

## **Alternative biologisch aktivierte Oberflächenabdichtungen für kleinere Deponien**

**Marion Martienssen**

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH

### **Abstract**

Für größere Deponien ist die Regelabdichtung eine allgemein anerkannte und praktikable Lösung. Alternativen, wie die aerobe in situ Stabilisierung, sind zwar fachtechnisch z.T. gut untersucht, aber vor allem nach wie vor mit erheblichen Prognoseunsicherheiten behaftet.

Anders stellt sich die Situation bei vielen kleinen Deponien dar. Das Konzept der vollständigen bzw. weitgehenden Abgrenzung des Deponiekörpers von seiner Umgebung durch die Regelabdichtung stellt für diese Deponien häufig eine erhebliche technische und finanzielle Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass der abgedichtete Deponiekörper sein biologisches Potential nicht verliert. Eine Beschädigung der Abdichtsysteme kann selbst nach Jahrzehnten jederzeit zu einer Reaktivierung der Stoffumsätze führen. Im Gegensatz zur abdichtenden Konservierung des Schadstoffpotentials durch die Regelabdichtung kommt gerade für solche kleineren Deponien mit geringem Gefährdungspotential eine in-situ-Stabilisierung als nachhaltige Alternative in Betracht. Dabei werden die Schadstoffemissionen nicht vollständig unterbunden, sondern gezielt gesteuert um durch Nutzung der natürlichen Selbstreinigungspotentiale langfristig eine Wiedereingliederung des Deponiekörpers in den natürlichen Stoffkreislauf zu gewährleisten.

Eine wesentliche Maßnahme dabei stellt die biologisch aktivierte Oberflächenabdichtung dar. Eine solche Abdichtung soll den Wassereintritt gezielt reduzieren, aber nicht vollständig unterbinden. Gleichzeitig wird ein freier Gasaustritt aus dem Deponiekörper angestrebt. Eine mit methanotrophen Bakterien biologisch aktivierte und mit Sauerstoff angereicherte Schicht sorgt in einem solchen System für die weitgehend vollständige Umwandlung des freigesetzten Methan in CO<sub>2</sub>. Die kontinuierliche Sauerstoffbereitstellung in einer für den Stoffumsatz geeigneten Tiefe der Abdeckung wird u.a. durch die Verwendung Sauerstoff freisetzender Verbindungen (ORC) gewährleistet. Diese werden in die Abdeckung eingebracht und sichern den Sauerstoffbedarf mindestens für die ersten 2-3 Jahre. Durch gezielte Formulierung der ORC kann die Sauerstoff bereitstellende Schicht zusätzlich so gestaltet werden, dass mit zunehmendem Verbrauch auch eine zunehmende Abdichtung des Deponiekörpers erfolgt. Damit übernimmt die ORC-Schicht in späteren Deponiephasen die Funktion einer zusätzlichen Barriere.

Das Konzept der biologisch aktivierten Oberflächenabdichtung soll im Rahmen eines Pilotprojektes an einem Deponiestandort in Sachsen-Anhalt erprobt werden. Weil bei diesem Konzept auch Sickerwasser über längere Zeiträume anfällt, stellt die längerfristige Prognose der Sickerwasserbildung und Schadstoffausbreitung einen wichtigen Teil des Projektes dar. Dabei ist zu prüfen, ob Natural Attenuation - Prozesse (NA) oder Enhanced Natural Attenuation Maßnahmen (ENA) in die Sanierungsstrategie einbezogen werden können.

## Keywords

Deponie, Oberflächenabdichtung, biologische Methanoxidation, ORC, Sickerwasserprognose, in situ Stabilisierung

Landfill, Landfill cover, biological methane oxidation, ORC, leachate forecast, in situ stabilization

## 1 Einführung

Trotz deutlich erkennbarer Schwächen und der erheblichen Aufwendungen ist die Regelabdichtung für größere Deponien eine zum aktuellen Zeitpunkt praktikable Lösung, um vor allem die Probleme der Sickerwasseremission zu beherrschen. Alternativen, wie die aerobe in situ Stabilisierung, sind zwar fachtechnisch z.T. gut untersucht, aber für große Deponiekörper gleichfalls nur mit großem Aufwand umzusetzen und nach wie vor mit erheblichen Prognoseunsicherheiten behaftet.

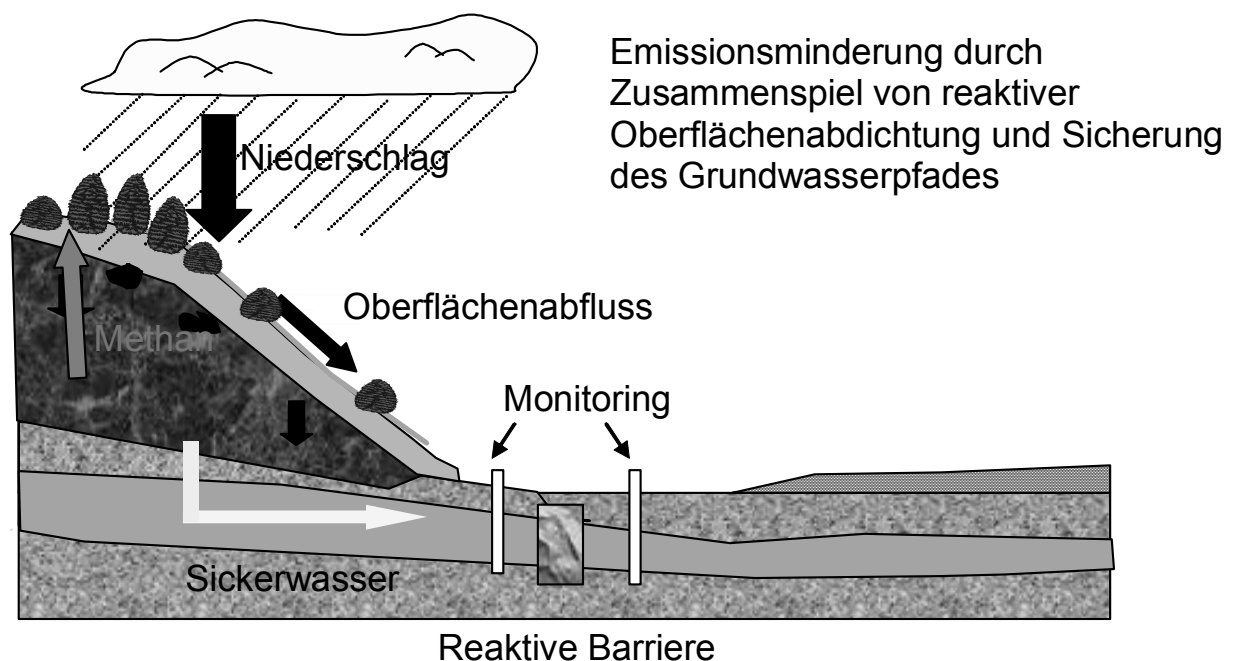
Anders stellt sich die Situation bei vielen kleinen Deponien dar. Das Konzept der vollständigen bzw. weitgehenden Abgrenzung des Deponiekörpers von seiner Umgebung durch die Regelabdichtung stellt diese Deponien häufig vor erhebliche technische und finanzielle Probleme. Da eine effektive Verwertung des Deponiegases für solche Deponien kaum möglich ist (zu geringe Mengen und Gasqualitäten), entstehen durch Fassung und Beseitigung des Deponiegases erhebliche Betriebskosten über lange Zeiträume (zwischen 15 und 30 Jahren). Hinzu kommt, dass der abgedichtete Deponiekörper sein biologisches Potential nicht verliert. Eine Beschädigung der Abdichtsysteme kann selbst nach Jahrzehnten jederzeit zu einer Reaktivierung der Stoffumsätze führen. Ein abgedichteter Deponiekörper ist folglich über lange Zeiträume von Folgenutzungen weitgehend ausgeschlossen. Gleichzeitig zeigen zahlreiche Untersuchungen, dass das Gefährdungspotential kleinerer und kleinster Deponien häufig erheblich geringer ist, als dies zu erwarten wäre. Trotz teilweise lange anhaltender Ablagerungsphasen und bei häufig nur mangelhafter Basisabdichtung sind bei vielen kleineren Deponien kaum Gefährdungen angrenzender Schutzgüter über den Wirkpfad Boden-Grundwasser festzustellen. Der Freisetzung vergleichsweise geringer Schadstoffmengen in das Grundwasser stehen hier hinreichende natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse gegenüber, die eine Aufkonzentrierung von Schadstoffen im Grundwasser weitgehend verhindern. Im Gegensatz zur abdichtenden Konservierung des Schadstoffpotentials durch die Regelabdichtung kommt gerade für solche kleineren Deponien mit geringem Gefährdungspotential eine in-situ-Stabilisierung als nachhaltige Alternative in Betracht.

Zahlreiche Untersuchungen vor allem aus den letzten 10 Jahren belegen, dass reine Hausmüllablagerungen durch Rotte innerhalb von überschaubaren Zeiträumen ihre biologische Aktivität stark reduzieren. Die verbleibende Restaktivität entspricht der von humusreichen Waldböden und steht somit im Gleichgewicht mit der natürlichen Umge-

bung. Ziel alternativer Abdichtsysteme sollte also nicht der Abschluss des Deponiekörpers von seiner Umgebung sein, sondern die mittelfristige Einbindung in das natürliche Ökosystem.

## 2 Das Konzept der reaktiven Barrieren

Das Konzept der reaktiven Barrieren geht im Gegensatz zum abgedichteten Deponiekörper davon aus, dass Wassereintrag und Stoffaustrag aus dem Deponiekörper nicht verhindert werden sondern gezielt gesteuert. Dabei sind sowohl der Pfad Deponiekörper – Atmosphäre wie auch der Grundwasserpfad zu betrachten und als eine Einheit zu behandeln (Abb. 1).



**Abbildung 1** Das Konzept der reaktiven Barrieren

Ein wesentlicher Teil des Multibarrierenkonzeptes ist die biologisch aktivierte Oberflächenabdichtung. Eine solche Abdichtung soll den Wassereintritt gezielt reduzieren, aber nicht vollständig unterbinden. Gleichzeitig wird ein freier Gasaustritt aus dem Deponiekörper angestrebt. Eine mit methanotrophen Bakterien biologisch aktivierte und mit Sauerstoff angereicherte Schicht sorgt in einem solchen System für die weitgehend vollständige Umwandlung des freigesetzten Methans in  $\text{CO}_2$ , ohne das dafür zusätzliche Maßnahmen z.B. durch Stützfeuerung in einer Hochtemperaturfackel erforderlich wären. Weil die biologischen Prozesse bei dieser technologischen Lösung nicht zum Erliegen kommen, wird im Gegensatz zur Regelabdichtung Sickerwasser über einen längeren Zeitraum weiter gebildet. Deshalb stellt die längerfristige Prognose der Sickerwasserbildung und Schadstoffausbreitung einen wichtigen Teil des Projektes dar. Dabei ist zu prüfen, ob Natural Attenuation - Prozesse (NA) in die Nachsorgestrategie

einbezogen werden können. Unter Umständen ist auch eine Optimierung des natürlichen Rückhalte- und Abbaupotentials im Rahmen von Enhanced Natural Attenuation (ENA) erforderlich. Die Einbeziehung derartiger NA und ENA Maßnahmen wird in anderen Bereichen des Umweltschutzes und der Altlastensanierung gegenwärtig allgemein anerkannt und teilweise auch praktisch realisiert.

### **3 Die methanotrophe Oberflächenabdichtung als biologisch aktive Alternative zur Regelabdichtung**

#### **3.1 Leistungen Methan oxidierender Bakterien**

Die Mechanismen der biologischen Methanoxidation sind seit vielen Jahren bekannt und intensiv untersucht. Eine umfangreiche Zusammenfassung findet sich z.B. bei HUMER UND LECHNER (1997). Im Zuge der Methanoxidation wird Methan auf mikrobiellem Wege zu CO<sub>2</sub>, Wasser und Biomasse umgesetzt. Dieser Prozess ist obligat aerob, d.h. er verläuft unter Verbrauch von Sauerstoff.

Methanoxidierende (methanotrophe) Bakterien sind auf der Erde ubiquitär verbreitet und obligat methylo-troph. Sie sind auf die Verwertung von C1-Verbindungen (Methan, Methanol) spezialisiert und nutzen diese als einzige Quelle von Kohlenstoff und Energie. Als Stickstoffquellen werden hauptsächlich Ammonium und Nitrat verwertet. Die biologische Methanoxidation läuft in vielen Ökosystemen, wie den oberen durchlüfteten Bodenschichten sehr effizient ab und stellt einen wichtigen Faktor des natürlichen Kohlenstoffkreislaufes dar. So konnten Untersuchungen belegen, dass unter naturnahen Bedingungen in den Sumpfgebieten Floridas etwa 70-90% des durch Faulung gebildeten Methans in den sauerstoffreichen Schichten von Erdreich und Atmosphäre wieder abgebaut werden (HUMER UND LECHNER, 1997).

Die Ansprüche der Bakterien an das sie umgebende Milieu sind eher gering. Methanotrophe Bakterien haben einen relativ großen pH-Toleranzbereich zwischen pH 4 und 9. Ihre maximale Wachstums- und Aktivitätsrate wird zwischen pH 5,5 und 8,5 erreicht. Die Mehrzahl der Methanotrophen besitzt einen optimalen Temperaturbereich zwischen 20°C und 37°C. Thermotolerante Stämme können ihr Wachstum bis zu 55°C aufrechterhalten. Für den Einsatz im Umweltbereich von größerem Interesse sind jedoch eher psychrophile Arten, deren Temperaturoptimum unterhalb von 20 °C liegt. Solche Arten können sich auch bei Temperaturen knapp oberhalb der Nullgradgrenze noch vermehren. Allerdings ist die Temperaturabhängigkeit der Methanoxidation erheblich. Unter natürlichen Bedingungen bilden sich üblicherweise Konsortien, die hinsichtlich ihrer Temperaturansprüche an das sie umgebende Milieu angepasst sind. So finden sich z.B. aktive Populationen mit hohen Methanumsatzraten auch in Tundraböden bei Temperaturen wenig über dem Gefrierpunkt.

Bei der Etablierung methanotropher Konsortien ist zu berücksichtigen, dass die Methanoxidation eine exotherme Reaktion darstellt, bei der pro Mol Methan 210,8 kcal freigesetzt werden. Das bedeutet, dass in aktiven methanotrophen Konsortien eine zusätzliche Aufheizung durch die Tätigkeit der Mikroorganismen stattfindet.

Der Wassergehalt des Trägermediums beeinflusst die Methanoxidation auf vielfältige Weise. Einerseits wird über die Wasserphase das Zusammenwirken von Methan und Sauerstoff vermittelt. Andererseits müssen die Milieubedingungen der Bakterien aufrecht erhalten werden. Bei Wassergehalten unter 13 % der maximalen Wasserhaltekapazität kommt die mikrobielle Aktivität zum Erliegen. Darüber wurde bei Untersuchungen mit verschiedenen Deponieabdeckmaterialien ein relativ weiter Toleranzbereich für einen optimalen Methanumsatz zwischen 40% und 80% der maximalen Wasserhaltekapazität festgestellt.

Methanotrophe Bakterien sind obligat aerob. Bei der Umsetzung von Methan werden je Mol Methan 2 Mol Sauerstoff benötigt. Eine optimale Gasphasenzusammensetzung zeichnet sich demzufolge durch ein Methan-Sauerstoff-Verhältnis von 1:2 aus. Jedoch können viele Bakterien auch noch unter mikroaerophilen Bedingungen eine gute Methanoxidation realisieren. Auch wird durch Biomasseproduktion der Sauerstoffbedarf vermindert.

Eine Reihe von Verbindungen können die Methanoxidation negativ beeinflussen. So wirken z.B. hohe Ammoniumkonzentrationen hemmend. Auch andere Substanzen, die an der Methanoxxygenase cometabolisch umgesetzt werden, können zu einer deutlichen Verminderung der Methanoxidation führen.

### **3.2 Anforderungen an biologisch aktivierte Oberflächenabdichtungen und ihre technische Umsetzung**

Trotz der prinzipiell sehr guten Voraussetzungen für den Einsatz von methanotrophen Mikroorganismen zeigen die bisher vorliegenden Resultate aus Feldversuchen einige deutliche Schwächen auf. So muss eine gleichmäßige stabile Sauerstoffbereitstellung gewährleistet sein. Die biologisch aktive Schicht, in der Sauerstoff und Methan in stöchiometrischen Verhältnissen für einen vollständigen Umsatz verfügbar sind, muss in einer hinreichenden Tiefe angeordnet sein, um auch im Winter ausreichende Umsatzraten zu gewährleisten. Letztlich darf das Porensystem der Abdeckung durch die biologische Aktivität der Mikroorganismen nicht beeinträchtigt werden. Dabei lassen sich aus bisherigen Feldversuchen bereits Erfahrungen hinsichtlich der Struktur leistungsfähiger Oberflächenabdeckungen ableiten (LECHNER UND HUMER, 2000):

- großes Luftporenvolumen (auch bei hohen Wassergehalten) und langfristige Strukturstabilität, um eine dauerhafte Zufuhr von Luftsauerstoff und Methan zu gewährleisten.
- Hohes Wasserhaltevermögen
- Gute und dauerhafte Nährstoffversorgung

Die Auswahl eines geeigneten Trägersubstrates ist bei der Herstellung einer biologisch aktivierten Oberflächenabdichtung in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung. Zum einen wirkt das Trägersubstrat als Siedlungsfläche für die Bakterien. Zum anderen ist die Bereitstellung und Nachlieferung von ausreichend Nährstoffen für das Wachstum der Bakterien für die Funktionstüchtigkeit der Systeme essentiell. In verschiedenen Studien auch im technischen Maßstab erwiesen sich dabei gut ausgereifte Müll- oder Grünkomposte als besonders geeignete Medien (LECHNER UND HUMER, 2000). Solche Materialien zeichnen sich durch eine gute Porenstruktur, eine hohe Pufferkapazität und ein gutes Nährstoffreservoir aus. Alternativ wurden auch mit nährstoff- und humusreichen Mutterböden gute Resultate erzielt. Nicht geeignet sind hingegen Sand, bindige Böden oder humusarme Mutterböden. Wie entsprechende Feldversuche belegen, lassen sich mit solchen optimierten Substraten bereits ohne zusätzliche Maßnahmen gute Methanoxidationsraten erzielen (HUPE ET AL. 2004).

Ein erhebliches Problem bisheriger Konzepte ist die Bereitstellung einer genügenden Menge an Sauerstoff. Darüber hinaus muss der Sauerstoff auch noch in einer Tiefe verfügbar sein, die auch unter Winterbedingungen eine effiziente Methanoxidation zulässt. Das Problem der kontrollierten Sauerstoffbereitstellung wird im hier dargestellten Konzept u.a. durch die Verwendung Sauerstoff freisetzender Verbindungen (ORC) gelöst. Diese werden in die Abdeckung eingebracht und sichern den Sauerstoffbedarf mindestens für die ersten 2-3 Jahre. In dieser Zeit kann sich eine stabile methanotrophe Bakterienpopulation etablieren. Die weitere Sicherstellung der Sauerstoffbereitstellung erfolgt dann im Zusammenwirken von ORC und Luftsauerstoff, dessen Transport durch die Begrünung des Deponiekörpers gesteuert wird. Durch gezielte Formulierung der ORC kann die Sauerstoff bereitstellende Schicht zusätzlich so gestaltet werden, dass mit zunehmendem Verbrauch auch eine zunehmende Abdichtung des Deponiekörpers erfolgt. Damit übernimmt die ORC-Schicht in späteren Deponiephasen die Funktion einer zusätzlichen Barriere.

Bisher kaum beachtet wurde das Problem der Verblockung des Porenraumes, welche vor allem durch bakterielle Schleimbildungen hervorgerufen wird (HILGER ET AL., 2000). Da die Bildung solcher extrazellulärer Substanzen zwischen verschiedenen Bakterienstämmen stark variiert, wurden am UFZ gezielt Organismen mit geringer Schleimbildung angereichert, die als Starterkulturen eingesetzt werden. Somit wird im Zusam-

menwirken von Trägermatrix und angepassten Organismen eine Verblockung der Methan oxidierenden Schicht verhindert.

Um den dargestellten Anforderungen an eine reaktive Barriere gerecht zu werden, lassen sich für das Gesamtkonzept einer biologisch aktivierten Oberflächenabdichtung folgende Anforderungen ableiten:

- Gewährleistung eines möglichst ungestörten Gasdurchtrittes aus dem Deponiekörper in die biologisch aktivierte Schicht.
- Sicherung einer hinreichenden Sauerstoffversorgung.
- Gewährleistung eines kontrollierten Wasserhaushaltes sowohl im Deponiekörper, wie auch in der mikrobiell wirksamen Abdeckung.
- Gewährleistung einer hinreichenden Temperaturkonstanz in der mikrobiologisch aktiven Zone.

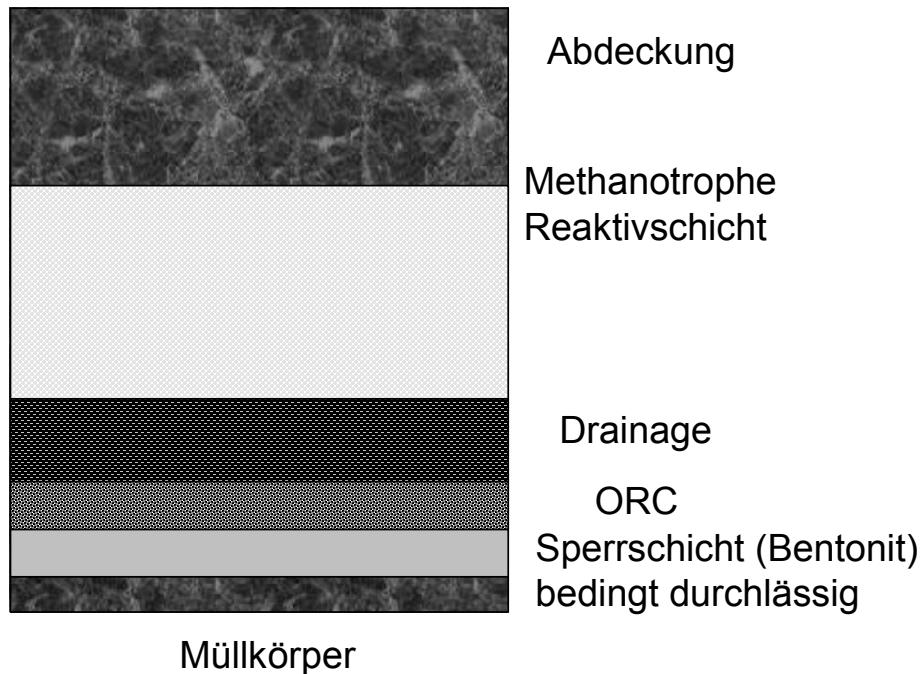
Diesen Anforderungen kann langfristig nur durch das Zusammenwirken von technischen und technologischen Maßnahmen entsprochen werden.

Für die Regulierung des Wassereintritts in den Deponiekörper kommen zunächst mineralische Barrieren in Betracht. So lässt sich z.B. Bentonit in seiner Zusammensetzung so steuern, dass einerseits eine hinreichende Wasserundurchlässigkeit erreicht wird, andererseits aber noch ein genügender Gasdurchgang gewährleistet bleibt. Eine anschließende Gasdrainage gewährleistet die gleichmäßige Verteilung des austretenden Deponiegases. Die darüber angeordnete ORC-Schicht versorgt die Mikroorganismen mit Sauerstoff und ermöglicht die Anordnung des Methan oxidierenden Horizontes in hinreichender Bodentiefe. Eine besondere Bedeutung besitzt, wie oben erläutert, die biologisch aktivierte Schicht, welche für die mikrobiellen Stoffwechselleistungen angepasst wird. Die Gesamtstärke von Methan oxidierender und Vegetationsschicht sollte nach bisherigen Untersuchungen zur Sicherstellung einer hinreichenden Aktivität eine Stärke von 1,5 m bis 2 m aufweisen. Diese Stärke ist erforderlich, um eine ausgeprägte Vegetationsschicht mit guter Durchwurzelung zu gewährleisten, ohne dass eine Schädigung der Abdeckung oder der Vegetationsschicht auftritt.

Durch die Gestaltung der Vegetationsschicht wird im Zusammenwirken einer mehrstöckigen Vegetation mit den technischen Maßnahmen in der Abdichtung selbst eine Regulation des Wasserhaushaltes von Abdeckung und Deponiekörper gewährleistet. Angestrebt wird dabei eine Restdurchlässigkeit der gesamten Abdeckung zwischen 10 und 20 % (70-100 mm/a Versickerung). Geringere Versickerungen sind nicht wünschenswert, weil dadurch der biologische Abbauprozess im Deponiekörper behindert wird oder gar zum Erliegen kommt. Dies würde jedoch bedeuten, dass dann zu späteren Zeit-

punkten mit unkontrollierten neuen Gas- und Sickerwasseremissionen gerechnet werden.

Der mögliche Aufbau einer biologisch aktivierten Oberflächenabdeckung ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2** Schematischer Aufbau einer reaktiven Oberflächenabdichtung

#### 4 Voraussetzungen für den Einsatz reaktiver Barrieren

Für den erfolgreichen Einsatz der In-Situ-Stabilisierung unter Verwendung reaktiver Barrieren kommen beim jetzigen Stand der Forschung und Entwicklung nur Deponien in Betracht, die gewisse ablagerungstechnische Voraussetzungen erfüllen. Diese können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Ablagerung besteht überwiegend aus Siedlungsabfall.
2. Es wurden keine industriellen Abfälle mit umweltgefährdenden wassermobilisierbaren Inhaltsstoffen abgelagert.
3. Die Deponie besitzt keinen direkten Kontakt zum Grundwasserkörper.
4. Durch die Deponie besteht aktuell keine erhebliche Beeinträchtigung des Grundwassers.
5. Durch Lage und Aufbau des Untergrundes ist auch für die Zukunft keine Beeinträchtigung des Grundwassers zu erwarten.



## 5 Literatur

- Hilger, H., Cranford, D.F., 2000 Methane oxidation and microbial exopolymer production in landfill cover soil. *Soil Biol. & Biochem.* 32, 457  
Barlaz, M. A.
- Humer, M., Lechner, P. 1997 Grundlagen der biologischen Methanoxidation. *Waste Reports* 5, S. 1-40
- Hupe, K., Heyer, K.-U., Becker, J.F., Traore, O., Koop, A., Stegmann, R. 2004 Standortangepasste Oberflächenabdichtungen zur Methanoxidation – Systeme und Funktionsweise.
- Lechner, P., Humer, M. 2000 Technischer Aufbau einer Deponieabdeckung zum Zwecke der Methanoxidation. *Hamburger Berichte zur Abfallwirtschaft* 16, S. 285-299

### **Anschrift der Verfasserin**

PD. Dr. rer. nat. habil. Marion Martienssen  
UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Dept. Hydrogeologie  
  
D-06120 Halle/S.  
Telefon +49 345 5585212  
Email [marion.martienssen@ufz.de](mailto:marion.martienssen@ufz.de)  
Website: [www.ufz.de](http://www.ufz.de)