende Schicht wirken, die verhindert, dass der Dichtungsschicht Porenwasser durch kapillaren Aufstieg entzogen wird und diese schädliche Wasserspannungen erfährt.

Zum anderen soll mit einer geeigneten Körnung verhindert werden, dass Wasser in der Dampfphase durch konvektiven Transport über die Luftströmung ausgetragen wird. Dies kann verhindert werden, in dem das Porenvolumen und insbesondere die Porengröße so weit reduziert werden, dass die konvektive Strömung von Luft deutlich behindert wird. Alternativ zu einer insgesamt geringen Porengröße der Entwässerungsschicht kann hier auch eine unmittelbar auf der Abdichtungsschicht liegende Schutzschicht geringer Körnung (z.B. Sand) zum Einsatz kommen.

Siehe hierzu auch Kapitel 3.1.2.

2.4.6 Dichtungskontrollsysteme

Dichtungskontrollsysteme sind zur flächigen Überwachung eines fertig hergestellten Oberflächenabdichtungssystems bei Deponien der Klasse III erforderlich.

Bei Deponien der Klasse II, bei denen der Deponiebetreiber Maßnahmen nach § 25 Absatz 4 DepV zur Beschleunigung biologischer Abbauprozesse und zur Verbesserung des Langzeitverhaltens nachweislich erfolgreich durchgeführt hat, kann das Dichtungskontrollsystem an Stelle der zweiten Abdichtungskomponente eingebaut werden.

Wird bei Deponien der Klassen I bis III das Oberflächenabdichtungssystem ohne Konvektionspermeabilität hergestellt, ist ein Kontrollfeld zu errichten, mit dem der Durchfluss durch das Oberflächenabdichtungssystem bis zum Abschluss der Nachsorgephase bestimmt werden kann.

2.4.6.1 Elektrische Dichtungskontrollsysteme

Elektrische Dichtungskontrollsysteme beruhen auf der Messung von verschiedenen physikalischen Messgrößen.

Bekannt sind derzeit

- Systeme, die unter Nutzung der Isolationswirkung der Kunststoffdichtungsbahn die lokale Anomalie des elektrischen Widerstandes messen,
- Systeme, die Wassergehaltsänderungen in der mineralischen Dichtung durch die Bestimmung der Dielektrizitätszahl des mineralischen Dichtungsmaterial messen,
- Systeme, die Temperaturanomalien in und/oder unterhalb eines Abdichtungselementes mittels optischer Verfahren erfassen.

Derzeit wird eine Zulassungsrichtlinie bei der *Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)* erarbeitet, auf deren Grundlage die Zulassungen erteilt werden sollen.



www.bam.de

☞ Service ☞ Amtliche Mitteilungen ☞ Abfallrecht

Nach Deponieverordnung müssen Dichtungskontrollsysteme für Konvektionssperren über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren ihre Funktion erfüllen. Für elektrische Dichtungskontrollsysteme, die z.B. zur Überwachung von mineralischen Abdichtungskomponenten eingesetzt werden gilt die allgemeine Anforderung der Deponieverordnung einer Funktionsdauer von wenigstens 100 Jahren.

2.4.6.2 Kapillarsperre als Kontrollsystem

Auch der Einsatz einer Kapillarsperre als Kontrollsystem ist möglich und bereits in der Praxis erfolgt. Die Funktion der Kapillarsperre als kontrolliertes System erfordert es, dass die Abflüsse in Kapillarschicht und Kapillarblock getrennt erfasst und bilanziert werden. Zur Lokalisierung und Instandsetzung von Fehlstellen muss die flächig angelegte Kapillarsperre in hinreichend kleine Kontrollsektoren unterteilt werden. Abbildung 12 zeigt dies beispielhaft.

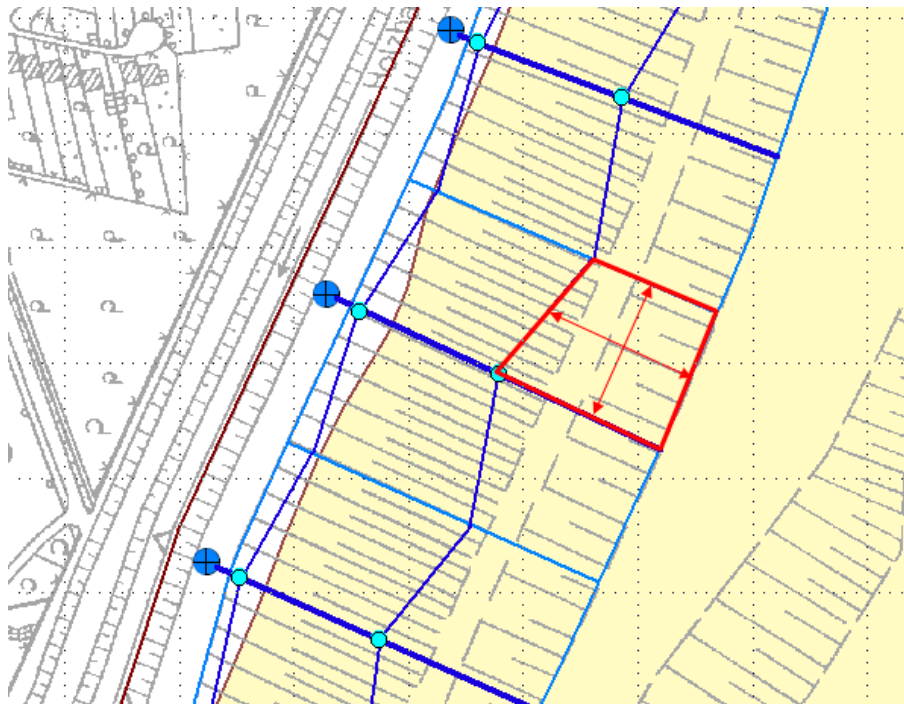


Abbildung 12 Dichtungskontrollsektor in einer Kapillarsperre

2.4.6.3 Kontrolldränschichten

Eine Dichtungskontrolle kann für jedes Abdichtungssystem auch in Form einer Kontrolldrainage angelegt werden. Analog der unter 2.4.6.2 beschriebenen Bauweise in einem Kapillarblock kann eine entsprechende Drainage auch unter anderen Dichtungskomponenten vorgesehen werden. Die Kontrolldrainage muss flächendeckend angelegt und zur Lokalisierung und Instandsetzung von Fehlstellen in hinreichend kleine Kontrollsektoren unterteilt werden.

2.4.6.4 Kontrollfelder

Wird ein Oberflächenabdichtungssystem ohne eine Konvektionssperre (Kunststoffdichtungsbahn, Deponieasphalt) errichtet, ist ein Kontrollfeld anzulegen, mit dem langfristig die tatsächliche Durchsickerung des Oberflächenabdichtungssystems gemessen werden kann. Diese Messung dient dazu, die langfristige Funktionsfähigkeit des Oberflächenabdichtungssystems bis zum Abschluss der Nachsorge überprüfen zu können.

- Die Größe des Kontrollfeldes muss mindestens 300 m² betragen.
- Das Kontrollfeld muss an repräsentativer Stelle im Oberflächenabdichtungssystem angeordnet sein. Dabei sind insbesondere die Exposition und die Neigung der Oberfläche sowie die Wetterbedingungen zu berücksichtigen.
- Werden im Oberflächenabdichtungssystem signifikant unterschiedliche Systeme ohne Konvektionssperre (z.B. in Plateau und Böschung) verwendet, ist für jedes dieser Systeme ein gesondertes Kontrollfeld anzulegen.
- Das Kontrollfeld ist bis zum Abschluss der Nachsorge zu betreiben.

Für die Gestaltung des Kontrollfeldes werden die folgenden Empfehlungen gegeben:

- Das Kontrollfeld ist zur zuverlässigen quantitativen Erfassung der Durchsickerungsmengen nach unten und zu den Seiten mit einer wasserundurchlässigen Kunststoffdichtungsbahn zu versehen.
- Die Aufzeichnung der Durchsickerungsmengen in angemessener zeitlicher Auflösung ist Voraussetzung für eine qualifizierte Bewertung der Durchsickerungsmenge und der Funktionsfähigkeit des Dichtungssystems. Es bietet sich an, hierfür selbstaufzeichnende Geräte (z.B. Kippzähler und Datenlogger) zu installieren.
- Die Abdichtungskomponenten und die technischen Einrichtungen müssen vor Frosteinwirkungen geschützt werden.
- Bei Kapillarsperren kann der Kapillarblock als Kontrolldränage verwendet werden. Die ergänzende Kontrolle der Kapillarschicht bietet zusätzliche Erkenntnisse über die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

Abbildung 13 gibt beispielhaft die Gestaltung eines Kontrollfeldes wieder, das in die Oberflächenabdichtung integriert ist.

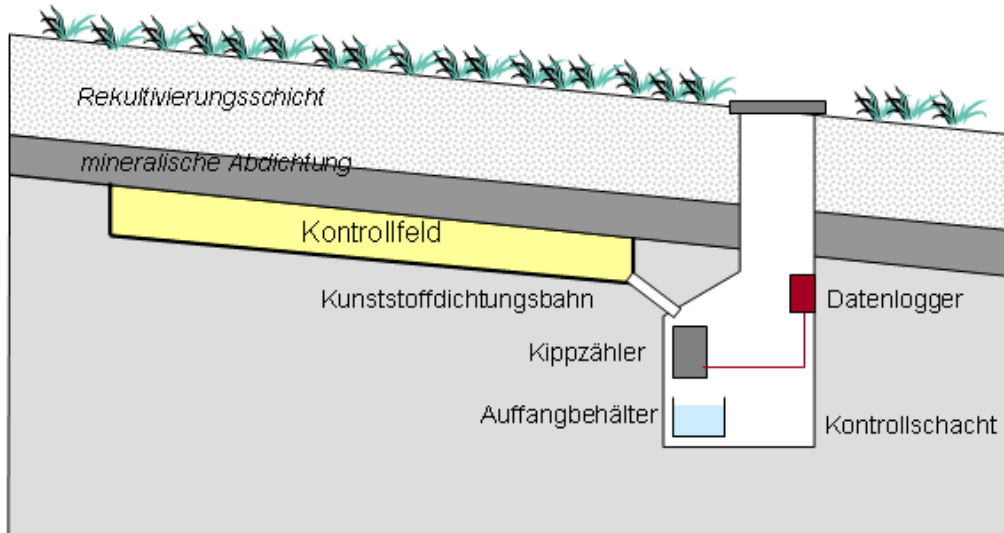


Abbildung 13 Gestaltungsvorschlag für ein Kontrollfeld am Beispiel einer mineralischen Abdichtungsschicht

2.4.7 Ausnahmeregelungen für die Nachbehandlung des Abfallkörpers

Bei Deponien oder einzelnen Deponieabschnitten, auf denen Hausmüll oder hausmüllähnliche Gewerbeabfälle mit hohen organischen Bestandteilen abgelagert worden sind, kann eine nachweislich erfolgreiche Nachbehandlung des Abfallkörpers zu Erleichterungen bei der Gestaltung des Oberflächenabdichtungssystems führen.

2.4.7.1 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen, die bei der Nachbehandlung einzuhalten sind, sind in § 25 DepV geregelt.

Tabelle 8 Voraussetzungen für die Nachbehandlung von Hausmüll und ähnlichen, organikhaltigen Abfällen

Befeuchtung (Infiltration)	Belüftung (Aerobisierung)
Basisabdichtung, Fassung des Sickerwassers	
aktive Deponiegasfassung	kontrollierbare Abluftfassung und -behandlung, Vermeidung schädlicher Emissionen
geregelt und kontrollierbare Infiltrationstechnik	gezielte und kontrollierbare Belüftungstechnik
Kontrolle des Gas- und Wasserhaushalts	
Standsicherheit des Deponiekörpers	
relevante Mengen an biologisch abbaubarer, organischer Substanz im Deponiekörper	



Abbildung 14 Gasbrunnen für eine Aerobisierungsmaßnahme

2.4.7.2 Abdichtungssysteme bei erfolgreicher Nachbehandlung

Bei nachweislich erfolgreicher Nachbehandlung des Abfallkörpers kommen zwei Möglichkeiten in Betracht, am Oberflächenabdichtungssystem für eine Deponie der Klasse II Abweichungen von den Anforderungen nach Anhang 1 Nr.2.3 Tabelle 2 DepV vorzusehen:

- Die obligatorisch geforderte zweite Abdichtungskomponente kann durch eine Wasserhaushaltsschicht ersetzt werden, sofern diese die Anforderungen der Deponieverordnung einhält. Die Einhaltung dieser Anforderungen ist in Nordrhein-Westfalen auf Grund der meteorologischen Bedingungen in der Regel nicht möglich.
- Auf eine zweite Abdichtungskomponente kann auch ganz verzichtet werden, wenn als erste Komponente eine Konvektionssperre gewählt wird, d.h. eine Kunststoffdichtungsbahn oder ein Dichtungselement aus Deponieasphalt. In diesem Fall muss ein Kontrollsystem für die verbleibende Abdichtungskomponente angelegt werden. Siehe hierzu auch Kapitel 2.4.6.1.

3 Rekultivierung/Folgenutzung

3.1 Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht ist eine der Systemkomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems auf Deponien. Neben ihrer Aufgabe, den Deponiekörper gestalterisch in die umgebende Landschaft einzubinden, erfüllt sie wichtige Funktionen zum Schutz der unterliegenden Dichtungskomponenten. Diese Schutzfunktionen machen es erforderlich, die Gestaltung der Rekultivierungsschicht funktional an die besonderen Erfordernisse der jeweils verwendeten Dichtungskomponenten anzupassen.

3.1.1 Funktionen der Rekultivierungsschicht

3.1.1.1 Trägersubstrat

Eine landschaftlich angepasste Vegetation benötigt ein geeignetes, kulturfähiges Bodenmaterial als Trägersubstrat. Mit der Vielfalt vorkommender Pflanzen variieren die Anforderungen an den Boden. Der Schutz der unterliegenden Dichtungskomponenten schränkt die Möglichkeiten bei der Auswahl eines geeigneten Bewuchses jedoch deutlich ein, so dass die Anforderungen enger gefasst werden müssen.



Abbildung 15 Gras- und Krautvegetation auf einer rekultivierten Deponie

Grundsätzlich ist die Differenzierung der Rekultivierungsschicht in Oberbodenzone und Unterbodenzone sinnvoll. Die ca. 30 cm mächtige Oberbodenzone soll dabei einen höheren organischen Anteil (humoses Material) aufweisen als die Unterbodenzone. Als optimales Bodenmaterial gelten lehmige Sande mit Sand- oder Kiesanteilen. Eine Kompostzugabe kann das Wasserspeichervermögen erhöhen.

Ein zu hoher Humusanteil (> 8 %) in der Oberbodenzone ist angesichts der erstrebten extensiven Bepflanzung nicht bedarfsgerecht und soll vermieden werden. Die Oberbodenzone soll eine ausreichende Luftkapazität aufweisen. Diese ist Voraussetzung für die Sauerstoffversorgung der Pflanzen und für eine natürliche Bodenentwicklung.

Die Unterbodenzone dient eher der mechanischen Sicherung des Bewuchses sowie der Wasserversorgung der Pflanzen in der niederschlagsfreien Zeit. Nach diesen beiden Funktionen richtet sich die Auswahl des Materials. Als optimal gelten Schluffe, schluffige Sande, lehmige Sande, schluffiger Lehm und sandiger Lehm. Mit zunehmender Tiefe kann und soll der humose Anteil des Unterbodens abnehmen. Ein Humusgehalt bzw. Anteil organischer Bestandteile von 1,5 Gew.-% (bestimmt als Glühverlust) in der Unterbodenzone soll nicht überschritten werden. Höhere Gehalte bewirken eine Austragung der Nährstoffe und eine Belastung des durchsickernden Niederschlagswassers (z.B. mit Stickstoff). Außerdem können sie bei unzureichender Durchlüftung zu einer Verockerung und damit zu einem langfristigen Versagen der Entwässerungsschicht führen. Siehe hierzu auch Anhang A 2.

Die Mächtigkeit sollte sich nach der zu erwartenden Durchwurzelungstiefe und dem benötigten Wasserspeichervermögen richten. In niederschlagsreichen Gebieten kann das Wasserspeichervermögen geringer ausfallen als in ausgeprägten Trockenregionen. Gegenüber den meisten natürlichen Standorten weisen Rekultivierungsschichten für die Vegetation den Nachteil auf, dass es hier keinen kontinuierlichen Nachschub durch kapillaren Aufstieg aus dem tiefer liegenden Grundwasser gibt. Der Bodenwasservorrat muss daher den Wasserbedarf der Pflanzen in der niederschlagsarmen Zeit decken können, ohne dass bei den Pflanzen Trockenstress entsteht.

3.1.1.2 Durchwurzelungsschutz

Ein vegetationsfähiger Boden wird von den Pflanzen in unterschiedlicher Tiefe durchwurzelt.

Die Durchwurzelungstiefe lässt sich durch Auswahl von geeigneten Pflanzen nur bedingt und kurzfristig begrenzen. Zahlreiche tief wurzelnde Arten siedeln sich im Zuge der natürlichen Sukzession von selber an und lassen sich auch durch intensive Pflege nur zum Teil kontrollieren. Um die Durchwurzelung auf eine Tiefe von weniger als 2 m eingrenzen zu können, sollten gezielte Maßnahmen getroffen werden.

Um die Durchwurzelungstiefe über das Wasser- und Nährstoffangebot zu steuern, sollte die Oberbodenzone humushaltig sein (s. o.) und mit zunehmender Tiefe nährstoffärmer angelegt werden, so dass der Anreiz zur Ausbildung tief reichender Wurzeln geringer ausfällt. Das Wasserspeichervermögen sollte so gut ausgebildet sein, dass ausreichend Wasser in der Rekultivierungsschicht zur Verfügung steht und die Pflanzen nicht durch Trockenstress zum tieferen Wurzeln getrieben werden.

Die folgende Tabelle gibt die ungefähren Wurzeltiefen typischer Deponiepflanzen wieder:

Tabelle 9 Durchwurzelungstiefen typischer Deponiepflanzen
nach [11], [20], [46]

Pflanze	Botanischer Name	Wurzeltiefe
Geruchlose Kamille	Matricaria perforata	0,70 m
Roter Schwingel	Festuca rubra	0,80 m
Ackerkratzdistel	Cirsium arvense	1,50 - 3,00 m
Glatthafer	Arrhenatherum elatius	1,10 - 2,00 m
Krauser Ampfer	Rumex crispus	1,30 - 3,20 m
Stumpfblätriger Ampfer	Rumex obtusifolius	1,50 - 3,00 m
Pfeilkresse	Cardaria draba	1,20 m
Gemeiner Löwenzahn	Taraxacum officinale	0,70 - 2,00 m
Mehlige Königskerze	Verbascum lychnitis	1,50 m

Sofern sich die Durchwurzelungstiefe nicht mit den o. g. Maßnahmen begrenzen lässt, können konstruktive Maßnahmen ergriffen werden, z.B. Wurzelsperren oder der Einbau einer stark verdichteten untersten Lage im Unterboden, die dem Wurzelwachstum einen mechanischen Widerstand bietet und den für das Wurzelwachstum benötigten Sauerstoff verknüpft. Um dabei die für die Standsicherheit von Böschungen erforderliche hydraulische Durchlässigkeit zu erhalten, sollten hierfür enggestufte, stark steinige oder sandige Substrate zum Einsatz kommen.

Bei Einbau einer *BAM*-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahn besteht ein sicherer Schutz gegen Durchwurzelung während der Dauer ihrer vollen Funktionsfähigkeit (>100 Jahre). Nach der alterungsbedingten Materialschwächung und dem Eintreten von Rissen und Perforationen verliert die Kunststoffdichtungsbahn diese Schutzwirkung.

Sofern aus landschaftsästhetischen Gründen die Anpflanzung von Bäumen vorgesehen ist, müssen solche Bereiche mit einer deutlich dickeren Rekultivierungsschicht (>2,5 m, je nach Bauminventar auch mehr) ausgestattet werden. Siehe hierzu Kapitel 3.5.

3.1.1.3 Sickerwasserverminderung

Die bezweckte Verringerung der Durchsickerung von Niederschlagswasser richtet sich vor allem auf die Intensität der Sickerwasserströmung. Eine Minderung der hydraulischen Belastungsspitzen ermöglicht eine geringere Dimensionierung der Entwässerungsschicht.

Erreicht wird die Minderung der Durchflussspitzen durch die Zwischenspeicherung im Porenvolumen der Rekultivierungsschicht. Mit zunehmendem Wasserspeichervermögen fällt die durchsickernde Restwassermenge und -intensität geringer aus. Im Extremfall und bei geeigneten meteorologischen Verhältnissen kann die Rekultivierungsschicht so ausgebaut sein, dass kein Sickerwasser nach unten dringt (Wasserhaushaltsschicht).

Die Speicherwirkung der Rekultivierungsschicht kann mit geeigneten Simulationsmodellen berechnet und bemessen werden. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn das Speichervermögen für die Funktionsfähigkeit des gesamten Dichtungssystems von Bedeutung ist, z.B. bei der Bemessung der Entwässerungsschicht in Ansatz gebracht wurde.

Die entscheidende Eigenschaft eines Untergrundes für ein hohes Wasserspeichervermögen ist das Porenvolumen im Bereich der mittelgroßen Poren (0,2-50 µm). In diesem Bereich kann Bodenwasser gut bei Niederschlägen gespeichert und bei Trockenheit wieder abgegeben werden. Zur quantitativen Beschreibung der Fähigkeit des Bodens, Wasser in pflanzenverfügbare Form wieder abzugeben, wird die nutzbare Feldkapazität nFK verwendet. Die nutzbare Feldkapazität bewegt sich bei kultivierungsfähigen Böden häufig in einem Bereich von 15 bis 22 Vol.-% und reicht bei sehr schluffreichen Böden bis 28 Vol.-%. Durch Zugabe von Humus kann die nutzbare Feldkapazität erhöht werden.

3.1.1.4 Schutz gegen Austrocknung

Die Gefahr der Austrocknung einer mineralischen Dichtungsschicht entsteht beim Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln im Zuge der Transpiration sowie durch den kapillaren Aufstieg von Bodenwasser infolge austrocknungsbedingter, hoher Wasserspannungen in der Rekultivierungsschicht. Die Wirkung der Rekultivierungsschicht als Austrocknungsschutz für die mineralische Dichtungsschicht oder für eine geosynthetische Tondichtungsbahn beruht deshalb auf ihrem Wasserspeichervermögen. Solange für die Evapotranspiration genügend Bodenwasser in der Rekultivierungsschicht zur Verfügung steht, wird das Austrocknen tiefer liegender Schichten verhindert. Zudem lässt sich das Fortschreiten einer Austrocknungsfront von oben nach unten dadurch verhindern oder hemmen, dass der kapillare Aufstieg von Bodenwasser in die oberen Bodenzonen unterbrochen wird.

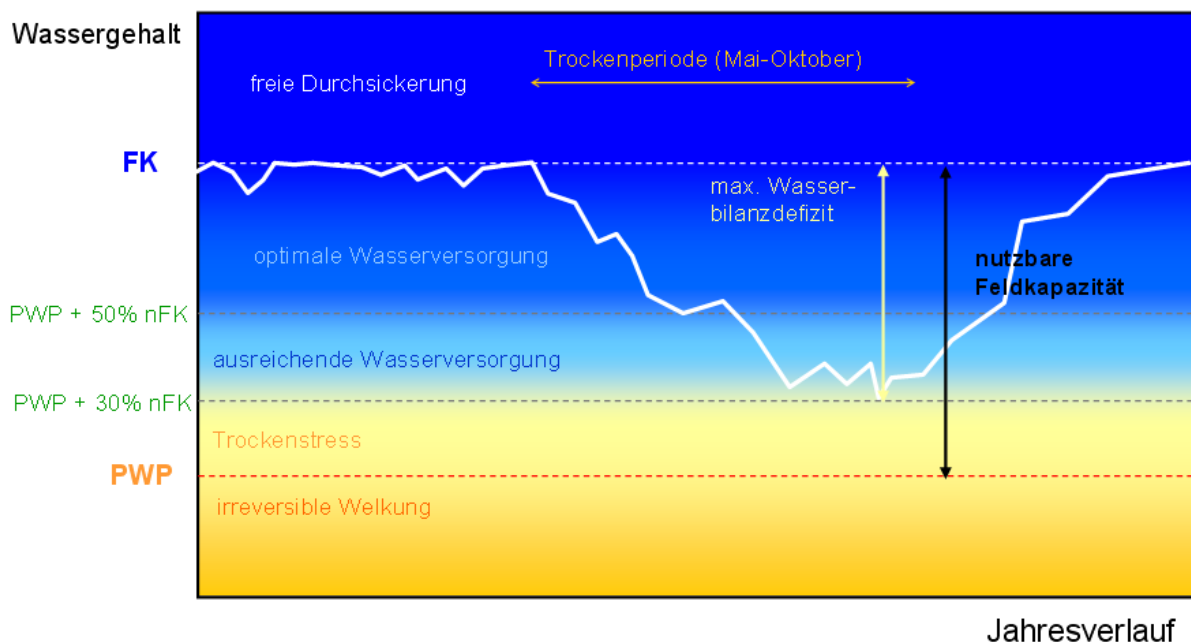


Abbildung 16 Bodenwasservorrat im Jahresverlauf

FK: Feldkapazität
 nFK: nutzbare Feldkapazität
 PWP: Permanenten Welkepunkt

Ein wirksamer Schutz mineralischer Abdichtungen gegen Austrocknung besteht also vorrangig in der Bereitstellung ausreichend großen Bodenwasservolumens in der Rekultivierungsschicht sowie in einer kapillarbrechenden Schicht zwischen Rekultivierungsschicht und mineralischer Dichtung.

3.1.1.5 Schutz gegen Temperaturschwankungen und Frost

Die Rekultivierungsschicht gleicht kurzzeitige Temperaturschwankungen aus, die ansonsten die Dichtungssysteme übermäßigen mechanischen Belastungen aussetzen könnten. Der Schutz der mineralischen Dichtungsschicht gegen die Einwirkung von Frost ist durch eine ausreichende Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht zu erreichen. Die erforderliche Mächtigkeit ergibt sich aus der Frosteindringtiefe abzüglich der Dicke der Entwässerungsschicht. Die Frosteindringtiefe ist nach Frosteindringzonen gestaffelt. Abbildung 27 im Anhang stellt die Frosteindringtiefen für Nordrhein-Westfalen dar.

Zone I	0,80 m
Zone II	1,00 m
Zone III	1,20 m

Unter Einhaltung der Mindestmächtigkeiten von 1 m für die Rekultivierungsschicht und 0,30 m für die Entwässerungsschicht bestünde in Nordrhein-Westfalen immer eine ausreichende Sicherheit gegen Frosteinwirkung. Bei der Verwendung von synthetischen Dränelementen sowie von Rekultivierungsschichten oder anderen Abdeckungen, die gegenüber dieser Mindestmächtigkeit reduziert sind, ist die Frostsicherheit im Einzelfall zu prüfen.

3.1.1.6 Schutz gegen Wühltiere

Die Rekultivierungsschicht stellt aufgrund der angestrebten Nähe zu einem natürlichen Boden einen geeigneten Lebensraum für Wühltiere dar. An Deponien ist in erster Linie mit dem Auftreten von Feldmäusen, Wanderratten, Kaninchen und Maulwürfen zu rechnen. Insbesondere die relativ steilen Böschungen bieten günstige Voraussetzungen für das Anlegen von Bauten.

Die Wühltätigkeit von Kleintieren führt zu einem starken Wasserwegsamkeiten in den Wühlgängen. Diese kann das angestrebte Wasserspeichervermögen und die ausgleichende Wirkung der Rekultivierungsschicht deutlich herabsetzen. In Kombination mit einer Entwässerungsschicht, deren hydraulische Leistungsfähigkeit geringer ausgelegt wird, kann sich daraus eine Überlastung der Entwässerungsschicht ergeben, die auch zu Standsicherheitsproblemen führen kann.

Ein vollständiger Schutz gegen die Wühltätigkeit ließe sich praktisch nur durch konstruktive Maßnahmen sicherstellen, da die Grabtiefe einiger Tiere mehrere Meter betragen kann (z.B. Kaninchen). Erfahrungen aus dem Deichbau zeigen aber, dass eine konventionell hergestellte mineralische Dichtung dem Angriff von Wühltieren in der Regel widersteht, da der hohe Verdichtungsgrad Wühltiere abschreckt [4].

Eine Entwässerungsschicht, die aus grobem, scharfkantigem Kies besteht, bietet gegenüber Wühltieren einen erheblichen Widerstand. In der Kombination mit einer regelkonformen Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist dann mit einer Durchdringung nicht zu rechnen.

Alternativ kann die unterste Zone der Rekultivierungsschicht aus stark verdichtetem, grobem und scharfkantigem Mineral hergestellt werden, um den gleichen Effekt innerhalb der Rekultivierungsschicht zu erreichen. Dies vermindert jedoch die nutzbare Feldkapazität und muss mit einer höheren Mächtigkeit ausgeglichen werden. Als weitere Möglichkeit bleibt der Einbau von widerstandsfähigen Gittern in oder unterhalb der Rekultivierungsschicht.

3.1.2 Bemessung

3.1.2.1 Idealzusammensetzung

Die ideale Rekultivierungsschicht erfüllt alle gewünschten Schutzfunktionen und weist alle günstigen Eigenschaften auf, die hierzu beitragen. Einige der im Folgenden genannten Zielvorstellungen kollidieren miteinander, so dass diese Idealkonstellation tatsächlich nicht erreichbar ist. In der praktischen Umsetzung sind der Optimierung der Rekultivierungsschicht zudem Grenzen gesetzt, die sich aus der Verfügbarkeit von geeignetem Material, der baulichen Ausführbarkeit und den finanziellen Belastung ergeben können. Insofern soll die Rekultivierungsschicht an die Erfordernisse im Einzelfall und insbesondere an das unterliegende Dichtungssystem angepasst werden.

- a) Das Wasserspeichervermögen der Rekultivierungsschicht ist so hoch, dass das gespeicherte Wasser ausreicht, den Pflanzen auch in Trockenperioden gute Bedingungen zu liefern. Die untere Zone der Rekultivierungsschicht ist immer feucht.
- b) Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist so groß, dass alle standorttypischen Pflanzen ihr Wurzelwerk in der Rekultivierungsschicht ausbilden können ohne in tiefere Schichten vorzudringen.
- c) Die Rekultivierungsschicht ist so mächtig, dass Wühltiere nicht bis zur Unterfläche vordringen.
- d) Aufgrund unterschiedlicher Funktionen weist die Rekultivierungsschicht verschiedene Zonen auf: Oberbodenzone, Unterbodenzone, wurzelhemmende Schicht.
- e) Um eine möglichst große Menge Niederschlagswasser aufnehmen zu können, ist die Oberbodenzone stark durchlässig.
- f) Die obere Zone der Rekultivierungsschicht weist ein bedarfsgerechtes Nährstoffangebot auf, welches den Pflanzen eine ausreichende Versorgung sichert.
- g) Im Wurzelbereich weist die Rekultivierungsschicht eine mittlere Luftkapazität (LK) auf, die eine gute Versorgung mit Sauerstoff sicherstellt.
- h) Die untere Zone der Rekultivierungsschicht weist ein geringes Nährstoffangebot, ein geringeres Wasserdargebot und einen mechanischen Widerstand gegenüber Wurzelbildung auf.

- i) Am Übergang zwischen Rekultivierungsschicht und Entwässerungsschicht stellt sich ein Porengrößenprung ein, der Wurzeln von der weiteren Ausbreitung in die Tiefe abhält.
- j) Die Entwässerungsschicht ist so grobkörnig, dass der kapillare Aufstieg aus der mineralischen Dichtung verhindert wird.
- k) Die Entwässerungsschicht ist so feinkörnig, dass ein konvektiver Dampftransport aus der mineralischen Dichtungsschicht weitgehend vermieden wird.
- l) Die Rekultivierungsschicht ist so bepflanzt, dass eine gute Transpirationsleistung über das ganze Jahr gewährleistet, eine zu starke Austrocknung im Sommer jedoch nicht zu besorgen ist.

3.1.2.2 Anforderungen

Die Bemessung einer Rekultivierungsschicht muss sich gemäß Anhang 1 Nr. 2.3.1 DepV nach den Schutzerfordernissen der darunter liegenden Systemkomponenten richten. Darüber hinaus sind unabhängig von diesen Schutzerfordernissen bestimmte Mindestanforderungen einzuhalten:

- Mindestmächtigkeit $\geq 1,0$ m
- nutzbare Feldkapazität ≥ 140 mm (bezogen auf die Gesamtdicke)

Es liegen zahlreiche Erkenntnisse vor, dass in vielen Fällen eine Rekultivierungsschicht mit diesen Mindestanforderungen ohne weitere, gezielte Maßnahmen keine ausreichende Schutzwirkung gegen Austrocknung und Durchwurzelung bietet. Insofern wird empfohlen, diese Werte als eine Untergrenze anzusehen, die bei Vorliegen günstiger Verhältnisse und bei unempfindlichen Dichtungssystemen ausreichen kann. Im Folgenden werden neben dieser Minimalkonfiguration zwei weitere Varianten ausgeführt, die jeweils ein höheres Schutzniveau erreichen lassen.

Die Schutzniveaus berücksichtigen die unterschiedlich starken Ansprüche, die sich aus der Wahl des Oberflächenabdichtungssystems ergeben. Die im Folgenden aufgeführten Empfehlungen orientieren sich zum einen an den grundsätzlich geltenden Anforderungen des Anhangs 1 der Deponieverordnung, zum anderen an fachtechnischen Richtlinien und Empfehlungen (z.B. *LAGA*, *DGGT*). Sie sind als Orientierungswerte zu verstehen, die bei Vorliegen besonderer Umstände eine angemessene Abweichung erlauben.

Mit der folgenden Staffelung werden drei verschiedene Schutzniveaus beschrieben, die im Detail an die Besonderheiten des einzelnen Systems anzupassen sind.

Tabelle 10 Empfehlungen zu Schutzniveaus für die Rekultivierungsschicht

In einzelnen Fällen kommen je nach Ausführung der Dichtungskomponente mehrere Möglichkeiten für die Rekultivierungsschicht in Betracht.

Schutzerfordernis Dichtungskomponente/-system	Schutzniveau 1	Schutzniveau 2	Schutzniveau 3
Kombinationsabdichtungen (mit KDB oder Asphaltbeton)	•		
Dichtungssysteme als Einzelkomponente			
Kunststoffdichtungsbahn	•		
Asphaltbetondichtung	•		
<i>TRISOPLAST</i>		• ¹⁾	
tonmineralische Abdichtung			•
gemischtkörnige mineralische Abdichtung ²⁾		•	•
geosynthetische Tondichtungsbahn			• ¹⁾
Kapillarsperre ²⁾		•	•
<i>METHA</i> -Material			• ¹⁾
Wasserglasvergütete mineralische Dichtungen		•	
<i>Bentokies</i> 0,5 m		•	
<i>Bentokies</i> 0,3 m			•
<i>CHEMOTON</i> 0,5 m		•	
<i>CHEMOTON</i> 0,3 m			•
<i>DYWIDAG</i> -Mineralgemisch 0,5 m		•	
<i>DYWIDAG</i> -Mineralgemisch 0,2 m			•

¹⁾ Für diese Dichtungssysteme sind konkrete Festlegungen in den Eignungsbeurteilungen getroffen worden, die vorrangig einzuhalten sind.

²⁾ Die Empfehlung richtet sich im Einzelfall nach den baulichen Besonderheiten des Dichtungssystems

3.1.2.3 Schutzniveau 1 (Mindestschutzfunktion)

Die Rekultivierungsschicht erfüllt in dieser Variante nur geringe Schutzfunktionen für die unterliegenden Systemkomponenten. Die Hauptfunktion liegt in der Bereitstellung eines kulturfähigen Bodens als Trägersubstrat für die vorgesehene Bepflanzung. Die Entwässerungsschicht wird bei angepasster Bepflanzung und Pflege soweit geschützt, dass ihre dauerhafte Funktionsfähigkeit sichergestellt ist. Die Rekultivierungsschicht in dieser Variante stellt die Minimallösung dar, die den Mindestanforderungen des Anhangs 1 der Deponieverordnung genügt.

Tabelle 11 Anforderungen und Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 1

Eigenschaft	Anforderung	Bemerkung
Mächtigkeit	≥ 1,0 m	
nutzbare Feldkapazität	≥ 140 mm	bezogen auf die Gesamtmächtigkeit
Anteil organischer Bestandteile	2-8 Gew.-%	Empfehlung für die obere Zone (≈ 0,3 m)
(bestimmt als Glühverlust)	≤ 1,5 Gew.-%	Empfehlung für die untere Zone (≈ 0,7 m)
Luftkapazität	≥ 7 Vol.-%	Empfehlung für die obere Zone

Der Übergang zur Entwässerungsschicht ist mit einer geeigneten Kornabstufung oder durch ein Trennvlies zu stabilisieren. Da infolge der geringen Überdeckung mit dem Eindringen von Pflanzenwurzeln in die Entwässerungsschicht zu rechnen ist, muss diese ausreichend groß bemessen werden, um Einschränkungen in der hydraulischen Leistungsfähigkeit zu kompensieren.

Diese Variante einer Rekultivierungsschicht kann mit Dichtungssystemen kombiniert werden, die keines besonderen Schutzes gegen Durchwurzelung und Austrocknung bedürfen (siehe Tabelle 10).

Zu beachten ist, dass bei Kombinationsabdichtungen die Schutzfunktion für eine unterliegende mineralische Dichtung nur solange und soweit gegeben ist, wie die Kunststoffdichtungsbahn intakt ist. Für die Gewährleistung eines vollständigen Redundanzprinzips und einen dauerhaften Schutz gegen Durchwurzelung wird ein weitergehender Schutz gegen Durchwurzelung (Schutzniveau 2) empfohlen.

3.1.2.4 Schutzniveau 2 (mittlere Schutzfunktion)

Die Rekultivierungsschicht nach dem Schutzniveau 2 ergänzt die systemeigenen Schutzmechanismen soweit, dass geringer empfindliche Systemkomponenten bei regelkonformer Ausbildung mit einer hinreichenden Sicherheit dauerhaft funktionsfähig bleiben. Das Wasserspeichervermögen reicht aus, um Austrocknungserscheinungen auf ein für das jeweilige Dichtungselement zuträgliches Ausmaß zu begrenzen. Ebenso führt das hohe Wasserspeichervermögen dazu, dass die Durchwurzelung im Zusammenspiel mit den systemeigenen Widerständen hinreichend begrenzt werden kann.

Tabelle 12 Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 2

Eigenschaft	Anforderung	Bemerkung
Mächtigkeit	≥ 1,3 m	
nutzbare Feldkapazität	≥ 170 mm	Empfehlung, bezogen auf die Gesamtmächtigkeit
Anteil organischer Bestandteile	2-8 Gew.-%	Empfehlung für die obere Zone (≈ 0,3 m)
(bestimmt als Glühverlust)	≤ 1,5 Gew.-%	Empfehlung für die untere Zone (≈ 1 m)
Luftkapazität	≥ 7 Vol.-%	Empfehlung für die obere Zone

Der Übergang zur Entwässerungsschicht ist mit einer geeigneten Kornabstufung oder durch ein Trennvlies zu stabilisieren. Die Entwässerungsschicht soll den kapillaren Aufstieg von Bodenwasser aus der mineralischen Dichtungsschicht unterbrechen, den konvektiven Transport von Wasserdampf hemmen und Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum speichern, um der Gefahr der Austrocknung der mineralischen Dichtung weiter entgegenzuwirken. Hierfür kommt eine Entwässerungsschicht mit einer relativ feinen Körnung (z.B. 0/8 mm) in Betracht oder eine Sandschutzschicht mit vergleichbaren Eigenschaften, die zwischen Entwässerungsschicht und Dichtungskomponente angeordnet ist.

An wenigen Standorten Nordrhein-Westfalens, die ein feuchtes und kühles Klima aufweisen, können ggf. geringere Anforderungen ausreichend sein, die gewünschte Schutzwirkung zu entfalten. Eine geringere Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ist dann geeignet, wenn mit einer Wasserhaushaltsberechnung nachgewiesen wird, dass auch bei extremen Trockenperioden ein Wassergehalt von mindestens 50 mm über dem Permanenten Welkepunkt eingehalten werden kann. Die Mindestmächtigkeit liegt in diesem Fall bei 1,00 m.

Diese Variante einer Rekultivierungsschicht kann mit Dichtungssystemen kombiniert werden, die nur eines Grundschatzes gegen Durchwurzelung und Austrocknung bedürfen (siehe Tabelle 10).

3.1.2.5 Schutzniveau 3 (hohe Schutzfunktion)

Die Rekultivierungsschicht nach dem Schutzniveau 3 bietet so hohe Schutzfunktionen, dass auch empfindliche Systemkomponenten bei regelkonformer Ausbildung mit einer hinreichenden Sicherheit dauerhaft funktionsfähig bleiben. Das Wasserspeichervermögen ist so hoch, dass Austrocknungserscheinungen mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden. Ebenso führt das hohe Wasserspeichervermögen dazu, dass die Durchwurzelung mit hoher Wahrscheinlichkeit hinreichend begrenzt werden kann.

Für die Unterbodenzone eignen sich z.B. Böden mit hohem Schluffanteil, die eine hohe nutzbare Feldkapazität aufweisen.

Tabelle 13 Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 3

Eigenschaft	Anforderung	Bemerkung
Mächtigkeit	$\geq 1,5$ m	
nutzbare Feldkapazität	≥ 200 mm	Empfehlung, bezogen auf die Gesamtmächtigkeit
Anteil organischer Bestandteile	2-8 Gew.-%	Empfehlung für die obere Zone ($\approx 0,3$ m)
(bestimmt als Glühverlust)	$\leq 1,5$ Gew.-%	Empfehlung für die untere Zone ($\approx 1,2$ m)
Luftkapazität	≥ 7 Vol.-%	Empfehlung für die obere Zone

An wenigen Standorten Nordrhein-Westfalens, die ein feuchtes und kühles Klima aufweisen, können ggf. geringere Anforderungen ausreichen, um die gewünschte Schutzwirkung zu entfalten. Eine geringere Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht oder eine geringere nutzbare Feldkapazität sind dann geeignet, wenn mit einer Wasserhaushaltssimulation nachgewiesen wird, dass auch bei extremen Trockenperioden ein Wassergehalt von mindestens 90 mm über dem Permanenten Welkepunkt eingehalten werden kann. Die Mindestmächtigkeit sollte in diesem Fall bei 1,30 m liegen; weitergehende Anforderungen (z.B. der Auflast) an die Mächtigkeit bleiben unberührt.

Der Übergang zur Entwässerungsschicht ist mit einer geeigneten Kornabstufung oder durch ein Trennvlies zu stabilisieren. Die Entwässerungsschicht soll den kapillaren Aufstieg von Bodenwasser aus der mineralischen Dichtungsschicht unterbrechen, den konvektiven Transport von Wasserdampf hemmen und Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum speichern, um der Gefahr der Austrocknung der mineralischen Dichtung weiter entgegenzuwirken. Hierfür kommt eine Entwässerungsschicht mit einer relativ feinen Körnung (z.B. 0/8 mm) in Betracht oder eine Sandschutzschicht mit vergleichbaren Eigenschaften, die zwischen Entwässerungsschicht und Dichtungskomponente angeordnet ist.

Diese Variante einer Rekultivierungsschicht kann mit Dichtungssystemen kombiniert werden, die eines besonderen Schutzes gegen Durchwurzelung und Austrocknung oder gegen hohe Sickerwasserraten bedürfen.

3.2 Wasserhaushaltsschicht

An Stelle einer Rekultivierungsschicht kann eine Wasserhaushaltsschicht vorgesehen werden. Das wesentliche Merkmal einer Wasserhaushaltsschicht ist der nahezu vollständige Ausgleich von Niederschlag und Evapotranspiration durch das Wasserspeichervermögen des eingebauten Bodenmaterials.

Anhang 1 Nr. 2.3.1.1 DepV i.V.m. Nr. 2.3.1. macht strenge Vorgaben für die Eigenschaften der Wasserhaushaltsschicht.

Anforderungen nach Deponieverordnung

Einsatzbereich	als eigenständige Dichtungskomponente (DK I)	als Ersatz für Dichtungskomponente (DK II)
Durchsickerungsmenge	≤ 20 mm/a	≤ 60 mm/a
max. Anteil am Jahresniederschlag	-	≤ 10 %

Ergänzend werden hier weitere Empfehlungen analog denen zur Rekultivierungsschicht ausgesprochen.

Tabelle 14 Anforderungen und Empfehlungen an die Wasserhaushaltsschicht

Eigenschaft	Anforderung	Bemerkung
Mächtigkeit	≥ 1,5 m	
nutzbare Feldkapazität	≥ 220 mm	bezogen auf die Gesamtmächtigkeit
Anteil organischer Bestandteile	2-8 Gew.-%	Empfehlung für die obere Zone (≈ 0,3 m)
(bestimmt als Glühverlust)	≤ 1,5 Gew.-%	Empfehlung für die untere Zone (≥ 1,2 m)
Luftkapazität	≥ 7 Vol.-%	Empfehlung für die obere Zone

Die klimatischen Rahmenbedingungen, die zur Einhaltung der Anforderungen an die Durchsickerungsmenge erforderlich wären, sind erfahrungsgemäß dann zu erwarten, wenn die Jahresniederschlagssumme unter 650 mm liegt. Dies ist in Nordrhein-Westfalen nur auf einer sehr kleinen Fläche gegeben (siehe Abbildung 25). Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass in Folge eines günstigen Kleinklimas geeignete Bedingungen auch auf Standorten mit geringfügig höheren Jahresniederschlägen anzutreffen sind. In jedem Fall ist der Wirkungsgrad der Wasserhaushaltsschicht anhand von Modellberechnungen nachzuweisen.

3.3 Methanoxidationsschicht

Auf Deponien, in denen die Bildung von Deponiegas so gering ist oder soweit zurück gegangen ist, dass die aktive Fassung und Verwertung bzw. Behandlung des Deponiegases nicht mehr notwendig ist, kann die Errichtung einer Methanoxidationsschicht eine kostengünstige und effektive Möglichkeit sein, diffuse Methanemissionen aus dem Deponiekörper zu verhindern.

Für die Ausgestaltung der Methanoxidationsschicht gibt es einen relativ weiten Spielraum. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Regelfall die Primärfunktionen des Oberflächenabdichtungssystems (Minimierung des Niederschlagseintrags) Vorrang gegenüber weiteren Funktionen haben.

Für den Einsatz von Methanoxidationsschichten gibt es drei Ausführungsvarianten:

- Sanierung von emissionsintensiven Punkten (Hotspots). Hierfür kommen alte, bereits rekultivierte Deponien infrage, die über keine Oberflächenabdichtung und über keine Entgasungseinrichtung verfügen.
- Einbau von Methanoxidationsfenstern als integriertem Bestandteil eines Oberflächenabdichtungssystems (z. B. Wasserhaushaltsschicht mit Gasfenstern).
- Bau einer Methanoxidationsschicht auf der gesamten Deponieoberfläche als (Teil der) Rekultivierungsschicht.

Die Methanoxidation findet in einer begrenzten Zone (aktive Schicht) der Rekultivierungsschicht statt. Die Deponieverordnung gibt vor, dass die Wechselwirkungen der Methanoxidation und des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht zu bewerten sind. Das Material muss gewährleisten, dass auch nach ergiebigen Niederschlägen atmosphärischer Sauerstoff in ausreichender Menge über die wasserfreien Grobporen zu den Methan oxidierenden Mikroorganismen in der aktiven Schicht gelangt. Die in der Methanoxidationsschicht benötigte Sauerstoffmenge ist vom Methandargebot abhängig.

Der Einbau der für die Methanoxidation vorgesehenen Rekultivierungsschicht muss möglichst ohne Verdichtung erfolgen (z. B. mit Langarmbaggern oder Moorraupen), da eine Verdichtung insbesondere das Volumen der Grobporen (Luftkapazität) drastisch verringert. Auch bei einer Folgenutzung der Deponieoberfläche ist darauf zu achten, dass die Methanoxidationsschicht nicht weiter verdichtet wird. Das Material muss außerdem biologischen Abbauprozessen lange Zeit widerstehen können, um das Porengerüst stabil zu halten. Der Hauptanteil sollte daher aus mineralischem Material bestehen; Kompost allein ist hierfür nicht geeignet. Zur Vermeidung bevorzugter Strömungsbahnen (Hotspots) darf das Material nur eine geringe Neigung zur Rissbildung zeigen.

Zur Umsetzung eines diffusen Methanaustrags aus dem Deponiekörper von beispielsweise $0,5 \text{ l CH}_4/(\text{m}^2\text{h})$ sollte das Bodenmaterial ein Luftporenvolumen von 17 Vol.-% nicht unterschreiten. Dies wird durch schwach bis mittel schluffige, lehmige oder tonige Sande bei geringer bis mittlerer Verdichtung erfüllt. Schluffige Sande sind am Besten für die Methanoxidation geeignet. Mit einer geeigneten Gasausgleichsschicht unterhalb der aktiven Oxidationsschicht lässt sich die Methanoxidation optimieren [21].

3.4 Empfehlungen zum Einbau und zur Qualitätssicherung

Der Aufbau einer Rekultivierungsschicht, die die vorgesehenen Funktionen dauerhaft erfüllt, bedarf eines sorgfältigen Einbaus und einer anspruchsvollen Qualitätssicherung. Nur wenn die Materialien die Qualitätskriterien vollständig erfüllen und der Einbau die besonderen Eigenschaften einer Rekultivierungsschicht berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Rekultivierungsschicht eine Systemkomponente mit qualifizierten Eigenschaften bildet.

3.4.1 Material

Die Rekultivierungsschicht wird aus mineralischem Bodenmaterial aufgebaut. Üblicherweise stammt solches Material aus dem Aushub im Rahmen von Baumaßnahmen. Zum Teil kommen auch gezielt hergestellte Bodenmaterialien aus Erdenwerken zum Einsatz. Bei der gezielten Aufbereitung von Bodenmaterial dürfen nur solche Stoffe zugegeben werden, die für die Herstellung der Bodenfunktionen geeignet und erforderlich sind.

An das Bodenmaterial werden Anforderungen gestellt, die sicherstellen sollen, dass sich die Bodenfunktionen nach dem Einbau so einstellen, wie es die Planung vorsieht. Insbesondere die Bodenzusammensetzung (Bodenart, Korngrößenverteilung) ist eine wichtige Voraussetzung für die spätere Funktionsfähigkeit der Rekultivierungsschicht.

Für die Gewährleistung einer hohen nutzbaren Feldkapazität kommen insbesondere die folgenden Bodenarten in Betracht:

- schluffiger Sand
- lehmiger Sand
- schluffiger Lehm
- sandiger Lehm

Eine vollständige Übersicht über die Eignung der unterschiedlichen Bodenarten bietet Abbildung 17.

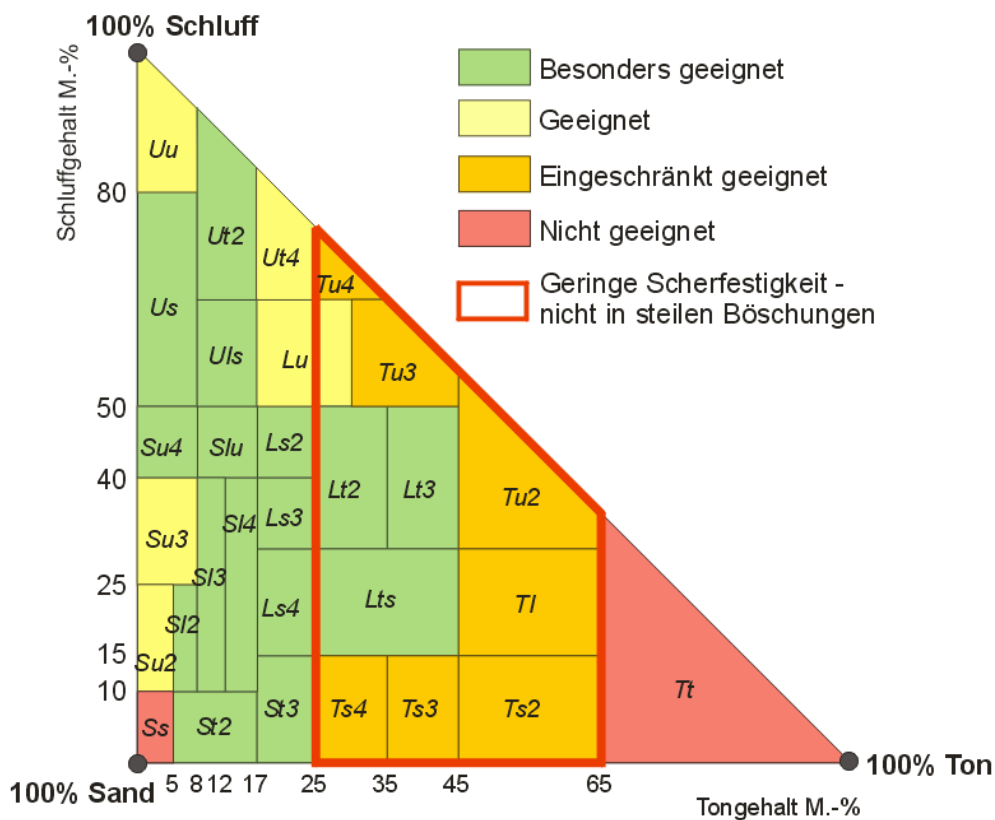


Abbildung 17 Eignung der Feinbodenarten als Rekultivierungsmaterial
Bodenarten nach [1]

Für die Oberbodenzone soll das Material einen ausreichenden Humusgehalt (2-8 Gew.-%) aufweisen. Humus hilft das Korngerüst zu stabilisieren und das Grobporenvolumen länger zu erhalten. Für die Unterbodenzone ist ein hoher Humusgehalt eher schädlich, da dieser zur Sauerstoffzehrung beiträgt; der Humusanteil soll hier nicht mehr als 1,5 Gew.-% (bestimmt als Glühverlust) betragen. Eine gezielte Steuerung des Humusgehaltes kann ggf. durch das Untermischen bzw. Einfräsen von Kompost in die Oberfläche erreicht werden. Das Einbringen von Nährstoffen ist entsprechend den Pflanzenerfordernissen zu begrenzen. Hinweise zur nutzungsgerechten Nährstoffeinbringung gibt das *LUA-Merkblatt Nr. 44 - Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden gemäß § 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung* [37].

Die Zwischenlagerung angelieferter Materialien in großen Mieten kann zu deutlichen Qualitätseinbußen führen. Die Beurteilung der Böden sollte dies berücksichtigen. Muss Bodenmaterial zwischengelagert werden, ist es vor Verdichtungen und Vernässungen zu schützen. Das Lager soll nicht mit Radfahrzeugen befahren werden. Die Miete sollte profiliert und geglättet werden. Zur Begrenzung der auflastbedingten Verdichtung sollte die Mietenhöhe bei humosem Bodenmaterial höchstens 2 m betragen [17].

Die Beurteilung der Eignung sollte sich in ihrem Umfang danach ausrichten, wie stark die Materialeigenschaften aufgrund wechselnder Herkunft oder Inhomogenität schwanken. In dieser Hinsicht sind gezielt hergestellte Bodenmaterialien aus Erdenwerken gegenüber wechselnden Lieferungen leichter zu überwachen.

3.4.2 Einbau

Die Maßgaben für den Einbau richten sich nach den im Einzelnen festgelegten Eigenschaften und Qualitäten der Rekultivierungsschicht.

Ist ein mehrschichtiger Aufbau der Rekultivierungsschicht vorgesehen, muss zwischen den betriebstechnischen und bodenkundlichen Vor- und Nachteilen eines mehrlagigen Einbaus abgewogen werden.

Der lagenweise Einbau bietet betriebstechnische Vorteile, birgt aber die Gefahr von unerwünschten Verdichtungseffekten. Eine ggf. vorgesehene untere Schicht des Unterbodens, die zum Schutz gegen Durchwurzelung stark verdichtet sein soll, kann auf diese Weise problemlos eingebaut werden. Sie sollte jedoch keinen stauenden Horizont bilden, um die Standsicherheit einer Böschung nicht zu gefährden. Die Schichten, die aufgrund ihrer Porenstruktur eine hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität erreichen sollen, sind gegen Verdichtungsprozesse äußerst empfindlich. Insbesondere die in den Grobporen vorliegende Luftkapazität reagiert sensibel auf Verdichtungsprozesse. Die Lagen sollten in einem Zuge eingebaut und nicht verdichtet werden. Das Einplanieren mit einer Raupe mit Moorblättern kann ggf. einen geeigneten Kompromiss zwischen betriebstechnischen und bodenkundlichen Erfordernissen darstellen. Benötigte Fahrstraßen können überhöht angelegt und zum Abschluss aufgelockert und rückgebaut werden.

Verdichtungen und mehrfache Überfahrten können zu Verdichtungshorizonten führen, die zu einer Stauwasserbildung neigen und damit sowohl den Wasserhaushalt stören als auch die Standsicherheit insbesondere von Böschungsfächen gefährden.

Alternativ kommt der Einbau der Rekultivierungsschicht in einer Lage in Betracht. Mit dieser Einbautechnik werden Überfahrten und Verdichtungen des Materials vermieden. Dies bietet aus bodenkundlicher Sicht Vorteile. Der Einbau mehrerer Schichten in einem Zuge ist allerdings bautechnisch schwierig und aufwändig, da Überfahrten des eingebauten Materials nicht möglich sind. Erfahrungen zeigen auch, dass bei dieser Einbauweise mit Problemen der Erosion und Standsicherheit zu rechnen ist. Ebenso ist damit zu rechnen, dass das zunächst sehr große Porenvolumen durch Sackungen mit der Zeit zurückgeht.

Die Anforderungen an das Bodenmaterial richten sich beim einlagigen Einbau nach den Anforderungen an die Unterbodenzone. Der Humusgehalt bzw. der Anteil organischer Bestandteile ist auf max. 1,5 Gew.-% (bestimmt als Glühverlust) zu begrenzen. Die gewünschte Erhöhung des Humusgehaltes an der Oberfläche kann durch oberflächennahes Einfräsen (bis 30 cm) von Kompost erreicht werden. Die Kompostzugabe sollte auf 2-5 l/m² (Frischmasse) begrenzt werden; bei nährstoffarmem Kompost (entsprechend Typ 1 nach *Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.*) kann die Zugabe auf das Doppelte erhöht werden. Für das Einfräsen ist ein Fahrzeug mit möglichst geringer Bodenpressung zu verwenden (Pistenraupe, Moorblätter).

Die gut geeigneten Bodenarten sind aufgrund ihres bindigen Anteils gleichzeitig sehr witterungsempfindlich. Eine Vernässung verhindert auf längere Zeit die Befahrbarkeit und damit die Möglichkeit des Einbaus. Der Einbau des Materials muss auf jeden Fall bei geringem Wassergehalt erfolgen, damit Verdichtungsvorgänge minimiert werden. Die Einbaudichte soll bei 1,2-1,5 g/cm³ liegen (mittlere Trockenrohdichte).

Die unvermeidliche Nachverdichtung der unverdichtet eingebauten Rekultivierungsschicht muss bei der Bemessung der Einbau durch eine angemessene Überhöhung berücksichtigt werden. Eine spätere Aufhöhung erhöht den Aufwand und verursacht unvermeidliche Verdichtungseffekte.

Durch nachbehandelnde Maßnahmen kann die Stabilität der Rekultivierungsschicht verbessert werden:

- Gegen Erosionsvorgänge der ungeschützten Oberfläche insbesondere in Böschungsbereichen kann ein leichtes Andrücken der Oberfläche vorteilhaft sein.
- Um zu verhindern, dass die unbedeckte Rekultivierungsschicht bei starken Niederschlägen verschlämmt und die Grobporen verschlossen werden, kann eine Mulchlage unmittelbar nach dem Einbau aufgebracht werden.
- Bei mehrlagigem Einbau der Rekultivierungsschicht soll der Oberboden unmittelbar nach dem Unterboden eingebaut werden, um eine Verschlämmung des Unterbodens zu vermeiden.
- Wesentlich für die Ausbildung einer guten Bodenstruktur und für die Mineralisierung von Nährstoffen sind Regenwürmer. Eine produktive Population von Regenwürmern stellt sich - außer bei sehr kleinen Flächen - nur bei einer gezielten Besiedlung zeitnah ein [30].

3.4.3 Qualitätssicherung

Im Folgenden werden Eigenschaften aufgelistet, die für Eignungsprüfungen grundsätzlich in Betracht kommen. Umfang und Ausmaß tatsächlich erforderlicher Eignungsprüfungen richten sich nach den Verhältnissen im Einzelfall. Grundsätzlich sollen Umfang und Ausmaß der Qualitätssicherung mit den Ansprüchen an die Wirksamkeit der Rekultivierungsschicht steigen. Mindestens für das Schutzniveau 3 sollten aufgrund der hohen Bedeutung für die Wirksamkeit die folgenden Eigenschaften grundsätzlich im Zuge einer Qualitätssicherung geprüft werden.

- Korngrößenzusammensetzung
- Zustandsgrenzen / Konsistenz, Wasseraufnahme
- Trockendichte
- Scherfestigkeit
- Durchlässigkeit, Infiltrationsvermögen
- Luftkapazität, Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt, nutzbare Feldkapazität
- Humusgehalt, Nährstoffgehalt
- Kalkgehalt, Eisengehalt.

Konkretere Hinweise zur Qualitätssicherung von Rekultivierungsschichten bieten die *GDA-Empfehlungen E 2-31*.

Die nutzbare Feldkapazität als dominanter Kennwert für das Wasserspeichervermögen lässt sich im eingebauten Zustand nicht bzw. unmittelbar nach dem Einbau nur eingeschränkt ermitteln, da sich die Porenverteilung nach dem Einbau durch Nachverdichtung und Umwandlung von Primär- in Sekundärporen noch deutlich verändert. Die Konsolidation der eingebauten Rekultivierungsschicht sowie die durch Pflanzen und Tieren ausgelöste Gefügebildung verändern die nutzbare Feldkapazität noch lange Zeit (mehrere Jahre) nach dem Einbau. Diese Prozesse müssen abgeschätzt werden, wenn die angelieferten Materialien auf deren Eignung beurteilt werden. Gleiches gilt in noch stärkerem Maße für die Luftkapazität. Mit Hilfe einer Korngrößenanalyse und der Trockenrohdichte können diese Werte jedoch abgeschätzt werden. Die Schätzwerte für die nutzbare Feldkapazität müssen um den Grobbodenanteil (> 2 mm) vermindert werden.

Eine geeignete Methode zur unmittelbaren Feststellung von Verdichtungshorizonten ist die Bestimmung des Eindringwiderstandes mit einem Penetrometer.

Sofern die Rekultivierungsschicht nach dem Schutzniveau 3 aufgebaut werden soll, sollte ein geeignetes Versuchsfeld angelegt werden, an dem Materialeigenschaften und Einbautechnik erprobt werden können.

3.5 Rekultivierungsmaßnahmen bei besonderen Standorten

Die harmonische Einbindung einer Deponie in die landschaftliche Umgebung kann es in Einzelfällen erforderlich machen, von den Sollvorgaben der Deponieverordnung abzuweichen, um die Rekultivierungsschicht an die Standortbedingungen der umgebenden Landschaftsbestandteile anzupassen. So kann z.B. im Umfeld von ehemaligen Kalksteinbrüchen die Wahl eines steinig oder steinig durchsetzten Rekultivierungsmaterials geeignet sein, eine umgebungstypische Vegetation zu fördern. Solche Materialien können naturbedingt die Anforderungen an die nutzbare Feldkapazität und eine möglichst hohe Evapotranspiration nicht erfüllen.

Die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht müssen in solchen Fällen die Vorgaben des Anhangs 1 DepV Nr. 2.3.1 an

- die Mindestmächtigkeit von 1 m (Ziffer 1.)
- den Schutz der unterliegenden Dichtungskomponenten (Ziffer 1.)
- die stoffliche Beschaffenheit des Materials (Ziffer 4.)

zwingend einhalten.

Von den Anforderungen an die nutzbare Feldkapazität (Ziffer 2.) und an eine möglichst hohe Evapotranspiration (Ziffer 3.) kann dagegen abgewichen werden, wenn die Anpassung des Bodensubstrats an die umgebende Landschaft dies erfordert.

Diese Abweichungen von den Sollvorgaben der Deponieverordnung sind nur dann zulässig, wenn die Schutzerfordernisse des unterliegenden Abdichtungssystems dennoch in vollem Umfang erfüllt werden kann. Dies ist z. B. bei Dichtungssystemen aus Kunststoffdichtungsbahnen und aus Deponieasphalt im Regelfall gegeben.

3.6 Anpflanzung von Bäumen auf Rekultivierungsschichten

Bei der Anpflanzung von Bäumen auf Deponieoberflächen ergeben sich besondere Schwierigkeiten, die bei der Bemessung und Gestaltung der Rekultivierungsschicht berücksichtigt werden müssen. Insbesondere die Wurzeltiefe der Bäume kann mit den Schutzerfordernissen der unter der Rekultivierungsschicht liegenden Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems kollidieren.



Abbildung 18 Bäume auf einer rekultivierten Boden- und Bauschuttdeponie

Das Eindringen von Wurzeln in die Entwässerungsschicht kann dazu führen, dass durch die Ausfüllung der abflusswirksamen Poren der dort benötigte Abflussquerschnitt durch die Wurzelmasse verringert wird. Sobald die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht unter das erforderliche Maß sinkt, wird die untere Zone der Rekultivierungsschicht eingestaut. In Böschungsbereichen kann das den Verlust der Standsicherheit der Böschung nach sich ziehen, da das Bodenmaterial unter Auftrieb schlechtere Standsicherheitsparameter aufweist.

Das Eindringen von Pflanzenwurzeln ist bei allen porösen Dichtungssystemen möglich, d.h. vor allem bei mineralischen Dichtungen (Tondichtungen, Bentonitmatten, *TRISOPLAST*, vergütete mineralische Dichtungen) und Kapillarsperren. Kunststoffdichtungsbahnen gelten bei ordnungsgemäßer Verlegung während ihrer Funktionsfähigkeit als durchwurzelungssicher. Asphaltbetondichtungen sind ähnlich wurzelbeständig.

Bei tonmineralischen Dichtungen treten zwei nachteilige Effekte auf, wenn Wurzeln in die Dichtungsmatrix eindringen:

- Die Wurzelkanäle bilden nach dem Absterben der Wurzeln bevorzugte Fließwege, durch die das Oberflächensickerwasser in den Deponiekörper eindringen kann. Je dicker die Wurzeln werden, um so stärker wird später die mögliche Durchströmung.
- Die Wurzeln entziehen der Dichtung einen Teil ihres Porenwassers. Die dadurch hervorgerufenen Kapillarkräfte sorgen für eine Kontraktion des Bodengefüges, die zur Rissbildung führt. Diese Risse bilden zum einen wiederum bevorzugte Fließwege und zum anderen bevorzugte Wurzelwege, die den Prozess verstärken.

In Auslegung der deponierechtlichen Vorgaben ist die Rekultivierungsschicht so mächtig zu gestalten, dass die Wurzeln der Bäume allenfalls in geringem, unschädlichem Maß in die Entwässerungsschicht und nicht in mineralische Dichtungssysteme eindringen.

Die umfangreichste Befassung mit dem Durchwurzelungsverhalten von Pflanzen, auch Bäumen, findet sich in den Wurzelatlanten von *Kutschera*, insbesondere im „Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher“ [31]. Aus den dort enthaltenen Beschreibungen des Wurzelverhaltens von Bäumen hat das LANUV eine Orientierungstabelle erstellt, die das Wurzelverhalten auf natürlichen Böden beschreibt (siehe Tabelle 18 im Anhang A 4). Demnach liegen gängige Wurzeltiefen zwischen 0,6 m und 3 m. Als besonders tief wurzelnde Bäume werden u. a. Stieleiche, Robinie und Feldulme genannt. Die hier beschriebenen Wurzeltiefen sind aber nur bedingt auf Deponiestandorte zu übertragen. Während natürlich gewachsene Böden in der Tiefe eine stark zunehmende Verdichtung aufweisen, sind Rekultivierungsschichten über die gesamte Mächtigkeit sehr locker geschüttet, um ein gutes Wasserspeichervermögen zu erreichen. Eine tiefgründige Lockerheit des Bodensubstrats kann zu einer erheblich tieferen Durchwurzelung führen. Auf sonnenexponierten Böschungen kann zudem die tiefgründige Erwärmung von Rekultivierungsschichten das Wurzelwachstum fördern.

Untersuchungen an Baumstämmen, die durch Sturmeinwirkungen entwurzelt wurden, zeigten, dass Schäden an Dichtungssystemen bei einer Überdeckung von 2,5 m und mehr unwahrscheinlich sind. Diese Untersuchungen beziehen sich auf natürliche Böden. Im Straßenbau wird für Leitungen im Bereich von Straßenbäumen eine Mindesttiefe von 2,5 m vorgeschrieben. Beide Situationen sind auf Deponien eingeschränkt übertragbar.

Auch auf Deponien wurde das Wurzelwachstum von Bäumen bereits untersucht. Unstrittig ist, dass mineralische Tondichtungen nicht an sich wurzelbeständig sind, wie mehrere Fälle von durchwurzelten Dichtungsschichten belegen. Es ist aber zu beobachten, dass stark verdichtete, intakte Tondichtungen einer Durchwurzelung durchaus standhalten können. Eine geschlossene Oberfläche ohne Ansätze von Rissbildung erschwert das Eindringen von Wurzeln offenbar so erheblich, dass mit einer Durchwurzelung nicht unbedingt zu rechnen ist.

Zur Begrenzung des Wurzelwachstums sind zwei Strategien bekannt: passive technische Maßnahmen als Wurzelwiderstand und aktive Maßnahmen zur Beeinflussung des Wurzelwachstums.

Als technische Wurzelsperren wurden verschiedene Systeme erprobt, deren Wirkung mit einer Ausnahme nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Die Ausnahme ist die Kunststoffdichtungsbahn nach *BAM* (2,5 mm), die durch Wurzeln eindeutig nicht durchdrungen werden kann, wenn sie intakt ist. Andere Techniken wie Verdichtungshorizonte aus scharfkantigem Gestein, Korngrößenprünge oder Kupfervliese haben sich nicht durchgehend bewährt. Grobkörnige Kiesschichten können wegen ihres Mineralstoffgehaltes sogar attraktiv auf Baumwurzeln wirken.

Als aktive Maßnahmen, die das Tiefenwachstum der Baumwurzeln beeinflussen können, gelten:

- Schaffung eines hohen Bodenwasservorrates oberhalb der Dichtungsebene
Diese Maßnahme geht einher mit einer extrem geringen Verdichtung, die wiederum das Tiefenwachstum anregt. Belastbare Ergebnisse über den Grad der Wirksamkeit liegen nicht vor.
- Gezielte Pflegemaßnahmen
Das Auf-den-Stock-Setzen bzw. die Niederwald-Kultur vermindern nach übereinstimmender Auffassung von Forstexperten das Tiefenwachstum von Wurzeln. Es liegen aber keine quantifizierten Erkenntnisse über die Wirksamkeit hinsichtlich der maximalen Wurzeltiefe vor.

Auf flach geneigten Deponieflächen mit ausreichender Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht (≥ 2 m) kann die Anlage einer Kurzumtriebsplantage mit geeigneten Hölzern eine technisch und ökonomisch sinnvolle Variante darstellen, wenn man sie zum Beispiel für die Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen nutzt.

3.7 Technische Funktionsschichten

3.7.1 Allgemeine Anforderungen an technische Funktionsschichten

Anhang 1 Nr. 2.3.2 DepV sieht vor, dass die Rekultivierungsschicht durch eine technische Funktionsschicht ersetzt werden kann, wenn die Deponieoberfläche nach der endgültigen Stilllegung als Verkehrsfläche, zur Bebauung oder in ähnlicher Weise genutzt werden soll.

Die Bemessung der technischen Funktionsschicht richtet sich dann ausschließlich nach den Schutzanforderungen der darunter liegenden Systemkomponenten. Es ist dabei sicherzustellen, dass

- die Entwässerungsschicht – soweit erforderlich – langfristig funktionsfähig bleibt und nicht durch Durchwurzelung, Kolmation oder mechanische Schädigung in ihrer Entwässerungsleistung beeinträchtigt wird
- mineralische Abdichtungsschichten vor Schäden durch Frost, Austrocknung oder Durchwurzelung geschützt sind.

Die stofflichen Anforderungen an das eingesetzte Material richten sich nach den Anforderungen an den Einbau von Ersatzbaustoffen, die außerhalb von Deponieflächen unter vergleichbaren Randbedingungen gelten würden. Das in der Entwässerungsschicht oder auf der Oberfläche gefasste Wasser muss nach den wasserrechtlichen Vorschriften eingeleitet werden können.

Für technische Funktionsschichten gilt, dass nach Aufgabe der die technischen Funktionsschicht begründenden Nutzung die Deponieoberfläche so herzustellen ist, dass die Schutzanforderungen dauerhaft erfüllt und eine natürliche Funktion des Standortes erreicht werden können. Dazu wird in der Regel der Aufbau einer Rekultivierungsschicht nach Kapitel 3.1 erforderlich sein.

3.7.2 Asphaltbetondecke

Für die Gestaltung der technischen Funktionsschicht aus Asphalt sind drei grundsätzliche Systemkonstellationen denkbar:

- als entkoppeltes System (siehe 3.7.2.1)
- als teil-entkoppeltes System (siehe 3.7.2.2)
- als gekoppeltes System (siehe 3.7.2.3)

3.7.2.1 Entkoppelte Funktionen

Als entkoppeltes System wird die vollständige Trennung der Funktion als Untergrund für eine Folgenutzung von der Dichtungsfunktion angesehen. Diese Trennung wird dadurch erreicht, dass das Abdichtungssystem unterhalb der Funktionsschicht in einer ausreichenden Tiefe (≥ 1 m) errichtet wird.

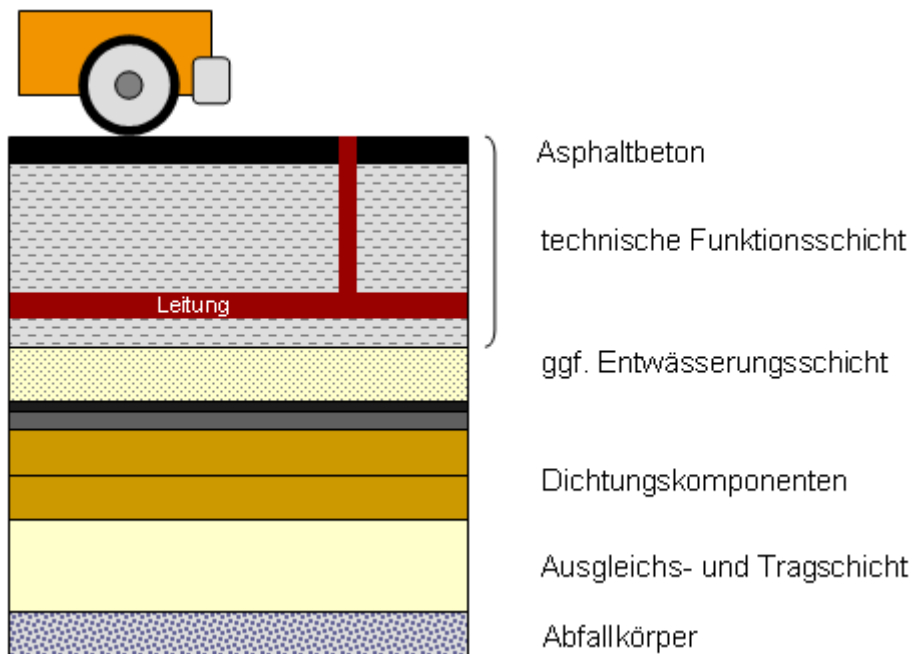


Abbildung 19 Schemadarstellung einer entkoppelten Funktionsschicht

Die Anforderungen an eine Asphaltbetondecke, die in einem solchen entkoppelten System oberhalb der Dichtungskomponenten als technische Funktionsschicht vorgesehen wird, richten sich ausschließlich nach den Erfordernissen der vorgesehenen Folgenutzung. Bei wasserundurchlässiger Ausbildung kann ggf. auch auf eine unterliegende Entwässerungsschicht verzichtet werden. Dabei ist zu beachten, dass eine ggf. unterliegende mineralische Dichtungsschicht durch eine ausreichende Zwischenschicht auch gegen Frosteinwirkungen zu schützen ist. Die stofflichen Anforderungen an die technische Funktionsschicht richten sich nach den allgemeinen Anforderungen von Anhang 1 Nr. 2.3.2 DepV (siehe 3.7.1).

Die Ausgestaltung einer technischen Funktionsschicht als entkoppeltes System erlaubt die Verlegung von Leitungen unterhalb der genutzten Oberfläche sowie flache Gründungen für Bauwerke.

Ein vollständig entkoppeltes System bietet ggf. günstigere Voraussetzungen, über die Entlassung der Deponie aus der Nachsorge zu entscheiden, ohne die Folgenutzung aufgeben zu müssen.

3.7.2.2 teil-entkoppelte Funktionen

Als teil-entkoppeltes System wird die teilweise Trennung der Funktion als Untergrund für eine Folgenutzung von der Funktion als Dichtungselement angesehen. Diese teilweise Trennung wird dadurch erreicht, dass in Kombinationsabdichtungen die erste Abdichtungskomponente aus Deponieasphalt hergestellt wird und gleichzeitig als Betriebsfläche für eine Folgenutzung genutzt wird. Die zweite Abdichtungskomponente wird unterhalb einer Distanzschicht (≥ 1 m) errichtet, so dass diese durch die Folgenutzung nicht beeinträchtigt wird. Eine technische Funktionsschicht oberhalb der Abdichtungskomponenten im engeren Sinne der DepV liegt hier nicht vor. Die Distanzschicht soll wenigstens gering durchlässig sein, um ggf. durch eine temporäre Fehlstelle tretendes Niederschlagswasser oder Leckagewasser aus Leitungen lateral abführen zu können.

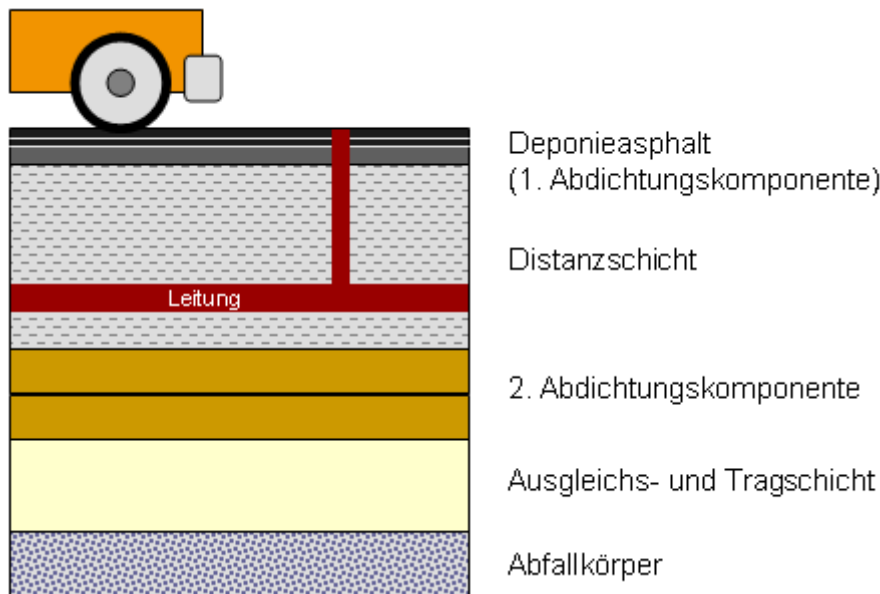


Abbildung 20 Schemadarstellung einer teil-entkoppelten Funktionsschicht

Die Anforderungen an die Asphaltbetondecke richten sich dann zum Einen nach deponietechnischen Erfordernissen, zum Anderen nach den statischen und sonstigen Erfordernissen der vorgesehenen Folgenutzung. Für die stofflichen Anforderungen an die Distanzschicht gelten die Anforderungen des Anhangs 3 Nr. 1 Tabelle 1 Zeile 4.1 DepV, da die Distanzschicht in die Abdichtungskomponenten integriert ist.

Die Ausgestaltung der Oberfläche als teil-entkoppeltes System erlaubt die Verlegung von Leitungen in der Distanzschicht unterhalb der genutzten Oberfläche sowie flache Gründungen für Bauwerke unter strengen Auflagen an die ständige Kontrolle und Instandsetzung der Leitungen und der Durchdringungen der Asphaltoberfläche.

Nach Aufgabe der Folgenutzung muss das Dichtungselement aus Deponieasphalt überprüft und instandgesetzt (Entfernung der Durchdringungen) werden, bevor die Rekultivierung der Oberfläche vorgenommen wird. Die Entlassung der Deponie aus der Nachsorge vor Aufgabe der Folgenutzung ist aus diesem Grunde in der Regel nicht möglich.

3.7.2.3 gekoppelte Funktionen

Als gekoppeltes System wird die Zusammenlegung der Funktionen als Untergrund für eine Folgenutzung und als Dichtungselement in einem System angesehen. Eine technische Funktionsschicht oberhalb der Abdichtungskomponenten im engeren Sinne der DepV liegt hier nicht vor.

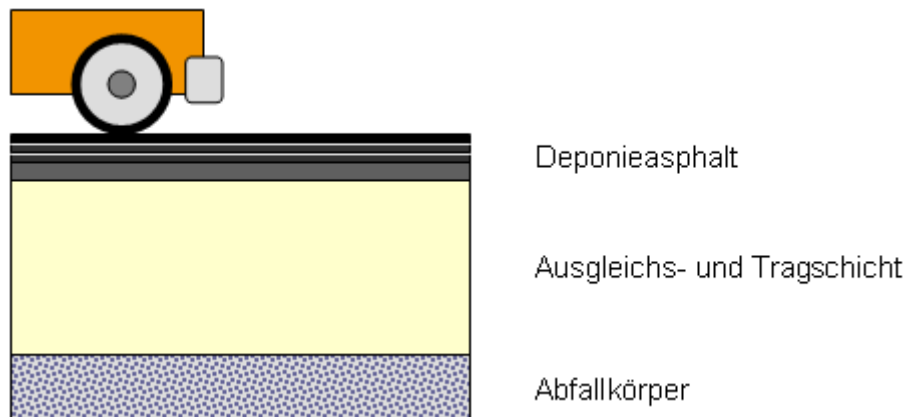


Abbildung 21 Schemadarstellung einer gekoppelten Funktionsschicht

Die Ausgestaltung einer Kombinationsabdichtung mit einer mineralischen Dichtungskomponente in einem gekoppelten System ist wegen der fehlenden Frostsicherheit in der Regel nicht möglich. In diesem Fall muss die zweite Abdichtungskomponente in einer frostunempfindlichen Bauart oder - in Orientierung an die Empfehlung der LAGA-Arbeitsgruppe *„Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und –abdeckungen“* - durch eine weitere Dichtungsschicht der Asphaltbetondichtung ersetzt werden.

In einem gekoppelten System sind Durchdringungen der Oberfläche und somit weder die Verlegung von Leitungen unterhalb der Oberfläche noch die Anordnung von Fundamenten möglich.

Nach Aufgabe der Folgenutzung muss das Dichtungselement aus Deponieasphalt überprüft und instand gesetzt werden, bevor die Rekultivierung der Oberfläche vorgenommen wird. Die Entlassung der Deponie aus der Nachsorge vor Aufgabe der Folgenutzung ist aus diesem Grunde in der Regel nicht möglich.

3.7.2.4 Anforderungen an die Asphaltbetondichtung einer Funktionsschicht

Die Tragfähigkeit der Asphaltbetondichtung muss die vorgesehene Folgenutzung - i.d.R. unter Erhöhung der Dicke der Tragschicht - schadlos ermöglichen. Die Oberfläche des Dichtungselements aus Deponieasphalt ist durch geeignete Maßnahmen gegen Witterungseinflüsse (UV-Bestrahlung und hohe Temperaturen) zu schützen. Das Auflager muss frostsicher ausgebildet sein. Sofern die vorgesehene Folgenutzung die Oberfläche einer mechanischen oder andersartigen Belastung aussetzt, muss eine zusätzliche Verschleißschicht vorgesehen werden, die für die Einhaltung der Mindestanforderungen nicht angerechnet wird.

Die Oberfläche ist bei gekoppelten und teil-entkoppelten Systemen regelmäßig auf Schäden (Risse, Verformungen) zu prüfen, und diese sind unverzüglich zu beheben.

3.7.3 Mineralische Abdeckung

Sofern die vorgesehene Folgenutzung die Herstellung einer regulären Rekultivierungsschicht mit einem geeigneten Bewuchs nicht zulässt, kann die Überdeckung des Deponiekörpers mit einer mineralischen Abdeckung erforderlich sein. Diese muss so aufgebaut sein, dass sie die unterliegenden Systemkomponenten wirksam schützt. Sofern eine mineralische Dichtung vorhanden ist, muss diese ausreichend vor Austrocknung und Frost geschützt werden. Dazu muss die mineralische Abdeckung eine ausreichende Mächtigkeit und ein ausreichendes Wasserspeichervermögen aufweisen, welches eine verstärkte Konvektion und Verdunstung von Porenwasser aus der mineralischen Dichtung verhindert.

Daneben muss die Abdeckung hinsichtlich der vorgesehenen Folgenutzung eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen und gegenüber Erosionen durch Wind und Wasser stabil sein. Gegebenenfalls ist die mineralische Abdeckung z.B. durch eine hydraulische Bindung oder durch konstruktive Maßnahmen zu stabilisieren.

Auf die Entwässerungsschicht kann dann verzichtet werden, wenn die mineralische Abdeckung selbst ein ausreichendes Ableitvermögen hat und eine Begünstigung der Austrocknung der mineralischen Dichtungsschicht durch Kapillarwirkung nicht gegeben ist.

3.7.4 Deckschicht aus Pflastersteinen oder Platten

Sofern die vorgesehene Folgenutzung die Herstellung einer regulären Rekultivierungsschicht mit einem geeigneten Bewuchs nicht zulässt, kann eine Überdeckung des Deponiekörpers mit einer Deckschicht aus Pflastersteinen oder Platten vorgesehen werden.

Sofern in den unterliegenden Systemkomponenten eine mineralische Dichtung vorhanden ist, muss diese ausreichend vor Austrocknung und Frost geschützt werden. Dazu muss eine mineralische Zwischenschicht in ausreichender Mächtigkeit und mit ausreichendem Wasserspeichervermögen vorhanden sein, welche eine verstärkte Konvektion und Verdunstung von Porenwasser aus der mineralischen Dichtung verhindert.

Sofern die unterliegenden Systemkomponenten keines Schutzes gegenüber Austrocknung oder Frost bedürfen, bestimmen sich die Anforderungen an die mineralische Zwischenschicht nach den konstruktiven Erfordernissen.

Auf eine Entwässerungsschicht kann verzichtet werden, wenn die Deckschicht das Einsickern von Niederschlagswasser ausreichend verhindert und die mineralische Zwischenschicht über ein ausreichendes Wasserableitvermögen verfügt.

Literatur

- [1] Ad-hoc-AG Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover, 2005
- [2] Albers, Müller: Kunststoffdichtungsbahnen als Abdichtungselement in Oberflächenabdichtungssystemen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Tagungsband Anforderungen an Deponieoberflächenabdichtungssysteme, Höxter, Band 06, 2007
- [3] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L182 vom 16.7.1999: Richtlinie 1999/31/EG des Rates über Abfalldeponien vom 26. April 1999
- [4] ATV-DVWK: Merkblatt Nr. 226 - Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei Flußdeichen, 1993
- [5] Baumgartl, Taubner, Horn: Wasserspannungsverläufe in Böden unter unterschiedlicher Nutzung als Entscheidungsgrundlage für die Prognose der Rissgefährdung mineralischer Dichtschichten, Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, Heft 5, Berlin, 1998
- [6] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste in der Bundesrepublik Deutschland: Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 4, Hannover, 1997
- [7] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung: Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Deponien und Altlasten, Labor IV.32, Berlin, 1999
http://www.bam.de/de/service/amtl_mitteilungen/abfallrecht/abfallrecht_medien/rili_zul_kunststoffdichtungsbahnen.pdf
- [8] Bundesanzeiger Nr. 99a: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993
- [9] Bundesgesetzblatt I: Verordnung über Deponien und Langzeitlager – Deponieverordnung – DepV vom 24. Juli 2002
- [10] Bundesgesetzblatt III/FNA 2129-27-2-13: Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung – AbfAbIV) vom 20.2.2001
- [11] Degenbeck: Einfluss eingedrungener Pflanzenwurzeln auf die Funktionsfähigkeit von Kunststoffdränmatten in der Oberflächenabdichtung von Mülldeponien, Müll und Abfall, Heft 1, 2000
- [12] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): Einsatz von Geotextilien im Deponiebau, Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten E 2-9, 2005
www.gdaonline.de

- [13] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen, Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten E 2-20, 2003
www.gdaonline.de
- [14] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): Grundsätze des Qualitätsmanagements, Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten E 5-1, 1997
www.gdaonline.de
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen, November 1995
- [16] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Zulassungsgrundsätze für Dichtungsschichten aus natürlichen mineralischen Baustoffen in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien, Dezember 1997
- [17] Deutsches Institut für Normung: DIN 19731 - Verwertung von Bodenmaterial, Berlin, 1998
- [18] Deutsches Institut für Normung: DIN 19667 – Dränung von Deponien – Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb, Ausgabe Mai 1991, Berlin, 1991
- [19] Egloffstein, T.: Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, ICP-Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 2000
- [20] Gartung, Neff: Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke", Bautechnik 77, Heft 9, 2000
- [21] Gebert, Pfeiffer (Hrsg): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 63, Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg, 2010, ISSN:0724-6382
- [22] Gemeinsames Ministerialblatt GMBI: Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall – Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991
- [23] Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann: Vergleichbarkeit von Kombinationsabdichtungssystemen mit wasserglasvergüteten Dichtungssystemen mit und ohne aktive Rißsicherung - Abschlußbericht über ein Fachgespräch am 7.9.1994 im MURL, Aachen, 1995
- [24] Giurgea, Hötzl: Langzeituntersuchungen von alternativen Oberflächenabdichtungssystemen in Großlysimetern: Deponie Karlsruhe-West, LGA-Grundbauinstitut Nürnberg, Veröffentlichung 82, Nürnberg, 2004
- [25] Henken-Mellies: Wirksamkeit und Wasserhaushalt einer mineralischen Deponie-Oberflächenabdeckung: Ergebnisse von Langzeituntersuchungen an einem Großlysimeter, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002

- [26] Henken-Mellies, Gartung: Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach, Müll und Abfall, Ausgabe 1, 2002
- [27] Holzlöhner: Rechnerische Abschätzung der Austrocknungsgefährdung von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponieabdichtungssystemen, Schriftenreihe Angewandte Geologie, Heft 45, Karlsruhe, 1996
- [28] Horn: Analyse des Austrocknungsverhaltens von mineralischem Bodenmaterial anhand von Laboruntersuchungen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [29] Horn: Auswirkung von periodischer Austrocknung und Wiederbewässerung auf die Schrumpfrissbildung von künstlich erzeugten Gemischen aus groben starren Körnern und quellfähigem Feinmaterial, Müll und Abfall, Heft 10, 2003
- [30] Konold, Wattendorf u.a.: Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Re-kultivierungsschichten, Universität Freiburg, Freiburg, 2004
- [31] Kutschera: Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt, 1960
- [32] Kutschera, Lichtenegger: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher, Leopold Stocker Verlag, Graz, 2002
- [33] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Arbeitspapiere der Arbeitsgruppe zu Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen sowie weiteren Fragen, 2000
- [34] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) / Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): LANUV-Arbeitsblatt 6 - Mineralische Deponieabdichtungen, Augsburg/Recklinghausen, 2009
- [35] Landesamt für Wasser und Abfall NRW: Richtlinie Mineralische Deponieabdichtungen, Abfallwirtschaft NRW, Nr. 18, Düsseldorf 1993
- [36] Landesumweltamt NRW: Merkblatt zur Anwendung der TA Siedlungsabfall bei Deponien, Merkblatt Nr. 12, Essen, 1998
- [37] Landesumweltamt NRW: Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden gemäß § 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Merkblätter Nr. 44, Essen, 2004
- [38] LAGA: Empfehlungen der LAGA-Arbeitsgruppe Infiltration von Wasser in den Depo-niekörper und Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen, 1999
- [39] LAGA: Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme, LAGA-ad-hoc-AG 'Deponie-technische Vollzugsfragen', 2005
- [40] LAGA: Grundsätze für die Eignungsbeurteilung unter Verwendung von Abfällen her-gestellter mineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Depo-nien, LAGA-ad-hoc-AG 'Deponietechnische Vollzugsfragen', 2005

- [41] LAGA: Beurteilung der grundsätzlichen Eignung der Kombikapillarsperre, 2007, www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de
- [42] LAGA: Eignungsbeurteilung von METHA-Material zur Herstellung von mineralischen Dichtungen, 2008 www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de
- [43] LAGA: Eignungsbeurteilung von Trisoplast zur Herstellung von mineralischen Dichtungen, 2009 www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de
- [44] Linert: Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen - Umweltverträglichkeitsprüfung und Möglichkeiten der Optimierung
- [45] Maier-Harth, Melchior: Überprüfung der Wirksamkeit der mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [46] Maier-Harth, Melchior: Überprüfung der Wirksamkeit der mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen, Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, IGB, 1999
- [47] Melchior, Berger, Vielhaber, Miehlich: Großlysimeter Deponie Hamburg-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Dichtungen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [48] Melchior, Steiner, Boels: Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungen mit Trisoplast - Zwischenergebnisse, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [49] Melchior, Vielhaber: Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [50] Neff: Untersuchung von Schrumpfrissen in einem mineralischen Abdichtungskörper, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [51] Ramke u.a. (Hrsg.): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Tagungsband, Fachhochschule Lippe und Höxter, Höxter, 2002
- [52] Rödl, Heyer, Ranis: Feldstudien zum Langzeitverhalten mineralischer Deponieabdeckungen in Bayern, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [53] Scheffer, Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin, 2002

- [54] Steinert, Flöter, Melchior: Vergleichende Laboruntersuchungen des Austrocknungs- und Durchwurzelungsverhaltens von bindigen mineralischen Dichtungen aus Gesschiebemergel und aus Trisoplast, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [55] Vielhaber, Melchior, Miehlisch: Felduntersuchungen zur temperaturinduzierten Austrocknungsgefährdung einer Kombinationsdichtung im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Hamburg-Georgswerder, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter, 2002
- [56] Witt, Zeh: Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 81, Stuttgart, 2004
- [57] Witt, Zeh, Fabian: Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen, Müll und Abfall, Heft 11, 2004
- [58] Zepp: Bericht über das alternative Oberflächenabdichtungssystem auf der ZD Castrop-Rauxel, Ruhr-Universität Bochum, 2005

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Dichtwandsystem bei einer Deponie in Haldenlage	12
Abbildung 2	Abmessungen für ein Probefeld	15
Abbildung 3	Verschweißen zweier Kunststoffdichtungsbahnen	26
Abbildung 4	gelegtes Geogitter in einer steilen Böschung	27
Abbildung 5	Dränmatten in unterschiedlicher Bauweise	28
Abbildung 6	Rekultivierungsschicht mit Zoneneinteilung	31
Abbildung 7	geosynthetische Tondichtungsbahn	33
Abbildung 8	Verdichtung einer TRISOPLAST-Dichtungsschicht	36
Abbildung 9	Einbau von Deponieasphalt mit einem Fertiger	37
Abbildung 10	Aufbau Boden-Natur-Dichtung	38
Abbildung 11	Einbau einer Kapillarsperre	43
Abbildung 12	Dichtungskontrollsektor in einer Kapillarsperre	46
Abbildung 13	Schemadarstellung Gestaltungsvorschlag für ein Kontrollfeld	48
Abbildung 14	Gasbrunnen für eine Aerobisierungsmaßnahme	49
Abbildung 15	Gras- und Krautvegetation auf einer rekultivierten Deponie	50
Abbildung 16	Bodenwasservorrat im Jahresverlauf	53
Abbildung 17	Eignung der Feinbodenarten als Rekultivierungsmaterial	63
Abbildung 18	Bäume auf einer rekultivierten Boden- und Bauschuttdeponie	68
Abbildung 19	Schemadarstellung einer entkoppelten Funktionsschicht	71
Abbildung 20	Schemadarstellung einer teil-entkoppelten Funktionsschicht	72
Abbildung 21	Schemadarstellung einer gekoppelten Funktionsschicht	73
Abbildung 22	Durchwurzelungsintensität im Tiefenprofil	95
Abbildung 23	pF-Kurve verschiedener Bodenmaterialien	97
Abbildung 24	Wasserspannung in einer Rekultivierungsschicht	99
Abbildung 25	Jahresniederschlagssummen in Nordrhein-Westfalen in mm	101
Abbildung 26	Starkniederschlagsgebiete in NRW	102
Abbildung 27	Frosttiefezonen in Nordrhein-Westfalen	104

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Anforderungen und Empfehlungen für die geologische Barriere	9
Tabelle 2	Anforderungen und Empfehlungen für geotechnische Barrieren	10
Tabelle 3	Anforderungen an eine bifunktionale Zwischenabdichtung	14
Tabelle 4	Übersicht über mögliche Abdichtungssysteme (Basis)	18
Tabelle 5	Übersicht über mögliche Abdichtungskomponenten (Oberfläche)	25
Tabelle 6	Sicherheitsbeiwerte für die Bemessung von Dränmatten	29
Tabelle 7	empfohlener Abminderungsfaktor A_1 zur Bemessung von Dränelementen	29
Tabelle 8	Voraussetzungen für die Nachbehandlung	48
Tabelle 9	Durchwurzelungstiefen typischer Deponiepflanzen	52
Tabelle 10	Empfehlungen zu Schutzniveaus für die Rekultivierungsschicht	57
Tabelle 11	Anforderungen und Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 1	58
Tabelle 12	Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 2	59
Tabelle 13	Empfehlungen für eine Rekultivierungsschicht mit Schutzniveau 3	60
Tabelle 14	Anforderungen und Empfehlungen an die Wasserhaushaltsschicht	61
Tabelle 15	Durchwurzelungsintensitätsstufen	93
Tabelle 16	Bodenkennwerte verschiedener Bodenarten	98
Tabelle 17	Kreise und kreisfreie Städte in Starkniederschlagsgebieten	103
Tabelle 18	Wurzeltiefen mitteleuropäischer Baumarten	105

Stichwortregister

Aerobisierung	48	Vervollständigung	9
Asphalt		Geosynthetische Tondichtungsbahn	32
Basisabdichtung	19	Geotechnische Barriere	12
Oberflächenabdichtung	36	Gesamttongehalt.....	9, 10
technische Funktionsschicht.....	71	Grubendeponie	7
Ausgleichsschicht		Grundwasserspiegel	7
Oberflächenabdichtung	24	Hotspots.....	62
Austrocknung.....	53, 89, 90	Humusanteil	51
BAM.....	17, 19, 26, 27, 28, 31, 45	Humusgehalt.....	65
Bentokies		Infiltration	48
Basisabdichtung	21	Kapillarsperre	
Oberflächenabdichtung	40	Kombikapillarsperre	34
Bentonitmatte	32	konventioneller Aufbau	42
Bodenmaterial	63	Kontrollfeld.....	47
Kennwerte	98	Konvektionssperre	18, 19
Zwischenlagerung	64	Kunststoffdichtungsbahn	
Boden-Natur-Dichtung.....	38	Basisabdichtung.....	18
Bodenwasser	53	Kontrollfeld	47
CHEMOTON		Oberflächenabdichtung.....	26
Basisabdichtung	22	Kunststoffdränelement.....	28
Oberflächenabdichtung	41	LAGA	32, 33, 35, 36, 39
Deponiegas	61	Luftkapazität.....	64
Deponieumschließung.....	12	METHA	34
DGGT	16, 31	Methanoxidationsschicht	61
DIBt.....	23, 37, 41	Mineralische Abdichtung	
Dichtungskontrollsystem.....	45	Basisabdichtung.....	20
Dränschicht.....	46	Oberflächenabdichtung.....	42
elektrisch.....	45	Nachbehandlung.....	48
Kapillarsperre	46	Nährstoffe	64, 95
Dichtwandsystem	12	nutzbare Feldkapazität.....	53, 56, 58, 59, 60, 61, 63, 96
Dränelement	28	Oberbodenzone	50, 64
Dränmatte.....	28	Permanenter Welkepunkt	96
Durchlässigkeitsbeiwert.....	86	pF-Kurve	96
Durchwurzelung.....	51, 68, 92	Probefeld.....	15
Dynagrout		Qualitätsmanagement.....	16, 62, 66
Basisabdichtung	21	Rekultivierungsschicht	
Oberflächenabdichtung	40	allgemein.....	50
DYWIDAG-Mineralgemisch		Bemessung	55
Basisabdichtung	23	Einbau	64
Oberflächenabdichtung	41	Substrat.....	50, 63, 95
Eignungsbeurteilung.....	17	Schadstoffrückhaltevermögen	8
Entwässerungsschicht		Schutzgebiete	7
Basisabdichtung	24	Schutzschicht.....	31
Oberflächenabdichtung	44, 91	Standort	7
Feldkapazität	96	Standortsicherheit	16
Frost.....	54, 104	System Kugler	
Geogitter.....	27	Basisabdichtung.....	20
Geokunststoffe	16, 26	Oberflächenabdichtung.....	39
Geologische Barriere.....	8, 86		
Nachbesserung	9		

Technische Funktionsschicht	70	Wasserhaushaltsschicht	60
TRISOPLAST	35	Wasserspannung	96, 98
Unterbodenzone	50, 64	Wühltiere	54
Untergrund	7	Wurzeltiefe	51, 69, 95
Versuchsfeld	15	Zulassung	17
Wasserglas	20, 39		

Anhang

A 1 Hinweise zur Permeabilitätsberechnung der geologischen Barriere

Erläuterung der Zeichen

d	Mächtigkeit einer Schicht [m]
h_w	Überstauhöhe über der betrachteten Schicht [m]
l	hydraulischer Gradient [-]
k	Durchlässigkeitsbeiwert einer Schicht [m/s]
k_m	harmonisches Mittel des Durchlässigkeitsbeiwertes mehrerer Schichten [m/s]
q	fiktiver Vergleichswert für die Durchsickerungsrate [m^3/m^2a]
v	Filtergeschwindigkeit der Durchsickerung [m/s]
ψ	Permeabilität [1/s]

Erläuterung der Indizes

GB	Geologische Barriere
GT	Geotechnische Barriere
R	Regelaufbau
ÜD	Überdeckungsschicht

Durchlässigkeitsbeiwert

Der Durchlässigkeitsbeiwert k oder k_f ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der frei bewegliches Grundwasser oder Sickerwasser ein bestimmtes Lockergestein durchströmt. Der k -Wert entspricht der Filtergeschwindigkeit, die bei einem hydraulischen Gefälle von 1 (druckfreie Durchsickerung) erreicht wird.

Es werden in diesem Leitfaden zwei Werte der Durchlässigkeit unterschieden:

- **Laborwert k**
Durchlässigkeitsbeiwert nach der Ermittlung im Laborversuch
- **Gebirgsdurchlässigkeit k^***
Durchlässigkeitsbeiwert unter natürlichen Verhältnissen. Im Festgestein liegt die Gebirgsdurchlässigkeit k^* aufgrund natürlicher Inhomogenitäten um ein Vielfaches über der im Laborversuch ermittelten Durchlässigkeit k des Gesteins.

In den Berechnungsbeispielen wird durchgehend der Laborwert k verwendet.

In Festgesteinen ist die Durchlässigkeit mittels Feldversuchen zu ermitteln. Als Anforderungen bzw. als Vergleichswerte gelten dann die den Laborwerten entsprechenden Gebirgsdurchlässigkeiten k^* für Lockergesteine.

Permeabilität

Als Rechenwert der Permeabilität wird oft der Quotient aus Durchlässigkeitsbeiwert und Mächtigkeit (Permittivität) einer Schicht ermittelt.

$$\psi = \frac{k}{d} \quad [1/s]$$

Dieser Quotient erlaubt den einfachen Vergleich verschiedener einschichtiger Dichtungssysteme bei einer bestimmten Druckhöhe. Bei im Verhältnis zur Schichtdicke geringen Überstauhöhen wirkt die Mächtigkeit der Schicht allerdings nur sehr untergeordnet auf die Durchsickerungsrate, da mit ihr das Druckpotenzial nahezu linear ansteigt. In diesen Fällen bietet der Quotient Ψ einen wenig aussagekräftigen Orientierungswert. Für die Beurteilung der geologischen Barriere werden deshalb in diesem Arbeitsblatt Vergleichswerte für die Durchsickerungsrate q zu Grunde gelegt.

Fiktiver Vergleichswert q für die Durchsickerungsrate

Der Vergleichswert q wird jeweils für einen konkreten hydraulischen Gradienten berechnet. Dieser bestimmt sich aus einem hydrostatischen Überstau von 0,10 m für die Deponiekategorie 0 (Fehlen einer Basisabdichtung) und von 0,03 m für die Deponieklassen I – III (Vorhandensein einer Basisabdichtung).

$$q = I * k * 3600 * 24 * 365 = \frac{d + h_w}{d} * k * 3600 * 24 * 365 \quad \text{in } m^3/m^2 a$$

Beispiel: geologische Barriere der Deponiekategorie I nach DepV:

Mächtigkeit: $d = 1,00 \text{ m}$

k-Wert: $k = 1 * 10^{-9} \text{ m/s}$

Überstauhöhe $h_w = 0,03 \text{ m}$

$$q = I * k * 3600 * 24 * 365 = \frac{1,0 + 0,03}{1,0} * 1 * 10^{-9} * 3600 * 24 * 365 = 0,0325 \frac{m^3}{m^2 a}$$

Fall 1 – Aufnahme des hydraulischen Drucks in der obersten Schicht

Dieser Fall liegt vor, wenn eine relativ gering durchlässige Schicht über einer stärker durchlässigen Schicht liegt und der hydraulische Überdruck nicht hoch genug ist, um sich bis in die untere Schicht auszuwirken. Die Filtergeschwindigkeit in der oberen Schicht (mit Überdruck) ist dann kleiner als in der unteren Schicht im freien Gefälle ($I=1$).

Ein typischer Fall ist die künstliche Verbesserung oder Vervollständigung einer geologischen Barriere mit einer neu aufgetragenen, gering durchlässigen Schicht. Die Durchsickerungsrate richtet sich dann ausschließlich nach der oberen Schicht.

Die Anforderungen an eine geotechnische Barriere (d_{GT} , k_{GT}), die die gleiche hydraulische Durchlässigkeit entfaltet wie das Regelsystem, errechnen sich wie folgt:

$$k_{GT} = \frac{(d_R + h_D)}{d_R} \cdot k_R \cdot \frac{d_{GT}}{(d_{GT} + h_D)}$$

- d_{GT} , k_{GT} : Mächtigkeit und k-Wert der geotechnischen Barriere
 d_R , k_R : Mächtigkeit und k-Wert einer Schicht nach Regelaufbau
 h_D : hydraulischer Druck auf dem Planum

Fall 2 – Aufnahme des hydraulischen Drucks in beiden Schichten

Dieser Fall liegt immer vor, wenn eine durchlässige Schicht über einer relativ gering durchlässigen Schicht liegt. Er liegt auch vor, wenn die Filtergeschwindigkeit unter Ansatz des hydraulischen Gradienten in der oberen Schicht höher ist als die Filtergeschwindigkeit bei freiem Gefälle in der unteren Schicht. Die untere Schicht wirkt dann beim Abbau des hydraulischen Druckes mit.

Der mittlere k-Wert k_m errechnet sich dann als gewichtetes harmonisches Mittel der einzelnen k-Werte:

$$\frac{\Sigma d}{k_m} = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{k_n} \quad \text{und} \quad k_m = \frac{\Sigma d}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{k_n}}$$

- Σd : Summe der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten
 k_m : mittlere Durchlässigkeit (Durchlässigkeit einer einzelnen Vergleichsschicht)
 d_1, \dots, d_n : Mächtigkeiten der einzelnen Schichten 1 ... n
 k_1, \dots, k_n : Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten 1 ... n

Der Vergleichswert q ergibt sich unter Verwendung dieses mittleren k-Wertes k_m zu:

$$q = k_m \cdot \frac{\Sigma d + h_D}{\Sigma d} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365$$

- q : Vergleichswert für die Durchsickerungsrate in $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ a}$
 h_D : hydraulischer Druck auf dem Planum

A 2 Schutz mineralischer Dichtungskomponenten

Die folgenden Ausführungen über die Probleme der austrocknungsbedingten Rissbildung und Durchwurzelung gelten für Oberflächenabdichtungssysteme mit mineralischen Dichtungsschichten ohne Kombination mit einer Kunststoffdichtungsbahn. In der Kombinationsdichtung prägen sich diese Probleme im Wesentlichen erst nach der alterungsbedingten Schädigung der Kunststoffdichtungsbahn und dann im verminderten Maße aus.

Aus einer Vielzahl von Ausgrabungen an Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien ist bekannt, dass mineralische Dichtungsschichten eine hohe Anfälligkeit insbesondere gegenüber Austrocknung und Durchwurzelung aufweisen. Beide Erscheinungen können die Wirksamkeit einer mineralischen Dichtung in wenigen Jahren deutlich mindern bzw. gänzlich aufheben.

Die Schäden lassen sich aber weitgehend vermeiden bzw. auf ein vertretbares Maß mindern, wenn den einzelnen Schadensfaktoren durch geeignete konstruktive Maßnahmen oder gezielte Schutzmechanismen begegnet wird. Dazu müssen die schädlichen Prozesse beschrieben werden.

Rissbildung durch Schrumpfung

Bindige mineralische Dichtungsschichten neigen bei Austrocknung zur Bildung von Schrumpfrissen, die die Durchlässigkeit erheblich erhöhen und somit zum Teil-Versagen der Dichtungsschicht führen können. Bei wassergesättigten Bodenschichten setzt bei einem Wasserverlust zuerst die Normalschrumpfung ein, in der die Volumenänderung des Bodens dem Volumenverlust des Porenwassers folgt. Sobald das Porenwasser die Poren nicht mehr vollständig ausfüllen kann, beginnt die Phase der Restschrumpfung, in der Luft in den Porenraum eindringt. Das verbleibende Porenwasser bildet in den Poren Menisken, die ihre Oberflächenspannung auf das Korngerüst übertragen (Wasserspannung) und dieses unter Zugspannung setzen. Die Zugspannung wird dabei umso größer, je weniger große Poren vorhanden sind. Da der Bodenkörper dieser Zugspannung nicht ungehindert durch Kontraktion folgen kann, entstehen Spannungsrisse, die im Boden vertikal verlaufen.

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung wird mit der sogenannten pF-Kurve beschrieben. Insbesondere bindige Böden mit einem hohen Anteil quellfähiger Minerale weisen eine hohe Sensitivität der Wasserspannung gegenüber Wassergehaltsänderungen auf. Bereits eine relativ geringe Abnahme des Wassergehaltes kann eine sehr hohe Wasserspannung auslösen. Es ist davon auszugehen, dass in konventionellen Tondichtungen ab einer Wasserspannung von 40-50 kPa eine relevante Rissbildung eintritt [47], [54], [56].

Der Prozess der Rissbildung ist nur zum Teil reversibel. In einer anschließenden Quellung des Bodens bei Zufuhr von Wasser wird der ursprüngliche Verbund des Korngerüsts nicht wieder erreicht. Das wieder eingetretene Porenwasser lagert sich bevorzugt an den Rissflächen an, wo es bei der nächsten Austrocknung leichter mobilisiert wird. Bei wiederholter Austrocknung und Wiederbefeuchtung setzt eine Gefügebildung ein, die mit einer größeren hydraulischen Durchlässigkeit einher geht [29].

Das Auftreten von schrumpfungsbedingten Rissen lässt sich durch zwei Maßnahmen verhindern oder wenigstens begrenzen.

- das Vermeiden von Zugspannungen
- das Vermeiden der Austrocknung

Vermeidung von Zugspannungen

Die Bodenmatrix weist eine innere Zugfestigkeit auf, die sich nach den Bedingungen hinsichtlich Wassergehalt und Verdichtung beim Einbau richtet. Erst Wasserspannungen, die größer sind als die beim Einbau der Dichtungsschicht, bzw. Wassergehalte, die kleiner sind als die beim Einbau, führen zu Zugspannungen. Ein Teil dieser Zugspannungen kann über die Zugfestigkeit aufgefangen werden, bevor Schrumpfungsrisse entstehen. Der Einbauwassergehalt sollte folglich so gewählt werden, dass er möglichst im Bereich der minimal zu erwartenden Bodenwassergehalte liegt. Gut verdichtete tonreiche, mineralische Dichtschichten weisen eine Zugfestigkeit von 20-30 kPa auf, so dass mit einer Rissbildung bei Wasserspannungen unter 20 kPa nicht zu rechnen ist. Je nach Einbauwassergehalt kann die verträgliche Wasserspannung auch höher liegen. Die Wahl eines gemischtkörnigen Materials mit einem geringeren Anteil an quellfähigen Mineralen wirkt sich ebenfalls günstig auf die Verringerung von Zugspannungen aus; hier können Wasserspannungen bis 50 kPa überstanden werden [56].

Austrocknung

Die Verminderung des Wassergehaltes in der mineralischen Dichtungsschicht kann verschiedene Ursachen haben:

- der kapillare Aufstieg des Porenwassers in die überliegenden Schichten bei Fehlen einer kapillarbrechenden Schicht
- der Transport von Wasserdampf in der Entwässerungsschicht
- der Transport von Wasserdampf durch die unterliegende Ausgleichsschicht bzw. Gasdränschicht
- der direkte Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln.

Kapillarer Aufstieg

Sofern die Rekultivierungsschicht durch Evaporation oder Transpiration soviel Wasser verloren hat, dass sie bis in die untere Zone ausgetrocknet ist, wird die entstehende Wasserspannung einen kapillaren Wassertransport aus der darunter liegenden mineralischen Dichtungsschicht nach sich ziehen. Eine Entwässerungsschicht unterbricht diesen Wassertransport, da ihre Körnung eine kapillarbrechende Wirkung entfaltet. Viele (schlechte) Beispiele von Oberflächenabdichtungssystemen, bei denen auf die Anordnung einer Entwässerungsschicht verzichtet wurde, zeigen, dass dieser kapillare Aufstieg zu Austrocknungserscheinungen

nungen bis in große Tiefen führen kann. Alle Untersuchungsbeispiele, in denen Austrocknungserscheinungen trotz relativ mächtiger Rekultivierungsschicht festgestellt worden sind, wiesen keine Entwässerungsschicht auf. Alles weist darauf hin, dass das Vorhandensein einer kapillARBrechenden Entwässerungsschicht zwingend erforderlich ist, um Austrocknungsprozesse zu vermeiden [25].

Auf der anderen Seite lässt sich der kapillare Aufstieg von Wasser auch dadurch mindern, dass die Wasserspannung an der Unterseite der Rekultivierungsschicht in verträglichen Grenzen gehalten wird. Wenn das Wasserspeichervermögen der Rekultivierungsschicht hinreichend groß ist, kann der Wasserverlust durch Evaporation und Transpiration aus dem Speicher der Rekultivierungsschicht gedeckt werden, ohne dass Wasser aus der unterliegenden mineralischen Dichtungsschicht abgezogen wird.

Wasserdampftransport in der Entwässerungsschicht

Die in der Regel nicht wassergesättigte Entwässerungsschicht kann insbesondere bei großen, luftgefüllten Poren erheblich zum Entzug von Wasser aus der mineralischen Dichtungsschicht beitragen [24]. An der Grenzfläche zwischen mineralischer Dichtung und Entwässerungsschicht geht das Porenwasser in einen dampfförmigen Zustand über und kann mittels Konvektion oder Diffusion in der Entwässerungsschicht nach außen transportiert werden.

Mit drei konstruktiven Maßnahmen lässt sich der konvektive Transport minimieren:

- Die Entwässerungsschicht kann so gestaltet werden, dass die Luftströmung reduziert wird und sich niedrige Dampfdrücke nicht von außen in die Entwässerungsschicht übertragen können.
- Die Kornabstufung der Entwässerungsschicht kann so gewählt werden, dass die kapillARBrechende Wirkung (bei entsprechender Dimensionierung) erhalten bleibt, die Poren jedoch so klein werden, dass der Strömungswiderstand den konvektiven Transport von Wasserdampf erheblich behindert. Eine Kornabstufung von 4-8 mm [56], [57] erfüllt diesen Zweck. Eine feine Kornabstufung führt auch dazu, dass die Entwässerungsschicht nach einer Durchsickerung länger feucht bleibt und die mineralische Dichtungsschicht benetzt [47].
- Eine Kunststoffdichtungsbahn ist eine absolut wirksame Konvektions- und Diffusionsperre für Wasserdampf. Auch bei einer alterungsbedingten Schädigung ist davon auszugehen, dass die Kunststoffdichtungsbahn eine gegenüber Dampf flächenhaft wirkende Konvektionssperre darstellt, da die Übertrittsfläche selbst nach Auftreten von Sprödrissen gering sein wird. Dies gilt nicht gleichermaßen für Rissbildungen infolge größerer Verformungen.
- Insbesondere bei geotextilen Entwässerungsschichten muss mit einem erheblichen Anteil von Wasserdampfkonnektion gerechnet werden [5]. Eine zusätzliche feinkörnige Mineralschicht stellt einen wirksamen Feuchtigkeitsspeicher für die mineralische Dichtungsschicht dar (Kapillarschutzschicht). Beim Schutz von geosynthetischen Tondichtungsbahnen in Kombination mit Dränmatten wurden hiermit gute Wirkungen erzielt [24], [56], [57].

Wasserdampftransport in der Ausgleichsschicht

Ein Wasserentzug in der mineralischen Dichtungsschicht kann auch über die unterliegende Ausgleichsschicht bzw. die Gasdränschicht erfolgen [56].

Bei Deponiekörpern, die aufgrund von Abbauprozessen noch eine relevante Wärmeentwicklung aufweisen, wird ein temperaturinduzierter Dampfdruckgradient im Winter vorliegen und von unten nach oben - in Richtung fallender Temperaturen - gerichtet sein. In diesem Fall wird Feuchtigkeit aus dem Deponiegas zur mineralischen Dichtungsschicht transportiert. Eine Austrocknung ist in dieser Phase nicht zu erwarten.

Bei Deponiekörpern, die keine exothermen Abbauprozesse aufweisen bzw. bei denen diese zum Erliegen gekommen sind, kommt es zu wechselnden konvektiven und diffusen Transportvorgängen. Während des Sommers liegt ein Temperaturgradient in Richtung des Abfallkörpers vor, der dazu führt, dass Wasser aus der mineralischen Dichtungsschicht in den Deponiekörper transportiert wird. Erfahrungen zeigen, dass sich dieser Prozess im Winter in der Regel soweit umkehrt, dass es zu keiner bzw. allenfalls zu einer sehr geringen Verlagerung von Wasser aus der Dichtung kommt. Es bietet sich aber an, nach Einstellung der aktiven Gasfassung die ggf. passive Fassung des Restgases so einzurichten, dass es nicht zu einer konvektiven Luftströmung in der Gasdränage kommen kann [55].

Durchwurzelung

Eine Durchwurzelung der Oberflächenabdichtung, die bis in die mineralische Dichtungsschicht reicht, wird in der Regel zum Versagen der Dichtungsschicht führen. Zwei Effekte lassen die Dichtungswirkung erheblich abnehmen.

- Die Wurzeln bilden in der mineralischen Dichtungsschicht ein Gefüge mit bevorzugten Wasserleitbahnen. Insbesondere beim Absterben der Wurzeln verbleiben wassergängige Röhren, die die Durchlässigkeit erheblich heraufsetzen.
- Die Pflanzen entziehen der mineralischen Dichtung Wasser und verursachen so hohe Wasserspannungen, dass über die so aufgebrachten Zugspannungen eine weitere Aggregation der bindigen Matrix einsetzt und wassergängige Klüfte gebildet werden.

Die Durchwurzelungstiefe hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen wird die Durchwurzelungstiefe von der einzelnen Pflanzenart bestimmt. Zum anderen wird die tatsächliche Durchwurzelung auch von örtlichen Gegebenheiten beeinflusst. So können das Wasserangebot und die geomechanische Bodenbeschaffenheit die Durchwurzelung fördern oder einschränken.

Die typischerweise auf Deponieoberflächen anzutreffenden Pflanzen weisen unterschiedliche natürliche Durchwurzelungstiefen auf, die sich in einem Bereich zwischen 0 und 4 m bewegen [20], [45]. Die Durchwurzelungsintensität nimmt mit der Tiefe stetig ab. Grundsätzlich muss man mit einer Durchwurzelung bis in vier Metern Tiefe rechnen, wenn die Durchwurzelung nicht durch gezielte Maßnahmen beeinflusst wird.

Die nachfolgende Tabelle benennt die Kenngrößen der Durchwurzelungsintensität nach AG Boden [1].

Tabelle 15 Durchwurzelungsintensitätsstufen
nach AG Boden [1]

Index	Bezeichnung	Wurzeln/dm ²
W0	keine Wurzeln	0
W1	sehr schwach	1 - 2
W2	schwach	3 - 5
W3	mittel	6 - 10
W4	stark	11 - 20
W5	sehr stark	21 - 50
W6	extrem stark bis Wurzelfilz	> 50

Faktoren die die Durchwurzelungstiefe und -intensität beeinflussen, sind im Folgenden beschrieben.

Pflanzeninventar

Das Wurzelbild von Pflanzen ist zum Teil genetisch bestimmt, zum Teil wird es durch die örtlichen Gegebenheiten geprägt. Die genetisch vorgesehene Wurzeltiefe korreliert nur sehr vage mit der oberirdischen Wuchshöhe von Pflanzen. Bäume weisen aufgrund biomechanischer Erfordernisse die höchsten Wurzeltiefen auf. Aber auch ausgesprochen kleine Pflanzen können erhebliche Wurzeltiefen erreichen (z.B. Löwenzahn). Gräser weisen in der Regel eine geringere Durchwurzelungstiefe auf als Kräuter. Durch eine fachgerechte Ansaat und häufige Mahd kann in den ersten Jahren ein dichter Grasbestand erreicht werden, der die Ansiedlung tiefwurzelnder Kräuter für einige Zeit erschwert.

Aufgrund des zu erwartenden Arteninventars ist bei einer dauerhaften Entfernung von tiefwurzelnden Pflanzen davon auszugehen, dass das Wurzelwachstum bei einer Tiefe von 1,50-1,80 m generell nur noch schwach ausgeprägt ist, im Einzelfall aber deutlich tiefer reichen kann [41], [49], [51]. Bäume erreichen ohne gezielte Maßnahmen zur Begrenzung des Wurzelwachstums Tiefen von 2,5-4 m. Gegebenenfalls können Maßnahmen zur Begrenzung des Tiefenwachstums der Wurzeln getroffen werden (z.B. "Auf den Stock setzen"); diese müssen in der Nachsorgephase fortgeführt werden.

Wasserversorgung

Die Durchwurzelungsintensität der einzelnen Pflanzen ist nicht homogen über die Bodentiefe verteilt. Die stärkste Wurzelbildung vollzieht sich in einer Bodentiefe von weniger als 1,5 m [20]. Von dort decken die Pflanzen den größten Teil ihres Wasserbedarfs ab. Tiefer gehende Wurzeln dienen hauptsächlich der Überbrückung von Trockenperioden.

Wird also der Wurzelraum gut und dauernd mit Wasser versorgt, so wird sich die Wurzelmasse auf diesen Raum konzentrieren und ein Tiefenwachstum zumindest erheblich eingeschränkt. Trocknet der Wurzelraum dagegen zeitweise ab, werden Pflanzen, soweit sie nicht genetisch dazu völlig ungeeignet sind, ihre Wurzeln in größere Tiefen vortreiben um sich dort mit Wasser zu versorgen (Trockenstress) [56]. Für die meisten, typischerweise auf Deponien anzutreffenden Pflanzen sollte ein Wurzelraum von ca. 1 m ausreichend sein, um bei guter

Wasser- und Nährstoffversorgung die pflanzenphysiologischen Mindestanforderungen zu erfüllen.

Eine optimale Wasserversorgung kann vereinfacht angenommen werden, wenn im effektiven Wurzelraum ein Wassergehalt gegeben ist, der bei 50-80 % der nutzbaren Feldkapazität liegt (Empfehlung des *Deutschen Wetterdienstes* für die Landwirtschaft). Für eine geeignete Rekultivierungsschicht mit günstigen Eigenschaften kann eine effektive Durchwurzelungstiefe von ca. 1,0 m und eine nutzbare Feldkapazität von ca. 200 mm/m angenommen werden. Der Wassergehalt für eine optimale Versorgung liegt dann bei ca. 100-160 mm (50-80 % nFK) über dem permanenten Welkepunkt. Bei einem Wassergehalt von mehr als 30 % ist die Wasserversorgung nicht optimal aber i.d.R. ausreichend. Daraus kann geschlossen werden, dass bei einem Wassergehalt von mehr als 60 mm (30 % nFK) über dem Permanenten Welkepunkt (bei einem geeigneten Rekultivierungsboden) - Pflanzen keinen Trockenstress erleiden und damit keinen ausgesprochenen Anreiz haben in tiefere und feuchtere Bodenzonen zu wurzeln. Es sollte deshalb sichergestellt werden, dass in der Rekultivierungsschicht dieser Wassergehalt am Ende der Trockenperiode nicht unterschritten wird.

Die in der Trockenperiode zwischen Mai und Oktober dem Boden durch Evaporation und Transpiration maximal entzogene Wassermenge kann je nach regionaler Lage (in Nordrhein-Westfalen) zu 100 bis 200 mm abgeschätzt werden; in den ausgesprochen niederschlagsreichen und kühleren Höhenlagen Nordrhein-Westfalens kann diese Menge auch niedriger liegen. Die nutzbare Feldkapazität sollte das maximale Wasserbilanzdefizit (im Sommer) ausgleichen können und darüber hinaus den Restwassergehalt von 60 mm sicher stellen, der als Schutz gegen Trockenstress erforderlich ist. Folglich ist im Allgemeinen eine gesamte nutzbare Feldkapazität von ca. 160-260 mm erforderlich [45]. Als unterer Richtwert für einen ausreichenden Wasserhaushalt kann der Wert von 180 mm dienen. Bei guten Rekultivierungsschichten mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität kann das mit einer Mächtigkeit von 1,0 - 1,3 m [42] erreicht werden. Natürlicherweise tiefer wurzelnde Pflanzen werden ohne weitere Vorkehrungen allerdings auch diese Tiefe überschreiten (s.o.).

Ein weiter gehender Schutz gegen eine tiefere Durchwurzelung ist zu erreichen, wenn am Ende der stärksten zu erwartenden Trockenperiode noch ein Wassergehalt deutlich im optimalen Bereich (100-160 mm) vorliegt. In diesem Fall ist von einer erforderlichen gesamten nutzbaren Feldkapazität von 200-300 mm auszugehen. Als Richtwert für einen optimalen Wasserhaushalt kann der Wert von 250 mm dienen.

Günstig für die Begrenzung der Durchwurzelung ist es, wenn in der Entwässerungsschicht kein attraktives Wasserangebot zur Verfügung steht. Die Entwässerungsschicht sollte daher so mächtig sein, dass die obere Zone überwiegend trocken ist. Eine in dieser Hinsicht ebenfalls günstige, grobe Körnung weist allerdings Nachteile hinsichtlich des konvektiven Wasserdampftransportes auf.

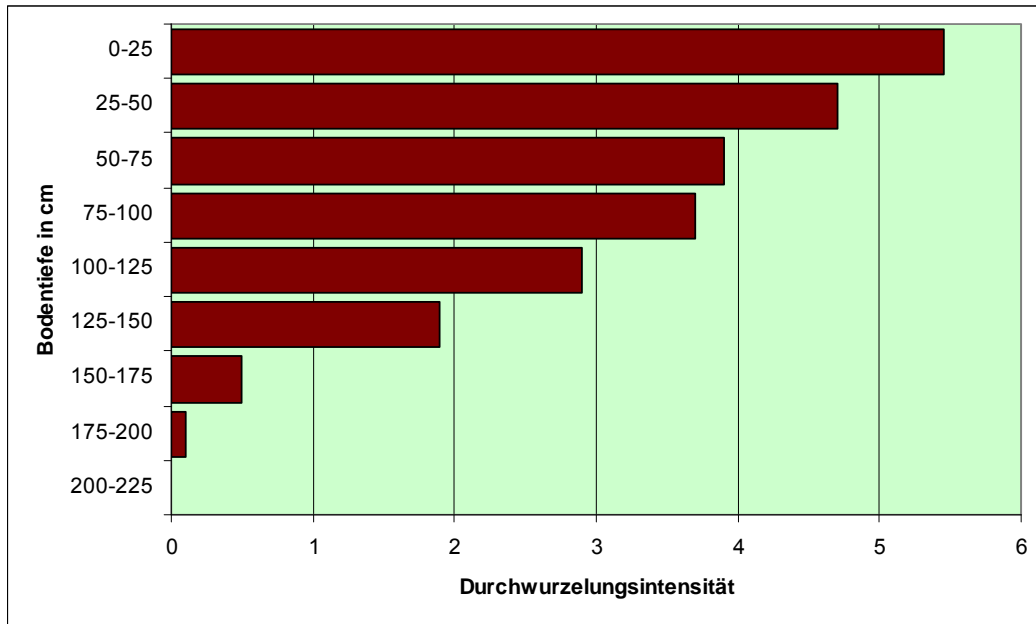


Abbildung 22 Durchwurzelungsintensität im Tiefenprofil
 Beispiel [46] - Durchwurzelungsintensität nach AG Boden

Nährstoffhaushalt

Ähnlich wie ein gutes Wasserangebot die Wurzelbildung anregt und auf die ergiebigen Bodenzonen fokussieren kann, ist es - allerdings in geringerem Maße - möglich, die Wurzelbildung über die Verteilung von Nährstoffen zu steuern.

Eine weitgehende Konzentration der Nährstoffe in den oberen Bodenzonen führt dazu, dass die Wurzeln hier den größten Teil ihres Wurzelwerkes ausbilden, vorausgesetzt, dass auch das Wasserangebot in diesem Bereich ausreichend ist. Bei Rekultivierungsschichten lässt sich eine solche Nährstoffanreicherung leicht durch die begrenzte Zugabe von Kompost in der oberen Zone erreichen, die sich auch positiv auf den Wasserhaushalt auswirkt. In einem Fall konnte die Durchwurzelungstiefe mit dieser Maßnahme um 20-30 cm verringert werden [41].

Substrat

Aus Feldbeobachtungen ist erkennbar, dass eine verdichtete Bodenlage im Vergleich zu einer entsprechenden, locker gelagerten Bodenschicht sehr viel geringer durchwurzelt wird. Ungeschädigte mineralische Dichtungsschichten weisen zum Teil keine oder nur sehr wenig Wurzelmasse auf, da die hohe Verdichtung für Pflanzen unattraktiv ist [51]. Aus diesen Beobachtungen resultiert die Empfehlung als Wurzelsperre eine untere, hoch verdichtete Schicht einzubauen. Es ist zu vermuten, dass die Neigung von verdichteten Bodenschichten zur Durchwurzelung nicht losgelöst von anderen Faktoren beurteilt werden kann. Verstärkter Trockenstress oder unzureichende Bodenmächtigkeit können Wurzeln auch in verdichteten Schichten tiefer treiben. Auch dieses belegen Ausgrabungen in mineralischen Dichtungsschichten, die mit unzureichenden Rekultivierungsschichten überdeckt waren. Besonders

gravierend ist in dieser Hinsicht das Vorhandensein von Schrumpfrissen, die den Pflanzenwurzeln das Eindringen in die mineralische Dichtung erheblich erleichtern.

Ein deutlicher Sprung in der Porengröße zwischen zwei Bodenzonen kann dazu führen, dass das Wurzelwachstum an der Grenzfläche abbricht. Dieser Effekt kann jedoch von anderen Faktoren überlagert und aufgehoben werden, wie die Durchwurzelung auch von grobkörnigen Entwässerungsschichten zeigt.

Wasserhaushalt in der Rekultivierungsschicht

Ein gezielt aufgebauter Wasserhaushalt ist der wirkungsvollste Ansatz zur Erreichung der vorgesehenen Schutzziele.

Ein hohes Wasserspeichervermögen bildet dafür die wichtigste Voraussetzung. Das Wasserspeichervermögen begründet sich in dem Gesamtvolumen der Mittelporen, die im Wurzelraum vorhanden sind und Wasser über längere Zeit speichern können.

Das Vermögen eines Bodens, Wasser zu speichern, wird in der Bodenkunde im Wesentlichen mit drei Parametern beschrieben:

- Die **Feldkapazität FK** beschreibt den Wassergehalt in Vol.-% oder mm/m, bei dem ein Boden das in seinen Poren enthaltene Wasser weitestgehend gegen die Schwerkraft zu halten vermag. Die zugehörige Wasserspannung liegt bei ca. 6 kPa (pF 1,8); der zugehörige Porendurchmesser liegt bei 50 µm.
Bei dieser Wasserspannung wird auch die Luftkapazität bestimmt, die das in diesem Zustand vorhandene Bodenluftvolumen kennzeichnet.
- Der **Permanente Welkepunkt PWP** beschreibt den Wassergehalt in Vol.-% oder mm/m, bei dem das in den Poren gespeicherte Wasser von der Saugspannung der Pflanzen nicht mehr erfasst werden kann. An diesem Punkt beginnen Pflanzen irreversibel zu welken. Die zugehörige Wasserspannung liegt bei ca. 1.600 kPa (pF 4,2); der zugehörige Porendurchmesser liegt bei 0,2 µm.
- Die **nutzbare Feldkapazität nFK** bezeichnet die Differenz der beiden vorgenannten Wassergehalte in Vol.-% oder mm/m und somit den Anteil des Porenvolumens, das in der Lage ist, Wasser längerfristig zu speichern und an die Pflanzen abzugeben. Dies sind Poren mit einem äquivalenten Durchmesser zwischen 0,2 und 50 µm.

Grobkörnige und enggestufte Böden weisen eine geringe Feldkapazität auf, da die großen Poren einen Großteil des Wassers sofort versickern lassen. Sehr feinkörnige Böden (Tone) weisen zwar eine hohe Feldkapazität auf, jedoch ebenso einen hohen Permanenten Welkepunkt. Die nutzbare Feldkapazität ist daher auch hier nicht sehr hoch. Optimal sind Böden mit einem großen Anteil von Mittel- und engen Grobporen, z.B. Lehm- und Schluffböden.

Die nachstehende Abbildung zeigt die pF-Kurve, die die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung wiedergibt. Die Wasserspannung pF ist als Logarithmus aufgetragen. Der grau unterlegte Bereich grenzt die nutzbare Feldkapazität ab. Links des grauen Bereiches kann das Porenwasser nicht gegen die Schwerkraft gehalten werden. Rechts des grauen Bereiches kann das Porenwasser von Pflanzen nicht mehr aufgenommen werden.

Der Schluffboden weist im grauen Bereich die höchste Spannweite des Wassergehaltes und somit das höchste Wasserspeichervermögen auf.

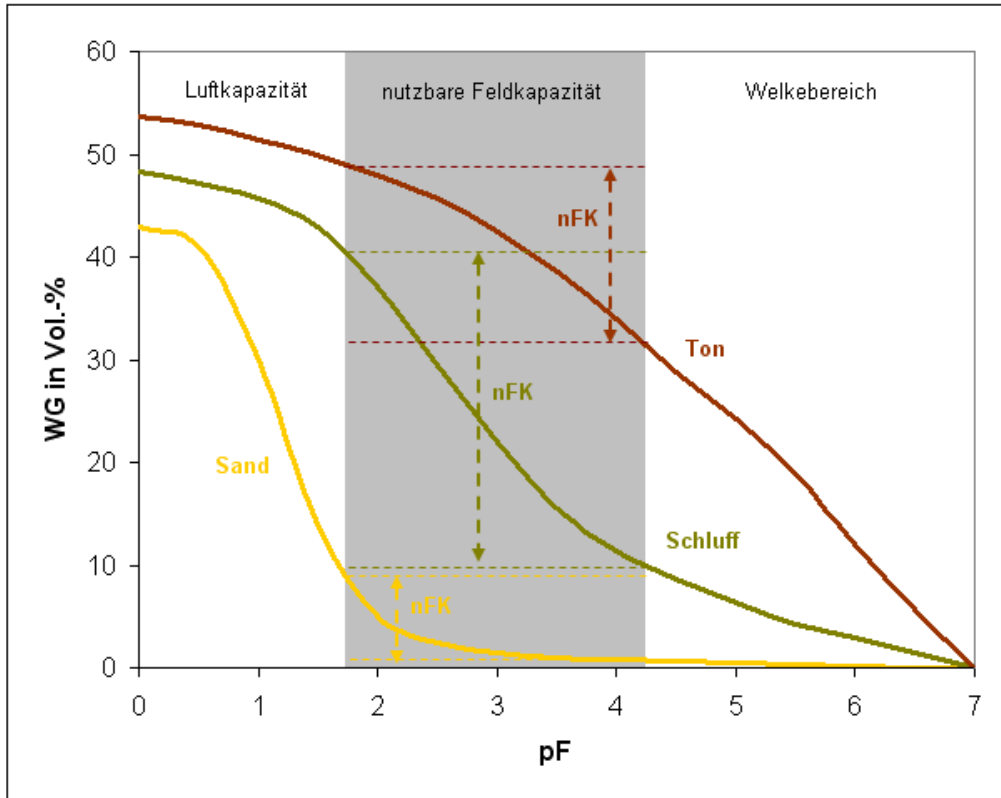


Abbildung 23 pF-Kurve verschiedener Bodenmaterialien

Die punktierten Linien geben den Bereich der nutzbaren Feldkapazität an

Die folgende Tabelle 16 gibt eine Übersicht über typische Werte der nutzbaren Feldkapazität für verschiedene Bodenarten.

Tabelle 16 Bodenkennwerte verschiedener Bodenarten

bei mittlerer Trockenrohdichte

PWP: Wassergehalt am Permanenten Welkepunkt

FK: Wassergehalt an der Feldkapazität

nFK: nutzbare Feldkapazität (FK-PWP)

Bodenart	Kurz	PWP Vol.-%	FK Vol.-%	nFK Vol.-%
Mittelsand	mS	4,0	10,0	6,0
reiner Sand	Ss	4,0	11,0	7,0
mittel schluffiger Sand	Su3	8,0	29,0	21,0
stark schluffiger Sand	Su4	9,0	32,0	23,0
schluffig lehmiger Sand	Slu	12,0	33,0	21,0
mittel sandiger Lehm	Ls3	17,0	33,0	16,0
schluffiger Lehm	Lu	19,0	36,0	17,0
reiner Schluff	Uu	12,0	38,0	26,0
sandiger Schluff	Us	10,0	35,0	25,0
sandig lehmiger Schluff	Uls	13,0	35,0	22,0
stark schluffiger Ton	Tu4	20,0	37,0	17,0
reiner Ton	Tt	30,0	43,0	13,0

Die Wasserbilanz einer Rekultivierungsschicht ist durch die folgenden Größen gekennzeichnet:

- Niederschlag
- Oberflächenabfluss / lateraler Abfluss
- Verdunstung
- Transpiration über Pflanzen
- Abfluss in die Dränage
- kapillarer Aufstieg aus der Dränschicht
- Porenwasservolumen

Idealerweise fällt in regenreichen Zeiten ein Wasserüberschuss an, der im Porenvolumen gespeichert wird. Wird die Feldkapazität der Rekultivierungsschicht überschritten, entsteht ein Abfluss über die Dränschicht. In Trockenzeiten wird der Wasserentzug durch Verdunstung und Transpiration aus dem Porenwasservolumen gespeist. Dabei verringert sich der Wassergehalt ausgehend von der Oberfläche in zunehmende Tiefen und führt zu entsprechenden Wasserspannungen. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht diesen Prozess sehr anschaulich. Hier wurde der Wasserspannungsverlauf der Rekultivierungsschicht und der mineralischen Dichtungsschicht über mehrere Jahre aufgezeichnet.

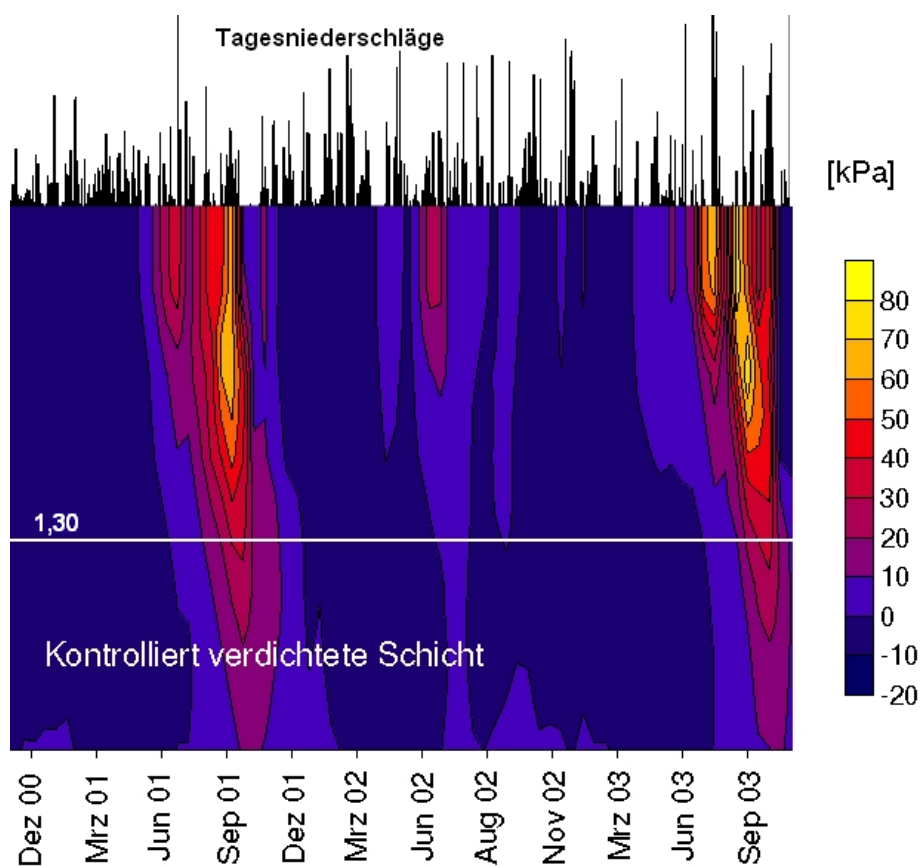


Abbildung 24 Wasserspannung in einer Rekultivierungsschicht
 Zeitlicher Verlauf in einem Beispiel
 Quelle: Ruhr-Universität Bochum, Prof. H. Zepp

Mit dem Wiedereinsetzen von Niederschlag wird der Wassergehalt wieder aufgestockt und die Wasserspannungen werden entsprechend abgebaut. Wasserhaushaltsberechnungen ergaben für einige Deponien in Nordrhein-Westfalen (im Rheinland und im Münsterland) in der außergewöhnlich warmen Sommerperiode des Jahres 2003 Wasserbilanzdefizite zwischen 125 und 190 mm.

Aus dem in Abbildung 24 dargestellten Beispiel ist erkennbar, dass Wasserspannungen von 200 hPa (20 kPa) schon unter normalen klimatischen Verhältnissen und guter nutzbarer Feldkapazität (200 mm) durchaus Tiefen von mehr als 1,5 m erreichen können [50], [58]. Dieses Fortschreiten geschieht umso schneller, je geringer die nutzbare Feldkapazität ist, und reicht umso tiefer, je leichter der kapillare Aufstieg fällt. Vergleichbare Ergebnisse liefern eine Lysimeteruntersuchung auf der *Deponie Karlsruhe-West* [24] und die Untersuchung eines Versuchsfeldes in Aurach [26].

Durch das Vorhandensein von tief wurzelnden Pflanzen mit hoher Transpirationsleistung kann sich der Verlauf der Wasserspannungen auch ungünstiger einstellen, da sich dann zum kapillaren Wasserentzug noch der direkte Entzug durch die Pflanzen addiert.

Das Fortschreiten einer Austrocknungsfront kann wirksam verhindert werden, wenn die nutzbare Feldkapazität so hoch ist, dass auch ungewöhnliche Trockenperioden ohne Abtrocknung der unteren Zone der Rekultivierungsschicht überstanden werden. Bei einer maximalen Wasserspannung von 50 kPa an der Untergrenze der Rekultivierungsschicht in Ver-

bindung mit einer kapillarbrechenden Entwässerungsschicht sollte die Gefahr der Übertragung von schädlichen Wasserspannungen auf die mineralische Dichtung weitgehend gebannt sein.

Ein günstiger Wasserhaushalt lässt sich durch die folgenden Bedingungen fördern:

- hohe Infiltrationsleistung der Oberbodenzone, damit ein möglichst hoher Anteil des Niederschlags die Rekultivierungsschicht speist.
- große Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht und eine hohe nutzbare Feldkapazität, damit möglichst viel Wasser langfristig gespeichert werden kann.
- angepasstes Pflanzeninventar, das durch eine gute Transpirationsleistung die Tiefenversickerung begrenzt, jedoch die Rekultivierungsschicht in Trockenzeiten nicht zu stark belastet
- Das Fehlen einer Entwässerungsschicht erscheint zwar für den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht selbst günstig, führt jedoch zur Übertragung von Wasserspannungen auf die unterliegende Dichtungsschicht.

A 3 Meteorologische Informationen

Niederschlag



Abbildung 25 Jahresniederschlagssummen in Nordrhein-Westfalen in mm

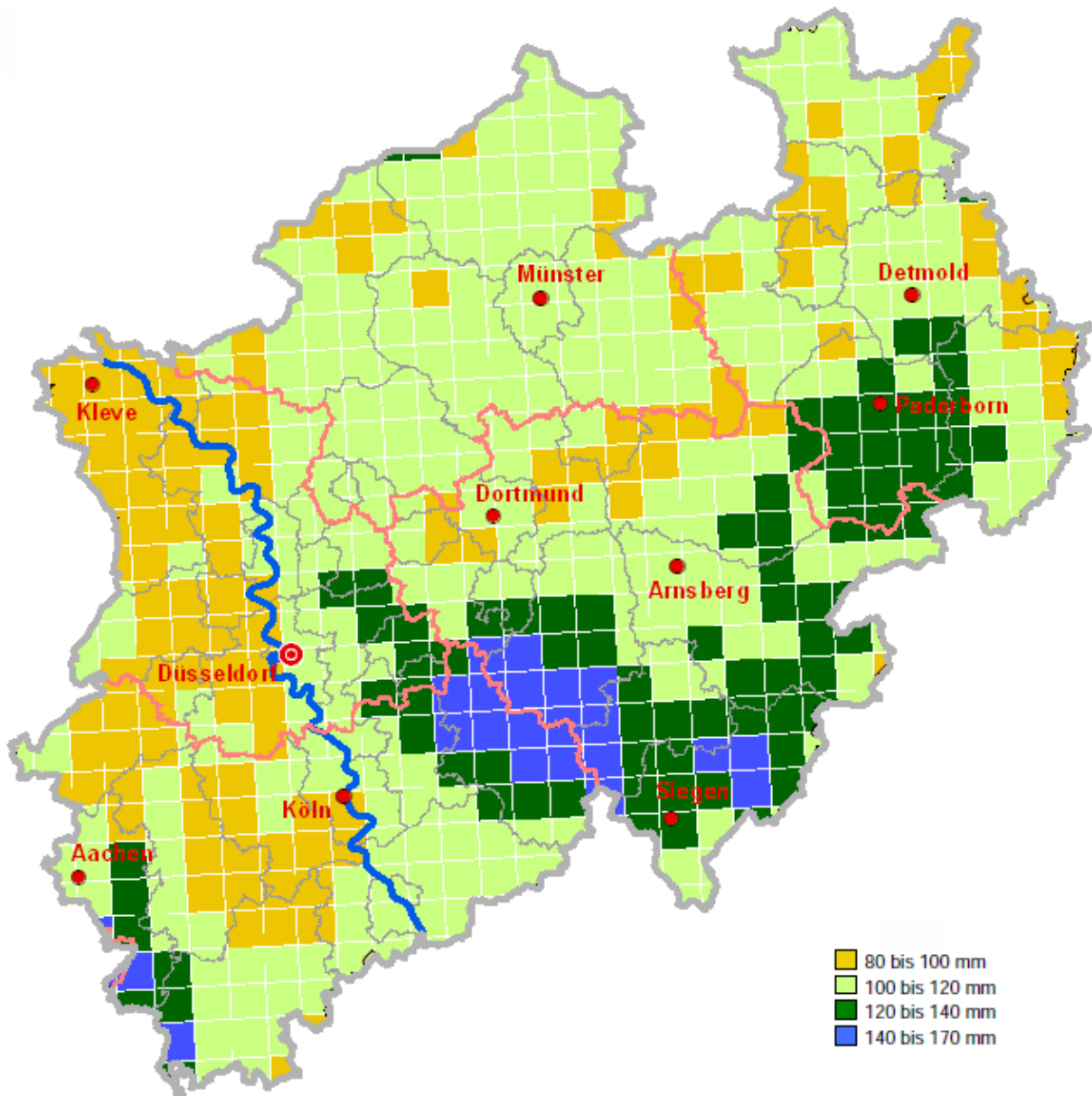


Abbildung 26 Starkniederschlagsgebiete in NRW
regionalisierte Niederschlagssummen für einen Zeitraum von 72 Stunden bei einer
Jährlichkeit von 100 Jahren
Quelle: Deutscher Wetterdienst

Tabelle 17 Kreise und kreisfreie Städte in Starkniederschlagsgebieten
 Gebiete mit einer 72h-Niederschlagssumme (100-jährlich) von mehr als 120 mm - entsprechend Abbildung 26
 Regierungsbezirk Münster ohne Starkniederschlagsgebiete

Gebietskörperschaft	Teilbereich
Regierungsbezirk Düsseldorf	
Stadt Essen	teilweise (Süden)
Stadt Remscheid	gesamt
Stadt Solingen	teilweise (Osten)
Stadt Wuppertal	überwiegend
Kreis Mettmann	teilweise (Nordosten)
Regierungsbezirk Köln	
Städteregion Aachen	teilweise (Süden/Osten)
Kreis Euskirchen	teilweise (Westen)
Oberbergischer Kreis	überwiegend (außer Süden)
Rheinisch-Bergischer Kreis	teilweise (Norden)
Rhein-Sieg-Kreis	teilweise (Nordosten)
Regierungsbezirk Detmold	
Kreis Höxter	teilweise (Westen)
Kreis Lippe	teilweise (Süden)
Kreis Paderborn	überwiegend
Regierungsbezirk Arnsberg	
Stadt Hagen	teilweise (Süden)
Ennepe-Ruhr-Kreis	teilweise (Süden)
Hochsauerlandkreis	teilweise
Märkischer Kreis	überwiegend (außer Nordosten)
Kreis Olpe	überwiegend (außer Nordosten)
Kreis Siegen-Wittgenstein	überwiegend (außer Süden)
Kreis Soest	teilweise (Osten)

Frost



Abbildung 27 Frosttiefenzonen in Nordrhein-Westfalen

A 4 Wurzeltiefen mitteleuropäischer Baumarten

Tabelle 18 Wurzeltiefen mitteleuropäischer Baumarten

nach [31]

WT: auf natürlichen Standorten beobachtete Wurzeltiefe in m

Baumart	Botanischer Name	WT	Bemerkung
Laubbäume			
Berberitze	<i>Berberis vulgaris</i>	2,50	gilt für warme, gut durchlüftete Böden
Wilde Pimpernuß	<i>Staphylea pinnata</i>	0,60	
Weißdorn	<i>Crataegus monogyna</i>	1,80	
Wildbirne	<i>Pyrus pyrastrer</i>	3,00	
Wildapfel, Holzapfel	<i>Malus sylvestris</i>	3,50	
Elsbeere	<i>Sorbus torminalis</i>	2,00	
Eberesche	<i>Sorbus aucuparia</i>	2,50	gilt für tiefgründig lockere Böden
Speierling	<i>Sorbus domestica</i>	3,00	Art nur in warmen Gebieten vertreten
Felsenbirne	<i>Amelanchier ovalis</i>	2,00	
Traubenkirsche	<i>Prunus padus</i>	1,50	
Vogel- oder Süßkirsche	<i>Prunus avium</i>	1,60	
Schlehe	<i>Prunus spinosa</i>	2,30	
Gewöhnlicher Kreuzdorn	<i>Rhamnus cathartica</i>	1,00	
Faulbaum	<i>Frangula alnus</i>	0,60	
Edelkastanie	<i>Castanea sativa</i>	3,00	
Rotbuche	<i>Fagus sylvatica</i>	2,00	
Roteiche	<i>Quercus rubra</i>	1,50	
Traubeneiche, Winter-eiche	<i>Quercus petraea</i>	2,00	
Stieleiche	<i>Quercus robur</i>	3,00	
Gewöhnliche Birke	<i>Betula pendula</i>	2,00	
Schwarz-, Roterle	<i>Alnus glutinosa</i>	3,00	
Grau-, Weißerle	<i>Alnus incana</i>	1,20	
		2,20	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Haselstrauch	<i>Corylus avellana</i>	3,50	gilt für tiefgründig lockere, erwärmte Böden
Hainbuche	<i>Carpinus betulus</i>	1,40	
		3,50	gilt für tiefgründig lockere, erwärmte Böden
Walnuß	<i>Juglans regia</i>	2,50	
Bergulme	<i>Ulmus glabra</i>	2,00	

Feldulme	<i>Ulmus minor</i>	3,50	
Flatterulme	<i>Ulmus laevis</i>	1,80	
Gewöhnliche Robinie	<i>Robinia pseudoacacia</i>	3,50	
Rosskastanie	<i>Aesculus hippocastanum</i>	3,00	
Bergahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	1,90	
Spitzahorn	<i>Acer platanoides</i>	3,00	
Feldahorn	<i>Acer campestre</i>	3,50	
Winterlinde	<i>Tilia cordata</i>	2,50	
Sommerlinde	<i>Tilia platyphyllos</i>	1,60	
Silberpappel	<i>Populus alba</i>	2,50	
Kanada-Pappel	<i>Populus canadensis</i>	3,50	
Schwarzpappel	<i>Populus nigra</i>	1,50	
Zitterpappel	<i>Populus tremula</i>	2,50	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Silberweide	<i>Salix alba</i>	3,00	gilt für tiefliegenden Grundwasserspiegel
Purpur-, Steinweide	<i>Salix purpurea</i>	2,00	gilt für tiefliegenden Grundwasserspiegel
Sal-, Palmweide	<i>Salix caprea</i>	2,00	gilt für tiefliegenden Grundwasserspiegel
Asch-, Grauweide	<i>Salix cinerea</i>	1,40	
Spindelstrauch	<i>Evonymus europaea</i>	1,00	
Roter Hartriegel	<i>Cornus sanguinea</i>	1,00	
Stechpalme	<i>Ilex aquifolium</i>	1,00	
Schmalblättrige Esche	<i>Fraxinus angustifolia</i>	1,70	
Gewöhnliche Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	1,50	
		2,00	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Liguster	<i>Ligustrum vulgare</i>	1,50	
Schwarzer Holunder	<i>Sambucus nigra</i>	3,00	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Roter Holunder	<i>Sambucus racemosa</i>	1,80	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Wolliger Schneeball	<i>Viburnum lantana</i>	1,50	
Gewöhnlicher Schneeball	<i>Viburnum opulus</i>	1,00	

Nadelbäume			
Weißtanne	<i>Abies alba</i>	1,60	gilt für feinsandige Sedimente in wärmeren Klimaten nimmt die Wurzeltiefedeutlich zu
Fichte	<i>Picea abies</i>	1,20	
		2,10	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Waldkiefer, Rotkiefer	<i>Pinus sylvestris</i>	4,50	gilt für Lößlehm und warmes Klima; Wurzeltiefe korreliert mit Wärme
Schwarzkiefer	<i>Pinus nigra</i>	4,50	gilt für feinsedimentreichen Boden
Douglasie	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2,20	
Wacholder	<i>Juniperus communis</i>	3,00	gilt für tiefgründig erwärmte Böden
Eibe	<i>Taxus baccata</i>	1,50	

Die Wurzeltiefen gelten für natürliche Standorte unterschiedlicher Ausprägung. Es ist davon auszugehen, dass die Wurzeltiefen auf tiefgründig locker geschütteten Rekultivierungsschichten auf Deponien höher ausfallen.