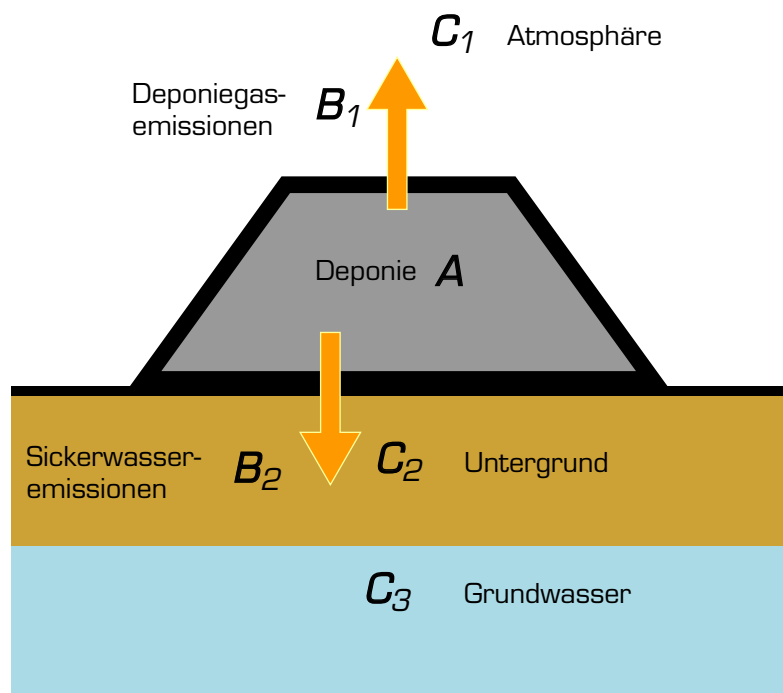


Standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer

EXECUTIVE SUMMARY





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer (SKUDENA)

Executive Summary

David Laner
Johann Fellner
Paul H. Brunner

Gefördert im Zuge der
Bund-Bundesländer-Kooperation
und durch das
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Wien, Jänner 2011

Projektleitung
Johann Fellner & Paul H. Brunner

Projektbearbeitung
David Laner
Johann Fellner

Grafische Gestaltung und Layout
Inge Hengl

Impressum
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226
Tel.: +43 1 58 801 226 41 (Skr.)
Fax.: +43 1 504 22 34
E-Mail: aws@iwa.tuwien.ac.at
<http://www.iwa.tuwien.ac.at>

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Ziel und Fragestellungen	2
3	Grundlagen der Beurteilung	3
3.1	Emissionsverhalten abgelagerter Abfälle	3
3.1.1	Emissionsverhalten ehemaliger Hausmülldeponien	4
3.1.2	Emissionsverhalten von Reststoffdeponien (Schlackedeponien)	4
3.1.3	Emissionsverhalten von Baurestmassendeponien	5
3.1.4	Prognosemodelle für Deponieemissionen	5
3.2	Dauerhafte Funktion technischer Barrieren	8
3.2.1	Funktion und Elemente technischer Barrieren	8
3.2.2	Prognose der zukünftigen Barrierefunktion	9
3.3	Schadstoffabminderungsprozesse in der Deponieumgebung	10
3.3.1	Rückhalte-, Abbau- und Verdünnungspotentiale im Deponieuntergrund	11
3.3.2	Abschätzung der Schadstoffmigration im Deponieuntergrund	11
4	Leitfaden zur Bestimmung von Nachsorgeentlassungskriterien	13
5	Anwendung der Bewertungsmethode für drei Deponien	16
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	19

1 Motivation

Deponien als Senken für Stoffe, die aus ökonomischen oder ökologischen Gründen nicht verwertbar sind, stellen ein zentrales Element einer nachhaltigen Abfallwirtschaft dar. Auch zukünftige Generationen werden trotz effizienter werdender Recyclingtechnologien auf den Gebrauch von Deponien nicht verzichten können.

Aktuell sind Deponien allerdings so konzipiert, dass nach Beendigung der Abfallablagerung noch umweltrelevante Emissionen zu erwarten sind und Deponie daher einer Nachsorge (Bewirtschaftung und Kontrolle) bedürfen.

Gemäß der österreichischen Deponieverordnung (2008) beginnt die Nachsorgephase mit dem angezeigten Ende der Abfallablagerung und endet mit der behördlichen Feststellung, dass keine Nachsorgemaßnahmen mehr erforderlich sind. Das ist dann der Fall, wenn von einer Deponie keine Gefährdung für Mensch und Umwelt mehr zu erwarten ist.

Bis dato gibt es allerdings keine Kriterien, anhand derer Behörden beurteilen können, ob und wie lange von einer Deponie noch Gefährdungen der Umwelt zu erwarten sind bzw. wie lange Nachsorgemaßnahmen erforderlich sind. Information darüber wäre aber vor dem Hintergrund der zu leistenden finanziellen Sicherstellungen, die zukünftig anfallende Kosten für die Behandlung von Emissionen sowie Kontroll- und Instandhaltungsarbeiten von Deponieeinrichtungen decken sollen, sowohl für den Deponiebetreiber als auch für die zuständige Behörde von zentraler Bedeutung.

2 Ziel und Fragestellungen

Das Ziel des gegenständlichen Projektes war es eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt standortspezifische Kriterien (unter Einbeziehung von Klima, Geologie, Hydrogeologie, betroffenen Schutzgütern, ...) zur Beendigung der Deponienachsorge abzuleiten.

Im Konkreten wurden dazu folgende Fragestellungen beleuchtet:

- Welche Größen sind bei der Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponien zu berücksichtigen?
- Welche Parameter einer Deponie eignen sich als Leitgrößen zur Beschreibung des aktuellen Emissionsverhaltens und welche Methoden können zur Prognose des zukünftigen Emissionsverhaltens herangezogen werden?
- Welches Maß an Restemissionen ist unter Einbeziehung der am Deponiestandort betroffenen Schutzgüter als langfristig umweltverträglich anzusehen?
- Inwiefern können in die Emissions- und Immissionsbetrachtungen natürliche Rückhalte- und Abbauprozesse am Deponiestandort miteinbezogen werden?
- Welche, insbesondere auch langfristige Funktion kommt in diesem Zusammenhang der technischen Ausgestaltung der Deponie zu?

Die Beantwortung dieser Fragen erlaubt es für spezifische Deponien Nachsorgezeiträume abzuschätzen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde diese Abschätzung für drei konkrete Deponiestandorte (unterschiedliche Deponietypen, klimatische und hydrogeologische und technische Ausgestaltung) durchgeführt und dokumentiert.

3 Grundlagen der Beurteilung

Die methodische Basis des entwickelten Ansatzes zur Bewertung von Deponien bzw. Deponieemissionen besteht aus:

- A) der Beschreibung des Emissionsverhaltens der abgelagerten Abfälle,
- B) der Beurteilung der dauerhaften Funktion der technischen Deponiebarrieren und
- C) der Evaluierung von Schadstoffausbreitungsprozessen in der Deponieumgebung und deren Auswirkungen auf betroffene Schutzgüter

Demgemäß müssen für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit einer Deponie Informationen zu den abgelagerten Abfällen und damit verbundenen Emissionen, den technischen Deponiesystemen und den natürlichen Standortbedingungen erhoben und evaluiert werden. Anhand dieser Informationen ist schließlich zu beurteilen, ob das betrachtete Deponiesystem derzeit oder zukünftig mit Emissionen verbunden ist, die zu einer unzulässigen Beeinflussung relevanter Schutzgüter (z.B. Grundwasser) führen. Ist dies nicht zu befürchten, so kann die Deponie aus der Nachsorge entlassen werden.

Im Folgenden sind die wichtigsten Aspekte jener drei Themenkomplexe (Emissionsverhalten, technische Barrieren und Schadstoffausbreitung), die zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen sind, zusammengefasst.

3.1 Emissionsverhalten abgelagerter Abfälle

Das Emissionsverhalten der abgelagerten Abfälle stellt sicherlich jenen Aspekt dar, dem in Bezug auf die Beurteilung der Umweltverträglichkeit die größte Bedeutung zukommt. Dem wurde im Rahmen des Projektes einerseits durch eine umfassende und detaillierte Analyse von bestehenden Literaturdaten und andererseits durch die Auswertung von zahlreichen Datensätzen von geschlossenen Deponien (vorwiegend in Österreich) Rechnung getragen.

Im Detail wurde das Emissionsverhalten von drei Deponietypen

- (ehemaligen) Hausmülldeponien,
- Reststoffdeponien (Schlackeablagerungen) und
- Baurestmassendeponien

analysiert. Neben der Auswertung des zeitlichen Emissionsverlaufs und der zukünftigen Emissionspotentiale wurden dabei auch verschiedene Modelle zur Abschätzung zukünftiger Emissionen diskutiert. Je nach betrachtetem Deponietyp (abgelagerte

Abfälle) weisen die Emissionen unterschiedliche Charakteristika auf und sind dementsprechend differenziert zu beurteilen.

3.1.1 Emissionsverhalten ehemaliger Hausmülldeponien

Im Sickerwasser von ehemaligen Hausmülldeponien sind vor allem NH_4 , TOC^1 (bzw. CSB), Cl und AOX als problematisch anzusehen, wobei speziell die NH_4 -Konzentrationen mit zunehmender Ablagerungsdauer nur eine sehr langsame Abnahme erkennen lassen. Schwermetalle liegen im Sickerwasser meist in geringer Konzentration vor, können aber vereinzelt doch zu Grenzwertüberschreitungen (im Bezug auf Einleitgrenzwerte) führen.

Über den Gaspfad ist für Hausmülldeponien primär die Freisetzung von Methan relevant, wobei bei der Erhebung und insbesondere bei der Auswertung von Messdaten die unvollständige Erfassung des Deponiegases (bzw. diffuse Gasemissionen), das Ansaugen von Umgebungsluft, sowie gegebenenfalls relevante Beimengungen an Spurengasen zu berücksichtigen sind.

Modelle zur Abschätzung zukünftiger Emissionen beruhen auf der Kenntnis mobilisierbarer Stoffpotentiale und zukünftiger Interaktionen zwischen Abfallkörper und Umgebung. Generell gilt, dass auch nach dem Abklingen der intensiven Umsetzungsvorgänge im Abfallkörper das verbliebene Stoffpotential noch hoch ist und Hausmülldeponien somit über lange Zeit eine potentielle Gefährdung für die Umwelt darstellen.

3.1.2 Emissionsverhalten von Reststoffdeponien (Schlackedeponien)

Das Sickerwasser von Deponien für Müllverbrennungsschlacke weist in den ersten Jahrzehnten vor allem hohe Konzentrationen löslicher Salze auf, aber auch TOC oder NH_4 liegen teilweise über den Einleitgrenzwerten. Letzteres ist vor allem auf den unvollständigen Ausbrand der Verbrennungsrückstände und dadurch bedingte organische Abfallanteile in der Schlacke zurückzuführen². Die Schwermetallkonzentrationen bewegen sich in den ersten Jahrzehnten des Deponiebestandes auf sehr niedrigem Niveau, könnten aber auf lange Sicht (Jahrtausende) verstärkt aus der Schlacke mobilisiert werden. Ein entsprechender Ansatz zur Abschätzung langfristiger Emissionscharakteristika (basierend auf geochemischen Modellrechnungen) wurde vorgestellt, kurz- bis mittelfristig können Emissionsmodelle aber unter der

¹ Betreffend die organische Sickerwasserbelastung (CSB bzw. TOC) ist eine stoffspezifische Charakterisierung (z.B. Huminstoffanteil, persistente organische Schadstoffe) notwendig, um das Umweltgefährdungspotential besser einschätzen zu können.

² Die untersuchten Deponien lagen allesamt in der Schweiz, wo aufgrund **veralteter Müllverbrennungsanlagen der Ausbrand oft unvollständig** ist. In Österreich ist daher mit geringeren TOC and NH_4 Konzentration im Sickerwasser von Schlackedeponien zu rechnen.

Annahme gleichbleibender Bedingungen erstellt und anhand vorhandener Beobachtungen angepasst werden.

3.1.3 Emissionsverhalten von Baurestmassendeponien

Bei Baurestmassendeponien lassen sich vor allem hohe SO_4 -Konzentrationen beobachten, außerdem sind auch erhöhte TOC-, N- und Cl-Gehalte im Sickerwasser anzutreffen. Letzteres ist insbesondere dann der Fall, wenn die Sortenreinheit bzw. der Vorsortierungsgrad der abgelagerten Baurestmassen gering ist. Vereinzelt können auch Schwermetalle (Eisen, Zink) oder spezifische organische Schadstoffe (z.B. PAK) im Sickerwasser von Bedeutung sein. Abgesehen von der Fortschreibung beobachteter Emissionsverläufe, kann das Emissionsverhalten abgelagerter Baurestmassen aufgrund geeigneter Laborversuche (z.B. Säulenelutionsversuche) abgeschätzt werden.

3.1.4 Prognosemodelle für Deponieemissionen

Trotz genereller Emissionstrends für einzelne Deponietypen ist zu betonen, dass eine Bewertung zu erwartender Emissionen aus dem Abfallkörper einzelfallspezifisch erfolgen muss. Die Leitparameter in Tabelle A stellen die Grundlage für die Beschreibung der Emissionen am Deponiestandort dar. Generell ist bei der Erhebung und Analyse von Messdaten die Qualität einer Messung (z.B. Angabe der Abflussverhältnisse, Anwendung eines (dokumentierten) Probenahme- und Analyseprotokolls, repräsentativer Probenahmeort) mindestens ebenso wichtig, wie eine adäquate Frequenz. Demnach empfiehlt es sich für stillgelegte Deponien nach einer umfangreicheren Charakterisierung des Sickerwassers (und ggf. der Gasemissionen) das routinemäßige Monitoring auf relevante Parameter zu begrenzen und in größeren Zeitabständen ein breiteres Spektrum an Parametern zu erheben. Auf diese Weise wäre trotz geringerer Intensität der Emissionsüberwachung unter stabilen Deponierandbedingungen kein wesentlicher Informationsverlust in Hinblick auf die Beurteilung der Emissionen zu erwarten.

Tabelle A: Leitparameter zur Beurteilung der zukünftigen Deponieemissionen

Sickerwasser - Hauptparameter	Sickerwasser - Nebenparameter
<ul style="list-style-type: none"> - Sickerwasserkonzentrationen <ul style="list-style-type: none"> o Ammonium (NH₄), Nitrat (NO₃), Nitrit (NO₂) o CSB und/oder TOC bzw. DOC, BSB₅ o Cl, SO₄, Metalle (Fe, Zn, Cr etc.) - Sickerwassermengen <ul style="list-style-type: none"> o Sickerwasseranfall (kontinuierliche Messung, Pumpzeiten, Bilanzen usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrische Leitfähigkeit - Abflussverhältnisse bei Probenahme - pH-Wert, Redox (Eh), Temperatur - BSB₅/CSB-Verhältnis (< 0,1 typisch für stabile Methanphase)* - Organische Sickerwasserinhaltsstoffe (BTEX, AOX, Kohlenwasserstoffe, PAK) - Weitere Sickerwasserinhaltsstoffe
Deponiegas – Hauptparameter*	Deponiegas- Nebenparameter*
<ul style="list-style-type: none"> - Gasproduktionsrate und Gasabsaugrate (gemessen bzw. berechnet) - CH₄, CO₂, O₂, N₂ (in [Vol%]) 	<ul style="list-style-type: none"> - CH₄/CO₂-Verhältnis - Spurengase (z.B. H₂S, FCKWs)
Abfallkörper – physische Faktoren	Abfallkörper - Qualität
<ul style="list-style-type: none"> - Abfallmaterialien (Korngrößen, Heterogenität, Durchlässigkeit) - Wasser-Feststoff-Verhältnis - Heterogenität der Wasserströmung und -verteilung - Setzungsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - Abfallzusammensetzung (chemisch), Stoffbilanzen - Untersuchungen: <ul style="list-style-type: none"> o lösliche Abfallanteile (in Abhängigkeit des pH-Wertes), o biochemische Mobilisierbarkeit organischer Abfallanteile*

*Typischerweise nur für Hausmülldeponien relevant.

Um die zukünftigen Emissionen von Deponiegas und Sickerwasser abzuschätzen, werden Emissionsmodelle basierend auf der Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle, der Wasserströmungsverhältnisse im Deponiekörper (Heterogenität) und verschiedenen deponietechnischen Faktoren (Schütthöhe, Einbautechnik) erstellt (vgl. Tabelle A). Die Leitparameter in Tabelle A bilden die Grundlage zur Entwicklung der Prognosemodelle für Deponiegas und Sickerwasser, wobei je nach Datenlage und Prozessverständnis unterschiedliche Modelle zur Anwendung kommen können (z.B. Trendextrapolationen vs. physikalisch basierte Prozessmodelle).

Zur Vorhersage von Sickerwasserkonzentrationen, für die in der Nachsorgephase ein exponentiell abnehmender Trend zu beobachten ist (vgl. Abbildung A), wird das Emissionsmodell in Gleichung A herangezogen. Das Modell beruht auf einem Ansatz von Belevi und Baccini (1989), wurde aber zur Berücksichtigung der Heterogenität der Wasserströmung (Parameter h in Gleichung A) und der langsamen Mobilisierung von Abfallinhaltsstoffen (2. Term der Gleichung A) modifiziert. Zur Anpassung (Kalibrierung) des Modells bzw. der Modellparameter werden Untersuchungen zur Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle und vor allem Sickerwassermonitoringdaten aus der Phase abnehmender Konzentrationen (z.B. nach Aufbringung einer Oberflächenabdeckung) verwendet (vgl. Abbildung A). Die vorhergesagten Emissionen sind durch Monitoringdaten zu belegen und gegebenenfalls ist das Prognosemodell aufgrund der beobachteten Konzentrationen anzupassen. Die Entscheidung ob eine Anpassung der Modellparameter notwendig ist, muss in Anbetracht bereits

beobachteter Variabilitäten der Sickerwassercharakteristika (Schwankungsbreiten der vorhandenen Messdaten) und im Hinblick auf die Unsicherheiten im Rahmen der Modellentwicklung getroffen werden, entsprechend ist ein Vertrauensbereich für die Validierung des Prognosemodells festzulegen (vgl. Abbildung A).

$$\text{Gleichung A: } c(t) = c_0 \cdot e^{-\left(\frac{c_0}{m_v} \cdot \Delta \frac{W}{F} \cdot h\right) \cdot t} + c_{0,org} \cdot e^{-\left(\frac{c_{0,org}}{m_{org}} \cdot \Delta \frac{W}{F} \cdot h\right) \cdot t}$$

wobei: $c(t)$ = mittlere jährliche Sickerwasserkonzentration nach t Jahren [mg/l], c_0 = Anfangskonzentration aufgrund direkter Auswaschung nach Einstellen eines kontinuierlich abnehmenden Trends [mg/l], m_v = durch Auswaschung mobilisierbare Stoffkonzentration des Abfalls [mg/kg TS], $\Delta W/F$ = mittlere Änderung des Wasser-Feststoff-Verhältnisses pro Jahr [l/kg TS.a], h = Heterogenitätsfaktor der Wasserströmung im Deponiekörper [-], t = Zeit nach Einstellen eines stabilen Trends [a], $c_{0,org}$ = Anfangskonzentration aufgrund weitergehender Stofffreisetzung (Abbau) nach Einstellen eines kontinuierlich abnehmenden Trends [mg/l], m_{org} = durch weitergehenden Abbau mobilisierbare Stoffkonzentration des Abfalls [mg/kg TS].

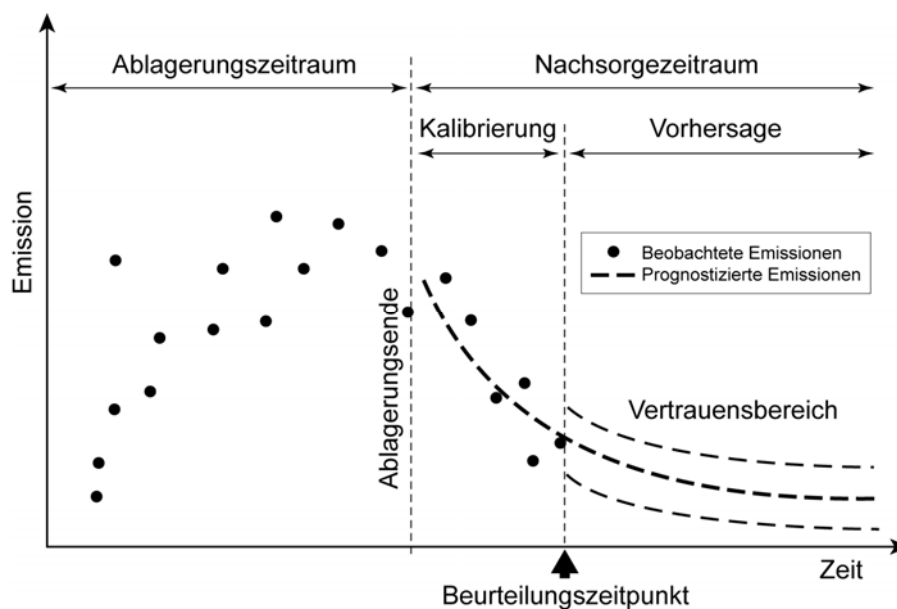


Abbildung A: Entwicklung eines Prognosemodells für Sickerwassercharakteristika unter der Annahme gleichbleibender Freisetzungsmechanismen

Das Modell aus Gleichung A und Abbildung A kann zur Abschätzung zukünftiger Emissionen bei gleichbleibenden Freisetzungsmechanismen (z.B. Wasserwegigkeit oder Milieu im Abfallkörper) verwendet werden. Zur Abschätzung der Emissionen unter veränderten Freisetzungsbedingungen (z.B. Änderung der Wasserwegigkeiten) ist das Emissionsmodell zu adaptieren (z.B. mobilisierbarer Abfallanteil) und kann demzufolge nicht mehr anhand beobachteter Konzentrationsverläufe im Sickerwasser geeicht werden. Die entsprechenden Modellannahmen und –zusammenhänge zur Berücksichtigung veränderter Freisetzungsmechanismen sind im Zuge der jeweiligen Emissionsszenarien darzustellen und zu diskutieren.

3.2 Dauerhafte Funktion technischer Barrieren

Neben den zukünftigen Emissionen des Abfallkörpers ist auch die dauerhafte Funktion der Deponiehülle für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit einer Deponie von wesentlicher Bedeutung, da sie die Interaktion zwischen Abfallkörper und Umgebung kontrolliert. Ausgehend von Literaturangaben und Expertenbefragungen wurden verschiedene Faktoren, die bei der Abschätzung der zukünftigen Funktionstüchtigkeit technischer Barrieresysteme von Bedeutung sind, analysiert und bewertet.

3.2.1 Funktion und Elemente technischer Barrieren

Technische Barrieren an Deponien dienen dazu Wechselwirkungen zwischen dem Deponiekörper und der Umwelt auf ein verträgliches Ausmaß zu beschränken. Barriersysteme können aus verschiedenen Elementen aufgebaut sein, die wichtigsten sind mineralische Dichtschichten, Geomembrane (inkl. Kunststoffbasisdichtungen), geosynthetische Tondichtungen, Dränageschichten und Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten (siehe Tabelle B). Kurzfristig wird die Funktion der einzelnen Elemente vor allem durch Beschädigungen im Zuge des Einbaues, ungeeignete Aufbauten und Materialien, mangelhafte Ausführung und Standsicherheitsprobleme beeinflusst, mittel- bis langfristige (sekundäre) Funktionseinbußen ergeben sich aus der Intensität negativer Einwirkungen (zB. Sickerwasserzusammensetzung, Temperaturschwankungen) und der Widerstandsfähigkeit der jeweiligen Komponente (vgl. Tabelle B).

Je nach Systemaufbau kann das Versagen einzelner Komponenten von hoher bzw. geringer Bedeutung für die Funktion des Gesamtsystems sein. Anhand von Laborversuchen und theoretischen Überlegungen ist es möglich die Servicezeiträume³ einzelner Komponenten abzuschätzen und entsprechende Vorhersagen zum Systemverhalten zu machen. Beispielsweise werden für Kunststoffdichtungsbahnen oft technische Lebensdauern von 100 – 300 Jahren angesetzt, Sickerwasserentwässerungssysteme können über mehrere Jahrzehnte funktionsfähig bleiben, oder tonmineralische Dichtschichten können Funktionsdauern im geologischen Zeitmaßstab (Jahrtausende) aufweisen. Je nach Bedeutung der Komponenten im Gesamtsystem, können für die Gesamtbarriere entsprechende Servicezeiträume abgeschätzt werden. Die Änderung der Systemeigenschaften über die Zeit bildet schließlich die Basis zur Abschätzung der Langzeiteffektivität verschiedener Barrieren, wobei aufgrund des spekulativen Charakters solcher Modelle bzw. der mangelnden Datenverfügbarkeit zur Kalibrierung und Validierung der Modelle jedenfalls große Unsicherheiten bei den Abschätzungen bestehen. Da eine Überprüfbarkeit der

³ Servicezeiträume sind Zeiträume über die ein bestimmtes Funktionsniveau bzw. Barriereverhalten aufrecht erhalten werden kann

Prognosen derzeit nicht möglich ist, sind bei der Modellentwicklung konservative Ansätze angebracht.

Tabelle B: Kritische Aspekte im Hinblick auf die Effektivität verschiedener Komponenten von technischen Barriersystemen

Barrierenkomponente	Betrachtungszeitraum	
	kurzfristige Aspekte in Bezug auf Effektivitätsverluste der Barrierenkomponente	mittel- bis langfristige Aspekte
Mineralische Dichtschichten	defekte Materialien, unzureichende Verdichtung, Austrocknung, Böschungsstabilität	Rissbildung (Schrumpfen/Schwellen, Gefrieren/Tauen, Durchwurzelung, ungleichmäßige Setzungen, Austrocknung), chemische Unverträglichkeit, Abfall- und Böschungsstabilität
Kunststoffdichtungsbahnen	defekte Materialien, physische Beschädigung durch Bauarbeiten, schadhafte Schweißnähte	Durchlöcherung, globale und lokale Stabilität, Degeneration
Geosynthetische Tondichtungen	defekte Materialien, Aufgehen der Schweißnähte	Rissbildung (Schrumpfen/Schwellen, Gefrieren/Tauen, Durchwurzelung, ungleichmäßige Setzungen), chemische Unverträglichkeit, lokale und globale Stabilität, Abbau der Verstärkung/Gewebe, inadäquate Hydratisierung
Asphalt-Zement-Dichtungen	defekte Materialien	Risse aufgrund von Schrumpfen/Verformung/Degeneration des Asphaltbinders oder Zuschlagstoffen
Dränageschichten	unzureichende Kapazität	Verstopfung aufgrund von infiltrierten Partikeln/biologischen Vorgängen/Ausfällung von Mineralen; für geosynthetische Dränagen auch Eindringen von Fremdmaterialien und Kriechen des Geotextiles
Rekultivierungsschichten	defekte Materialien, unzureichende Dicke, unzureichende Vegetationsbesiedelung	nicht genügend Speichervermögen für infiltriertes Wasser, Unvermögen die Vegetation zu erhalten, Risse und andere sekundäre Erhöhungen der hydraul. Leitfähigkeit, Erosion, Durchwühlen durch Tiere und Pflanzen

3.2.2 Prognose der zukünftigen Barrierefunktion

Die wichtigsten Parameter (Leitparameter) zur Abschätzung der dauerhaften Funktion unterschiedlicher Barriersysteme in Abhängigkeit der Standortgegebenheiten sind in Tabelle C zusammengefasst. Einerseits sind dies Informationen zur Widerstandsfähigkeit des Barriersystems (z.B. Aufbau und Design der Barriere oder die Überwachung der ordnungsgemäßen Ausführung der Barriere) und andererseits handelt es sich um Informationen im Zusammenhang mit potentiell negativen Einwirkungen auf die Barriere am Standort (z.B. Setzungsentwicklung des Deponiekörpers, klimatische Verhältnisse am Standort (z.B. Niederschlag, Temperaturverlauf in der Atmosphäre). Letztlich ist die Funktion der Barriere das Produkt aus den Einwirkungen am Standort und der Widerstandsfähigkeit des Barriersystems.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ansatz zur Beurteilung der zukünftigen Barrierefunktion entwickelt, der im Wesentlichen auf der Beschreibung des Barriersystems und der Beurteilung verschiedener Standortfaktoren beruht (vgl. Tabelle C). Letztere wurde im Rahmen einer Expertenbefragung zur Identifikation wesentlicher Faktoren für die Funktionsfähigkeit verschiedener Barriersysteme erhoben. Je nach Betrachtungszeitraum sind unterschiedliche Aspekte von Bedeutung: Kurzfristig stehen beispielsweise Faktoren wie die aktuelle Funktion der Barriere, das Qualitätsmanagement bei der Errichtung, die Setzungen oder die Funktion der Sickerwasserdrainage im Vordergrund. Langfristig nehmen jedoch Faktoren wie das lokale Klima, die standorttypische Vegetation und die Rekultivierungsschicht, die geplante Nachnutzung oder die Deponieform an Bedeutung zu. Basierend auf einer Bewertung dieser Faktoren werden schließlich spezifische Funktionsniveaus für unterschiedliche Zeiträume ermittelt. Abgesehen von der Ermittlung der „erwartbaren“ Barrierefunktion, werden auch die Fälle einer unveränderten Barrierefunktion (=Status Quo) und eines vollständigen Versagens der Barriere betrachtet. Dadurch ist es möglich im Rahmen der Emissionsmodellierung die gesamte Bandbreite möglicher Interaktionen zwischen Abfallkörper und Umgebung zu berücksichtigen.

Tabelle C: Leitparameter zur Bewertung der dauerhaften Funktionsfähigkeit der technischen Barrieren

Barriersystem	
Aufbau	Schichten, Designanforderungen, vergleichbare Systeme
Ausführung	Qualitätsmanagement (Prüfberichte, Protokolle, Dokumentation), lokale und globale Standsicherheitsnachweise
Beobachtete Funktion	Monitoringdaten (Sickerwasseranfall, Effektivität der Basisdichtung)
Abfalleigenschaften	
Setzungen	Setzungsverlauf (insgesamt) und lokale Setzungsdifferenzen
Temperaturen	Temperaturbereiche im Abfallkörper
Emissionen	Sickerwasserzusammensetzung (z.B. Verstopfung der Drainage)
Deponiestandort	
Klima und lokale Wasserbilanz	Niederschlag, Temperaturen, Grundwasserneubildung, evtl. Windverhältnisse
Nachnutzung und Vegetation	Nachnutzungskonzept, standorttypische Vegetation
Weitere Faktoren	Hydrogeologie, Extremereignisgefahr

3.3 Schadstoffabminderungsprozesse in der Deponieumgebung

Die Fähigkeit eines Umweltsystems negative Effekte verursacht durch den Eintrag von Schadstoffen abzumildern (generell als Natural Attenuation bezeichnet), wurde in Bezug auf deponiebürtige Schadstoffe untersucht. Im Detail wurden für ausgewählte Schadstoffpfade Ansätze zur Berücksichtigung von Schadstoffabminderungsprozessen vorgestellt und diskutiert, wobei der Schadstofftransport über das Si-

ckerwasser im Deponieuntergrund im Mittelpunkt der Betrachtungen stand. Für diesen Pfad wurden natürlich ablaufende Prozesse, die zu einer Reduktion der Masse, der Toxizität, der räumlichen Ausdehnung, der Mobilität oder der Konzentration von Schadstoffen führen diskutiert und bewertet. Die wichtigsten Prozesse in Bezug auf Deponieschadstoffe sind der biologische Abbau, die Sorption, die Dispersion und die Verdünnung. Wobei nur der Abbau zu einer dauerhaften Reduktion der Schadstoffmenge führt, die anderen Prozesse tragen in erster Linie zu einer Konzentrationsabminderung entlang der Transportstrecke bei.

3.3.1 Rückhalte-, Abbau- und Verdünnungspotentiale im Deponieuntergrund

Zur Ermittlung vorhandener Rückhalte-, Abbau- und Verdünnungspotentiale von Sickerwasseremissionen im Deponieuntergrund ist eine Beurteilung relevanter Schadstoffmigrationsprozesse notwendig. Dazu ist ein geeignetes Transportmodell basierend auf stoffspezifischen Daten und standortspezifischen Informationen (Untergrundeigenschaften und lokale Randbedingungen) zu erstellen. Die Komplexität des gewählten Schadstofftransportmodells sollte jedenfalls die Menge und Qualität der Daten widerspiegeln, die zur Erstellung und Anpassung des Berechnungsmodells vorliegen. Je mehr Schätzwerte (z.B. Literaturangaben) an die Stelle von standortspezifisch erhobenen Größen treten, desto einfacher und konservativer sollte ein entsprechender Modellansatz sein.

3.3.2 Abschätzung der Schadstoffmigration im Deponieuntergrund

Basierend auf der Evaluierung verschiedener Schadstofftransportmodelle (einfache Abschätzverfahren, analytische sowie numerische Berechnungsmodelle) wurde zur Beurteilung des Schadstofftransportverhaltens ein einfacher⁴ Ansatz gewählt.

Für die ungesättigte Zone (Untergrund) wird ein Modell basierend auf der analytischen Lösung der Advektions-Dispersions-Gleichung in Kombination mit einem Massenbilanz-Ansatz bei variierenden Sickerwasserraten verwendet. Für die Einmischung und den Transport der deponiebürtigen Schadstoffe im Grundwasser werden ebenfalls frachtbezogene Betrachtungen herangezogen. Die notwendigen Informationen zur Abschätzung der Schadstoffmigration im Untergrund sind in Tabelle D zusammengefasst.

⁴ Dies begründet sich zum Einen damit, dass Daten zur Modellerstellung und -anpassung meist nur in grober Auflösung (wenn überhaupt) verfügbar sind und zum Anderen können konservative Abschätzungen eines einfachen Modells als Grundlage zur Erstellung komplexerer Schadstofftransportmodelle in einem nächsten Schritt dienen.

Tabelle D: Leitparameter zur Abschätzung der Schadstoffmigrationsprozesse im Deponieuntergrund im Rahmen des Bewertungsverfahrens)

Emissionsquelle (Eingangsdaten aus Emissionsszenarien)	
Sickerwasserrate	Sickerwasserfreisetzung in den Untergrund
Schadstoffgehalte	Konzentrationen kritischer Parameter im Sickerwasser
Geometrie	Kontaminierte Fläche (z.B. Basisfläche der Deponie)
Ungesättigte Zone	
Schichtaufbau	Bodenschichten (inklusive mineralische Schichten der Deponiebasisdichtung) Für jede Schicht: Mächtigkeit und Bodenparameter (Korngrößenverteilung, Trockendichte, C_{org} -Gehalt, hydraulische Leitfähigkeit usw.)
Stoffspezifische Parameter	Für jede Schicht: Sorptionskoeffizienten Allgemein: Diffusionskoeffizient (Wasser und evtl. Luft), Abbauraten (Halbwertszeit)
Grundwasser	
Strömung und Aquifer	Grundwasserströmungsrichtung und hydraulischer Gradient Aquifereigenschaften (hydraulische Leitfähigkeit, Mächtigkeit, geologischer Aufbau)
Grundwasserqualität	Konzentrationen im An- und Abstrom (Schadstoffvorbelastung, Sauerstoffgehalt bzw. E_n -Werte)

Weitere Daten wären gegebenenfalls für potentiell beeinflusste Oberflächengewässer zu erheben (z.B. mittlerer Jahresabfluss des Oberflächengewässers)

4 Leitfaden zur Bestimmung von Nachsorgeentlassungskriterien

Die Herleitung von Entlassungskriterien für eine bestimmte Deponie erfolgt durch die Verknüpfung der drei Modelle zur Prognose

- der zukünftigen Emissionen des Abfallkörpers,
- der zukünftigen Funktion der technischen Barrieren, und
- der Schadstoffausbreitung in der Deponieumgebung

Eine schematische Darstellung der entwickelten Methode bietet Abbildung B. Die wesentlichen Pfade zur Beurteilung des Einflusses einer Deponie auf die Umwelt sind der Gaspfad und der Sickerwasserpfad, wobei letzterer für die Umweltverträglichkeitsbeurteilung aller Deponietypen relevant ist und langfristig die wichtigste Schadstoffemissionsquelle darstellt. Abgesehen davon können beispielsweise auch geotechnische Aspekte (Rutschungen oder Sackungen) eine Rolle spielen, solche Gefährdungen sind aber getrennt von der gegenständlichen Bewertungsmethode, z.B. im Zuge von Restrisikobetrachtungen, zu evaluieren.

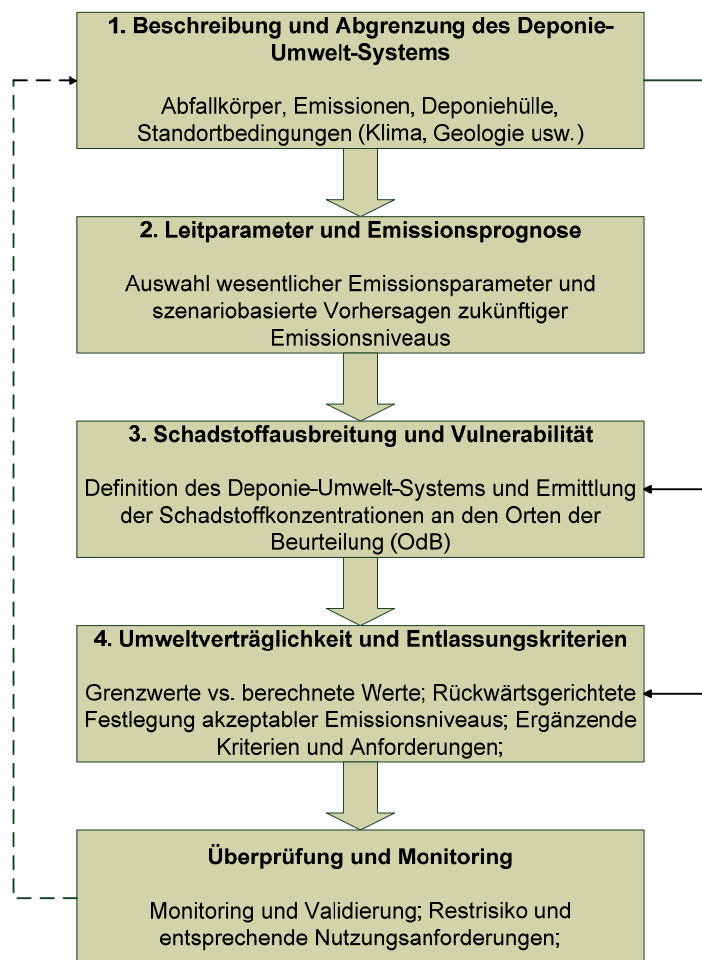


Abbildung B: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Festlegung von Entlassungskriterien für die Deponienachsorge

Den **1. Schritt** (vgl. Abbildung B) im Rahmen der Beurteilung stellt die Beschreibung der Deponie und der Deponieumgebung dar. Dies bedeutet im Wesentlichen die Erhebung von Daten zur Entwicklung der einzelnen Bewertungsmodelle (Leitparameter in den Tabellen A, C und D) und zur Identifikation und Charakterisierung potentiell betroffener Schutzgüter (sensitive Nutzungen in der Umgebung, Fließgewässer, ...). Generell sind die vorhandenen Informationen bezüglich Aussagekraft und Unsicherheiten zu evaluieren und dementsprechend ergänzende Untersuchungen durchzuführen bzw. die Unsicherheiten im Rahmen der Bewertungen zu berücksichtigen.

Im **2. Schritt** werden relevante Emissionsparameter für die Deponie (z.B. Ammonium im Sickerwasser, Methan im Deponiegas) als Leitparameter festgelegt und für diese Parameter Prognosemodelle zur Abschätzung zukünftiger Emissionen erstellt (siehe Abbildung B). Im Rahmen von Szenarioanalysen werden mögliche zukünftige Deponiebedingungen (z.B. Abnahme der Funktionstüchtigkeit von technischen Barrieren) betrachtet und für diese Emissionsvorhersagen erstellt. Durch die Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten (in Abhängigkeit der Zeit) zu den einzelnen Szenarien werden maßgebliche Emissionsschätzungen festgelegt.

Im **3. Schritt** werden diese Emissionsprognosen herangezogen, um die Schadstoffmigration in der Deponieumgebung abzuschätzen (vgl. Abbildung B). Für definierte Orte der Beurteilung (Schutzgüter) wird die Beeinflussung durch die prognostizierten Deponieemissionen anhand von Schadstofftransportmodellen ermittelt und mit bestimmten Grenzwerten bzw. zulässigen Beeinflussungsniveaus (in Abhängigkeit der Empfindlichkeit des betroffenen Schutzgutes) verglichen. Im Rahmen der Ausbreitungsmodellierung werden Abminderungsfaktoren berechnet, die für einen bestimmten Ort der Beurteilung (OdB) die maximal zu erwartenden Konzentration an diesem Ort im Verhältnis zur maximalen Quellkonzentration (z.B. Sickerwasserkonzentration an der Deponiebasis) angeben (z.B. bei einem Abminderungsfaktor von 2 beträgt die maximale Konzentration am OdB die Hälfte der maximalen Quellkonzentration). Die Abminderungsfaktoren werden schließlich verwendet, um in Abhängigkeit des jeweiligen Emissionsszenarios maximal zulässige Konzentrationen im Deponiesickerwasser zu berechnen. Ausgangspunkt für diese Berechnung stellt die zulässige Schadstoffkonzentration (Beeinflussung) in einem bestimmten Schutzgut (Ort der Beurteilung) dar. Je nach maßgeblichem Szenario können auf diese Weise emissionsseitige Kriterien zur Entlassung aus der Deponienachsorge festgelegt werden (**Schritt 4** in Abbildung B). Ergänzend zu den Emissionsbegrenzungen sind die Randbedingungen der einzelnen Szenarien zu prüfen (z.B. geotechnische Stabilität) und gegebenenfalls zusätzliche Kriterien für das Nachsorgeende zu definieren (z.B. Nachweis der langfristigen Standsicherheit bei Wassersättigung des Abfallkörpers). Außerdem sind nicht betrachtete Szenarien (z.B. Überflutung der Deponie) im

Zuge von Restrisikobetrachtungen (zumindest) qualitativ zu diskutieren. Die Entwicklung von Emissionen und Immissionen ist durch geeignete Monitoringmaßnahmen zu überwachen und die Modellannahmen und –prognosen sind durch Messdaten im Laufe der Nachsorgephase zu validieren. Deuten die Monitoringdaten auf abweichende Entwicklungen (gegenüber den maßgeblichen Szenarien) hin, so ist der Deponiezustand erneut zu bewerten und Emissionsmodelle bzw. Szenarien sind entsprechend anzupassen.

5 Anwendung der Bewertungsmethode für drei Deponien

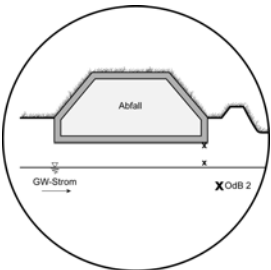
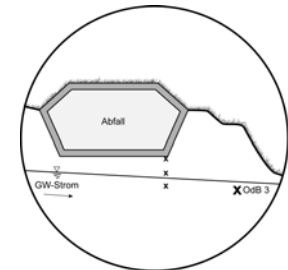
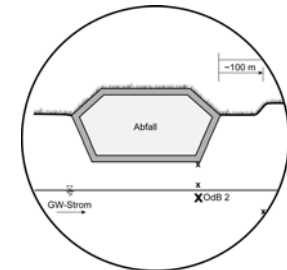
Um die entwickelte Methodik auf Praxistauglichkeit zu überprüfen, wurde für drei geschlossene Deponien eine Bewertung der Umweltgefährdung durchgeführt und Nachsorgeentlassungskriterien abgeleitet. Die Auswahl der Deponien beruhte auf der ausreichenden Verfügbarkeit grundlegender Daten, der Abbildung unterschiedlicher Gefährdungssituationen in Bezug auf Deponieemissionsverhalten und Schutzgüter sowie dem Kooperationswillen des Betreibers bzw. Nachsorgeverpflichteten. Bei den bewerteten Standorten handelte es sich um zwei ehemalige Hausmülldeponien (Deponie A: große Deponie mit durchschnittlichen Niederschlagsverhältnissen, Deponie B: kleinere Deponie an einem sehr feuchten Standort) und eine Baurestmassendeponie (mittelgroße Bauschuttanlage an einem trockenen Standort). Die Bewertung der Nachsorgedauer für die drei Deponien ergab je nach angesetzter Nachsorgestrategie unterschiedliche Zeiträume (vgl. Tabelle E). Für den Standort A liegt die ermittelte Nachsorgedauer bei mindestens 80 und maximal 450 Jahren. Danach wäre eine vollständige Freisetzung der Sickerwasseremissionen in den Untergrund bezogen auf die maßgebenden Beurteilungskriterien an den OdBs tolerierbar (vgl. Tabelle E).

Für den Standort B betragen die ermittelten Nachsorgezeiträume je nach Nachsorgestrategie zwischen 11 und 110 Jahren. Zur Beurteilung des Nachsorgeendes wird für den Standort B das Szenario „Graduelle Abnahme der Barrierefunktion mit teilweiser Sickerwassererfassung“ als maßgeblich angesehen, da diese Deponie über eine Sickerwasserableitung im freien Gefälle verfügt und somit nach der Beendigung der Nachsorge eine (teilweise) kontrollierte Entwässerung plausibel erscheint. Sowohl für Standort A als auch für Standort B stellt Ammoniumstickstoff den kritischen Sickerwasserparameter dar.

Im Fall der Baurestmassendeponie (Standort C) ergibt die Bewertung keine weitere Nachsorgenotwendigkeit, wobei angenommen wird, dass die Funktion der Oberflächenabdeckung allmählich nachlässt und das gesamte anfallende Sickerwasser in den Untergrund entwässert. Aufgrund der kurzen (und unvollständigen) Monitoringzeitreihen seit der Deponieschließung⁵, sind für diesen Standort aber jedenfalls noch Messdaten zu erheben, um die zugrundeliegenden Modellannahmen zu validieren und die Aussagekraft der Bewertung zu belegen.

⁵ Die Deponie befindet sich erst seit 2 Jahren in der Nachsorgephase

Tabelle E: Bewertung der Modellstandorte und ermittelte Nachsorgedauern

	Standort A ehem. Hausmülldeponie	Standort B ehem. Hausmülldeponie	Standort C Baurestmassendep.
Allgemeine Deponiedaten	Niederschlag: 956 mm/a pot. Verdunst.: 633 mm/a Betrieb: 1972-2005 Volumen: 1.700.000 m ³ mittlere Schütthöhe: 15 m	Niederschlag: 1960 mm/a pot. Verdunst.: 550 mm/a Betrieb: 1988-2003 Volumen: 135.000 m ³ mittlere Schütthöhe: 11 m	Niederschlag: 613 mm/a pot. Verdunst.: 630 mm/a Betrieb: 1992-2008 Volumen: 400.000 m ³ mittlere Schütthöhe: 13 m
Leitparameter (Emissionen)	Sickerwasser: Cl, CSB, NH ₄ -N, Cr _{ges} ; Gas: CH ₄	Sickerwasser: Cl, CSB, NH ₄ -N; Gas: CH ₄	Sickerwasser: Cl, CSB, N _{ges} , SO ₄
Wahrscheinlichstes Emissionsszenario nach Beendigung der Nachsorge	Graduelle Funktionsabnahme der Oberflächenabdeckung und vollständige Sickerwasserentwässerung in den Untergrund (Szenario A*)	Graduelle Funktionsabnahme der Oberflächen- und Basisdichtung (teilweise Sammlung und Erfassung des Sickerwassers – Szenario A)	Graduelle Funktionsabnahme der Oberflächenabdeckung und vollständige Sickerwasserentwässerung in den Untergrund (Szenario A*)
Sickerwasserbildung <i>(Anfangsniveau nach 100 Jahren nach 300 Jahren)</i>	$\begin{pmatrix} 50 \text{ mm/a} \\ 100 \text{ mm/a} \\ 150 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 20 \text{ mm/a} \\ 100 \text{ mm/a} \\ 320 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30 \text{ mm/a} \\ 50 \text{ mm/a} \\ 80 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$
Sickerwassereintrag in den Untergrund <i>(Anfangsniveau nach 100 Jahren nach 300 Jahren)</i>	$\begin{pmatrix} 50 \text{ mm/a} \\ 100 \text{ mm/a} \\ 150 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,2 \text{ mm/a} \\ 5 \text{ mm/a} \\ 95 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30 \text{ mm/a} \\ 50 \text{ mm/a} \\ 80 \text{ mm/a} \end{pmatrix}$
Maßgebender Ort der Beurteilung (OdB) im Untergrund	Grundwasserfahne 	100 m stromab im GW 	Grundwassereinmischzone 
Akzeptable Beeinflussung am OdB	Kriterien der TrinkwasserVO	Kriterien der TrinkwasserVO	Kriterien der TrinkwasserVO
Kritischer Parameter (Sickerwasser)	Ammoniumstickstoff (Nitrifikation berücksichtigt) ²	Ammoniumstickstoff (Keine Nitrifikation)	-
Erforderliche Nachsorgedauer¹	Minstdauer: 80 Jahre Max. Dauer: 450 Jahre	Minstdauer: 11 Jahre Max. Dauer: 110 Jahre	Wahrsch. Szenario ist am Standort umweltverträglich
Zusatzkriterien	a) Ungestörter Deponiekörper (z.B. Standsicherheit); b) Funktionsabnahme der Oberflächenabdeckung erfolgt graduell;	a) Erfassung und Behandlung des Sickerwassers ist gewährleistet; b) Ungestörter Deponiekörper (z.B. Standsicherheit); c) Funktionsabnahme der Oberflächenabdeckung erfolgt graduell	a) Ungestörter Deponiekörper (z.B. Standsicherheit); b) Funktionsabnahme der Oberflächenabdeckung erfolgt graduell; c) Weiteres Monitoring zur Validierung der Emissionsmodelle

¹ Minimale Nachsorgedauer: Wasserinfiltration in den Deponiekörper in Höhe der lokalen Grundwasserneubildungsrate. Maximale Nachsorgedauer: Wasserinfiltration in die Deponie bei Annahme gleichbleibender Barrierefunktion.

² Es wird von einer Nitrifizierung des Ammoniums ausgegangen bevor oder während die Sickerwasserfahne in die angrenzenden Oberflächengewässer exfiltriert (Nitratstickstoffgrenzwerte zur Beurteilung der GW-Konzentration).

Zusammenfassend gilt für alle Standorte, dass noch weitere Daten für eine zuverlässige Bewertung zu erheben wären. Speziell in Bezug auf die Schadstoffausbreitungsmodellierung könnten durch standortspezifische Daten und Untersuchungen, die einfachen (und dadurch konservativen) Abschätzungen durch realistischere Beurteilungen ersetzt werden. Außerdem wären für den Fall der Nachsorgeentlassung geeignete Überwachungskonzepte festzulegen, um die Modellvorhersagen zu prüfen bzw. die Szenariorandbedingungen zu überwachen (vgl. Zusatzkriterien in Tabelle D). Schließlich ist festzustellen, dass die bewerteten Hausmülldeponien jedenfalls noch über mehrere Jahrzehnte bzw. einige Jahrhunderte nachgesorgt werden müssen, um das langfristige Umweltrisiko am Standort zu minimieren. Eine vollständige Sorgfreiheit (vollständiges Versagen aller Barrieren nicht mehr umweltrelevant) wird für solche Deponiestandorte jahrhundertlang nicht möglich sein. Für die beurteilte Baurestmassendeponie wäre gegebenenfalls in absehbarer Zeit eine Entlassung aus der Nachsorge in Anbetracht der Standortbedingungen (trockenes Klima, hoher Grundwasservolumenstrom usw.) möglich, sofern die Emissionsmodelle durch zukünftige (aussagekräftige) Monitoringdaten gestützt werden und die Randbedingungen am Deponiestandort (z.B. Funktionsentwicklung der Oberflächenabdeckung) jenen entsprechen, die im Rahmen des Emissionsszenarios angesetzt wurden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die wissenschaftlichen Grundlagen zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von geschlossenen Deponien beschrieben und diskutiert. Ausgehend von einer Evaluierung bestehender naturwissenschaftlich-technischer Ansätze zur Beendigung der Deponienachsorge wurde eine Methode entwickelt, die die Ermittlung standortspezifischer Nachsorgeentlassungskriterien erlaubt. Die Bewertungsmethode beruht auf der Verknüpfung verschiedener Modelle zur Beschreibung des Abfallemissionsverhaltens, der zukünftigen Funktionstüchtigkeit technischer Barrieren und des Schadstoffausbreitungspotentials in der Deponieumgebung. Ausgehend von festgelegten, akzeptablen Beeinflussungsniveaus an definierten Beurteilungsorten können anhand der entwickelten Modelle zulässige Restemissionsniveaus am Deponiestandort berechnet werden. Dementsprechend ist es anhand der entwickelten Methodik möglich, basierend auf derzeit verfügbaren Informationen über den Zustand des Deponie-Umwelt-Systems, das langfristige Umweltrisiko durch die Deponie abzuschätzen. Es bestehen jedoch Wissenslücken bezüglich der Evaluierung des langfristigen Verhaltens von Deponien und Deponieschadstoffen, weswegen die inhärenten Unsicherheiten bei der Bewertung der Deponieumweltverträglichkeit anhand von Szenarioanalysen sowie durch die Diskussion sensibler Annahmen berücksichtigt wurden.

Ausgehend von der Ableitung von Nachsorgeentlassungskriterien für drei konkrete Deponien im Rahmen des Projektes wurde deutlich, dass vor allem für ehemalige Hausmülldeponien von Nachsorgezeiträumen im Bereich hunderter Jahre auszugehen ist. Anhand der ermittelten Entlassungskriterien können optimierte Nachsorgestrategien entwickelt werden, die einen effizienten Einsatz der vorhandenen Mittel zur Minimierung der langfristigen Umweltrisiken am Standort erlauben. Vor diesem Hintergrund entsteht auch verstärkter Forschungsbedarf bezüglich adäquater Betreuungskonzepte für die dauerhafte Verhinderung negativer Umwelteinwirkungen durch Deponien. Dazu gehören beispielsweise die Beurteilung der (langfristigen) Wirkung aktiver Schadstoffentfrachtungsverfahren oder die Entwicklung extensiver Verfahren zum Management von Restemissionen.

Die vorgestellte Methodik sollte in Zukunft im Zuge von weiteren Fallbeispielen durch die betroffenen Akteure (Behörden, Ingenieurbüros, Betreiber) angewendet werden. Einerseits werden dadurch Erfahrungswerte im Rahmen der Anwendung gesammelt und andererseits wird die vorhandene Datenbasis zur Bewertung von Deponien verbessert. Außerdem wird sich herausstellen, ob die Bewertungen als Grundlage behördlicher Entscheidungen herangezogen werden und dementsprechend der Auf-

wand zur Durchführung der Bewertung angebracht ist. Von erheblichem praktischem Nutzen wäre eine Plattform, die den Austausch und die Diskussion von Erfahrungen bei der Herleitung von Nachsorgeentlassungskriterien sowie die Weiterentwicklung der Bewertungsverfahren ermöglicht. Um eine möglichst einfache und einheitliche Anwendung der Methodik durch verschiedene Akteure zu erleichtern, ist es notwendig, ein automatisiertes Berechnungstools für die Durchführung der standortspezifischen Bewertung zu entwickeln.

Folgerungen für die Abfallwirtschaft

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass die Rückstellungen zur Finanzierung notwendiger Deponienachsorgemaßnahmen für Hausmülldeponien generell in Bezugnahme auf einen zu kurzen Nachsorgezeitraum getätigt wurden, da diese Deponien nicht innerhalb der nächsten Generationen aus der Nachsorge entlassen werden können. Für Schlackedeponien stehen im Rahmen der Nachsorge vor allem die Salzfrachten im Sickerwasser im Vordergrund, welche an vielen Standorten innerhalb von Jahrzehnten auf tolerierbare Niveaus absinken werden. Für moderne Baurestmassendeponien erscheint der veranschlagte Mindestnachsorgezeitraum von 30 Jahren realistisch, wobei je nach Standortbedingungen auch eine vorzeitige Beendigung der Nachsorge (mit definierten Minimalbetriebsniveau, v.a. Monitoring) angebracht sein kann.

Im Rahmen der Standortbewertungen spielt die geologische (natürliche) Barriere eine wesentliche Rolle für die Ermittlung des langfristigen Umweltrisikos. Einerseits ist durch Abfallqualität und technische Deponieeinrichtungen (v.a. Dichtungssysteme) ein umweltverträgliches Interaktionsniveau zwischen Deponie und Umwelt sicherzustellen, andererseits ist besonders auf lange Sicht die Situation am Standort (Einwirkungen und potentiell betroffene Schutzgüter) von Bedeutung. Dementsprechend sollte bei der Errichtung zukünftiger Deponien der Standortwahl noch mehr Bedeutung zugemessen werden. Letzteres gilt sowohl in Bezug auf die Empfindlichkeit der Umwelt am Standort (geologische Barrierewirkung, vorhandene oder geplante Nutzungen) als auch in Bezug auf mögliche Einwirkungen auf den Deponiekörper (z.B. Extremereignisgefahr, Klima).

Durch die Notwendigkeit die Deponieumweltverträglichkeit einzelfallspezifisch zu beurteilen und zur Finanzierung der daraus abzuleitenden Nachsorgemaßnahmen, sind Nachsorgekonzepte und -strategien für eine bestimmte Deponie bereits während des Betriebes zu erstellen und zu beurteilen. Die entwickelte Methodik zur Ermittlung von Zielkriterien (bzw. eines Zielzustandes) für eine Deponie stellt hierfür eine Basis dar.

Ein Umweltrisiko besteht nur dann, wenn von den abgelagerten Abfällen eine potentielle Gefährdung ausgeht. Da die abgelagerten Materialien das Endprodukt des gesamten Abfallwirtschaftssystems sind, können bestimmte Anforderungen an dieses Endprodukt nur durch die Integration abfallwirtschaftlicher Prozesse wie z.B. der Ausschleusung von Schadstoffen an der Quelle, der Verwertung, Aufbereitung und Vorbehandlung von Abfällen oder der Erzeugung ablagerungsfähiger Produkte durch die Immobilisierung enthaltener Schadstoffe erreicht werden. Die nachsorgefreie Deponie stellt für die moderne Abfallwirtschaft eine Herausforderung dar, zu deren Bewältigung alle Akteure (vom Abfallerzeuger bis zum Entsorger) einen Beitrag leisten müssen.

