

Die Wasserhaushaltsschicht bei der Rekultivierung von Deponien – günstige Kombination mit alternativen Dichtungssystemen oder teures „Draufsatteln“ auf die Regelabdichtung?

Thomas Egloffstein, Gerd Burkhardt

ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, Karlsruhe

Abstract

In den letzten Jahren wurde die Rekultivierungsschicht für Oberflächenabdichtungen von Deponien in ihrer Teilfunktion als Wasserhaushaltsschicht im Rahmen des Gesamtsystems Oberflächenabdichtung aufgewertet. Mächtigkeit, Bodenart, Einbaubedingungen, nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, locker geschütteter Einbau d.h. die Vermeidung jeglicher Bodenverdichtung wurden zu Begriffen, mit denen sich Planer, Überwacher, Baufirmen, Genehmigungs- und Überwachungsbehörden sowie Bauherren zu beschäftigen haben. Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten sollen zum Einen die (mineralischen) Dichtungselemente i.W. vor Austrocknung und Durchwurzelung schützen und zum Anderen als langfristig wirksame Begrenzung für in die Deponie einsickernde Niederschläge wirken („Ewigkeitskomponente“), nachdem die Dichtungsschichten der Oberflächenabdichtung, wie z.B. die Kunststoffdichtungsbahn und/oder die mineralische Abdichtung möglicherweise versagt haben. Neben den oben bereits genannten Anforderungen an den Boden der Rekultivierungsschicht spielt der Bewuchs mit einer möglichst hohen realen Verdunstung eine entscheidende Rolle. Denkt man dieses Konzept zu Ende so lautet das Rekultivierungsziel Entwicklung und Pflege eines „Deponiewaldes“ mit mehrschichtigem Kronendach und intensiver Bodendurchwurzelung, welcher einen nachhaltigen Beitrag zu einer hohen realen Verdunstung und einer Minimierung der Versickerung leistet. Geht man von einem langfristig unausweichlichen Versagen der Regel-Kombinationsabdichtung aus, so ist der Aufbau der Regelabdichtung nach TA Siedlungsabfall, Deponieklasse II, d.h. mineralische Abdichtung + Kunststoffdichtungsbahn + Wasserhaushaltsschicht, sicherlich keine besonders ökonomische Variante. Betrachtet man die Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht als einzig langfristig wirksame Komponente einer Oberflächenabdichtung, so bieten sich aus ökonomischer Sicht sinnvollere und günstigere Alternativen als die Regelkombinationsoberflächenabdichtung an.

Keywords

Wasserhaushaltsschicht, Rekultivierungsschicht, Bodenarten, Mächtigkeit, Lagerungsdichte, Bewuchs, Austrocknung, Durchwurzelung, mineralische Abdichtung, alternative Abdichtungen

1 Einleitung

Oberflächenabdichtungen von Deponien sollen die abgelagerten Abfälle über einen sehr langen Zeitraum vor der Auslaugung durch Niederschlagswasser schützen. Deponien wurden und werden als Endlager für die Abfälle gebaut und betrieben. Nach der Entlassung aus der Nachsorge möchte man die Deponie häufig am liebsten vergessen können. Dies bedeutet, dass alle einmal gebauten Abdichtungssysteme über einen sehr langen Zeitraum (z.B. 10.000 Jahre => Forderung einer deutschen Genehmigungsbehörde) wartungsfrei funktionieren sollen. Technische Systeme und Bauwerke haben jedoch in aller Regel nur eine begrenzte Lebensdauer. Ein gutes Beispiel für diese Diskussion um die Lebensdauer ist die Frage nach der Langzeitfunktionsfähigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen. In dieser, seit ca. Mitte der achtziger Jahre, z.T. bis heute geführten Diskussion, geht man inzwischen von einer Funktionsfähigkeit über Zeiträume von ≥ 100 bis mehreren hundert Jahren aus (Müller 2001). Zeiträume von ≥ 100 Jahren waren jedoch den Vätern der Technischen Anleitungen Abfall (1991) und Siedlungsabfall (1993) für ein Deponiebauwerk zu gering bemessen, und so soll nach dem alterungsbedingten „Versagen“ der künstlichen Polymerdichtung (KDB) die Langzeitkomponente „mineralische Dichtung“ die langfristige Dichtheit des Bauwerks Deponie gewährleisten. Dem natürlichen mineralischen Dichtungsmaterial (i.d.R. ein Lehm, d.h. eine Mischung aus Ton, Schluff und Sand) traut man eine höhere Beständigkeit gegenüber Alterungsprozessen zu, als künstlichen Polymerdichtungen. Aufgrund der geologischen Entstehungsgeschichte dieses Materials, als Rückstand der chemisch-physikalischen Gesteinsverwitterung (insbesondere von Schluff und Ton als wichtigste Komponenten für die Dichtungsfunktion) ist dies sicherlich richtig. Dennoch muss bei diesem Dichtungsmaterial begrifflich zwischen Beständigkeit im Sinne von Alterungsbeständigkeit oder gegenüber dem Angriff der Verwitterung durch Atmosphärrillen und der Funktionsfähigkeit (Dichtungswirkung) unterschieden werden. Diese ist im Wesentlichen vom Anteil und der Zustandsform des im mineralischen Dichtungsmaterial vorhandenen Wassers abhängig. Sowohl Frost als auch Austrocknung können die geschlossene Struktur einer mineralischen Abdichtung soweit auflockern, dass sie ihre Dichtungsfunktion nicht mehr in ausreichendem Maße erfüllt. Ergebnisse aus Testfeldern bzw. aus Aufgrabungen an bereits abgedichteten Deponien belegen dies.

Um die langfristige Funktionsfähigkeit bindiger, mineralischer Abdichtungen unter den für diese Dichtungsart eher ungünstigen Randbedingungen als Oberflächenabdichtung einer Deponie (vom kapillarem Aufstieg aus dem Grundwasser abgeschnitten) gewährleisten zu können, muss die Rekultivierungsschicht gleichzeitig auch als Wasserhaushaltsschicht fungieren, und für das zu schützende Dichtungselement einen weitgehend gleichbleibenden bzw. nur in bestimmten Grenzen schwankenden Wassergehalt garantieren können. Dies gilt unter etwas anderen Randbedingungen und Besonderheiten

prinzipiell auch für das „mineralische“ Dichtungselement Bentonitmatte (Dichtungsmaterial Bentonit => quellfähiger Ton) sowie grundsätzlich auch für künstliche Mineralgemische (Chemoton, Dywidag Mineralgemisch, TRISOPLAST etc.). Für die nichtbindige (rollige), „mineralische“ Kapillarsperrenabdichtung wird eine entsprechend dimensionierte Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht langfristig die für diese Dichtungsart wichtige Funktion der Zuflussbegrenzung übernehmen müssen. Technisch und wirtschaftlich interessant sind Kombinationen von Dichtungselementen mit Wasserhaushaltsschichten, denen nach der vorherrschenden Meinung von vorneherein nur eine begrenzte Lebensdauer zugestanden wird, wie dies bei der Kunststoffdichtungsbahn und ggf. auch der Asphaltoberflächenabdichtung der Fall ist.

2 Anforderungen an Rekultivierungsschichten

Gemäß den GDA - Empfehlungen E 2-31 „Rekultivierungsschichten“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, haben Rekultivierungsschichten nachfolgende Funktionen im Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie zu übernehmen (verändert nach GDA E 2-31 2000):

1. Abschirmung der schädlichen Abfälle von der Umwelt (Mensch, Tier, Pflanzen, Luft, Boden)
2. Pflanzenstandort
3. Schutz der tieferen Funktionsschichten vor schädlichen Einflüssen (Entwässerungsschicht, Dichtungsschicht)
4. Optimierung des Wasserhaushaltes des Gesamtsystems

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

zu 1:

- ausreichende Mächtigkeit
- Aufbau aus umweltverträglichen Materialien (i.d.R. unbelastetem Boden)
- standsicherer Aufbau

zu 2:

- gute Durchwurzelbarkeit
- hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität
- ausreichendes Infiltrationsvermögen
- Vermeidung von Stauhorizonten
- ausreichende pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte
- günstige Bodenreaktion und Pufferung

zu 3:

- ausreichende Mächtigkeit
- Beständigkeit gegenüber allen Formen der Erosion (Wind-, Wasser-, äußere Erosion, Suffusion, Kontakterosion)
- Frostschutz sowie Dämpfung von atmosphärischen Temperaturschwankungen
- Schutz von schrumpfungsanfälligen Dichtungen vor Wasserverlust (Wasserspeichervermögen)
- Schutz der Entwässerungs- und Kapillarschichten vor Überlastung (Reduzierung und Dämpfung der Dränspende)
- Schutz der Entwässerungs- und Dichtungsschichten vor Durchwurzelung und Durchwühlung (ausreichend effektiver Wurzelraum, ggf. Wurzelsperren oder „biologische Barrieren“)
- Stabiles Korngerüst und gleichmäßiges Bodengefüge (keine Lösungserscheinungen, keine Bildung von Makroporengefüge)
- Filterstabilität gegenüber Entwässerungs- und Kapillarschichten

zu 4:

a) im Hinblick auf die Durchlässigkeit des Gesamtsystems

- Maximierung der Evapotranspiration durch optimierte Speicherung des pflanzenverfügbaren Wassers im effektiven Wurzelraum der Rekultivierungsschicht
- Reduzierung und Dämpfung der Dränspende (Zuflussbegrenzung) um Entwässerungs- und Kapillarschichten nicht zu überlasten und die potentielle Versickerung in den Abfallkörper zu minimieren

b) im Hinblick auf die Schutzfunktion der tieferen Schichten

- ausreichendes Wasserspeichervermögen um schrumpfungsanfällige Dichtungsschichten auch in Trockenperioden feucht zu halten und vor höheren Wasserspannungen zu schützen

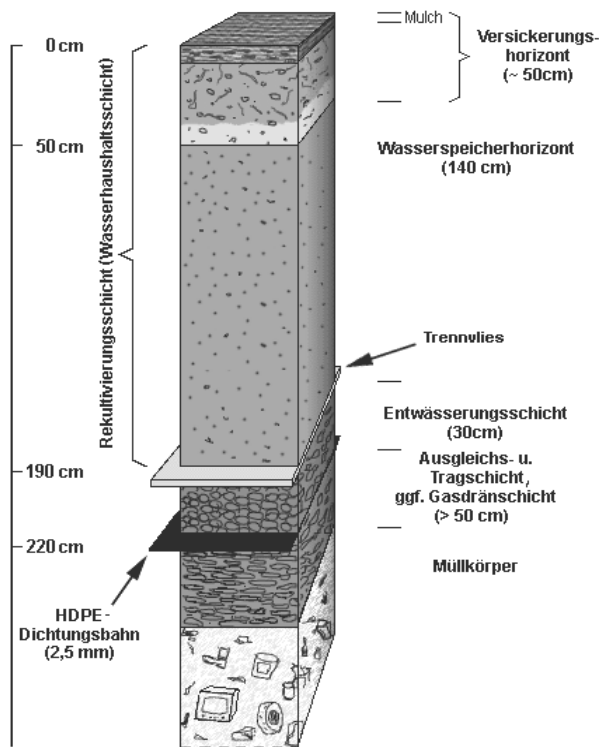
Der Schichtaufbau der Rekultivierungsschicht erfolgt i.d.R. in zwei Lagen:

1. ≤ 30 cm humushaltiger Oberbodenboden
2. ≥ 70 cm – 2,7 m mineralischer Unterboden mit wenig organischer Substanz (unbedingt zu vermeiden ist der Einbau organischer Substanz im Unterboden, da es aufgrund von Sauerstoffmangel zu anaerober Zersetzung (Faulung) kommen kann).

Ggf. können zusätzliche, verdichtete Mineralböden als Wurzelsperre dienen. Diese sollten, wenn sie eingesetzt werden (publizierte Erfahrungen hierzu liegen nach unserer Kenntnis derzeit nicht vor), aus verdichteten, sandigen Böden oder steinreichen, sandigen Böden bestehen, um unerwünschte Begleiterscheinungen wie Staunässebildung

(ggf. Hangquellen, Luftmangel für Pflanzenwurzeln) und Standsicherheitsprobleme zu vermeiden. Eine Abstimmung auf die Entwässerungsschicht bzw. eine differenzierte Entwässerungsschicht mit kombinierter Wurzelsperre als oberer Teil der Entwässerungsschicht sind denkbar (s. a. Abb. 2). Ein Beispiel eines Aufbaus einer Wasserhaushaltsschicht in niederschlagsarmen Gebieten bis ca. 650 mm/a in Kombination mit angepasster Bepflanzung gibt das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz auf seiner Homepage (www.lgb-rlp.de).

Bei dieser vorgeschlagenen Lösung, einer Kombination aus Wasserhaushaltsschicht und Kunststoffdichtungsbahn, ersetzt die Wasserhaushaltsschicht für die Deponiekategorie II die mineralische Abdichtung.



Versickerungshorizont:

Stark durchlässiger, humoser, leicht sandiger Boden mit Feinkies, evtl. in den obersten 30 cm mit Kompost vermischt (z.B. schluffig, lehmiger Sand). In die obersten cm wird Rindenmulch als Erosionsschutz und zur Interzeptionserhöhung in die Unterlage eingefräst. nFk: $\approx 70 - 90$ mm bei 0,5 m ($> \text{ca. } 18 \text{ Vol.-%}$)

Wasserspeicherhorizont:

Schluffiger Boden (ca. 40 - 50 % Schluff) mit zur Basis hin abnehmendem Sand- und Nährstoffgehalt, karbonathaltig, hohes Wasserspeichervermögen (z. B. Löß), nicht im feuchten Zustand verarbeiten (empfohlener Wassergehalt $< \text{ca. } 20 \%$), Einbau in steilen Böschungen mit leichter Verdichtung in den unteren Lagen, ansonsten möglichst unverdichtet. nFk: ca. 300 mm bei 1,4 m ($> \text{ca. } 21 \text{ Vol.-%}$)

Abbildung 1 Aufbau von Wasserhaushalts-/ Rekultivierungsschichten

2.1 Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht

Von verschiedenen Autoren werden Angaben zur Mächtigkeit von Rekultivierungsschichten gemacht. Neumann (1999) nennt Mindeststärken der Rekultivierungsschicht lediglich auf Grundlage der Wachstumsbedingungen für Pflanzen:

Für Gräser und Kräutersaaten: $\geq 0,30$ m

Für Strauchpflanzen: $\geq 0,50$ m

Für Bäume 1. Ordnung (Wuchshöhen > 15 m): $\geq 1,50$ m

Geht man von einer Brache mit ungestörter Vegetationsentwicklung aus (die Vegetation wird nach einer Ersteinsaat als Erosionsschutz sich selbst überlassen), wird nach ca. 50 – 60 Jahren ein „Waldstadium“ erreicht (GDA E 2-32 2000). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass für Deponien, die irgendwann sich selbst überlassen werden sollen, eine Mindestmächtigkeit von 1,5 m Rekultivierungsschicht bereits aus o.g. Gründen nicht unterschritten werden sollte. Neumann (1999) geht bei diesen Angaben bereits davon aus, dass es aufgrund der Dränwirkung der Dränschicht unterhalb der Rekultivierungsschicht schon zu Wuchsbeeinträchtigungen kommen kann, obwohl Bäume i.d.R. auch an natürlichen Standorten keine tieferen Wurzeln ausbilden.

Bönecke (1994) geht vor dem Hintergrund der Durchwurzelungsproblematik der Entwässerungs- und Dichtungsschicht davon aus, dass ab einer Überdeckung von 3,0 m keine Beeinträchtigungen durch Baumwurzeln mehr auftreten. Auch er weist auf die Dränwirkung der Entwässerungsschicht auf die tiefere Rekultivierungsschicht hin und führt aus, dass durch Gras-/Krautsaaten sehr viel tiefere Wurzelungstiefen erreicht werden, als durch heimische Baumarten (Schafgarbe > 4 m, Luzerne 2-5 m, Rotklee 0,8 – 2 m). Bönecke (2001) gibt die erforderliche Schichtmächtigkeit für Deponiewald je nach Hauptbodenart mit einer Dicke > 2,5 – 3 m an.

Konold et al. (1997) führt aus, dass, um die Dichtung vor Wurzelschäden zu bewahren, die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel Wald unabhängig vom Substrat mindestens 2 m mächtig sein müsse. Bei dieser Schichtstärke sollte zusätzlich geprüft werden, ob nicht zusätzliche Maßnahmen zur Begrenzung des Wurzelwachstums ergriffen werden sollten, da Wurzeln vor allem in sandreichen Substraten tiefer reichen können. Vor diesem Hintergrund (sandreiche Substrate sollten in Rekultivierungsschichten vermieden werden!) kann als höchste Anforderung 3,5 m Überdeckung definiert werden. Betrachtet man den Wasserbedarf der Pflanzen (Rekultivierungsziel Wald), sollte der Wurzelraum eine nutzbare Feldkapazität von 195 – 225 mm aufweisen. Eine geringe Lagerungsdichte über das ganze Profil und ein 30 cm mächtiger mittelhumoser Oberboden vorausgesetzt, sind dafür Mächtigkeiten des Unterbodens von 80 cm bei sandigem Schluff und 1,15 m bei tonigem Sand erforderlich. Nach diesen Aussagen könnte eine Schichtstärke der Rekultivierungsschicht von 1,5 m bei Auftrag eines für die Wasserspeicherung günstigen Substrats (z.B. sandiger Schluff) und des o.g. Korngrößenprungs einer weitgehend „trockenen“ Drainage ausreichend sein, um ein Tiefenwachstum der Wurzeln zu begrenzen.

Der Landesarbeitskreis „Forstliche Rekultivierung von Abbaustätten“ (ISTE 2000) gibt in seiner Schrift „Forstliche Rekultivierung“ an, dass nach bisheriger Erfahrung Rekultivierungsschichten von ca. 1,2 m bis 1,5 m Mächtigkeit bei guter Durchwurzelbarkeit für

den Wasserhaushalt und die Nährstoffversorgung als günstiger Pflanzenstandort angesprochen werden. In anderem Zusammenhang steht zu lesen, dass alter Waldboden über Kiesvorkommen (vor dem Kiesabbau!) selten mehr als 80 cm Mächtigkeit besitzt. Leider gibt es keine Aussage dazu, ob der Kies als Wurzelsperre wirkte oder die Wurzeln in den Kies eingewachsen sind.

Lottner (1998) schreibt, dass es bislang bei den in Südbayern (feuchterer Teil Bayerns) durchgeführten Aufgrabungen keine Hinweise auf eine Austrocknung der mineralischen Abdichtung gegeben habe, wegen der Durchwurzelungsgefahr jedoch das LfU in Bayern empfohlen habe die Rekultivierungsschichtdicke auf 1,5 m zu erhöhen.

Das DIBt (1997) geht in seinen Zulassungsgrundsätzen bei natürlichen mineralischen Baustoffen davon aus, dass nur günstige Bedingungen bei der Rekultivierungsschicht von 1,0 m ausreichende Sicherheit gegenüber Durchwurzelung bieten. Je nach Randbedingungen (Klima, verfügbares Bodenmaterial, Einbauqualität, Bepflanzungsart) werden Rekultivierungsschichten von ca. 1,5 m, bei Bepflanzung mit Bäumen (keine Tiefwurzler!) noch einmal deutlich mehr, erforderlich..

Die GDA-Empfehlung E 2-31 „Rekultivierungsschichten“ (2000) gibt mit Hinweis auf die Spanne üblicher Wurzeltiefen an, dass meist 1,5 – 3,0 m Rekultivierungsschicht erforderlich sind, um die Entwässerungsschicht und die Abdichtungsschicht wurzelfrei zu halten.

Auch die LAGA (2000) hat in ihrem Arbeitspapier „Rekultivierung“ 1,5 – 3 m Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht vorgeschlagen.

Das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Maier-Harth 2000) empfiehlt auf seiner Internetseite: ... für niederschlagsarme Gebiete bis 650 mm/a den Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht mit oben liegender, 0,5 m mächtiger Infiltrationsschicht aus stark durchlässigem, humosen, leicht sandigem Boden, im obersten Bereich (ca. 30 cm) mit Kompost vermischt und mit Rindenmulch abgedeckt, und einem darunterliegenden Wasserspeicherhorizont von 1,4 m Mächtigkeit aus schluffigem Boden mit einer nutzbaren Feldkapazität von ca. 215 mm/m. Nach 30 cm Entwässerungsschicht folgt eine 2,5 mm mächtige Kunststoffdichtungsbahn (s. Abb. 1).

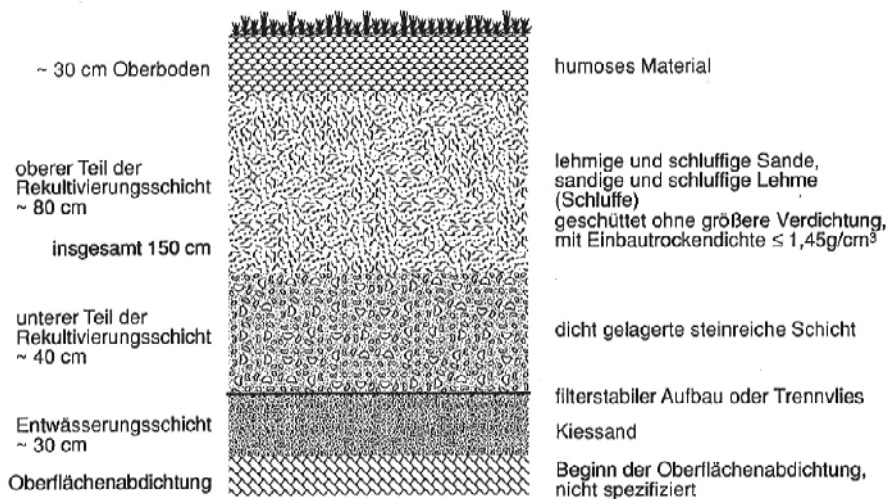


Abbildung 2 Von DIBt und LfU Bayern empfohlenes Oberflächenabdichtungssystem (ausreichend mächtig für Sträucher, aber nicht für Bäume (Lottner 1998))

Zusammenfassend kann u.E. gesagt werden, dass gegenwärtig noch keine gesicherten Erfahrungen vorliegen, die es erlauben, die Mindestschichtstärken der Rekultivierungsschicht auch bei Vorgabe detaillierter Randbedingungen im Hinblick auf die Durchwurzelungssicherheit der darunter liegenden Drän- und Dichtungsschicht unter ökonomischen Aspekten nach unten zu Minimieren. Einigermaßen schlüssig begründet erscheint uns nur die Mindestmächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 1,5 m, ausgenommen die Kunststoffdichtungsbahn wird im Abdichtungskonzept als Konvektions- und Wurzelsperre fest eingeplant (was aber bei der Annahme einer endlichen Lebensdauer der KDB wiederum kein schlüssiges Konzept darstellt). Hier erscheint uns jedoch die darunter liegende mineralische Abdichtung überflüssig, da zu befürchten ist, dass bei einem Versagen der KDB auch die mineralische Abdichtung nur unwesentlich länger funktionsfähig bleibt. Für Deponien die nach der Entlassung aus der Nachsorge sich selbst überlassen werden sollen (Brache mit ungestörter Vegetationsentwicklung => Waldstadium nach ca. 50 - 60 Jahren), kann nach heutigem Kenntnisstand das Bemessungsziel „wurzelfreie Drän- und Dichtungsschichten“ mit relativ großer Sicherheit nur mit Rekultivierungsschichten von ≥ 3 m Mächtigkeit erreicht werden. Etwas geringere Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht (ca. 1,5 – 2,5 m) sind wohl erforderlich, wenn die Rekultivierungsschicht als „qualifizierte Abdeckung“ mit einem standortgerechten höheren Bewuchs langfristig durch Wasserzischenspeicherung und Evapotranspiration eine Minimierung der Tiefenversickerung in die Deponie gewährleisten soll. Das Ziel einer weitgehenden Durchwurzelungsfreiheit der Entwässerungs-/Dichtungsschichten, welche die Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht unterlagern, erfordert naturgemäß höhere Mächtigkeiten als eine in idealer Weise vollständig durchwurzelt „qualifizierte Abdeckung“. Dabei ist immer zu beachten, dass die Mächtigkeit von Rekultivierungsschichten nie abgekoppelt vom Aufbau, der Bodenart und den Einbaubedingungen sowie des vorgesehenen Bewuchses gesehen werden kann.

2.2 Aufbringen geeigneter Bodensubstrate für Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten

Über die Eigenschaften und Anforderungen an die Bodenarten, die Dimensionierung und Herstellung der Rekultivierungsschicht berichten AG Boden (1994), Melchior (1998), Neumann (1999), GDA E 2-31 (2000), Krath & Rieger (2001), Dumbeck (2001), Fein & Manz (2001).

Wie bereits weiter oben erläutert sollen Rekultivierungsschichten aus einer unteren Mineralbodenschicht aus Schluffen, lehmigen und schluffigen Sanden und mit Abstrichen sandigen und schluffigen Lehmen (AG Boden 1994, GDA E 2-31 2000) mit wenig organischer Substanz und einer humosen Oberbodenschicht bestehen.

Rekultivierungsböden stammen i.d.R. aus unterschiedlichen Gewinnungsstätten, z.B. aus Baugruben und Erdbaumaßnahmen oder sind Abraummateriale, d.h. Böden, welche Lagerstätten der Sand-, Kies-, Schotter- oder Werksteingewinnung überdecken. Ober- und Unterböden sind dabei i.d.R. getrennt zu gewinnen und aufzubringen.

Bei Abdichtungsmaßnahmen von Deponien und Altlasten mit mehreren Hektar Größe werden große Mengen an Rekultivierungsböden benötigt. Je spezifischer die Anforderungen an das Bodenmaterial für die Rekultivierungsschicht sind, desto schwieriger, langwieriger und teurer wird die Beschaffung des Bodens. Da die längerfristige Zwischenlagerung zu Qualitätsverlusten führen kann (DIN 19731), ist aus fachlicher Sicht eigentlich die Entnahme und der Einbau ohne Zwischenlagerung zu empfehlen.

Dies gestaltet sich bei größeren Baumaßnahmen jedoch schwierig, da kontinuierlich große Bodenmengen zum Schutz der bereits aufgebrachten Dichtung benötigt werden und der Boden zudem in einem Arbeitsgang und ohne übermäßige Verdichtung eingebaut werden soll.

Neben der Beschaffung großer Mengen geeigneter Bodenarten ist eine zu hohe Verdichtung das Hauptproblem bei der Herstellung der Rekultivierungsschichten. Die darf nur durch geeignetes Einbaugerät erfolgen, d.h. beim Einschleppen des Bodens vor Kopf und in einem Arbeitsgang ist mindestens eine Moorraupe mit überbreiten Gleisketten einzusetzen, die eine möglichst geringe Bodenpressung von ca. 20 – max. 30 kPa (Dumbek 2001, Egloffstein 2003) erzeugt. Der Auftrag des Bodens sollte auf der „trockenen“ Seite, d.h. im steifen bis halbfesten Zustand erfolgen bzw. mit einem Wassergehalt der im Bereich oder unterhalb der Ausrollgrenze liegt, um eine schädliche Verdichtung mit nachteiligen Auswirkungen auf den Porenraum zu vermeiden (dies ist in der Praxis häufig eine kaum zu realisierende Wunschvorstellung). Dass der unverdichtete Auftrag des Bodenmaterials eine Grundvoraussetzung für die Funktion der Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht darstellt, kann gar nicht stark genug betont

werden. Da die meisten Baufirmen zwar große Erfahrung im Einbau von verdichtetem Boden nach Proctorkurve haben, ist hier hinsichtlich des unverdichteten Einbaus der Rekultivierungsschicht sicherlich des öfteren noch Überzeugungsarbeit zu leisten. Hat bereits eine unzulässige Verdichtung des Bodens stattgefunden, d.h. wurden bestimmte Grenzwerte der Rohdichte bzw. der Grobporengehalte über- bzw. unterschritten so sind Meliorationsmaßnahmen erforderlich. Die Meliorationsbedürftigkeit wird durch Rohdichten von $> 1,65 \text{ g/cm}^3$ bzw. durch die mittels Packungsdichte vorgenommene Beurteilung der funktionalen Gefügeeigenschaften bestimmt (Dumbek 2001).

Die Qualität des Bodenmaterials ist gemäß den Anforderungen (DIN 18915, DIN 19731) in einer geotechnischen und bodenkundlichen Eignungsprüfung festzustellen und bei der Herstellung der Rekultivierungsschicht gemäß eines zuvor aufzustellenden Qualitätssicherungsplans laufend zu überwachen. Angaben zum Umfang der Eignungs- und Kontrollprüfung für Bodenmaterial gibt Maier-Harth (Maier-Harth 2000).

Aus ökonomischen und ökologischen Gründen sollten die Bodenmaterialien aus der entsprechenden Region kommen (Stichwort: „standortangepasste Böden“). In einigen Teilen der BRD werden Schluffe und Lehme nur schwer in der erforderlichen Menge zu beschaffen sein, da z.B. sandige Bodenarten vorherrschen. Insgesamt sind die Anforderungen an die Bodenart und das qualitative Aufbringen der Wasserhaushaltsschichten sowie der Überwachungs- und Kontrollaufwand vom Aufwand her vergleichbar mit dem Einbau hochwertiger mineralischer Dichtungen. Die Kosten werden sich in einem ähnlichen Rahmen bewegen. Zu bedenken gilt, dass aufgrund der nach Abfallablagerversordnung bis 15.07.2009 zur Schließung anstehenden geschätzten ca. 400 Deponien (Egloffstein 2004) bereits bei der Mindestschichtstärke nach TAsi/DepV von $\geq 1 \text{ m}$ Böden in der Größenordnung von ca. 3 – 4 Mio. m^3 benötigt werden, eine Menge, die sich linear zur Mindestanforderung ($\geq 1 \text{ m}$) erhöht, wenn höhere Schichtstärken vorgesehen werden. Man muss kein Prophet sein, um vorherzusehen, dass deutlich höhere Anforderungen an die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht unter dem heute herrschenden Kostendruck i.d.R. nicht einfach auf das Regelabdichtungssystem „draufgesetzt“ werden können, ohne über Abstriche bei anderen Systemkomponenten oder über Alternativen zum Oberflächenabdichtungssystem zu diskutieren.

Bereits die Väter der TAsi hatten Anfang der 90-er Jahre für die Rekultivierungsschicht neben der Mindestmächtigkeit von $\geq 1 \text{ m}$, kulturfähigen Boden gefordert, „dass der Bewuchs in Verbindung mit zu erfassenden meteorologischen Datenreihen und unter Anwendung von Wasserhaushaltsbetrachtungen darüber hinaus so auszuwählen ist, dass die Infiltration von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem minimiert wird“. Ca. 10 Jahre später hatte man in der DepV erkannt, dass dies der Bewuchs allein nicht leisten kann sondern präzisiertere (ohne allerdings, außer bei der Mächtigkeit, Mindestanforderungen zu definieren): „Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht soll sich an der

Durchwurzelungstiefe der Vegetation, ... der erforderlichen Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats ... im Einzelfall orientieren. Sie ist so zu bemessen, dass unter Berücksichtigung der vegetationspezifischen Durchwurzelungstiefe und der Materialeigenschaften eine Durchwurzelung der Entwässerungsschicht weitestgehend vermieden wird und die Dichtung vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung geschützt wird. Die Mächtigkeit soll daher mindestens 1 m betragen. Die Materialien für die Rekultivierungsschicht ... sollen über eine hohe nutzbare Feldkapazität sowie über ausreichende Luftkapazität zur Sicherstellung eines hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrates verfügen.“

Die Konkretisierung dieser allgemein formulierten Anforderungen wird dem Planer, dem Bauherrn bzw. den Fach- und Genehmigungsbehörden überlassen. Letztere orientieren sich nach unseren Erfahrungen, im Hinblick auf die Mächtigkeit und vor Allem im Hinblick auf die nutzbare Feldkapazität (des effektiven Wurzelraumes?) gerne am letzten Entwurf der DepV vor Inkrafttreten: „Die nutzbare Feldkapazität (nFk [mm/m]) soll im effektiven Wurzelraum ($nFkWe$) mindestens 200 mm betragen“. Dies würde bedeuten, dass bei mittleren Durchwurzelungstiefen We von 0,7 bis 1,1 m (AG Boden 1994) die geforderte nFk zwischen 182 und 286 mm liegen müsste, was jedoch an vielen Standorten nur durch höhere Anforderungen an die Rekultivierungsböden und infolge dessen z.T. auch mit ökologischen Nachteilen (Transport von großen Bodenmassen über größere Entfernungen) einzuhalten ist. Dies trifft auch schon auf die in der Praxis oftmals geforderte nutzbare Feldkapazität (nFk) von 200 mm/m zu. Der ebenfalls zuweilen in der Praxis zu beobachtende Ansatz der Kompensation einer zu geringen nFk durch eine höhere Mächtigkeit (z.B. $nFk = 160 \text{ mm/m} \times 1,25 \text{ m Mächtigkeit} = 200 \text{ mm}$) geht am Grundansatz der Wasserhaushaltsschicht vorbei, wenn diese Bodenart (z.B. schwach lehmiger Sand $nFk = 160 \text{ mm/m}$, $We = 0,7 \text{ m}$) nicht auch tatsächlich über diese Tiefe ($We \neq 1,25 \text{ m}$) durchwurzelt wird.

3 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Bis in die 80er Jahre hinein wurden Deponien nach ihrer Verfüllung mit Boden abgedeckt. Besondere Anforderungen gab es i.d.R. nicht. Der Boden musste lediglich einbaufähig und die Bodenschicht so mächtig und für den Bewuchs so weit geeignet sein, dass sich Pflanzen darauf ansiedeln konnten. Durch die TA Abfall/TA Siedlungsabfall wurde die Rekultivierungsschicht lediglich durch die Angabe einer Mindestmächtigkeit von $\geq 1 \text{ m}$ und durch die Kernaussage, dass es sich um kulturfähigen Boden handeln soll, definiert. Erste Ansätze, die Infiltration von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem durch die Auswahl des Bewuchses zu minimieren, waren nicht ausreichend und wurden in der Praxis auch kaum beachtet. Bis vor wenigen Jahren stand die Diskussion um alternative Abdichtungssysteme und deren Gleichwertigkeit zur TAsi im

Vordergrund. Die Rekultivierungsschicht war bis ca. 1996 kaum ein Diskussionsthema. Dies hat sich mit den prägenden, überwiegend negativen Erfahrungen i.W. aus den Testfeldern der Deponie Hamburg-Georgswerder geändert. Eine intensive Diskussion wurde seither um den Wasserhaushalt, die Austrocknungs- und Durchwurzelungssicherheit von mineralischen Abdichtungen und auch von Bentonitmatten geführt. Hierdurch kam, i.W. zum Schutz der mineralischen Dichtungselemente, die Diskussion um den Aufbau, vor allem aber um die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht in Gang. In Folge dieser Auseinandersetzung, verknüpft mit der Entwicklung und Weiterentwicklung von Wasserhaushaltsmodellen (HELP u.a.), wurde die qualifizierte Abdeckung in Verbindung mit der Gestaltung und Entwicklung eines optimierten, standortgerechten Bewuchses, als mögliche Alternative zur Regel-Abdichtung diskutiert. Diese sollte zumindest an trockenen Standorten und für Deponien von geringem Gefährdungspotential, als mögliche Alternative zur Abdichtung in Betracht kommen. Der Beitrag von Böneke (2001) „Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien – Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen“ spiegelt diese Diskussion am fortgeschrittensten wieder.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt fokussiert sich die Diskussion nach unserem Eindruck vielerorts auf die Anforderungen der Deponieverordnung, wobei es dabei i.d.R. relativ unwichtig zu sein scheint, ob sich unterhalb der Rekultivierungsschicht eine Regelabdichtung nach TASI/DepV oder ein alternatives Abdichtungssystem befindet. Dabei könnte u.E. deutlicher zwischen den Funktionen der Rekultivierungsschicht mit Schwerpunkt auf den Wasserhaushalt, d.h. die Minimierung der Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper (z.B. in Form einer reinen „qualifizierten Abdeckung“) oder einer Rekultivierungsschicht mit Schwerpunkt auf die Schutzwirkung der darunter liegenden Drainage- und Dichtungsschichten unterschieden werden. Sicherlich ist es ein gewisser Vorteil, wenn das in die Dränageschicht infiltrierende Niederschlagswasser minimiert wird, dies ist jedoch bei einer darunter liegenden funktionsfähigen Dichtungsschicht weniger wichtig als der dauerhafte Schutz der selben gegen Austrocknung, Frosteinwirkung und Durchwurzelung. Für im Sinne der TASI-Philosophie dauerbeständigen mineralischen Abdichtungen müsste die Schutzwirkung der Rekultivierungsschicht im Vordergrund stehen. Hier ist u. E. vor allem die Frage der Durchwurzelungssicherheit, dem hierfür benötigten Aufbau und der Mächtigkeit bzw. nach ggf. die Schutzwirkung unterstützenden Wurzelsperren, noch nicht abschließend geklärt. Sicher scheint nur zu sein, dass, obwohl die Schutzwirkungsfunktion auf der Wasserhaushaltsfunktion aufbaut, die Schutzwirkungsfunktion etwas schwieriger sicher zu stellen ist als die Wasserhaushaltsfunktion.

Die Regel-Kombinationsabdichtung nach TASI, Deponieklasse II, stellt mit einer im Hinblick auf den Wasserhaushalt und die Schutzwirkung optimierten Rekultivierungsschicht

gemäß den Anforderungen nach Anhang 5 DepV, aus fachtechnischer Sicht sicherlich eine sehr aufwendige, sozusagen dreifach redundante Kombination dar. Gäbe es nicht den u.E. zu hohen Durchlässigkeitsbeiwert für die mineralische Abdichtung von $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s würden wir die Kunststoffdichtungsbahn für überflüssig halten (ausgenommen sind Redundanz-Überlegungen), wenn sie nach vorherrschender Meinung nach ca. 100 – 400 Jahren sowieso versagt. Bei gleichen Anforderungen an den Durchlässigkeitsbeiwert der mineralischen Oberflächenabdichtung, wie an der Deponiebasis von $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s, würde u.E. eine für die meisten Fälle völlig ausreichende Dichtigkeit erzielt. Damit werden nach HELP Modellierungen Wirksamkeiten ((1 – Durchsickerung / Niederschlag) • 100 %) im Bereich von ca. 97 – 99 % erreicht.

Andere fachtechnisch sinnvolle Lösungen sind die Kombination einer Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht mit alternativen mineralischen Dichtungsmaterialien, wie z.B. TRISOPLAST oder auch Bentonitmatten, die man aufgrund ihrer Dichtungsschicht aus Bentonit (ausgeprägt plastischer, quellfähiger Ton) in diesem Fall zu den mineralischen Dichtungselementen zählen würde. Eine weitere sehr gute Kombination mit einer Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht bilden auch entsprechend dimensionierte Kapillarsperren. Dabei kann die für Kapillarsperrenabdichtungen erforderliche Zuflussbegrenzung (Vergleichmäßigung der Dränspende) in der frühen Phase nach Fertigstellung, in der die volle Wirksamkeit der Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht noch nicht erreicht wird, sehr gut durch eine Kunststoffdichtungsbahn gewährleistet werden. Für diese zeitlich begrenzte Funktion der Kunststoffdichtungsbahn bräuchte diese aus fachtechnischer Sicht auch nicht die o.g. 100 – 400 Jahre für BAM-zugelassene Dichtungsbahnen angegebenen Mindestlebensdauer erreichen, sondern müsste nur bis zur Ausbildung einer mehrstufigen Vegetationsdecke auf der Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht wirksam sein (ca. 30 – 60 / max. 100 Jahre).

Alle oben genannten Kombinationen von Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten mit mineralischen Dichtungselementen (inkl. Bentonitmatte) gehen in der theoretischen Diskussion von einer dauerhaften Wirksamkeit beider Systembestandteile aus. Lediglich die in der Anfangsphase nach Fertigstellung, aufgrund des noch nicht voll ausgebildeten Bewuchses geringe Wirksamkeit der Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht, wird durch die darunter liegende Dichtungsschicht ausgeglichen. Dieser theoretische Grundansatz wird bei Kombinationen der Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht mit einer Kunststoffdichtungsbahn (Asphaltdichtung?) durchbrochen, da ein Versagen des Dichtungselementes Kunststoffdichtungsbahn KDB nach den o.g. Zeiträumen (≥ 100 – ca. 400 Jahren) unterstellt wird. Danach müsste die bis dahin optimal ausgebildete (mehrstufiges Kronendach) Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht die alleinige Zuflussbegrenzung übernehmen.

Die Frage nach der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen muss ebenso, wie bei Wasserhaushaltsschichten und mineralischen Abdichtungen insoweit relativiert werden, dass es aus heutiger Sicht praktisch kaum Ingenieurbauwerke gibt, die auf eine Lebensdauer von über >> 100 Jahre bemessen werden können. Im Deponiebau wird dies zwar immer wieder versucht, das Ergebnis bleibt jedoch ein Geheimnis zukünftiger Generationen. Sicher ist jedoch, dass die langfristige Funktionsfähigkeit aller mineralischen Abdichtungen an die Funktionsfähigkeit der darüberliegenden Rekultivierungsschicht geknüpft ist. Aufgrund des hohen Anteils an Wasser in bindigen mineralischen Abdichtungen, welcher sich nur in engen Grenzen erniedrigen darf, garantiert die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht die langfristige Funktionsfähigkeit der Dichtungsschicht. Geht man von der sicheren Funktionsweise der Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht in Kombination mit einer darunter liegenden mineralischen Dichtung aus, so ist die Kunststoffdichtungsbahn eigentlich überflüssig. Diese wäre (ausgenommen Redundanz-Überlegungen) lediglich bei nicht ausreichend dimensionierter Wasserhaushalts-/ Rekultivierungsschicht als Wurzelsperre erforderlich, nach deren Versagen aber nur kurze Zeit später auch die mineralische Abdichtung versagen würde.

Grundsätzlich sind die Autoren der Meinung, dass der heutige Kenntnisstand noch nicht völlig ausreicht um mineralische Abdichtungen und dazugehörige Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschichten im Hinblick auf die langzeitbeständige Funktionsfähigkeit sicher zu bemessen (i.W Schutzwirkung gegen Durchwurzelung). Dies muss zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch vergleichsweise weit auf der „sicheren Seite“ und mit verbleibenden Restunsicherheiten erfolgen. Wir erwarten jedoch, dass weitere Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis in den nächsten Jahren die Restunsicherheiten beseitigen und eine sicherere Dimensionierung ermöglichen werden.

4 Literatur

- | | | |
|--|------|--|
| AG Boden - Arbeitsgruppe Bodenkunde der geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland | 1994 | Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. |
| Bönicke, G | 1994 | Forstliche Belange bei der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien und Altlasten. Schr.Angew.Geol. Karlsruhe, Bd. 34. |
| Bönicke, G. | 2001 | Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien – Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen? Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 122, |

- Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- DIBt Deutsches Institut für Bautechnik 1997 Zulassungsgrundsätze für Dichtungsschichten aus natürlichen mineralischen Baustoffen in Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien. 22 S. 1 Anh. DIBt, Berlin.
- Dumbeck, G. 2001 Langjährige Erfahrungen aus den rekultivierten Braunkohletagebauen im Hinblick auf die Rekultivierung von Deponien. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. Eigenverlag Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz.
- Egloffstein, T., Sturm, D. 2003 Der locker geschüttete Einbau von Wasserhaushalts- / Rekultivierungsschichten – Standsicherheit, Setzungsverhalten, baupraktische Erfahrungen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 128, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Egloffstein, T. 2004 Sicherung / Sanierung von Altdeponien – Gefahrenabwehr - contra Vorsorgeprinzip? Unterschiedliche Ansätze und Vorgehensweisen bei der Altlasten- und Deponiesanierung. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Fein, W., Manz, E. 2001 Bau einer Wasserhaushaltsschicht – die Praxis zur Theorie am Beispiel der Deponie Eisenberg (Donnersberg). In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. Eigenverlag Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz.
- GDA E2–30 2003 Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien (Entwurf). DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ak. 6.1 Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7 „Oberflächenabdichtungssysteme“. www.gdaonline.de.
- GDA E2–31 2000 Rekultivierungsschichten (Entwurf). DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ak. 6.1 Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7 „Oberflächenabdichtungssysteme“. Bautechnik 77 (2000), Heft 9, Ernst & Sohn.
- GDA E2–32 2000 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf). DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ak. 6.1 Geotechnik der Deponiebauwerke, UG 7 „Oberflächenabdichtungssysteme“. Bautechnik 77 (2000), Heft 9, Ernst & Sohn.
- ISTE Umweltberatung im Industrieverband Stein und Erden Baden Württemberg e.V. (Hrsg.). 2000 Forstliche Rekultivierung. Planung, Rohstoffgewinnung, Rekultivierung, Wiederbewaldung. Landesarbeitskreis Forstliche Rekultivierung von Abbaustätten, ISTE, Bd. 3.

-
- | | | |
|---|------|--|
| Konold, W., Wattendorf, P., Leisner, B. | 1997 | Anforderungen an die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel Wald. Abfallw. in Forschung und Praxis, Band 103, Erich Schmidt Verlag, Berlin. |
| Krath, U., Rieger, D. | 2001 | Deponieabschluss mit Wasserhaushaltsschicht – Optimierung nach bodenphysikalischen, hydrogeologischen und landschaftspflegerischen Gesichtspunkten. Wasser und Abfall 7-8 2001. |
| LAGA Länderarbeitsgemeinschaft Abfall | 2000 | „Rekultivierung“. Arbeitspapier, eingeführt durch die Erlasse der Bundesländer, z.B. mit Erlass des Landes Baden-Württemberg an die Regierungspräsidien vom 12.05.2000. |
| Lottner, U. | 1998 | Lottner, U. (1998): Anforderungen an den Aufbau und die Dimensionierung der Rekultivierungsschicht. Seminar des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz in Wackersdorf. Eigenverlag LfU, Augsburg. |
| Müller, W. | 2001 | Handbuch der PE-HD Dichtungsbahnen in der Geotechnik. Birkhäuser Verlag, Basel. |
| Maier-Harth, U. | 2000 | Wasserhaushalts und Rekultivierungsschicht/Eignungs- und Kontrollprüfung für Bodenmaterial in Deponie-Rekultivierungsschichten. http://www.lgb-rlp.de . |
| Melchior, S. | 1998 | Ansätze zur Gestaltung und Dimensionierung von Rekultivierungsschichten in Abdecksystemen für Altdeponien und Altlasten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 107, Erich Schmidt Verlag, Berlin. |
| Neumann, U. | 1999 | Rekultivierungsanleitung. Müll-Handbuch MuA Lfg. 5/99, Kennziffer 4622, Erich Schmidt Verlag, Berlin. |