

Praxiserfahrungen und Ergebnisse der Qualitätssicherung bei der Rekultivierung von Deponien

PD Dr. habil. Stefan Melchior ¹

Zusammenfassung

Keywords

- 1 Die Rekultivierungsschicht im Wandel der Regelwerke
- 2 Grundlagen
 - 2.1 Begriffe
 - 2.2 Anforderungen an die Rekultivierungsschicht
- 3 Fallbeispiele zum Einfluss der Trockendichte auf die bodenhydrologischen Kennwerte
- 4 Fazit
- 5 Literatur

erschienen 2005 in:

Kranert, M. (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik 2005. Deponieverwertungsverordnung und Lösungsansätze bei der Deponiestillegung.

Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 84, S. 135 - 152

¹ **melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft**

Hamburg und Wörrstadt, Tel.: +49 40 430 950 – 0, Fax: -20, www.mplusw.de
info@mplusw.de

Zusammenfassung

Der Gestaltung des Systems Rekultivierungsschicht / Bewuchs wird verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt, da demnächst bei der Stilllegung von Deponien bundesweit erhebliche Bodenmassen gewonnen und eingebaut werden müssen. Die in den einschlägigen Regelwerken genannten Anforderungen an die Bodeneigenschaften und die Einbautechnik der Rekultivierungsschicht sollen Schäden am Oberflächenabdichtungssystem vorbeugen und die langfristige Wirksamkeit des Systems erhöhen. Sie verursachen allerdings auch Kosten. Entsprechend kontrovers verlaufen die Diskussionen in der Praxis, insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Einbautechnik der Böden.

Die aktuell realisierten Rekultivierungskonzepte reichen von sehr einfachen Systemen mit fehlenden oder im Vergleich zu TA Siedlungsabfall und Deponieverordnung unzureichenden Qualitätsanforderungen über qualifizierte Systeme, an die definierte technische Anforderungen gestellt werden, bis hin zu Wasserhaushaltsschichten mit optimiertem Bewuchs, die so stark zur hydrologischen Wirksamkeit des Gesamtsystems beitragen sollen, dass andere Abdichtungskomponenten durch sie ersetzt werden können.

Qualifizierte Konzepte müssen auf die verfügbaren Böden oder Ersatzbaustoffe abgestimmt sein. Da es noch keine breite Datenbasis zur Bemessung von Rekultivierungsschichten und zur Auswirkung von verschiedenen Einbautechniken auf die qualitätsbestimmenden Parameter gibt, werden häufig durch in diesem Metier unerfahrene Planer und Bauherren aus Sorge vor zu hohen Kosten Ansätze gewählt, die zu einer unnötig schlechten Qualität der eingebauten Rekultivierungsböden führen. So wird mit moderatem Aufwand an Geld, großem Aufwand an Energie viel Boden mit unnötig schlechtem Ergebnis bewegt und eingebaut. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr, dass auf einer unzureichenden fachlichen Grundlage übervorsichtige und teure Einbaukonzepte ausgeschrieben werden, die die Bauabläufe unnötig behindern. Im vorliegenden Beitrag werden anhand von Fallbeispielen Daten zur Auswirkung der Einbaudichte auf die bodenhydrologischen Kennwerte von Rekultivierungsböden dargestellt, aus denen ersichtlich wird, dass die Bodenverdichtung sich in unterschiedlichen Böden unterschiedlich bemerkbar macht und es sich daher fachlich und finanziell lohnen kann, diesen Zusammenhang bodenspezifisch im Einzelfall zu untersuchen. Im Ergebnis solcher Untersuchungen können ggf. Böden gefunden werden, deren maßgebliche Kennwerte relativ unempfindlich auf die Überfahung mit Baugeräten reagieren, oder es kann bei empfindlichen Böden eine schädliche Bodenverdichtung verhindert werden.

Keywords

Deponie, Oberflächenabdichtung, Rekultivierung, Boden, Vegetation, Wasserhaushalt, Bodenhydrologie, Eignungsprüfung, Qualitätssicherung, Einbautechnik

Landfill, landfill cover, recultivation, soil, vegetation, water balance, soil hydrology, suitability testing, quality assurance, construction technology

1 Die Rekultivierungsschicht im Wandel der Regelwerke

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

Bereits in den 80er Jahren und insbesondere nachdem Forschungsvorhaben zeigten, dass auf dem nassen Ast eingebaute tonhaltige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten empfindlich gegenüber Austrocknung und Durchwurzelung sind (MELCHIOR 1993, 1997, 1999), setzte geradezu ein Boom bei der Suche nach alternativen Abdichtungen ein, die besser herstellbar, langfristig wirksamer und kostengünstiger sein sollten als die mineralische Dichtung nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall.

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

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

- Bemessung der Schichtdicke im Einzelfall mit den Zielen Vermeidung der Durchwurzelung der Entwässerungsschicht und Schutz der Dichtung vor Wurzeln, Frost und Austrocknung (Minstdicke 1 m)
- Stoffliche Qualität nach § 8 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und Klärschlammverordnung (Zulässige Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen werden genannt)
- „Die Materialien für die Rekultivierungsschicht dürfen die langfristige Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht nicht beeinträchtigen. Sie sollen über eine hohe nutzbare Feldkapazität sowie über ausreichende Luftkapazität zur Sicherstellung eines hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats verfügen.“ Zahlenwerte werden zu nFK, Luftkapazität (LK) und pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat nicht genannt. Nach AG Boden ist der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat nFKWe in grundwasserfernen Böden bei einem Wert $\geq 220 \text{ mm}$ als hoch einzustufen.

Als Konsequenz der DepV werden in den nächsten Jahren viele Deponien stillgelegt werden. Dabei werden sehr große Massen an Bodenmaterial für den Einbau in die Rekultivierungsschichten benötigt und erhebliche Finanzmittel investiert.

In jedem Einzelfall stellt sich die Frage, welche Anforderungen projektspezifisch an die Rekultivierungsschicht zu stellen sind, welche Eigenschaften das Bodenmaterial für die Rekultivierungsschicht haben muss, um die zugewiesene Funktion zu erfüllen und wie das Bodenmaterial einzubauen ist. In der Praxis sind häufig sehr kontroverse Meinungen anzutreffen, die sich insbesondere auf die wirtschaftlich interessante

Frage der Einbautechnik fokussieren. Muss das Bodenmaterial bodenschonend unter Vermeidung schädlicher Bodenverdichtungen eingebaut werden oder sind solche Forderungen übertrieben und unangemessen? Der vorliegende Beitrag will gerade zu dieser Frage einige interessante Fallbeispiele und Daten aus der Qualitätssicherung vorstellen.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe

Im Zusammenhang mit der Rekultivierungsschicht und deren Funktion und Gestaltung haben sich in den letzten Jahren zahlreiche Begriffe herausgebildet, die nicht eindeutig definiert sind und unterschiedlich benutzt werden. Im vorliegenden Beitrag werden folgende Begriffsdefinitionen benutzt:

<i>Rekultivierungsschicht</i>	Definition gemäß DepV, Anhang 5 auf der Grundlage und in Fortschreibung von TA Abfall und TA Siedlungsabfall
<i>Bodenabdeckung / Decksubstrat</i>	Sammelbegriff für alle Arten von Bodenauftrag auf Altlasten und Deponien zum Zwecke der Begrünung, die nicht den Anforderungen der TA Abfall, der TA Siedlungsabfall oder der Deponieverordnung folgen (z.B. auf Altdeponien und Altlasten oder in temporären Abdeckungen)
<i>Wasserhaltungsschicht</i>	Rekultivierungsschicht, die an Standorten mit geringem Niederschlagseintrag und hoher potentieller Evapotranspiration so gestaltet und hergestellt wird, dass sie so viel Wasser pflanzenverfügbar speichern kann, dass sie die vertikale Absickerung von Wasser aus dem Wurzelraum (und mithin die potentielle Einsickerung in die Deponie) im Verbund mit einer auf dieses Ziel hin etablierten Vegetation so stark reduziert, dass sie im Fall der Deponieklassen II und III der DepV eine Komponente der Kombinationsdichtung und im Fall der Deponiekategorie I die mineralische Dichtung ersetzen kann.
<i>Bodenmaterial</i>	nach LAGA, 1997 in der aktuellen Novellierung: <ul style="list-style-type: none"> ➤ gem. BBodSchG, § 2 Abs. 1: Obere Schicht der Erdkruste soweit sie Träger der Bodenfunktionen nach BBodSchG, §2, Abs. 2 ist, einschließlich ihrer flüssigen und gasförmigen Bestandteilen (Bodenlösung bzw. Bodenluft) sowie ➤ Bodenaushub aus der Gewinnung und Aufbereitung nichtmetallischer Bodenschätze, der als Abfall entsorgt wird ➤ Bodenmaterial mit maximal 10 Vol.-% mineralischen Fremdbestandteilen ➤ Bodenmaterial, das in Bodenbehandlungsanlagen behandelt wurde ➤ Baggergut mit maximal 10 Gew.-% Ton und Schluff
<i>Oberboden</i>	nach DIN 18915: durch physikalische, chemische und biologische Vorgänge entstandene oberste, humose Schicht des belebten Bodens („Mutterboden“)
<i>Unterboden</i>	nach DIN 18915: unter dem Oberboden liegende verwitterte Bodenschicht
<i>Bodenaushub</i>	Def. nach LAGA, 1997: Natürlich anstehendes und umgelagertes Locker- und Festgestein (DIN 18196), das bei Baumaßnahmen ausgehoben oder abge-

	tragen wird (ohne humosem Oberboden, Bankettschälgut und Bergematerial)
<i>Bauschutt / Bodengemische</i>	Def. nach LAGA, 1997: Bodenaushub mit ≥ 10 Vol.-% mineralischen Fremdbestandteilen (z.B. Schlacke, Ziegelbruch), zukünftig „Gemische“
<i>Rekultivierungs-substrat</i>	In einem festgelegten technischen Verfahren aus unterschiedlichen Komponenten als Ersatz für natürlichen Boden oder Bodenaushub zum Zwecke der Rekultivierung hergestellter Erdstoff
<i>Kompost</i>	Durch Mikroorganismen weitestgehend umgesetztes organisches Material (Rottegrad IV oder V, „Fertigkompost“)

2.2 Anforderungen an die Rekultivierungsschicht

Die in den Regelwerken, insbesondere TA Siedlungsabfall und DepV, gestellten Mindestanforderungen an die Rekultivierungsschicht wurden bereits im Kapitel 1 erläutert. Zusätzlich enthält die GDA-Empfehlung E2-31 (DGGT, 2000), auf die häufig in Ausschreibungen Bezug genommen wird, umfangreiche Hinweise zum Entwurf, zur Auswahl und Eignungsprüfung der Böden sowie zur Herstellung, Qualitätssicherung und Nachsorge von Rekultivierungsschichten.

Die E2-31 nennt drei Gruppen von Funktionen der Rekultivierungsschicht:

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

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

- Ausreichende Mächtigkeit
- Gute Durchwurzelbarkeit
- Hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität
- Ausreichendes Infiltrationsvermögen und Unempfindlichkeit gegen Verschlammung
- Ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung von Stauwasserbildung (Gefahr von Hangquellen, Rutschungen und Luftmangel für Pflanzenwurzeln)
- Standsicherheit (in sich und im Verbund mit den anderen Systemkomponenten)
- Beständigkeit gegen alle Formen der Erosion (Wind, Wasser, innere und äußere Erosion, Suffosion, Kontakterosion)

- Stabiles Korngerüst und Bodengefüge (nicht sackungs- oder lösungsgefährdet, kein Makroporengefüge)
- Geringes Lösungs- und Austragspotential von Stoffen, die in der Entwässerungsschicht und ggf. in einer Kapillarsperre ausfallen und deren Durchlässigkeit verringern können
- Ausreichende pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte, günstige Bodenreaktion und Pufferung
- Aufbau aus umweltverträglichen Materialien

In der E2-31 werden auch die bodenkundlichen und bodenhydrologischen Grundlagen (insbesondere Porengrößenverteilung und pflanzenverfügbares Bodenwasser) erläutert sowie Daten zur Durchwurzelung von Rekultivierungsschichten zusammengestellt, so dass hier auf eine entsprechende Darstellung verzichtet wird.

Da Messwerte zum pflanzenverfügbaren Bodenwasser (nutzbare Feldkapazität, nFK) in Rekultivierungsschichten von Deponien kaum verfügbar sind, stellt die E2-31 die an ungestörten, reifen natürlichen Böden ermittelten Zusammenhänge zwischen Bodenart, Trockendichte und nFK dar (Bild 2-31.3 in DGGT, 2000). Textlich heißt es in der GDA-Empfehlung hierzu: *„Die Trockendichte beeinflusst die nutzbare Feldkapazität umgekehrt proportional. Allerdings ist dieser Einfluss in natürlichen Böden weniger stark als die Einflüsse von Mächtigkeit und Bodenart.“* ... *„Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat als zentrale Zielgröße bei der Dimensionierung von Rekultivierungsschichten kann somit durch die Wahl der Bodenart (einschließlich Humusgehalt), durch die Schichtmächtigkeit und den Verdichtungsgrad beim Einbau beeinflusst werden.“*

Für die Einbautechnik wird daraus in Kapitel 4 der GDA-Empfehlung E2-31 abgeleitet:

„Der Abbau, die ggf. notwendige Zwischenlagerung und der Einbau des Bodenmaterials ist unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit so durchzuführen, dass Verdichtungen auf das unvermeidbare Maß beschränkt werden. Ober- und Unterboden sind getrennt abzubauen, zu lagern und einzubauen. Die Materialien sollten trocken bis feucht (halbfest bis steif) und keinesfalls sehr feucht bis nass (weich bis breiig) bearbeitet werden. Die Zwischenlagerung des Materials kann zu starken Qualitätsverschlechterungen führen und ist entweder zu vermeiden oder zeitlich zu begrenzen und an die in DIN 18915 und DIN 19731 genannten Anforderungen zu knüpfen.“

Es gibt verschiedene Einbautechniken, die ohne großen Aufwand eine geringe Einbaudichte ermöglichen. Wesentlichen Einfluss auf die Verdichtung im Einbauzustand

haben die Baugeräte und deren Einsatz. Jede Bodenschicht ist möglichst in einer Lage einzubauen.

Die maximale Mächtigkeit einer solchen Lage hängt von der Konsistenz des Bodens, der Böschungsneigung und der Kapazität der Baugeräte ab. Durch einen Einbau vor Kopf soll die bereits eingebaute und abgenommene untere Lage nicht nachträglich verdichtet werden. Die Fahrwege im Einbaufeld sind so zu planen, dass möglichst kurze und wenige Überfahrten notwendig sind. Hierbei sind Kettenfahrzeuge mit möglichst geringer Bodenpressung (bis 15 kPa) vorteilhaft. Bei großen Einbauflächen sollten Fahrstraßen in der Fläche durch eine Überhöhung angelegt werden, die anschließend rückwärtsfahrend mit einem Bagger aufgelockert und rückgebaut werden (seitliches Verteilen des Bodens). Weitere Möglichkeiten zum lockeren Einbau von Böden sind bei der Verwendung von Langlöffel- oder Teleskopbaggern, seitlich oder auf Fahrstraßen stehend, oder Bandabsetzern gegeben.

Bei der Herstellung der Rekultivierungsschicht sind die Anforderungen der DIN 18915 und DIN 19731 zu berücksichtigen.

In einem Probefeld ist die Eignung des vorgesehenen Geräteeinsatzes zu überprüfen und ggf. an die Herstellungsziele gemäß Entwurf und Eignungsprüfung anzupassen. Die ausführende Firma ist aufzufordern, hierzu vorab ein Ausführungskonzept vorzulegen. Das Probefeld ist in Anlehnung an die in E 3-5 dargestellten Prinzipien anzulegen.“

3 Fallbeispiele zum Einfluss der Trockendichte auf die bodenhydrologischen Kennwerte

Die melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft hat in der Funktion als Planer oder fremdüberwachende Stelle in den vergangenen 4 Jahren in mehreren Oberflächenabdichtungsprojekten Rekultivierungsschichten untersucht. In diesem Kontext haben wir zahlreiche Laborversuche zur Bestimmung der Luftkapazität und der nutzbaren Feldkapazität durchgeführt, die für unterschiedliche Böden den Einfluss der aus der Einbautechnik resultierenden Einbaudichte beschreiben. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse zu diesem Zusammenhang anhand von Fallbeispielen vorgestellt, wobei als Bezugsgröße immer die Schätzwerte von Luftkapazität und nutzbarer Feldkapazität für natürliche Böden nach AG BODEN, 1994 als Linie mit verzeichnet sind.

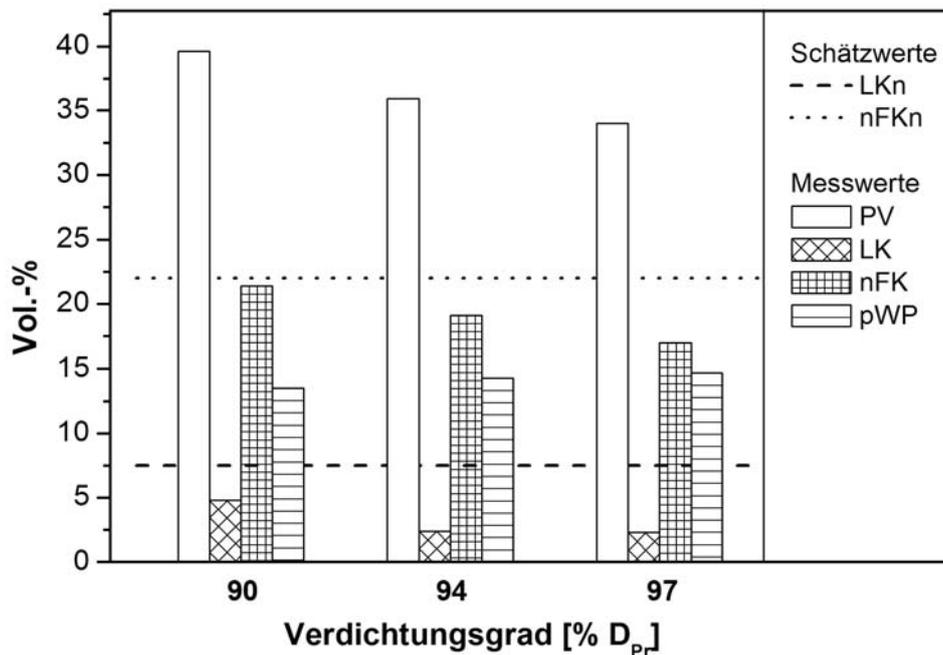


Abbildung 1 Schluffig lehmiger Sand (Slu, G0, h3, c3) aus Auenlehm (Boden KG): Bodenhydrologische Kennwerte Porenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (pWP) in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

Das erste Beispiel in Abb. 1 zeigt einen sehr ton- und schluffreichen Auenlehm, der im Zuge der Eignungsprüfung für eine Rekultivierungsschicht im Oberflächenabdichtungssystem für eine Deponie der Klasse II nach TA Siedlungsabfall untersucht wurde. Mit zunehmender Verdichtung sinken erwartungsgemäß sowohl das gesamte Porenvolumen als auch die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität. Die nFK entspricht bei einem Verdichtungsgrad von 90 % dem Erwartungswert an natürliche Böden vergleichbarer Korngrößenzusammensetzung und ist auch bei starker Verdichtung noch recht hoch, während die Luftkapazität bereits bei einem Verdichtungsgrad von 90 % bedenklich gering ist. Der Boden ist daher als empfindlich gegen Bodenverdichtung einzustufen.

Das zweite Fallbeispiel (Abb. 2) zeigt den Einfluss unterschiedlicher im Probefeld getesteter Einbautechniken auf die Kennwerte eines Lösses, der in eine Wasserhaushaltsschicht eingebaut werden sollte. Der lockere Einbau mit dem Bagger (77 % D_{pr}) zeigt eine hohe LK und eine für die Bodenart überraschend geringe nFK, die auf eine Bodenverdichtung am Entnahmeort zurückzuführen ist. Nach 20 Tagen Liegezeit hat die Sackung infolge Eigenlast und Befeuchtung eine deutliche Abnahme von PV und LK bei gleichzeitiger geringer Zunahme der nFK bewirkt, wenngleich die nFK für eine Wasserhaushaltsschicht noch immer relativ gering ist. Der Einbau mit der

leichten Supermoorraupe und mit der bereits recht schweren Moorraupe zeigt einen geringen Einfluss auf die nFK während die LK empfindlich reduziert wird. Beide Rau-
pen sind insbesondere hinsichtlich der LK für den Einbau dieses Bodens in die Was-
serhaushaltsschicht nicht geeignet.

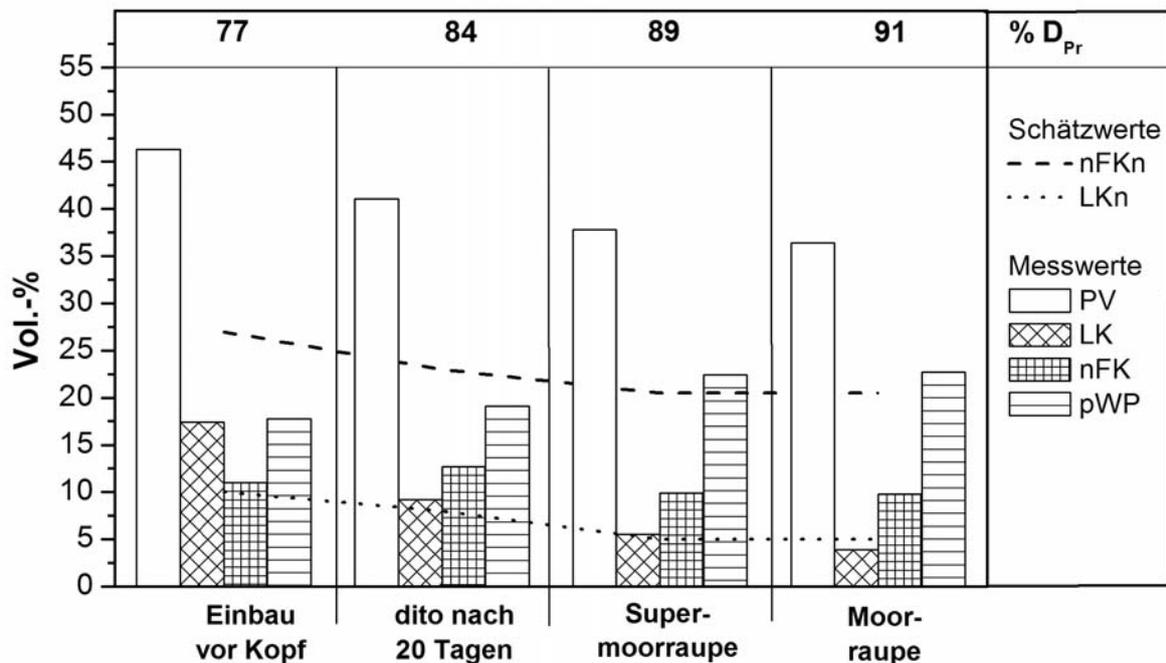


Abbildung 2 Stark lehmiger Sand (Uls, G2, h3, c4) aus Löss (Boden S): Bodenhydrologische Kennwerte in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr} nach unterschiedlicher Einbautechnik

Nicht bei jedem Boden führt jedoch eine Erhöhung der Einbaudichte zwangsläufig zu einem Rückgang von LK und nFK wie die Beispiele in Abb. 3 und Abb. 4 anhand zweier schwach schluffiger glazifluvialer Sande unterschiedlicher Herkunft zeigen, die wie der Lössboden S in Beispiel 2 in eine Wasserhaushaltsschicht eingebaut werden sollten. Bei beiden Sanden ist die nFK recht hoch und von der Einbaudichte unabhängig. Die LK sinkt in beiden Fällen mit zunehmender Einbaudichte, bleibt jedoch bis zu einer Verdichtung von 90 % bzw. 95 % D_{Pr} ausreichend hoch. Trotz fast identischer Bodenart ist der Boden UB E2 im Beispiel 3 verdichtungsanfälliger (LK) als der Boden UB E1 im Beispiel 4, bei dem außerdem kaum Unterschiede zwischen dem lockeren Einbau vor Kopf mit dem Bagger und dem seitlichen Einschleiben mit der Raupe (ohne Überfahren) auftreten. Der Boden UB E1 ist sehr unempfindlich gegen mechanische Einwirkungen.

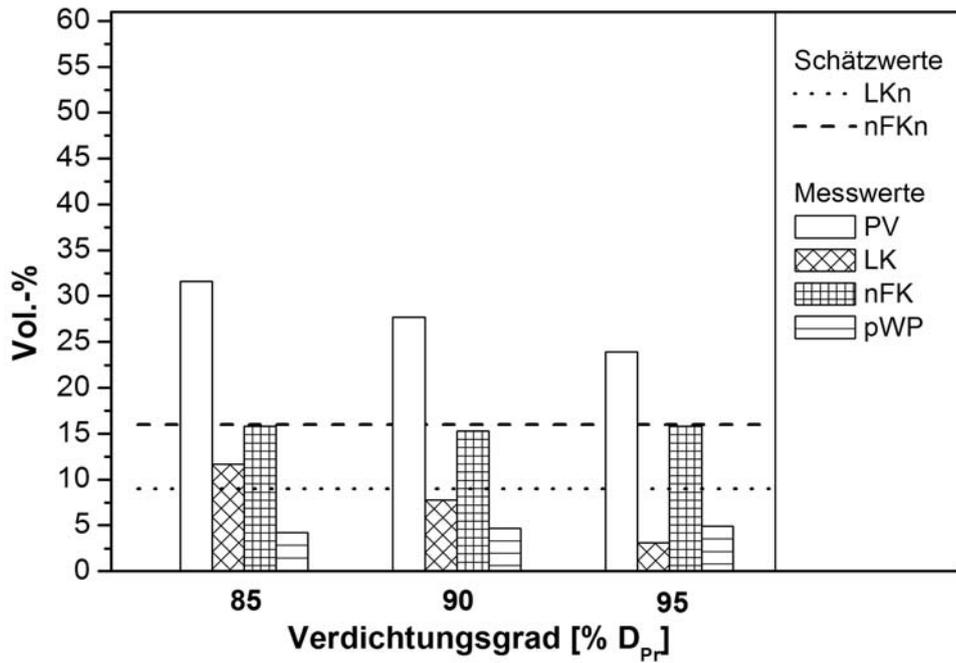


Abbildung 3 Schwach schluffiger Sand (Su2, G0, h1, c0) aus glazifluvialen Sanden (Boden UB E2): Bodenhydrologische Kennwerte in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr}

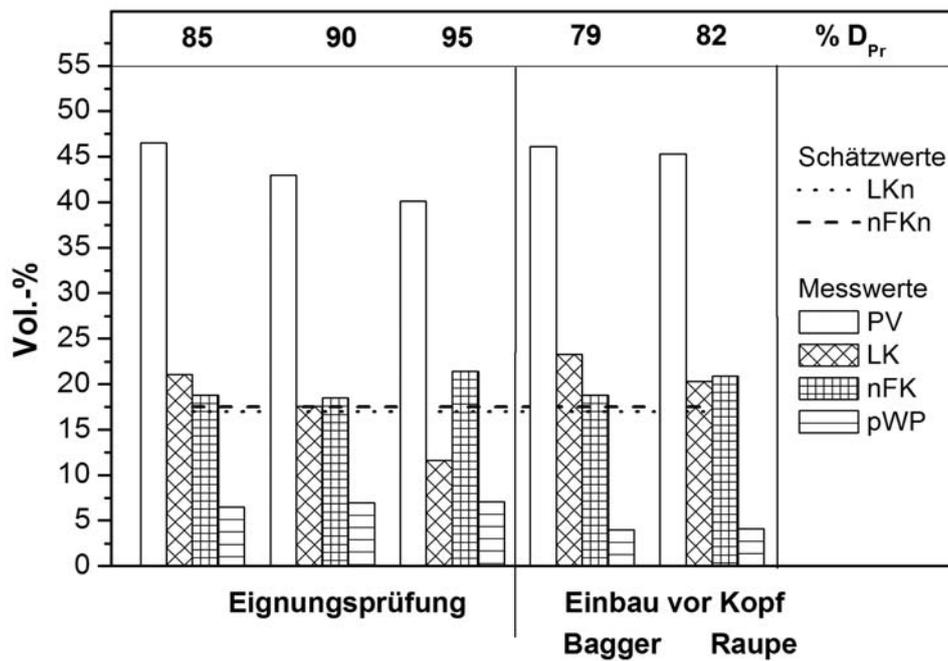


Abbildung 4 Schwach schluffiger Sand (Su2, G0, h1, c1) aus glazifluvialen Sanden (Boden UB E1): Bodenhydrologische Kennwerte in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad D_{Pr}

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

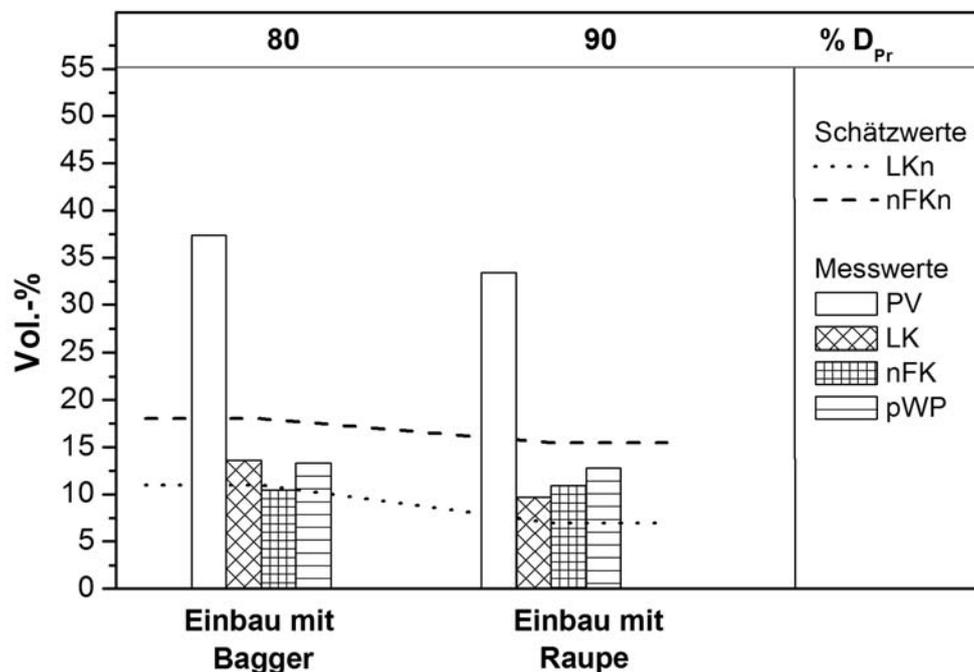


Abbildung 5 Mittel lehmiger Sand (SI3, G3, h2, c0) aus einer Halde mit gemischtkörnigem Bodenaushub unterschiedlicher lokaler Erdbaustellen mit Bauschuttanteilen (Boden H): Bodenhydrologische Kennwerte nach lockerem Einbau vor Kopf mit dem Bagger und lagenweisem Einbau mit Überfahrten durch die Raupe

Das letzte Beispiel (Abb. 6) zeigt einen ausgesprochenen Problemboden, der sich im Besitz des Bauherrn befand, in einer sehr ausgedehnten und hohen Halde auf dem Deponiegelände lagerte und in eine Rekultivierungsschicht oberhalb einer Verbunddichtung aus KDB und Trisoplast eingebaut werden sollte. Es handelt sich um einem standorttypischen tertiären Verwitterungslehm mit hohem Steinanteil (Boden K). Der ehemalige Unterboden zeigte kaum Anzeichen eines Bodenlebens und war in der Halde feucht und sehr dicht gelagert. Im diesem Ausgangszustand ergaben Laborversuche mit zunehmender Einbaudichte der Proben einen sehr starken Rückgang

der LK sowie extrem geringe Werte der nFK. Da das Bodenmaterial außerdem hohe Eisengehalte mit nennenswerten Anteilen an mobilisierbarem Eisen enthält, musste es nicht nur in bodenhydrologisch/bodenphysikalischer Hinsicht, sondern auch bodenchemisch aufbereitet werden. In Vorversuchen im Labor wurden durch eine Zugabe von Kalksand der pH-Wert deutlich angehoben und die Werte von LK und nFK (auf immer noch niedrigem Niveau) fast verdoppelt. Für den Einbau in die Rekultivierungsschicht wurde daher Kalksand in den Boden eingefräst und der Boden locker vor Kopf mit dem Bagger und mit Pistenraupen eingebaut (73 % D_{Pr}). Dadurch wurden kontinuierliche Grobporen geschaffen, die auch nach Sackung noch für eine ausreichend hohe LK und eine entsprechende Durchlüftung des Bodens sorgen, um der Mobilisierung und dem Austrag von Eisen in die Entwässerungsschicht entgegen zu wirken. Auch die nFK konnte dadurch noch etwas gesteigert werden, bleibt jedoch noch immer deutlich unter den Werten, die für natürlich gewachsene Böden mit der gleichen Bodenart erwartet werden können und die für eine ganz normale Rekultivierungsschicht anzustreben sind. Das Fräsen des stark überverdichteten Bodens hat sich im vorliegenden Fallbeispiel als geeignete Aufbereitungstechnik erwiesen. Das ist jedoch nicht immer so. Generell gilt, dass das vorbeugende Vermeiden einer schädlichen Bodenverdichtung Vorrang hat vor der Melioration.

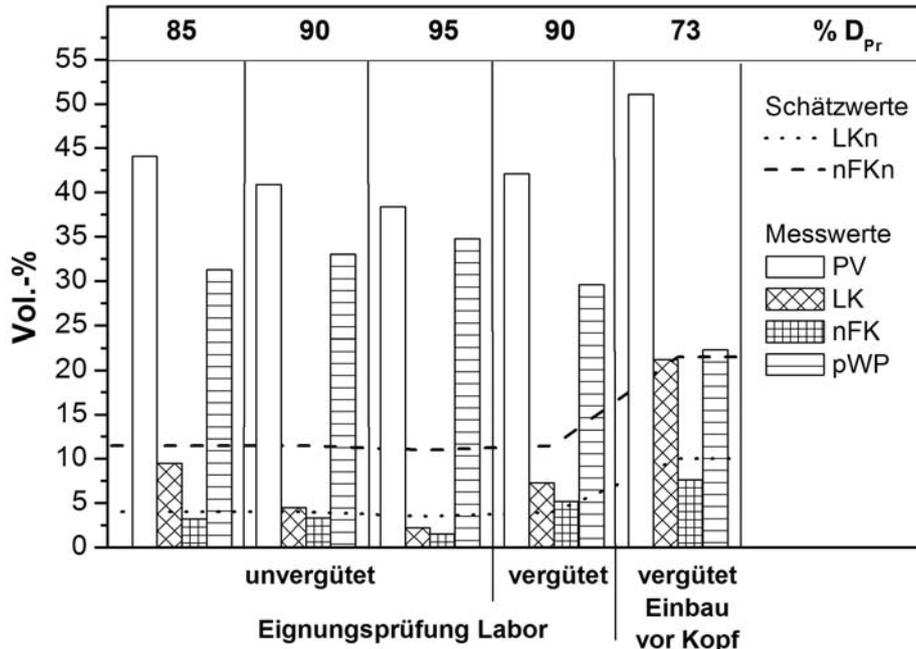


Abbildung 6 Schwach sandiger Lehm (Ls2, X3, h2) aus einer Halde mit Bodenaushub mit tertiärem Verwitterungslehm (Boden K): Bodenhydrologische Kennwerte im unvergüteten Ausgangszustand, nach Vergütung mit Kalksand sowie nach Vergütung mit Kalksand, Lockerung mit der Fräse und lockerem Einbau vor Kopf

4 Fazit

Aus den dargestellten Fallbeispielen und Praxiserfahrungen kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Die maßgeblichen bodenhydrologischen Kennwerte einer Rekultivierungsschicht können auf der Grundlage der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 1994), die Erfahrungswerte für natürliche ungestörte Böden mit vergleichbarer Bodenart nennt, nicht verlässlich abgeschätzt werden. Analysen der Luftkapazität (LK) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) sind für eine zutreffende Bewertung von Bodenmaterialien für die Rekultivierung unverzichtbar.
- Die untersuchten ton- und schluffreichen Bodenmaterialien zeigen in der Regel mit zunehmender Einbaudichte die erwarteten Rückgänge bei LK und nFK, wobei die LK meist wesentlich deutlicher auf die Erhöhung der Einbaudichte reagiert als die nFK. Die untersuchten schwach schluffigen Sande wurden allerdings nur relativ gering durch die Einbaudichte beeinflusst. Auch bestimmte Arten von Bodenaushub reagieren bezüglich der genannten Parameter kaum auf die Einbaudichte.
- Die in der GDA-Empfehlung E2-31 und den einschlägigen DIN-Normen genannten Hinweise zur Herstellung von Rekultivierungsschichten (siehe Abschnitt 3) sind im Grundsatz richtig. Der Einbau von Rekultivierungsböden sollte unter Berücksichtigung der Konsistenz bodenschonend und unter Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen im Unterboden erfolgen. Das bedeutet jedoch nicht, dass alle Böden grundsätzlich locker vor Kopf und ohne Überfahung mit Baugeräten eingebaut werden müssen. Es hängt vielmehr vom Rekultivierungskonzept und von der regionalen Verfügbarkeit geeigneter Böden ab, welche Ziele konkret zu verfolgen sind und welche Einbautechniken für welche Böden in Frage kommen. Eine Wasserhaushaltsschicht aus Löss, auf der ein stark wasserbrauchender Gehölzbewuchs etabliert werden soll, erfordert ein anders Vorgehen als eine Rekultivierungsschicht, die aus schwach bindigen Sanden über einer Kombinationsabdichtung hergestellt werden soll.
- Es wird sich sowohl mit Blick auf die Qualität als auch finanziell lohnen, den Zusammenhang zwischen der Einbaudichte und den Parametern LK und nFK bodenspezifisch im Einzelfall zu untersuchen. Im Ergebnis solcher Untersuchungen können entweder Böden gefunden werden, deren maßgebliche Kennwerte unempfindlich auf die Überfahung mit Baugeräten reagieren, oder aber es werden Schäden bei der Verwendung von empfindlichen Böden vermieden, sofern nur solche am Standort verfügbar sind. Durch eine gezielte Aufbereitung und Einbau-

technik kann es gelingen, auch solche Bodenmaterialien einzusetzen, die ohne solche Maßnahmen ungeeignet wären.

- Es gibt Fortschreibungsbedarf an der GDA-Empfehlung E2-31, da die Bedeutung der Luftkapazität und insbesondere die Abhängigkeit der LK von der Einbaudichte in der Fassung von 2000 im Vergleich zu der Bedeutung, die der nFK beigemessen wurde, etwas zu kurz kommen. Zu niedrige Luftkapazitäten und eine unzureichende Porenkontinuität sind in jedem Fall zu vermeiden, da sie mehrere unerwünschte und gravierende Folgen haben können und insbesondere im Unterboden kaum reversibel sind: Sauerstoffmangel für die Pflanzen, Staunässebildung mit Mobilisierung von Eisen und Mangan unter anaeroben Verhältnissen (damit verbunden die Gefahr der Verockerung für die Entwässerungsschicht), Bildung von Hangquellen mit Erosion sowie im schlimmsten Fall eine Reduzierung der Böschungstabilität.
- Durch eine fachkompetente Berücksichtigung dieser Zusammenhänge in der Planung und eine entsprechende Qualitätssicherung kann sowohl vermieden werden, dass auf einer unzureichenden fachlichen Grundlage übervorsichtige und teure Einbaukonzepte ausgeschrieben werden, die die Bauabläufe unnötig behindern, als auch dass aus Sorge vor zu hohen Kosten Ansätze gewählt werden, die zu einer unnötig schlechten Qualität der eingebauten Rekultivierungsböden und damit verbundenen Folgeschäden führen. Auf einen dem Stand der Technik entsprechenden und an die Erfordernisse im Einzelfall angepassten Umgang mit den örtlich verfügbaren Bodenmaterialien kommt es an.
- Die Qualitätsanforderungen an die Rekultivierungsschicht müssen projektspezifisch entwickelt, in den Verdingungsunterlagen eindeutig verankert und durch geeignete Verfahren im Zuge der Vergabe und Realisierung der Baumaßnahme gesichert werden. Nur so wird erreicht, dass mit der Ressource Boden vernünftig umgegangen wird und der Bauherr für sein Geld auch eine angemessene Leistung erhält.

5 Literatur

- | | | |
|--|------|---|
| AG Boden | 1994 | Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., Hannover |
| Berger, K. & V. Sokollek | 1997 | Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich? In: Egloffstein, T. & G. Burkhardt (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 103, S. 15-39 |
| Brauns, J., K. Kast, H. Schneider, W. Konold, P. Wattendorf & B. Leisner | 1996 | Erarbeitung von Regeln zur Herstellung einer Rekultivierungsschicht bei Deponien mit dem Stand der Technik entsprechenden Oberflächenabdichtungssystemen unter Beachtung fortwirtschaftlicher Belange. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Karlsruhe. |
| DepV - Deponieverordnung | 2002 | Verordnung über Deponien und Langzeitlager vom 10.07.2002 |
| DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik | 1998 | Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-68.11-5 vom 6. März 1998: Geosynthetische Tondichtungsbahn Bentofix B 4000. |
| DIN 18915 | 1990 | Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten. Beuth Verlag, Berlin/Köln. |
| DIN 19731 | 1998 | Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial. Beuth Verlag, Berlin/Köln. |
| DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik | 2000 | Geotechnik der Deponien und Altlasten (GDA) - Empfehlung E2-31 Rekultivierungsschichten. In: Ramke, H.G., K. Berger & K. Stief (Hrsg): Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkund. Arbeiten, 47, S. 275-293. |
| LAGA - Ländergemeinschaft Abfall | 1997 | Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln. In: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft (LAGA), Heft 20/1, Erich Schmidt Verlag, Berlin. (wird aktuell novelliert) |
| LAGA- Ländergemeinschaft Abfall | 2000 | LAGA-Arbeitsgruppe "Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen": Themenbereich: Rekultivierung. In: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Niedersächsi- |

- sches Landesamt für Bodenforschung & W. Bräcker
(Hrsg.): AbfallwirtschaftsFakten 6, S. 18-20.
- Melchior, S. 1993 Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundl. Arb., 22, 330 S. und Anhang.
- Melchior, S. 1997 The Application of Containment Technologies on Landfills and Contaminated Sites in Europe. In: Land Contamination & Reclamation, 5, 3, 209-216.
- Melchior, S. 1998 Ansätze zur Gestaltung und Dimensionierung von Rekultivierungsschichten in Abdecksystemen für Altdeponien und Altlasten. In: Stief, K. & B. Engelmann (Hrsg.): Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien - Kostentreibende Willkür oder Notwendigkeit? Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, E. Schmidt Verlag, Berlin, Band 107, S. 161-180.
- Melchior, S. 1999 Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen. In: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hrsg.): Die sichere Deponie. 15 Fachtagung 18./19.02.1999 in Würzburg, 34. S.
- TA Abfall 1991 Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Gemeinsames Ministerialblatt, 42. Jg., Nr. 8, S. 139-214, Bonn, 12.03.1991
- TA Siedlungsabfall 1993 Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger 99a, 14.05.1993