

Auswirkungen der aeroben in-situ Stabilisierung auf das Deponieverhalten: Ergebnisse des BMBF-Vorhabens auf der Altdeponie Kuhstedt

1 Einleitung

Zwischen Juli 1999 und Dezember 2007 wurde erstmalig in der Bundesrepublik Deutschland ein mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sowie des Landkreises Rotenburg (Wümme) finanziertes Projekt zur beschleunigten aeroben in-situ Stabilisierung einer stillgelegten Altdeponie mittels des Niederdruckbelüftungsverfahrens AEROflott® (Stegmann et al., 2000) durchgeführt. Vorausgegangen waren umfangreiche Untersuchungen an Abfallproben aus unterschiedlichen Altdeponien im Labormaßstab sowie großtechnische Belüftungsversuche auf der Altdeponie Kuhstedt im Jahr 1998. Sowohl die Ergebnisse der Versuche in Deponiesimulationsreaktoren (DSR) als auch der Belüftungs- und Absaugversuche auf der Deponie Kuhstedt bestätigten die Eignung des Verfahrens für den ausgewählten Standort.

Nach der Fertigstellung der Gasbrunnen sowie des Leitungssystems zur Belüftung und Ablufferfassung wurde im vierten Quartal 2000 sowie im ersten Quartal 2001 Deponiegas aus der Altdeponie abgesaugt und über eine mobile Hochtemperaturfackel schadlos verbrannt. Im April 2001 wurde der reguläre Belüftungs- und Ablufferfassungsbetrieb der Gesamtanlage aufgenommen und im weitgehend kontinuierlichen Tag- und Nachtbetrieb bis etwa Frühjahr 2006 durchgeführt. Im Zeitraum Frühjahr 2006 bis Mitte 2007 wurde der Anlagenbetrieb an den nun bereits sehr weitgehend stabilisierten Zustand des Deponiekörpers angepasst und im diskontinuierlichen Modus weitergeführt. Seit Juni 2007 wird in einer abschließenden Untersuchungsphase die Möglichkeit einer langfristigen, energieautarken passiven Aerobisierung mittels windgetriebener Be- und Entlüftungseinrichtungen getestet.

Anhand der Ergebnisse eines breit angelegten begleitenden Monitoringprogramms können die Auswirkungen der biologischen in-situ Stabilisierung auf das Emissionsverhalten des Deponiekörpers beurteilt werden. Die Ergebnisse geben wesentliche Hinweise auf die Leistungsfähigkeit des Verfahrens der Deponieniederdruckbelüftung. Ziel der beschleunigten biologischen Stabilisierung ist es, den Deponiekörper kontrolliert in einen nachhaltig (d.h. dauerhaft) emissionsarmen Zustand zu überführen, welcher die Entlassung aus der Deponienachsorge innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes erlaubt. Dieses betrifft einerseits die verbleibende Deponiegasproduktion, welche nach Abschluss der in-situ Belüftung in einer qualifizierten Rekultivierungsschicht (als Methanoxidationsschicht ausgeführt) biologisch oxidiert wird, andererseits sollen die Belastungen des Sickerwassers durch den erfolgten Abbau der organischen Abfallbestandteile wesentlich verringert werden, so dass kürzere und extensivere Behandlungsmaßnahmen durchgeführt werden können.

2 GRUNDLAGEN UND ZIELE AEROBER IN SITU STABILISIERUNGS-MAßNAHMEN

Durch die gezielte Luftzuführung in den Deponiekörper wird der biologisch abbaubare Anteil der in den Abfällen enthaltenen organischen Substanzen (z.B. Kohlenwasserstoffe) infolge aerober mikrobiologischer Stoffwechselaktivität in seine oxidierten Formen Kohlendioxid und Wasser überführt. Zusätzlich kommt es zur Oxidation reduzierter Schwefel- und Stickstoffverbindungen (im Wesentlichen Metallsulfide und Ammonium-Stickstoff). Parallel hierzu verlaufen aufbauende Reaktionen, welche zur Bildung huminstoffähnlicher, komplexer und relativ stabiler organischer Verbindungen mit hohem Adsorptionspotenzial führen (Leikam et al., 1998, Prantl et al., 2004). Generell können die Auswirkungen der Maßnahme zwischen den drei Phasen Gas, Feststoff und Flüssigkeit unterschieden werden.

In der Gasphase kommt es unter dem Einfluss der Belüftung (Wechsel des Milieus im Deponiekörper von anaeroben zu aeroben Verhältnissen) zunächst zu einer Verdünnung (Abnahme der relativen Konzentrationen), und infolge der einsetzenden mikrobiologischen Methanoxidation erfolgt eine weitere deutliche Abnahme der CH_4 -Gehalte, begleitet von einem Anstieg der Stickstoffkonzentrationen. Die CO_2 -Konzentrationen nehmen aufgrund der aeroben Atmung der Mikroorganismen (CO_2 -Produktion) deutlich geringer ab, während Sauerstoff bei einer entsprechenden mikrobiologischen Umsetzung nur noch in geringen Konzentrationen in der Abluft vorliegt. Die O_2 -Konzentration in der Gasphase ist folglich ein wesentlicher Parameter für die Einstellung möglichst optimaler Betriebszustände des Belüftungssystems. Die zuzuführenden Luftvolumina sind hierbei so zu wählen, dass der enthaltene Sauerstoff nicht zum limitierenden Faktor für die Aktivität der Mikroorganismen wird und gleichzeitig möglichst hohe Kohlenstofffrachten über die Abluft realisiert werden können. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass der mikrobiologische Stoffumsatz entscheidend von der O_2 -Verfügbarkeit in dem Mikroporensystem des Deponiekörpers abhängt. Da messtechnisch jedoch nur Sauerstoffkonzentrationen im Makroporensystem bestimmt werden können (welches im Wesentlichen durch Konvektionsvorgänge beeinflusst wird), kommt der diffusiven O_2 -Verteilung (in die Mikroporen) in der Konsequenz eine wichtige Bedeutung zu. Eine ausreichende, kontinuierliche Sauerstoffversorgung der Gasfließwege im Deponiekörper stellt in diesem Zusammenhang die Grundvoraussetzung für entsprechend hohe mikrobiologische Abbauleistungen dar.

Spezielle Laboruntersuchungen zur biologischen Aktivität (Atmungsaktivität) der jeweiligen Abfallstoffe können wichtige Hinweise zur Ermittlung der benötigten Netto-Belüftungsvolumina im Vorwege der Maßnahme geben. Unerlässlich beim Betrieb der Anlage ist jedoch immer auch die Beachtung der auftretenden Druckverluste, der physikalischen Eigenschaften des Deponiekörpers (Gaswegigkeiten) sowie des tatsächlichen Sauerstoffverbrauchs, welche die benötigten Luftmengen i.d.R. deutlich erhöhen. Sichere Betriebszustände können folglich nur über eine kontinuierliche Erfassung und Analyse der Abluftzusammensetzung und die entsprechende Regelung der Belüftungseinrichtung eingestellt und aufrechterhalten werden.

Aus dem Deponiekörper entnommene Feststoffproben liefern ebenfalls wichtige Aussagen über die Stabilisierbarkeit einer Deponie mittels der in situ Belüftung. So kann beispielsweise das verbleibende Deponiegas-Bildungspotenzial sowie die korrespondierende Atmungsaktivität bestimmt und etwaigen Anforderungswerten (d.h. Zielwerte des Verfahrens bzw. Vorgaben des Deponiebetreibers) gegenüber gestellt werden. Neben Analysen zum Abbaugrad der abgelagerten Abfälle (indirekt erfasst über die Bestimmung des Glühverlustes (GV) und des Gehaltes an organischem Kohlenstoff (TOC)) lassen insbesondere die

Bestimmung des Feuchtegehaltes und die Abschätzung der Lagerungsdichte erste Hinweise auf die zu erwartende Intensität der biologischen Abbauprozesse sowie den potenziellen Sauerstoffverbrauch erkennen. Feststoffuntersuchungen sind darüber hinaus ein wesentlicher Bestandteil im Rahmen der Erfolgskontrolle einer Belüftungsmaßnahme.

Aus dem Deponiekörper austretende Flüssigkeiten (Deponiesickerwasser) liefern hinsichtlich der Wirkung einer Belüftungsmaßnahme wichtige Anhaltspunkte. Über die Bestimmung organischer und anorganischer Sickerwasserinhaltsstoffe kann der, unter den eingestellten aeroben Bedingungen ablaufende beschleunigte mikrobielle Stoffumsatz / -abbau, nachvollzogen werden. Kurzfristig (d.h. im Zuge des Belüftungsbetriebes, insbesondere in den frühen Phasen) ist hierbei mit einem Konzentrationsanstieg insbesondere der organischen Sickerwasserinhaltsstoffe zu rechnen, da infolge des intensivierten Stoffumsatzes größere Mengen organischer Bestandteile in ihrer gelösten Form im Sickerwasser vorliegen. Mittelfristig (d.h. i.d.R. nach Abschluss der Belüftung) auftretende signifikante Abnahmen der Summenparameter BSB₅ und TOC stellen Indikatoren für den erfolgten Abbau organischer Abfallbestandteile dar, während der Rückgang der reduzierten Stickstoffverbindung Ammonium und ggf. die kurzzeitige Anwesenheit der oxidierten Verbindungen Nitrit und Nitrat auf Nitrifikations- / Denitrifikationsprozesse im Deponiekörper hinweisen. Die zeitliche Ausdehnung dieser Phasen sowie die mobilisierten Frachten hängen hierbei wesentlich von klimatischen Einflüssen (insbesondere Niederschlagsintensität), Art und Qualität der Oberflächenabdichtung, dem Temperaturprofil sowie der Intensität der Durchlüftung des Deponiekörpers ab.

Realisiert werden können die zuvor beschriebenen Reaktionen und Zusammenhänge im großtechnischen Maßstab über ein parallel betriebenes Belüftungs- und Gaserfassungssystem. Hierbei wird unbelastete Umgebungsluft über Belüftungsbrunnen in den Deponiekörper eingeblasen und mit geringem Zeitverzug an anderer Stelle wieder abgesaugt. Die Verteilung der Luft erfolgt über Konvektions- und Diffusionsvorgänge innerhalb der abgelagerten Abfälle, wodurch es in Abhängigkeit von den gewählten Belüftungsvolumina zu einer allmählichen Aerobisierung des gesamten Deponiekörpers kommt (Abbildung 1).

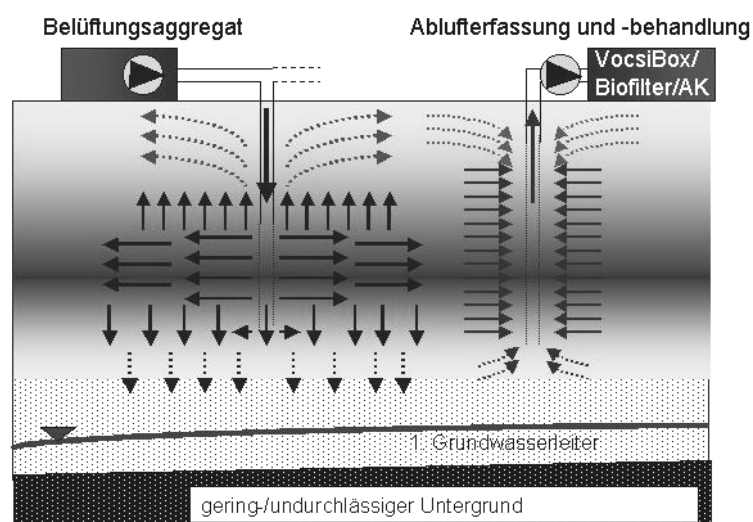


Abb. 1: Grundkonzept der aeroben Deponiestabilisierung mittels des Niederdruckbelüftungsverfahrens (Heyer et al., 2001)

3 STANDORT- UND VORHABENS BESCHREIBUNG SOWIE TECHNISCHE UMSETZUNG

3.1 Angaben zum Sanierungsobjekt und Hintergrund des Vorhabens

Die niedersächsische Altdeponie Kuhstedt liegt im nordwestlichen Teil des Landkreises Rotenburg (Wümme), östlich der Gemeinde Kuhstedt. Die Deponie wurde Mitte der sechziger Jahre in einer ehemaligen Kiesgrube angelegt und ab 1973 als Kreismülldeponie des Landkreises Rotenburg (Wümme) betrieben. Zum Ende der Ablagerung am 01.10.1987 betrug das Gesamtvolumen der deponierten Abfälle (vorwiegend Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll und Bauschutt) ca. 220.000 m³ auf einer Deponiefläche von ca. 3,2 ha. Die Mächtigkeit der Deponie beträgt im Mittel ca. 7 m (maximal 11 m), wobei die Deponiebasis etwa 2 – 3 m unter der Geländeoberkante liegt.

Nach dem Ende des Ablagerungsbetriebes wurde im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung ein erhöhtes Gefährdungspotenzial festgestellt, welches sich insbesondere in einer Beeinträchtigung des Grundwassers, Geruchsbelästigungen, Schadwirkungen auf Pflanzen, Tiere und Menschen sowie der Verdrängung von Bodenluft in benachbarten Flächen und dadurch bedingte Pflanzenschädigungen darstellte. Als Maßnahmen zur Gefahrenabwehr wurden das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung zur Minimierung der Sickerwasserneubildung aus dem Eintrag von Niederschlagswasser sowie der Einbau einer Entgasung mit kontrollierter Ableitung des Deponiegases vorgeschlagen.

Aktuelle Forschungsergebnisse der damaligen Zeit, u.a. auch der TU Hamburg-Harburg, zeigten jedoch bereits vor mehr als 12 Jahren sehr deutlich die zeitlich befristete Dichtwirkung von mineralischen und synthetischen Dichtungselementen auf (u.a. Melchior, 1993). Parallel hierzu vertraten Fachleute verstärkt die Auffassung, dass letztendlich nur eine kontrollierte Verringerung des Emissionspotenzials einer Deponie im Zuge aktiver Stabilisierungsmaßnahmen langfristig zu der erwünschten Nachhaltigkeit von Deponien führen kann. Ein solches innovatives, kostensparendes und zugleich nachhaltiges Verfahren, die Niederdruck in-situ Belüftung, wurde seit Mitte der neunziger Jahre am Arbeitsbereich Abfallwirtschaft der TU Hamburg-Harburg - zunächst im Labormaßstab - entwickelt und im Rahmen der Fachtagung „Deponietechnik 1998“ der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Der Deponiebetreiber griff die Idee auf und initiierte, gemeinsam mit seinen Projektpartnern TU Hamburg-Harburg und dem Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner, Hamburg, die deutschlandweit erste großtechnische Umsetzung einer vollständigen Deponiebelüftung zur beschleunigten biologischen Stabilisierung der abgelagerten Abfallstoffe.

3.2 Vorhabensbeschreibung

Mit der in situ Belüftung wird das übergeordnete Ziel verfolgt, erhebliche Kostensenkungen bei der Stilllegung und Nachsorge von Deponien bzw. der Sanierung von Altablagerungen sowie eine signifikante Reduzierung ihres Emissionspotenzials zu realisieren. Um das Gesamtziel zu erreichen, wurden folgende Aufgabenstellungen im Rahmen des F&E-Vorhabens bearbeitet:

- Überprüfung und Optimierung unterschiedlicher Betriebsweisen der Belüftung (z.B. Variation des Druckes bzw. des Volumens der Zu- und Abluft, intermittierende Belüftung und Ablufterfassung, gezielte Übersaugung etc.), um eine effektive und

kostengünstige (d.h. energieeffiziente) Stabilisierung des Deponiekörpers zu erzielen; technische Optimierung der Anlage

- Überprüfung der Auswirkungen der Belüftungsmaßnahmen auf das Emissionsverhalten des Deponiekörpers, wobei die Schwerpunkte in der Reduzierung der Belastungen des austretenden Sickerwassers (Verunreinigung des Grundwasserleiters) sowie des unkontrollierten Gasaustritts in die Atmosphäre lagen
- Wissenschaftliche Begleitung mit weiterführenden Laboruntersuchungen zur Bilanzierung der Emissionen, Abschätzung bzw. Vorhersage der Behandlungszeiträume sowie Entwicklung von (allgemeingültigen) Kriterien zur Erfolgskontrolle (Kriterien zur Beendigung der Deponiestabilisierung)
- Vorschläge zur Anpassung der nachfolgenden Sicherungs- und Nachsorgemaßnahmen an den in einen emissionsarmen Zustand überführten Deponiekörper
- Einrichtung und Betrieb von Testfeldern mit verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen: Überprüfung und Optimierung der Wirkung hinsichtlich Wasserspeicherung und -rückhalt sowie des Potenzials zur Methanoxidation

3.3 Verfahrenstechnische Realisierung

Das Verfahren der Niederdruckbelüftung zur beschleunigten aeroben in situ Stabilisierung von Deponien wurde am Standort Altdeponie Kuhstedt im Landkreis Rotenburg (Wümme) in der Praxis erprobt. Die Abbildung 2 stellt das Anlagentechnische Gesamtkonzept dar.

Die verfahrenstechnische Realisierung der Belüftung des gesamten Deponiekörpers erfolgt mittels eines Systems von Gasbrunnen, über welche mittels aktiver Belüftung (Seitenkanalverdichter) soviel Luftsauerstoff in den Deponiekörper eingebracht wird, dass es zu einer beschleunigten aeroben Stabilisierung der abgelagerten Abfälle kommt. Gleichzeitig wird die gering belastete Abluft über weitere Gasbrunnen kontrolliert erfasst (Erzeugung negativer Druckdifferenzen mittels Drehkolbenverdichter) und einer Behandlung (Oxidation der geringen Rest-Methanfracht; in Abhängigkeit von den vorherrschenden Konzentrationen entweder thermisch (RTO) oder biologisch (Biofilter)) zugeführt. Die Belüftung erfolgt mit geringen, positiven Druckdifferenzen und wird kontinuierlich an den Sauerstoffbedarf angepasst, so dass der Gesamtenergieverbrauch gering ist und fortlaufend optimiert werden kann.

Jeder Gasbrunnen ist über eine Einzelleitung mit einer Verteilerstation verbunden. Dort kann die Einzelleitung sowohl an das Verteilersystem zur Belüftung als auch an das Gassammelsystem zur Ablufferfassung angeschlossen werden. Für die Altdeponie Kuhstedt wurden zunächst 25 Gasbrunnen zur Belüftung und Ablufferfassung angeordnet, wobei gleichzeitig jeweils 10 - 15 Brunnen zur Belüftung und Ablufferfassung genutzt werden. Nach etwa zweijährigem Stabilisierungsbetrieb wurden, basierend auf den Ergebnissen der begleitenden Überwachungsmessungen, fünf weitere Gasbrunnen zur Belüftung eingerichtet. Diese Brunnen wurden gezielt in jenen Deponiebereichen installiert, welche zuvor nicht oder nur unzureichend Aerobisiert werden konnten.

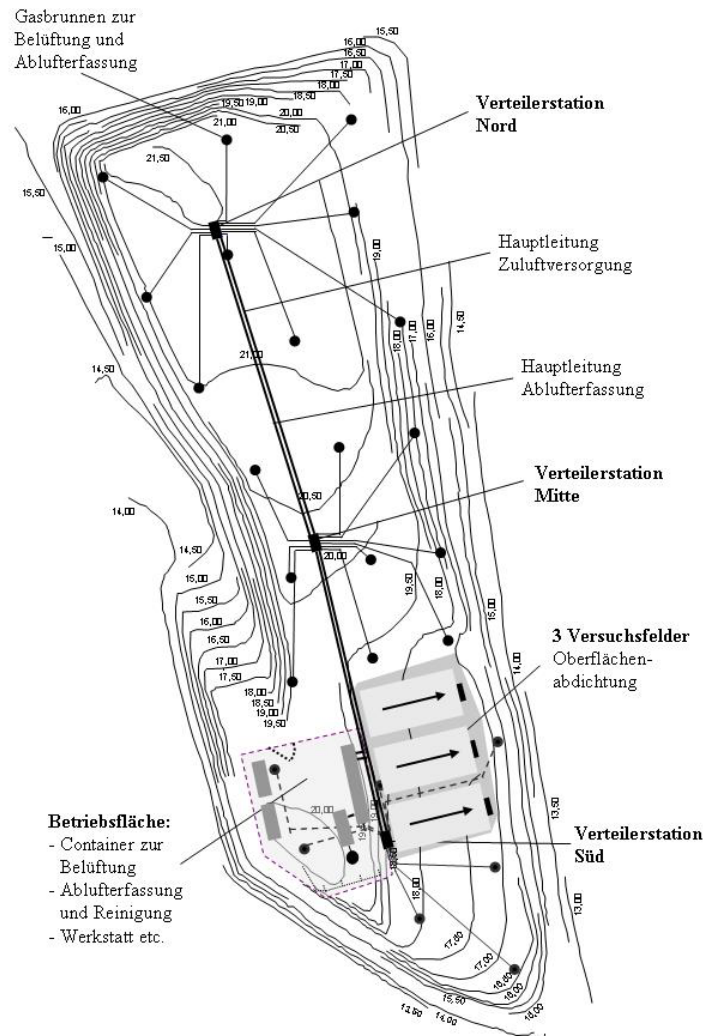


Abb. 2: Gesamtkonzept der baulichen Einrichtungen zur in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt

4 ERGEBNISSE DER AEROBEN IN SITU STABILISIERUNG

4.1 Ergebnisse aus Laboruntersuchungen

Vor dem Beginn der in situ Belüftung (August 2000) wurden im Zuge der Baumaßnahmen (Herstellung der Gasbrunnen mittels Bohrungen, \varnothing 500 mm) umfangreiche Abfallfeststoffproben aus dem Deponiekörper entnommen. Insgesamt handelte es sich um mehr als 70 Proben aus unterschiedlichen Tiefenhorizonten aller Deponiebereiche. Zum Abschluss der Belüftungsmaßnahme wurden im Frühjahr 2007 erneut Abfallfeststoffproben entnommen. Hierzu wurden fünf Schürfe, verteilt über die gesamte Deponiefläche, mittels eines Tieflöffelbaggers angelegt und Proben aus unterschiedlichen Tiefenhorizonten entnommen. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte der Deponiekörper eine netto Belüftungsdauer von ca. 5 Jahren erfahren.

Die Feststoffcharakteristik veränderte sich innerhalb dieser Belüftungsperiode von ca. 60 Monaten signifikant. Die Ergebnisse der durchgeführten chemischen Analysen sowie der biologischen Tests sind in der Abbildung 3 zusammengestellt.

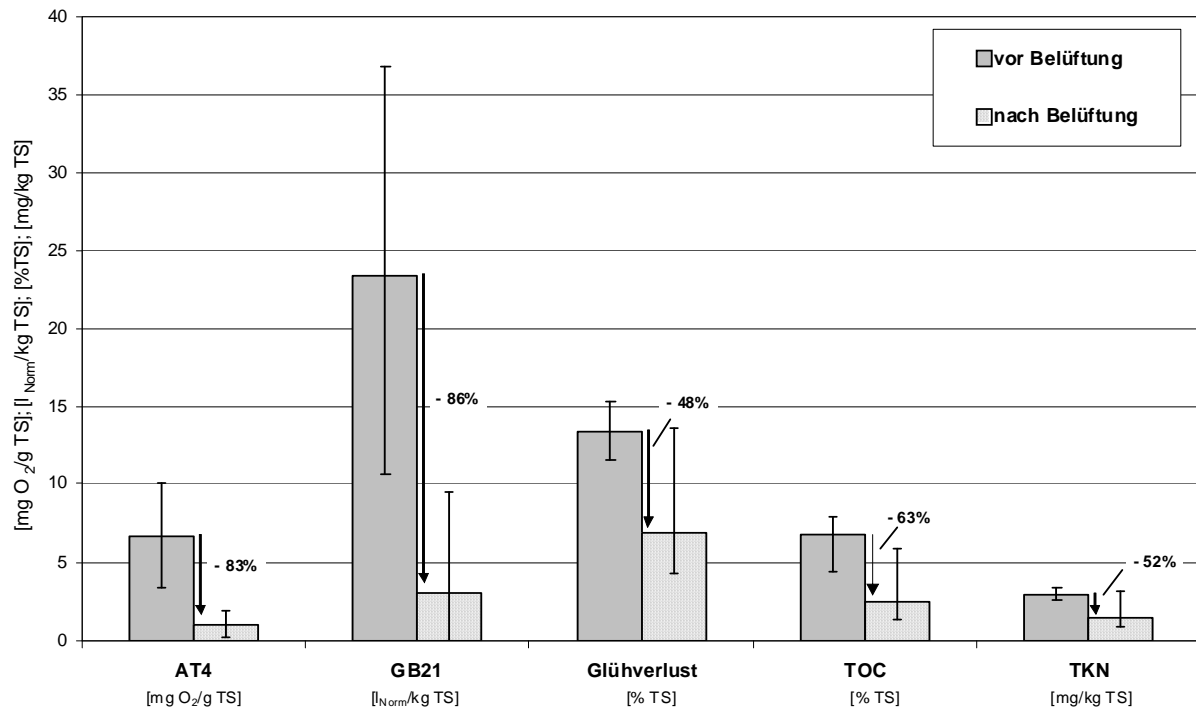


Abb. 3: Vergleich chemisch/physikalischer (GV, TOC, TKN) und biologischer Parameter (AT₄, GB₂₁), vor und nach sechsjähriger in situ Belüftung

Die Atmungsaktivität in vier Tagen (AT₄) reduzierte sich um 83% und die Gasbildung innerhalb von 21 Tagen (GB₂₁) um 86% gegenüber den Ausgangswerten vor dem Beginn der Belüftungsmaßnahme. Ursächlich hierfür ist die signifikante Reduzierung der biologisch verfügbaren organischen Substanz in den abgelagerten Abfällen. Dieses zeigt sich auch bei der Betrachtung der chemisch/physikalischen Feststoffanalysen, welche deutliche Abnahmen der Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC, - 63%) und gesamt Stickstoff nach Kjehldal (TKN, - 52%) ausweisen. Die absoluten Werte zum Abschluss der Belüftung, sowohl des organischen Kohlenstoffs als auch des Stickstoffs, können als sehr niedrig eingeschätzt werden. Die deutliche Reduzierung des Stickstoffpotenzials steht hierbei in guter Übereinstimmung zu den ebenfalls sehr niedrigen Mobilisierungsraten für Ammonium-Stickstoff im Zuge der längerfristigen Untersuchungen der entnommenen Abfallproben in Deponiesimulationsreaktoren (DSR).

Langzeituntersuchungen unter optimierten (d.h. stabiles mesophiles Temperaturniveau: 35°C, Wassersättigung, Zirkulation des Sickerwassers) anaeroben Bedingungen in DSR, mit Abfallfeststoffen aus der biologisch stabilisierten Altdeponie Kuhstedt, bestätigen sowohl die signifikante Reduzierung des Gasbildungspotenzials als auch die Verbesserung der Sickerwasserqualität. Hiernach konnte die Gasbildung im Zuge der fünfjährigen biologischen in situ Stabilisierung (sechs Jahre Brutto-Betriebsdauer) um ca. 95 % reduziert werden (Abbildung 4).

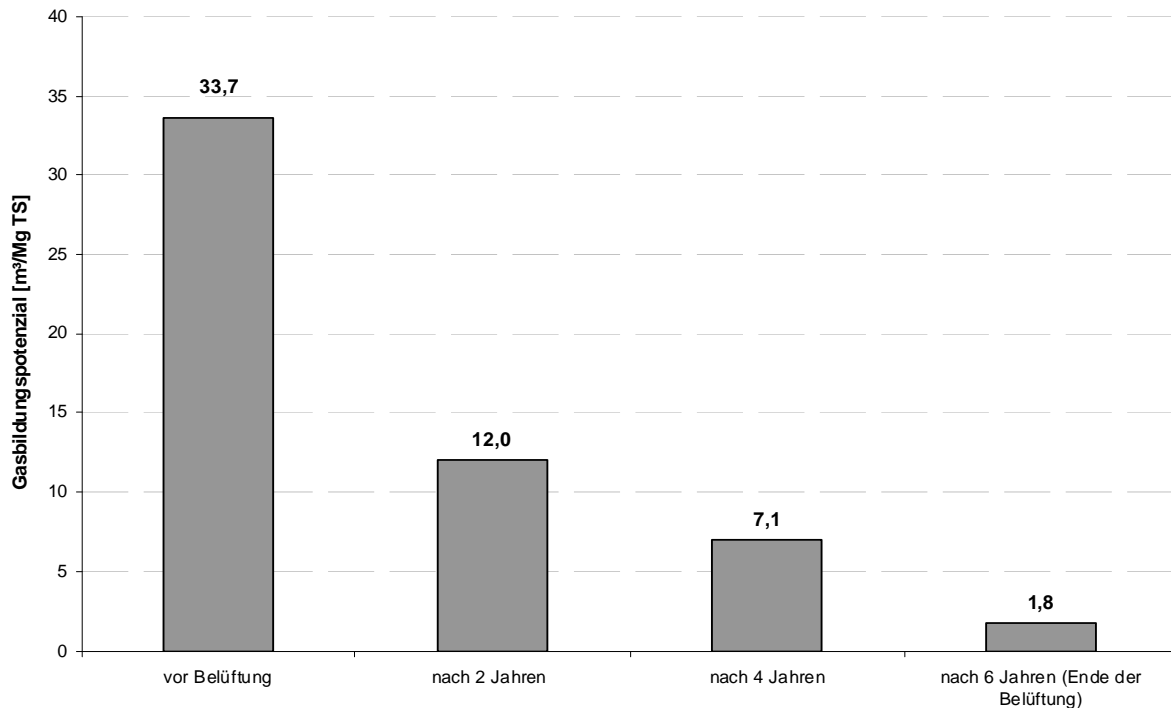


Abb. 4: Reduktion der Deponiegasproduktion (Potenzial) aus Abfallfeststoffproben im DSR-Versuch für unterschiedliche Belüftungszeiträume. Extrapolierte Maximalwerte als Gesamtpotenzial der Gasbildung.

Die Sickerwasserbelastungen (ausgetragene Stofffrachten) aus Abfallmaterial im Deponiesimulationsversuch verringerten sich für die gleichen Belüftungszeiträume um 79 bis 93% im Vergleich zu jenen aus Abfallmaterial vor Beginn der Belüftung. In der Tabelle 2 sind die über das Sickerwasser ausgetragenen Stofffrachten aus den Deponiesimulationsversuchen mit Abfallmaterial aus der Altdeponie Kuhstedt zusammenfassend dargestellt. Die Vergleichbarkeit der Daten vor und nach Beendigung der aeroben in situ Stabilisierung ist durch den Bezug auf ein vergleichbares Wasser/Feststoff-Verhältnis (0,46 Liter Wasser je kg Abfalltrocken-masse) sowie identische Wasseraustratsraten (d.h. vergleichbare Geschwindigkeit der Auswaschung) gewährleistet.

Tab. 2: Ausgetragene Stofffrachten ausgewählter Sickerwasserinhaltsstoffe (bis zu einem mittleren W/F-Verhältnis von 0,46) für DSR-Tests mit Abfallmaterial der Altdeponie Kuhstedt; Vergleich der Situation vor und nach Beendigung der aktiven Belüftung

		Abfallproben vor Belüftung	Abfallproben nach Belüftung	Variation [%]
BSB ₅	[mg/kg TS]	80	6	-93
TOC	[mg/kg TS]	156	28	-82
NH ₄ -N	[mg/kg TS]	144	12	-91
Cl ⁻	[mg/kg TS]	265	30	-89
HCO ₃ ⁻	[mg/kg TS]	1421	295	-79

Die nach abgeschlossener Deponiebelüftung entnommenen Abfallfeststoffproben wurden, parallel zu den Simulationsversuchen in den DSR, Einfachelutionen unterzogen. Diese wurden in Anlehnung an die Vorschriften nach DIN 38 414, DEV S4 durchgeführt. Bei dem 24-stündigen Elutionstest mit demineralisiertem Wasser ergibt sich rechnerisch ein Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10, welches zu einer wesentlich stärkeren (im Vergleich zu den DSR Versuchen) Auswaschung und Lösung von Abfallbestandteilen in die Flüssigphase führt. Die Eluate wurden hinsichtlich der in den Anhängen 1 und 2 zur Abfallablagerversordnung (AbfAbIV, 2001) gelisteten Parameter analysiert und die Ergebnisse den Zuordnungskriterien für die Deponieklassen I, II und MBA-Deponien gegenübergestellt (Tabelle 3).

Tab. 3: Vergleich der Zuordnungswerte nach Anhang 1 und 2 der AbfAbIV (Eluatkriterien) für die Deponieklassen I und II sowie MBA-Deponien mit den Ergebnissen der Eluatanalysen für in-situ belüftetes Deponiematerial aus der Altdeponie Kuhstedt

Eluatkriterien		Deponieklasse I	Deponieklasse II	MBA-Deponien	Deponie Kuhstedt (nach Belüftung)
pH-Wert	-	5,5 - 13,0	5,5 - 13,0	5,5 - 13,0	7,9
Leitfähigkeit	mS/cm	< 10	< 50	< 50	0,4
TOC	mg/l	< 20	< 100	< 300	13,4
Phenole	mg/l	< 0,2	< 50	< 50	0,036
Arsen	mg/l	< 0,2	< 0,5	< 0,5	0,005
Blei	mg/l	< 0,2	< 1,0	< 1,0	0,098
Cadmium	mg/l	< 0,05	< 0,1	< 0,1	0,001
Chrom-VI	mg/l	< 0,05	< 0,1	< 0,1	0,01
Kupfer	mg/l	< 1,0	< 5,0	< 5,0	0,089
Nickel	mg/l	< 0,2	< 1,0	< 1,0	0,024
Quecksilber	mg/l	< 0,005	< 0,02	< 0,02	0,001
Zink	mg/l	< 2	< 5	< 5	0,5
Fluorid	mg/l	< 5	< 25	< 25	< 0,5
NH ₄ -N	mg/l	< 4	< 200	< 200	5,2*
Cyanide	mg/l	< 0,1	< 0,5	< 0,5	< 1**
AOX	mg/l	< 0,3	< 1,5	< 1,5	0,028

* Median: 2,8 mg/l

** Analysengenauigkeit: 1mg/l

Es zeigt sich, dass die nach erfolgter biologischer Stabilisierung aus dem Deponiekörper entnommenen Abfallfeststoffproben, mit Ausnahme des Parameters Ammonium-Stickstoff, alle Zuordnungswerte für Eluatkriterien der Deponieklasse I einhalten. In der Regel liegen die ermittelten Massenkonzentrationen für die betrachteten Metalle eine Größenordnung niedriger als die zulässigen Werte nach Anhang 1 (DK I). Bemerkenswert sind insbesondere auch die sehr niedrigen Werte der organischen Parameter TOC und AOX, welche ebenfalls deutlich unter denen der DK I liegen. Der Mittelwert der Massenkonzentration des anorganischen Ammonium-Stickstoffs im Eluat liegt geringfügig oberhalb des zulässigen Wertes für die DK I (Überschreitung um 30%). Betrachtet man jedoch die Einzelergebnisse der Eluate, so liegen vier von fünf Proben deutlich unterhalb des Zuordnungswertes, welches durch den Median von 2,8 mg/l (mithin Unterschreitung um 30%) deutlich wird.

Zur Beurteilung des Stabilisierungserfolges ist, neben dem Vergleich der erreichten Endwerte nach Tabelle 3, auch die Entwicklung der Feststoff- und Eluatparameter im Verlauf des Stabilisierungsprozesses von Bedeutung. Während in den Abbildungen 2 und 3 bereits die Veränderung der biologischen Aktivität sowie der chemisch/physikalischen Feststoffparameter während der Belüftung dargestellt ist, stellt Tabelle 4 die Veränderungen für ausgewählte Eluatparameter zusammen.

Tab. 4: Veränderung ausgewählter Eluatparameter unter dem Einfluss der biologischen in situ Stabilisierung für Abfallproben aus der Altdeponie Kuhstedt (Netto Belüftungsdauer: 5 Jahre)

Parameter	Einheit	vor Belüftung		2 Jahre Belüftung		nach Belüftung	
		Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
pH-Wert	-	6,7 - 7,6	7,2	7,3 - 7,4	7,3	7,9 - 8,0	7,9
Leitfähigkeit	mS/cm	0,6 - 2,4	1,2	1,0 - 1,2	1,1	0,2 - 0,5	0,4
BSB ₅	mg/l	28 - 877	190	15 - 34	28	6 - 29	15
TOC	mg/l	58 - 775	235	71 - 153	109	8 - 19	13
AOX	mg/l	0,2 - 1,0	0,683	-	0,33	<0,001 - 0,043	0,028
NH ₄ -N	mg/l	10 - 55	21	26 - 55	39	3 - 14	5
SO ₄ ²⁻	mg/l	23 - 238	79	100 - 229	212	26 - 114	56

Die Ergebnisse nach Tabelle 4 zeigen, dass im Zuge der biologischen Deponiestabilisierung alle drei betrachteten Summenparameter für organische Inhaltsstoffe der wässrigen Phase (BSB₅, TOC und AOX) signifikant reduziert wurden. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Reduktion der biologisch schwer-abbaubaren Fraktionen, welche in diesem Fall über die Parameter TOC (gesamter organischer Kohlenstoff) und AOX (Adsorbierbare halogenierte organische Kohlenwasserstoffe) repräsentiert werden. Für die gelösten Massenkonzentrationen an Ammonium-Stickstoff sowie Sulfat zeigt sich ein vorübergehender Anstieg nach zwei Jahren Belüftung, während zum Ende der Stabilisierung niedrigere Werte im Vergleich zur Ausgangsmessung vorliegen. Beim Ammonium-Stickstoff ist dieser Verlauf auf die intensivierten Ammonifikationsprozesse unter hohen Temperaturen in den ersten Jahren der Belüftung zurückzuführen. Im weiteren Verlauf treten dann verstärkt Umsetzungsprozesse auf (im Wesentlichen Nitrifikation, Denitrifikation, teilweise auch Strippeffekte), welche zu dem beobachteten Konzentrationsrückgang führen. Sulfationen werden demgegenüber durch die zeitweilige Oxidation der reduzierten Metallsulfidverbindungen in den frühen Phasen der in situ Belüftung freigesetzt.

Die vorliegenden Ergebnisse belegen eindeutig den Stabilisierungserfolg der Belüftungsmaßnahme. Zum heutigen Zeitpunkt, d.h. nach Abschluss der biologischen Deponiestabilisierung, könnte das Abfallmaterial (hinsichtlich der Anforderungen an die Eluatqualität) auf einer DK I-Deponie abgelagert werden – welches einer Deponierung unter einer Einkomponentendichtung entsprechen würde.

4.2 Ergebnisse aus dem begleitenden Monitoringprogramm

Im Zuge eines maßnahmenbegleitenden Überwachungsprogramms wurden die Auswirkungen der in situ Belüftung auf den Gashaushalt, die Sickerwasserqualität, das Temperaturniveau im Deponiekörper sowie die auftretenden Setzungen untersucht.

Gashaushalt und Kohlenstoffaustrag

Der Kohlenstoffaustrag über die Gasphase wird im Zuge der in situ Belüftung signifikant gesteigert. Hierbei handelt es sich zum überwiegenden Teil um die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches im Wesentlichen als Produkt der aeroben Stoffwechselaktivitäten beim Abbau organischer Abfallbestandteile im Deponiekörper gebildet wird. Dieses CO₂ wird aufgrund seines anthropogenen Ursprungs als klimaneutral bewertet. Zeitgleich werden in der erfassten Abluft nur noch geringe Methankonzentrationen gemessen, welche im Zuge der fortschreitenden Aerobisierung immer stärker abnehmen. In Verbindung mit der installierten thermischen Abluftreinigung (regenerative thermische Oxidation, RTO, d.h. thermische CH₄-Oxidation zu CO₂) können CH₄-Emissionen in die Atmosphäre vollständig vermieden werden, wodurch eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen realisiert wird. Rechnerisch müssen bei in situ belüfteten Deponien lediglich die Sekundäremissionen aus der Energieerzeugung zum Betrieb der Belüftungs- und Abluftreinigungsanlage berücksichtigt werden, soweit diese nicht mittels erneuerbarer Energien oder CO₂-neutraler Brennstoffe erfolgt.

In Abhängigkeit vom Zustand des Deponiekörpers vor dem Beginn der in situ Belüftung (Grad der biologischen Stabilisierung der Abfälle (mit wesentlichem Einfluss auf die anzusetzende Halbwertszeit), Wassergehalt der abgelagerten Abfälle, eventuell erfolgte Abfallvorbehandlung etc.) ergibt sich ein spezifischer Beschleunigungsfaktor für den Umsatz des bioverfügbaren Kohlenstoffs. Dieser Faktor beschreibt zugleich die mögliche Verkürzung des Zeitraumes, in dem mit z.T. signifikanten Methangasemissionen zu rechnen ist.

Für die in situ stabilisierte Altdeponie Kuhstedt errechnen sich spezifische Beschleunigungsfaktoren zwischen 3,5 und 7. Die Spannweite ergibt sich als Resultat der angesetzten Halbwertszeiten zwischen 6 und 12 Jahren. Für die nicht oberflächengedichtete Deponie Kuhstedt erscheinen hierbei etwa 14 Jahre nach Ende der Verfüllung tendenziell eher längere Halbwertszeiten (> 10 Jahre) als realistisch. Übertragen auf die realen Deponieverhältnisse bedeutet diese Abschätzung, dass innerhalb des 5,5-jährigen Belüftungszeitraumes die gleiche Masse an organischem Kohlenstoff kontrolliert (d.h. ohne die Verursachung klimaschädlicher CH₄-Emissionen) umgesetzt wurde, die ansonsten unter anaeroben Deponiebedingungen innerhalb eines Zeitraumes von bis zu 39 Jahren (zum Großteil in Form des Treibhausgases Methan) emittiert wäre (Abbildung 5).

Nach Beendigung der aktiven Belüftungsmaßnahme verbleibt die Restgasproduktion aufgrund der sehr weitgehenden Umsetzung der biologisch verfügbaren organischen Substanz (> 90%) auf einem sehr niedrigen Niveau. Bereits im August / September 2006 (9 Monate vor Ende der Stabilisierungsmaßnahme) wurden im Rahmen eines Absaugversuches Methangasproduktionsraten < 0,2 l/(m²*h) gemessen. Eine vollständige biologische Oxidation dieser verbleibenden CH₄-Frachten in einer qualifizierten Rekultivierungsschicht (Methanoxidationsschicht) ist nach eigenen Untersuchungen (Hupe et al., 2007) sowie weiterer unabhängiger Meinungen (z.B. Rettenberger, 2006) unabhängig von saisonalen Einflüssen möglich. Eine zusätzliche Reduktion der Restgasproduktionsraten wird zudem aufgrund der installierten passiven Be- und Entlüftungseinrichtungen für die Deponie Kuhstedt erwartet.

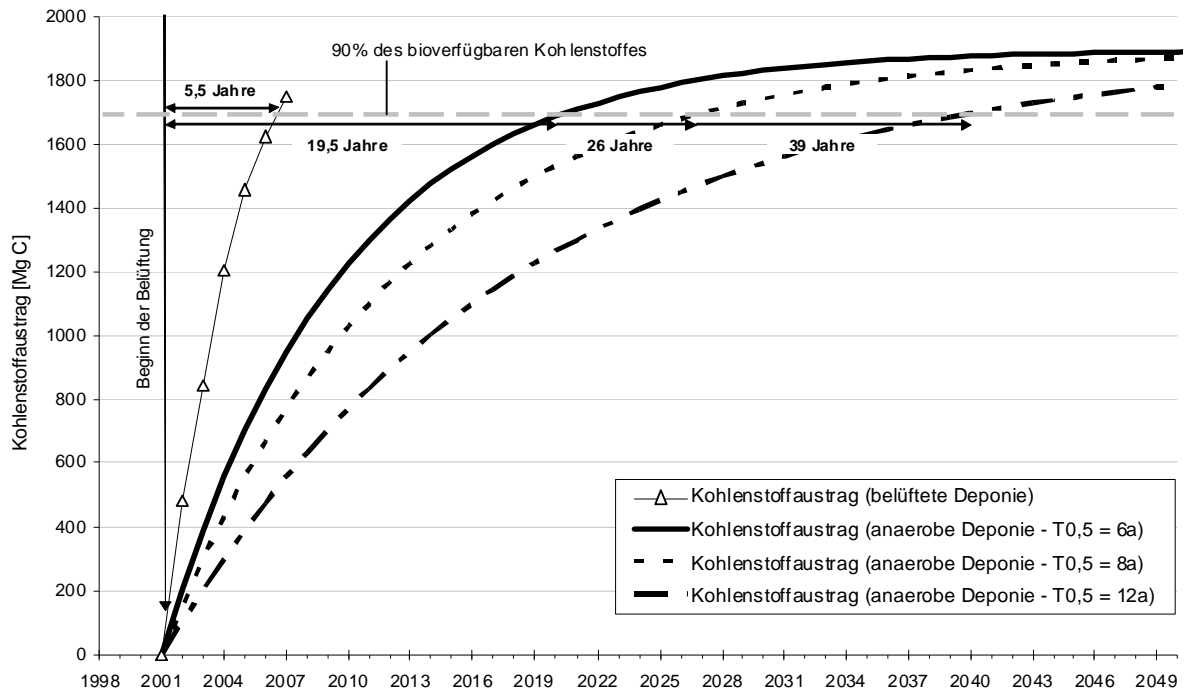


Abb. 5: Vergleich des kumulierten Kohlenstoffaustrages über die Abluft (belüftete Deponie, Messergebnisse) sowie über das Deponiegas (anaerobe Deponie, Ergebnisse einer Deponiegasprognose) für die in situ Stabilisierte Altdeponie Kuhstedt

Sickerwasserqualität

Für in situ belüftete Deponien ohne Basisabdichtung und Sickerwasser-erfassungssystem gestaltet sich die Beurteilung der Sickerwasserqualität schwierig und ist oft nur indirekt über die vergleichende Betrachtung der Grundwasserqualität im An- und Abstrom möglich. Im Fall der Altdeponie Kuhstedt liegen Analysenergebnisse für eine Sickerwassermessstelle vor, welche im südlichen Deponiebereich über annähernd die gesamte Deponiemächtigkeit verfiltert eingebaut wurde (Ritzkowski et al., 2004).

Die vorliegenden Ergebnisse dieser Messstelle zeigen nach einem Netto-Belüftungszeitraum von etwa 5 Jahren signifikant reduzierte Stickstoffkonzentrationen ($\text{NH}_4\text{-N}$), die etwa 40 bis 50% unter den Vergleichskonzentrationen vor Beginn der Belüftung liegen. Zeitgleich bewegen sich die CSB- und TOC-Werte auf einem annähernd unveränderten Niveau.

Ursächlich für den signifikanten Rückgang der Stickstoffbelastung des Deponiesickerwassers sind insbesondere in-situ Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse sowie, insbesondere in der frühen Phase der Belüftung, auch zeitweilig auftretende Strippeffekte (NH_3 -Stripfung über die Abluft). Bezüglich der bisher unveränderten Konzentrationen der organischen Sickerwasserinhaltsstoffe sind im Wesentlichen intensivierete Lösungsprozesse im Zuge des beschleunigten Umsatzes organischer Abfallbestandteile verantwortlich. Aufgrund der relativ langsamen vertikalen Fließgeschwindigkeiten im konsolidierten Deponiekörper sowie der geringen horizontalen Strömungsgeschwindigkeit des oberen Grundwasserleiters sind an den Messstellen im unmittelbaren Umfeld der Deponie kurzfristig nur geringe Änderungen zu erwarten. Mittel-

und langfristig wird sich die Belastungssituation jedoch signifikant verbessern, wie die Laboruntersuchungen der entnommenen Abfallproben eindeutig belegen (siehe Kapitel 4.1).

Temperaturen

Im Gegensatz zu mikrobiologischen Stoffwechselreaktionen im anaeroben Milieu wird im Zuge des aeroben Katabolismus ein Großteil der Reaktionsenthalpie als Wärme freigesetzt. In der Folge kommt es zu einer Temperaturerhöhung des Deponiekörpers, einhergehend mit dem beschleunigten Abbau der biologisch verfügbaren organischen Substanzen der abgelagerten Abfälle. Aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit der Abfälle in Verbindung mit einer entsprechenden verdichteten Oberfläche bzw. Oberflächenabdeckung des Deponiekörpers wird die Energie nur langsam in die Umgebung abgeführt, so dass auch nach erfolgtem Abbau der leicht umsetzbaren Abfallbestandteile bzw. auch nach Beendigung der Belüftung die Temperaturen über lange Zeiträume auf einem deutlich erhöhten Niveau verbleiben.

Unter Berücksichtigung der mittleren Temperaturen im Deponiekörper vor Beginn der Belüftungsmaßnahme (19,3°C, gemessen in den Bohrlöchern für die Gasbrunnen im August 2000) zeigt sich im Fall der in situ belüfteten Altdeponie Kuhstedt ein maximaler Anstieg der Jahresmittelwerte um ca. 30°C für einen Zeitraum von 9 bis 21 Monaten nach Beginn der Belüftungsmaßnahme. Bereits zum Ende des zweiten Betriebsjahres ist dann eine deutliche Temperaturabnahme zu beobachten, welche sich bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes (Dezember 2007) fortsetzt. Nach Abschluss der in situ Belüftung lagen die Temperaturen des Deponiekörpers im Mittel nur noch etwa 5°C über denen der Deponie vor Beginn der Belüftung (Abbildung 6).

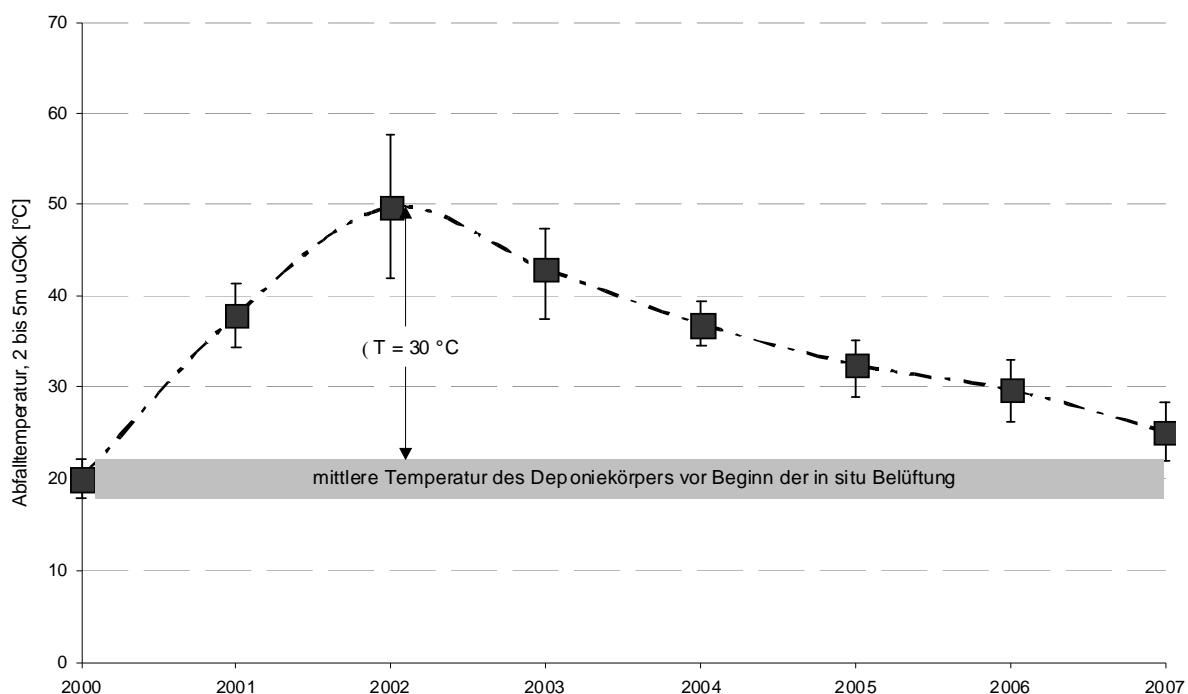


Abb. 6: Temperaturverlauf der abgelagerten Abfälle der Altdeponie Kuhstedt unter dem Einfluss der aeroben in situ Stabilisierung (Jahresmittelwerte, Beginn der Belüftung: April 2001)

Setzungen

Infolge des beschleunigten Abbaus biologisch verfügbarer organischer Substanz im Deponiekörper treten im Zuge von in situ Belüftungsmaßnahmen signifikante Setzungen und Sackungen auf. Im Rahmen des Monitoringprogramms wurden auf der Altdeponie Kuhstedt insgesamt 17 Setzungspegel installiert, welche 3 bis 4mal im Jahr vermessen wurden.

Die Ergebnisse der Messkampagnen zeigen eine durchschnittliche Setzung des gesamten Deponiekörpers von ca. 67 cm innerhalb eines netto Belüftungszeitraums von 60 Monaten. Bemerkenswert ist die sehr ungleichmäßige Verteilung der Setzungen: Im Bereich der Deponieauffahrt (relativ geringe Belüftungsraten) sowie in der unmittelbaren Umgebung der Versuchsfelder im südöstlichen Deponiebereich treten die geringsten Setzungen auf (ca. 26 cm), während im südlichen Deponiebereich Setzungen von bis zu 108 cm beobachtet werden. Ausschlaggebend hierfür ist zum einen die stärkere Auflast in diesem Bereich, welche sowohl infolge der installierten Belüftungseinrichtungen (Container) als auch im Zuge der Baumaßnahmen (insbesondere für die Versuchsfelder) auftritt; zum anderen weist die Altdeponie hier ihre maximale Mächtigkeit auf. Bezogen auf die mittlere Mächtigkeit der Altdeponie vor Beginn der in situ Belüftungsmaßnahme (ca. 6,9 m) ergeben sich Gesamtsetzungen von ca. 9,7 %. Eine Abschätzung der Höhenänderung infolge des Wasser- (Kondensat + Gasfeuchte) und Kohlenstoffaustrages zeigt, dass etwa 15% auf den Massenaustrag über den Gaspfad zurückzuführen sind während die übrigen 85% durch Sackungen infolge der Veränderungen des Korn- und Stützgefüges verursacht werden. Dieses ist wesentlich auf die aus der Bodenphysik bekannte Kontaktzahlerhöhung im Bereich der feinkörnigen Abfallbestandteile infolge der Verdrängung von Porenwasser zurückzuführen. Neben den absoluten Werten der Setzungen ist deren zeitlicher Verlauf insbesondere hinsichtlich der Beurteilung des Langzeitverhaltens eines belüfteten Deponiekörpers von Bedeutung. Hier lassen sich Aussagen zum Zeitpunkt der Beendigung der Stabilisierungsmaßnahme ableiten (im Sinne eines ergänzenden Stabilisierungskriteriums).

5 DISKUSSION UND AUSBLICK

Altdeponien und Altablagerungen können, aufgrund ihres zum Teil signifikanten Stoff- und Emissionspotenzials in Verbindung mit den in vielen Fällen fehlenden passiven Schutzsystemen (z.B. Basisabdichtung und Sickerwassererfassung), eine Gefährdung für die umgebenden Schutzgüter darstellen. Innovative Maßnahmen zur beschleunigten aeroben in situ Stabilisierung dieser Standorte können eine Ergänzung / Alternative zur konventionellen Sicherung (Aufbringen einer Oberflächenabdichtung, Einkapselung der Abfälle) sein, wenn die erforderlichen Randbedingungen, wie z.B. ausreichende Gaswegigkeiten und Feuchtegehalte eingehalten werden. Im Rahmen eines breit angelegten F&E-Projektes an der Altdeponie Kuhstedt im Landkreis Rotenburg (Wümme) konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte und kontrollierte Belüftungsmaßnahme eine deutliche Verbesserung des Emissionsverhaltens infolge der Stabilisierung der organischen Substanz und Reduzierung des Schadstoffpotenzials im Deponiekörper erreicht wird.

Mit der beschleunigten aeroben in-situ Stabilisierung von (Alt-)Deponien im Niederdruck Belüftungsverfahren steht heute eine Technologie zur Verfügung, deren generelle Praxistauglichkeit im Rahmen der hier beschriebenen großtechnischen Anwendung sowie in weiteren Anwendungsfällen nachgewiesen wurde. Entscheidungskriterien für den Einsatz der in-situ Stabilisierung für die Vielzahl der Altablagerungen und –deponien können die zu

erwartenden Kosteneinsparungen in den Bereichen der Deponienachsorge (Dauer und Umfang) und der endgültigen Oberflächenabdichtung (Einsatz kostengünstiger alternativer Aufbauten) sein. Vor dem Hintergrund des Endes der Übergangsfristen der TA Siedlungsabfall Mitte 2005 wurden darüber hinaus viele größere Betriebsdeponien in die Stilllegungsphase überführt, so dass sich auch für diese Standorte die Frage nach geeigneten Maßnahmen zum Deponieabschluss stellt.

Neben der ökonomischen Triebkraft zur Durchführung biologischer Deponiestabilisierungsmaßnahmen, stellt auf globaler Ebene die weltweite Klimaerwärmung infolge der Emission so genannter Treibhausgase eine übergeordnete ökologische Herausforderung dar. Auch in diesem Bereich kann die aerobe in situ Stabilisierung einen Beitrag leisten.

Trotz weiterer Optimierungspotenziale besteht bereits heute in der Fachwelt weitgehende Einigkeit darüber, dass aktive Maßnahmen zur kontrollierten Reduzierung des Emissions- und Gefährdungspotenzials von (Alt-)Deponien grundsätzlich alternativlos sind. Über die Wege (Verfahren) zur Erreichung dieses Zieles kann hierbei diskutiert werden. Sicher ist jedoch, dass die hier beschriebene Technologie großtechnisch erprobt ist und nachweislich erfolgreich die Übertragung von Umweltproblemen von heute auf zukünftige Generationen verhindert.

6 LITERATUR

- AbfAbIV (2001): Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen; AbfAbIV – Abfallablagerungsverordnung. In: BGBl. I S. 305; 24.7. 2002, p. 2807
- Heyer, K.-U., Hupe, K., Stegmann, R. 2001: Aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt - Verfahrenstechnik, Planung, Bau und Inbetriebnahme. In: Belüftung von Altdeponien zur in situ Stabilisierung. Tagung am 31.05.2001 in Kuhstedt, Landkreis Rotenburg (Wümme), Band 3 der Schriftenreihe Abfall aktuell, Hrsg.: R. Stegmann, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart
- Hupe, K., Heyer, K.-U., Lüneburg, R., Becker, J.-F., Stegmann, R. 2007: Methanoxidation an alternativen Oberflächenabdichtungen – Erfahrungen mit Testfeldern auf der Altdeponie Kuhstedt. In: Rettenberger und Stegmann (Hrsg.), Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 14, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 145 - 164
- Leikam, K., Heyer, K.-U., Stegmann, R. 1998: Einflußnahme auf das Deponieverhalten durch In-Situ Stabilisierung. In: Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik, 1. Hamburger Abfallwirtschaftstage 28.-29. Januar 1998, Hamburger Berichte, Band 12, Hrsg.: Stegmann, R.; Rettenberger, G., Economica Verlag Bonn, 83 - 104
- Melchior, S. 1993: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. In: Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 22, Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg, 1993. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg
- Prantl, R., Tesar, M., Huber-Humer, M., Heiß-Ziegler, C., Lechner, P. 2004: Veränderungen der organischen Substanz im Zuge der In-Situ Aerobisierung von Altablagerungen. In: Altlasten Spektrum, Heft 6/2004, S. 336 – 344

- Rettenberger, G. 2006: Erfahrungen zur biologischen Methanoxidation in der Rekultivierungsschicht. In: Stegmann, Rettenberger, Bidlingmaier, Bilitewski, Fricke (Hrsg.), Deponietechnik 2008, Hamburger Berichte Bd. 29, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 295 - 298
- Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Stegmann, R. 2004: Aktueller Erkenntnisstand zur Niederdruck in-situ Belüftung von Altdeponien. In: DepoTech 2004, Tagungsband. Lorber, K.-E., Staber, W., Novak, J., Prochaska, M., Maier, J., Kastl, I. (ed.), Verlag Glückauf GmbH, Essen, S. 65-72
- Stegmann, R., Hupe, K., Heyer, K.-U. 2000: Verfahren zur abgestuften beschleunigten in situ-Stabilisierung von Deponien und Altablagerungen. Patent Nr. 10005243. Deutsches Patent- und Markenamt, München