

Wasserinfiltration und Aerobisierung zur Reduzierung der Deponienachsorge

Kai-Uwe Heyer, Karsten Hupe, Rainer Stegmann

Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft (IFAS) *Prof. R. Stegmann und Partner*, Hamburg

Abstract

Gegenüber herkömmlichen Verfahren zur Sicherung von Deponien und Altablagerungen sollen durch die in situ Stabilisierung emissionsarme Ablagerungen erzeugt werden. Grundsätzlich kommen zur in situ Stabilisierung Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren und kombinierte Belüftungs- und Absaugverfahren zur Aerobisierung in Frage.

Die Stabilisierungsverfahren sind für viele Deponien ein wesentlicher Schritt zur Stilllegung und zur technischen, zeitlichen und finanziellen Überschaubarkeit der Nachsorge. Es werden Angaben zur Bemessung, zur technischen Realisierung und zu Betriebserfahrungen der in situ Stabilisierung gemacht.

Keywords

In situ Stabilisierung, Infiltration, Niederdruckbelüftung, Emissionsreduzierung, Nachsorgeverkürzung, Kostensenkungspotenziale

1 Emissionsverhalten von Abfallablagerungen und in situ Stabilisierungsmaßnahmen

Aufgrund der biologischen und chemisch-physikalischen Prozesse in Siedlungsabfalldeponien entstehen Sickerwasser- und Deponiegasemissionen, die solange kontrolliert, erfasst und behandelt werden müssen, bis sie auf umweltverträgliche Belastungen abgeklungen sind (STEGMANN et al., 2002).

Bei basisgedichteten Deponien ist eine Erfassung und Behandlung des Sickerwassers über viele Jahrzehnte notwendig (HEYER, 2003). Bei zahlreichen Altdeponien und vielen Altablagerungen, die weder über eine Basisabdichtung noch eine Sickerwasserefassung verfügen, besteht die permanente Gefahr des Sickerwasseraustritts in den Untergrund und damit in das Grundwasser, so dass Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen notwendig werden können. Zur Vermeidung der Umweltbelastungen durch Sickerwasser sind also in beiden Fällen langfristig erhebliche Kosten aufzuwenden.

In den ersten Jahren und ggf. Jahrzehnten nach Abschluss einer Deponieverfüllung kann das entstehende Deponiegas mit einem aktiven Gaserfassungssystem gefasst und energetisch verwertet werden. Mit zunehmender Ablagerungsdauer verringert sich

in der fortgeschrittenen stabilen Methanphase die Gasproduktion soweit, dass eine wirtschaftliche Deponiegasverwertung nicht mehr möglich ist. Gleichwohl ist eine kontrollierte Erfassung und Entsorgung der verbleibenden Gasmengen aus Gründen des Klima-/Umweltschutzes und der Gefahrenabwehr weiterhin erforderlich. Dies gilt auch für viele Altdeponierungen, die nicht über eine Gasfassung verfügen.

Eine Sicherung von Deponien und Altdeponierungen kann durch das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung erfolgen. Durch eine Oberflächenabdichtung wird der Wassereintrag in den Deponiekörper weitgehend reduziert, was zu einer unerwünschten Konservierung der noch vorhandenen abbaubaren organischen Substanzen führen kann. Bei einem Versagen der Oberflächenabdichtung ist allerdings wieder mit belastetem Sickerwasser und möglicherweise erneuter Deponiegasproduktion zu rechnen. Mit einer Sicherung allein erfolgt also keine Sanierung im Sinne der kontrollierten Schadstoffreduktion der Abfallablagerung (HEYER et al., 2002).

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie man das Emissionsverhalten von Siedlungsabfallablagerungen positiv beeinflussen und damit die Dauer und den Umfang von Maßnahmen in der Nachsorge, Sicherung und Überwachung reduzieren kann. Dazu können in Abhängigkeit der Randbedingungen von Deponien und Altdeponierungen im Wesentlichen zwei in situ Stabilisierungsverfahren einzeln oder auch gemeinsam eingesetzt werden (HUPE et al., 2003, Abbildung 1):

- Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren, z.B. bei basisgedichteten, jüngeren Abfallablagerungen mit höherem Anteil bioverfügbarer Organik
- Belüftungsverfahren, z.B. bei älteren Abfallablagerungen bzw. bei geringerem Anteil bioverfügbarer Organik

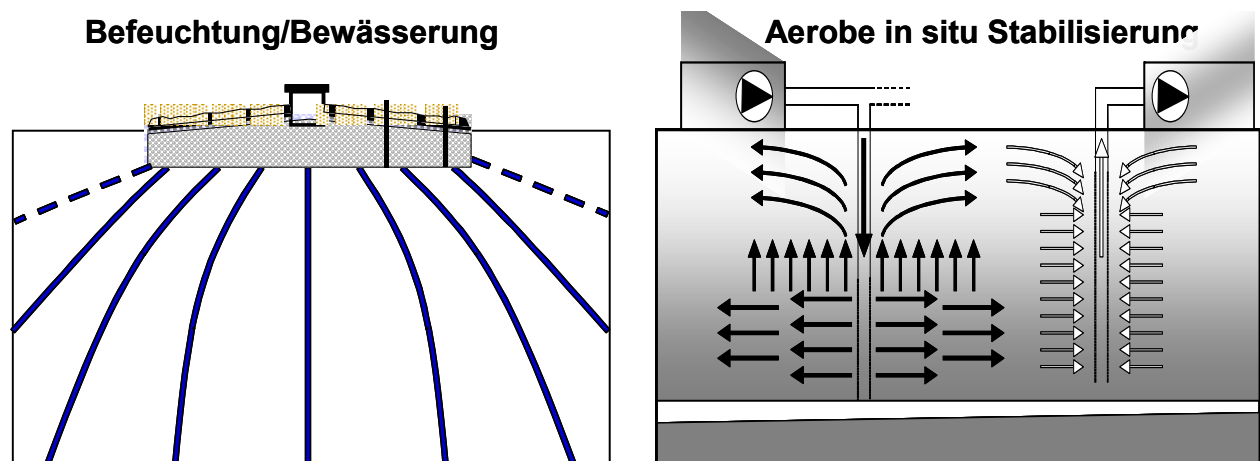


Abbildung 1 Verfahren zur in situ Stabilisierung zur Verkürzung der Deponienachsorge

2 Anwendungsbereiche, Anforderungen und Ziele von in situ Stabilisierungsmaßnahmen

2.1 Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren

Befeuchtungs- und Bewässerungsmaßnahmen können besonders dann eingesetzt werden, wenn Siedlungsabfälle relativ trocken abgelagert wurden oder schon kurz nach Abschluss der Verfüllung eine Zwischenabdeckung oder Abdichtung aufgebracht wurde. Der Wasserhaushalt wird dann zum limitierenden Faktor für die biologischen Abbauprozesse der organischen Abfallinhaltsstoffe. Als wesentlicher Grund werden die eingeschränkte Wasserbewegung im Deponiekörper und Austrocknungseffekte vermutet.

Mit einer kontrollierten Befeuchtung und Bewässerung trockener Deponiebereiche werden daher folgende Ziele verfolgt:

- Vermeidung einer unerwünschten Verzögerung der Reaktionsprozesse im Deponiekörper durch Wassermangel und Austrocknungseffekte.
- Beschleunigte in situ Stabilisierung der abgelagerten Abfälle zur nachhaltigen Reduzierung des Emissions- und daraus resultierenden Gefährdungspotenzials der Deponie. Dies geschieht über die Initiierung und Optimierung biologisch-chemischer Umwandlungsprozesse vorwiegend unter anaeroben Milieubedingungen, die zu einem beschleunigten Abbau der organischen Abfallbestandteile zu Deponiegas führen sollen. Die erhöhte Deponiegasproduktion soll kontrolliert erfasst und verwertet werden.
- Bei großen Wasserzugabevolumina erhöhte Auslaugung von organischen und anorganischen Verbindungen.
- Durch die kontrollierte Reduzierung des Emissions- und Gefährdungspotenzials: reduzierter Aufwand in der langfristigen Nachsorgephase, d.h.
 - geringerer Aufwand an Nachsorgemaßnahmen über einen kürzeren Zeitraum,
 - deutlich reduziertes Risiko, dass durch erneute Schadstoffmobilisierung langfristig ein kostenintensiver Sanierungsbedarf entsteht.

Der rechtliche Rahmen zur Infiltration wird insbesondere durch die Deponieverordnung (DEPV, 2002) bestimmt. Hier werden auch die standortbezogenen Voraussetzungen aufgeführt:

2.2 In situ Belüftungsverfahren

Mit der in situ Belüftung von Deponien und Altablagerungen wird ebenfalls das Ziel verfolgt, den Deponiekörper möglichst schnell in einen biologisch stabilisierten Zustand zu überführen. Dabei sollen anaerob nur noch schwer oder nicht abbaubare Stoffe

einem aeroben Abbau zugänglich gemacht werden. Als ein hierfür geeignetes Verfahren wurde die in situ Niederdruckbelüftung *AEROflott*[®] auf der Grundlage umfangreicher Labor- und technischer Untersuchungen entwickelt (STEGMANN et al., 2000). Nach Durchführung der in situ Stabilisierung soll keine nennenswerte Methanproduktion mehr erfolgen, und die Sickerwasserkonzentrationen sollen im Bereich umweltverträglicher Restkonzentrationen bzw. -frachten liegen.

Für die aerobe in situ Stabilisierung kommen verfüllte bzw. abgeschlossene Deponien oder Teilabschnitte und Ablagerungen sowohl mit als auch ohne Basisabdichtungssystem in Frage, wenn sie insbesondere folgende Randbedingungen aufweisen (HEYER et al., 2002):

- nur noch geringe Gasproduktion (Schwachgasproduktion, Erfassung und Behandlung der gasförmigen Emissionen erforderlich, wirtschaftliche Nutzung nicht mehr möglich)
- abnehmende Sickerwasserbelastungen in der stabilen Methan- oder Langzeitphase, die jedoch langfristig noch nennenswerte umweltrelevante Größenordnungen aufweisen und z.B. die Bestimmungen des 51. Anhangs der AbwV noch deutlich überschreiten
- erhöhtes Gefährdungspotenzial betroffener Schutzgüter (z.B. Grundwasser, Oberflächengewässer, Gefährdung/Schäden durch Gasmigration)
- bei bebauten oder zur Bebauung vorgesehenen Ablagerungen (Stabilisierung zur Gefahrenabwehr (Explosions- und Gesundheitsschutz) und höherwertigen Folgenutzung)

Die aerobe in situ Stabilisierung ist auch von Interesse, wenn Abfallablagerungen unter Aspekten der Emissionen, Setzungen und Kosten möglichst bald für eine hochwertige Folgenutzung hergerichtet und in ein städtebauliches oder landschaftsplanerisches Gesamtkonzept eingebunden werden sollen. Dies betrifft insbesondere kleinere, ältere Ablagerungen in großstädtischen Ballungsräumen, bei denen der Kostenaufwand zur in situ Stabilisierung und weiterer Nachsorgemaßnahmen über die begleitende oder auch nachfolgende Nutzung (z.B. Gewerbebebauung) abgedeckt werden kann.

3 Verfahren zur Befeuchtung, Bewässerung und Belüftung

3.1 Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren

Eine beschleunigte Stabilisierung kann über eine Befeuchtung des Deponiekörpers zur Beschleunigung der biologischen Umsetzungsprozesse im anaeroben oder aeroben Milieu erreicht werden. Durch eine intensive Bewässerung kann eine Auslaugung von Schadstoffen erfolgen.

Während bei der Befeuchtung nur soviel Wasser in den nicht wassergesättigten Deponiekörper gegeben wird, wie er aufnehmen kann, ohne dass es zu nennenswerten Sickerwasserabflüssen an der Deponiebasis kommt, wird bei der Bewässerung das Wasserhaltevermögen des Deponiekörpers gezielt überschritten. Das Wasser dient im zweiten Fall als Transport-, Absorptions- und Extraktionsmedium zur Abreicherung mobilisierbarer Abfallinhaltsstoffe, die in der Sickerwasserbehandlungsanlage extern abgetrennt und reduziert werden. Die im Vergleich zum Regelbetrieb beschleunigte Mobilisierung von Schadstoffen bzw. Abfallinhaltsstoffen führt u.U. zu erhöhten Anforderungen an das Sickerwasserfassungs- und -behandlungssystem. Der erhöhte Behandlungsaufwand ist jedoch nur für einen überschaubaren Zeitrahmen notwendig. Es werden durch dieses Vorgehen Auslaugprozesse vorweggenommen, die mittel- bis langfristig zu einer Reduktion des Behandlungsaufwands und der damit verbundenen Kosten führen.

In Abhängigkeit der standortspezifischen Randbedingungen und Ziele der Wasserinfiltration können folgende Infiltrationsverfahren für abgedichtete Deponien eingesetzt werden, wobei auch Kombinationen dieser Verfahren sinnvoll sein können:

- bedingt kontrollierte Befeuchtung über klimatische Sickerwasserbildung durch eine gering durchlässige temporäre Oberflächenabdeckung
- horizontale Infiltrationssysteme unter der Oberflächenabdeckung/-abdichtung: flächig oder linienförmig
- vertikale Infiltrationssysteme: vertikale Schluckbrunnen oder Infiltrationslanzen in kürzeren Rasterabständen

Neuere Konzeptionen der Verfasser zeigen, dass eine Kombination aus horizontalen Infiltrationsfeldern in Verbindung mit schluckbrunnenähnlichen Zugabeschächten für viele Deponiestandorte geeignet ist, um folgenden Belangen gerecht zu werden:

- technisch robuste und kostengünstige Ausführung
- einfacher und überschaubarer Infiltrationsbetrieb
- langfristige Funktionstüchtigkeit (z.B. bei Inkrustationen, Sackungen, Überschüttung)

In Abbildung 2 ist beispielhaft ein derart entwickeltes Infiltrationssystem dargestellt, wie es für drei deutsche Deponiestandorte derzeit installiert bzw. geplant wird.

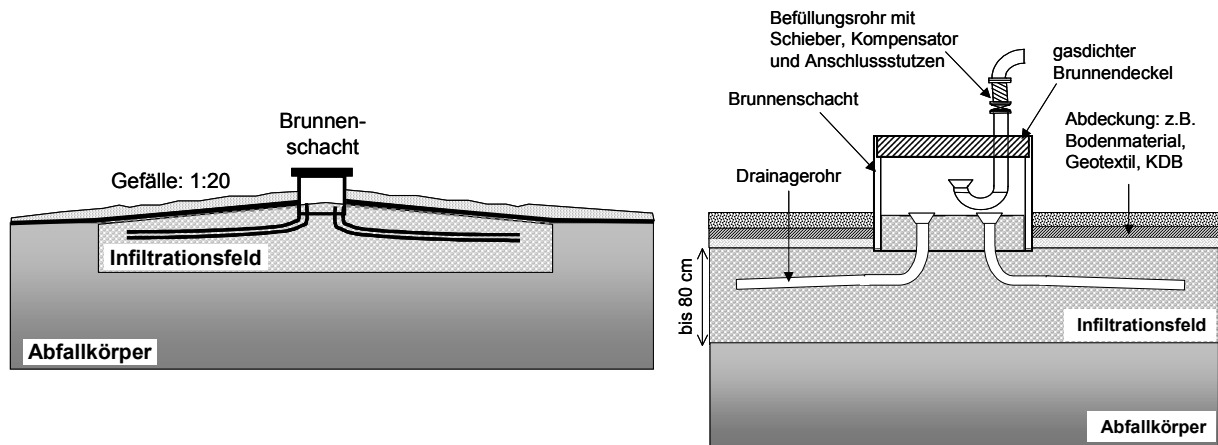


Abbildung 2 Schema eines Infiltrationssystems bestehend aus Brunnen-schacht und Infiltrationsfeld

Erfahrungen mit der kontrollierten Infiltration können wie folgt zusammengefasst werden: positive Erfahrungen Steigerung der Gasproduktion bis zu einem Faktor 3

- beschleunigte biologische Stabilisierung des Abfallkörpers
- Reduzierung der Halbwertszeit der biologischen Umsetzung organischer Abfallstoffe bis auf ein Drittel
- negative Erfahrungen Verstopfungen und Inkrustationen im Infiltrationssystem (z.B. wenn das Infiltrationssystem nicht auf das Infiltrationsmedium angepasst wurde)
 - Abscheren, Bruch, Knicken von Leitungen ungleichmäßiger Wassereintrag bzw. in Teilbereichen nicht mehr möglich

3.2 In situ Belüftungsverfahren

Das Grundprinzip der Belüftung und Ablufferfassung mit der innovativen Niederdruckbelüftung ist in Abbildung 3 dargestellt. Bei einer Luftzuführung unter geringen Überdrücken wird Umgebungsluft über Belüftungsbrunnen in den Deponiekörper eingepresst. Von dort verteilt sich die Luft bzw. der Luftsauerstoff über Konvektions- und Diffusionsvorgänge im Deponiekörper. In Abhängigkeit der Belüftungsrate und der Belüftungsdauer wird somit eine Aerobisierung des gesamten Deponiekörpers und ein beschleunigter Abbau der organischen Abfallbestandteile bewirkt. Über ein Gasfassungssystem, ebenfalls baugleiche Gasbrunnen, wird die Abluft erfasst und behandelt (HEYER et al., 2001).

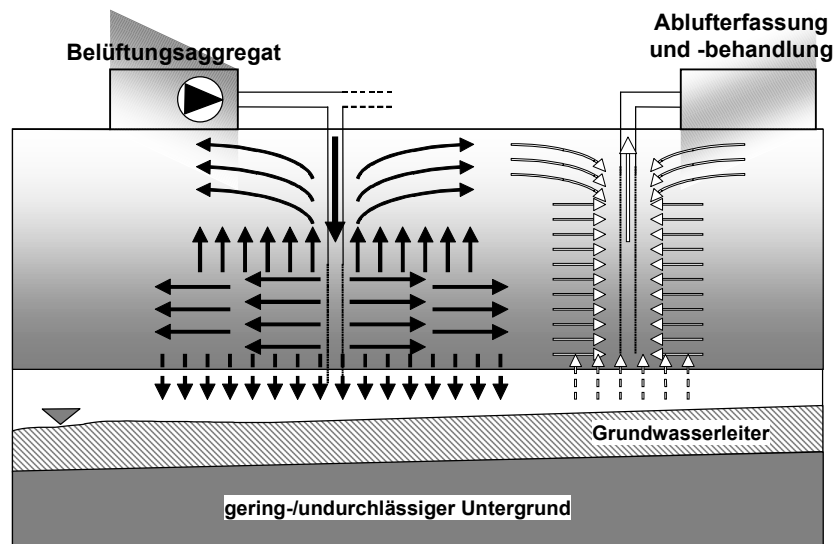


Abbildung 3 Grundkonzept der Stabilisierung durch Belüftungsverfahren – hier für einen nicht basisgedichteten Standort

Umfangreiche praktische Erfahrung für die Durchführung von Belüftungsvoruntersuchungen, für standortspezifische Planung des Niederdruckbelüftungsverfahrens sowie für den optimierten Anlagen-/Stabilisierungsbetrieb nach dem patentierten AEROflott®-Verfahren, konnten bisher auf folgenden Standorten gemacht werden:

- Altdeponie Kuhstedt, LK Rotenburg (Wümme) – Niedersachsen (vom BMBF gefördertes Projekt)
- Altdeponie Amberg-Neumühle, Stadt Amberg – Bayern
- Altdeponie Milmersdorf, LK Uckermark – Brandenburg
- zusätzlich wurden auf der Deponie Dörentrup, LK Lippe (Nordrhein-Westfalen), der Zentraldeponie Leppe (Nordrhein-Westfalen) und der Altlast Römerstraße, Stadt Memmingen (Bayern) erfolgreich Belüftungsvorversuche durchgeführt

Eine Auslegung des Verfahrens erfolgt grundsätzlich auf der Grundlage von standortspezifischen Belüftungsvorversuchen und unter Einbeziehung der verfügbaren Infrastruktur und bestehender Gasbrunnen:

- Gasbrunnen: Anzahl, Abstand, Lage, Durchmesser, Tiefe (Voll- und Filterrohr), Materialauswahl, Sicherung (z.B. Unterflur, Schächte)
- Gasleitungen (Einzelleitungen, Sammelleitung): Anzahl, Lage, Durchmesser, Leitungsgefälle, Sicherung (z.B. Unterflur, Überführungen)
- Kondensatfassungssysteme inkl. Sicherung und Ausstattung
- Gasverteilerstationen für den Übergang Einzel- zu Sammelleitungen und die betriebliche Umstellung der Gasbrunnen/Einzelleitungen „Belüftung oder Absaugung“: Auslegung, Ausstattung, Lage

- Gasverdichterstation für Belüftung und Absaugung
- Gasbehandlungsanlage in Abhängigkeit des Stabilisierungsgrades und der Gaszusammensetzung der Abluft: z.B. autotherme Hochtemperaturoxidationsanlagen (RTO), Aktivkohle oder Biofilter, ggf. mit Wechsel der Behandlungsart im Laufe des Stabilisierungsbetriebes zur Reduzierung der Betriebskosten
- Optimierung des Stabilisierungsbetriebes in Abhängigkeit des Stabilisierungsgrades und der Gaszusammensetzung der Abluft: Gesamtbelüftungs-/Absaugleistung, betriebliche Umstellung einzelner Brunnen „Belüftung oder Absaugung“ inkl. der brunnen-spezifischen Belüftungs-/Absaugleistungen
- Monitoringprogramm zur Optimierung des Stabilisierungsbetriebes und zur Überprüfung des Stabilisierungserfolges
- Kostenermittlung und Hinweise zur Realisierung (Investition/Miete/Dienstleistung)

Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Konzept zur aeroben in situ Stabilisierung eines Deponieabschnitts einer größeren Deponie, die Ende 2004 geschlossen werden soll. Die bestehenden Gasbrunnen und die vorhandene Infrastruktur werden zum Belüftungsbetrieb genutzt, um die Stabilisierung wirtschaftlich erreichen zu können.

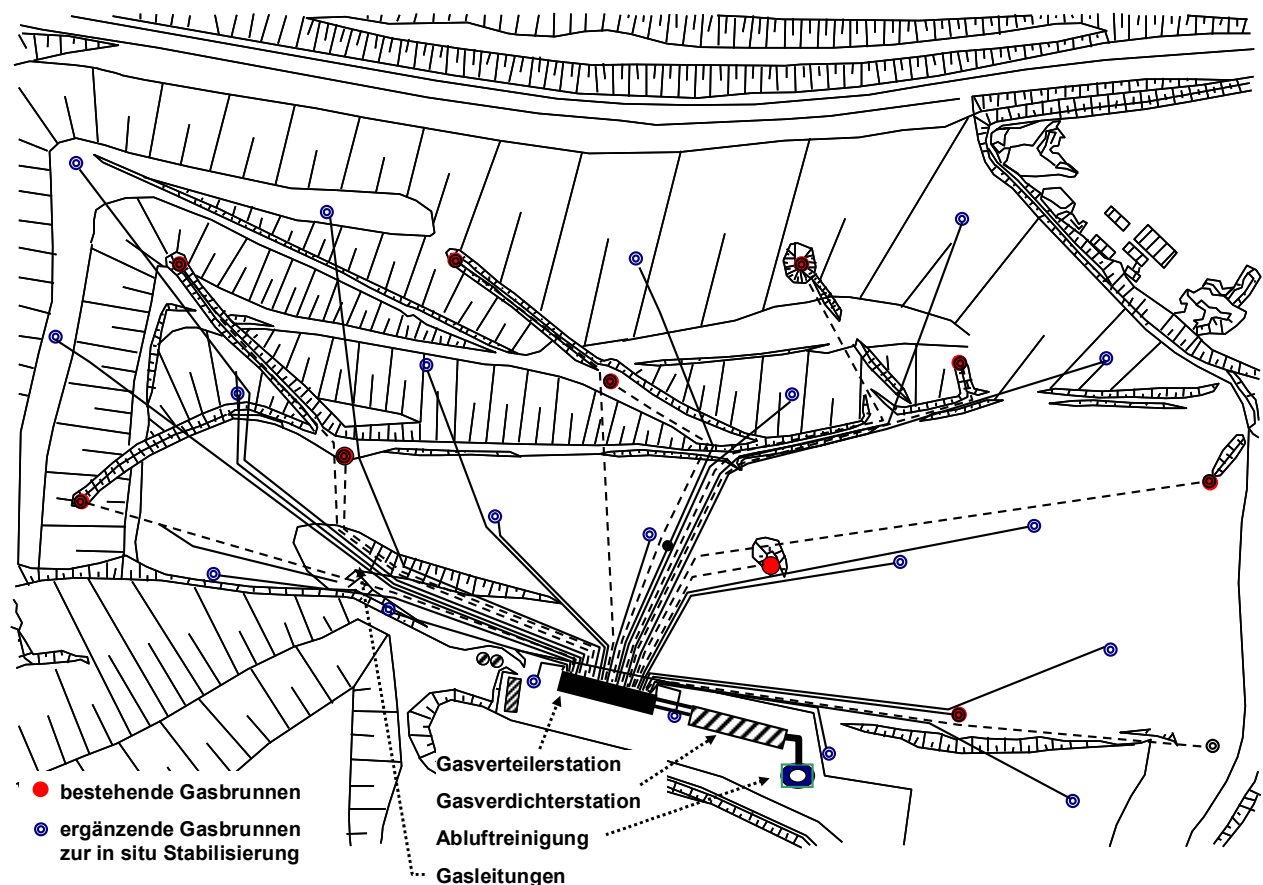


Abbildung. 4: In situ Belüftung eines größeren Deponieabschnitts unter Einbeziehung der bestehenden Gasfassung

Obige Ausführungen zeigen bereits die Komplexität der Planungsleistungen und des Stabilisierungsbetriebes und unterstreichen die Notwendigkeit der Durchführung von Belüftungsvoruntersuchungen, um eine technisch- oder kostenoptimierte Umsetzung realisieren zu können. Darüber hinaus wird deutlich, dass eine belastbare Kostenermittlung erst möglich und sinnvoll ist, wenn die Randbedingungen im Detail bekannt sind.

3.2.1 Prozesse und Auswirkungen bei der aeroben in situ Stabilisierung

Grundsätzlich laufen bei der Belüftung folgende Prozesse im Deponiekörper ab (HEYER et al., 2000 und 2002; RITZKOWSKI et al., 2000 und 2002):

- Es findet eine Umstellung von anaeroben auf aerobe Milieubedingungen statt, die einen beschleunigten und teilweise weiter gehenden Abbau der biologischen verfügbaren Abfallbestandteile zur Folge hat.
- Organische Verbindungen bestehen zum Ende der Stabilisierung nur noch aus schwer- oder nicht abbaubaren organischen Verbindungen mit sehr geringem Restgaspotenzial.
- Infolge der beschleunigten biologischen Abbauprozesse werden auch die Hauptsetzungen beschleunigt vorweggenommen.

Auswirkungen auf den Wasserpfad:

- Im Sickerwasserpfad tritt durch die Belüftung mit dem aeroben Abbau organischer Verbindungen und der Freisetzung in die Gasphase (hauptsächlich als Kohlendioxid) eine beschleunigte Abnahme der Parameter CSB und vor allem BSB₅ sowie des Stickstoffs (TKN bzw. NH₄-N) auf.
- Die Nachsorgezeiträume für den Emissionspfad Sickerwasser verkürzen sich bei der in situ Belüftung gegenüber strikt anaeroben Bedingungen um mehrere Jahrzehnte. Die Nachsorgephase ist nach Belüftungsende zwar noch nicht als beendet anzusehen, der Nachsorgeaufwand reduziert sich jedoch ganz erheblich, weil aufwändige Sickerwasserreinigungsmaßnahmen früher entfallen können. Würde Sickerwasser direkt in den Untergrund versickern, wie es bei Altdeponien ohne Dichtungs- und Drainsystemen zur Sickerwasserfassung der Fall sein kann, wären die umweltbelastenden Auswirkungen deutlich geringer.

Auswirkungen auf den Gaspfad:

- Durch den beschleunigten Kohlenstoffabbau wird vor allem die Bildungsrate von Kohlendioxid erhöht.

- Vermeidung bzw. Reduzierung des Methangehalts in der Abluft (reduzierte Gasproduktion bei Altdeponien zum Ende der stabilen Methanphase), dadurch z.B. geringeres Explosionsrisiko und geringerer Aufwand zur langfristigen Abluftbehandlung.
- Bei Abfallfeststoffproben im „Deponiesimulationsreaktor“ lag der Kohlenstoffaustrag bzw. der Abbau der organischen Substanz während der Belüftung um den Faktor 1,5 - 5 höher als im Vergleichszeitraum unter anaeroben Bedingungen (HEYER UND STEGMANN, 1997).

3.2.2 Ergebnisse und Erfahrungen zum Stabilisierungsbetrieb

Der in situ Belüftungsbetrieb ist bei durchschnittlichen Deponiebedingungen für einen Zeitraum von 3 bis 4 Jahren vorgesehen. Mittlerweile liegen auf den Deponiestandorten Ergebnisse und Erfahrungen des Stabilisierungsbetriebs über 2 bis 3 Jahre vor. Diese werden für folgende Bereiche beispielhaft dargestellt:

- Auswirkungen auf die Sickerwasser-/Grundwasserbelastung
- Auswirkungen auf den Gashaushalt und den Kohlenstoffaustrag
- Auswirkungen auf die Setzungen
- Auswirkungen auf die Temperaturen

3.2.3 Auswirkungen der in situ Stabilisierung auf die Sickerwasserbelastung

Auf der Altdeponie Kuhstedt liegen Erfahrungen von 3 Jahren Belüftungsbetrieb vor (siehe auch RITZKOWSKI et al., 2004):

- Die Monitoringergebnisse an der Altdeponie Kuhstedt bestätigen grundsätzlich die o.g. Entwicklung der Prozesse und Auswirkungen.
- Veränderungen der Beschaffenheit des Grundwasserleiters sind zu erkennen, z.B. die Erhöhung des Redoxpotenzials, des Sauerstoffgehalts und des pH-Werts als erster Schritt zur Reduzierung der Belastung mit organischen Verbindungen und Stickstoff.
- Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Stickstoffbelastungen im Grundwasserabstrom an einem Messpegel am Deponierand. Vom Beginn der Belüftung im April 2001 ist über ein Jahr Stabilisierung trotz einiger Schwankungen eine deutliche Abnahme der Stickstoffbelastung festzustellen.

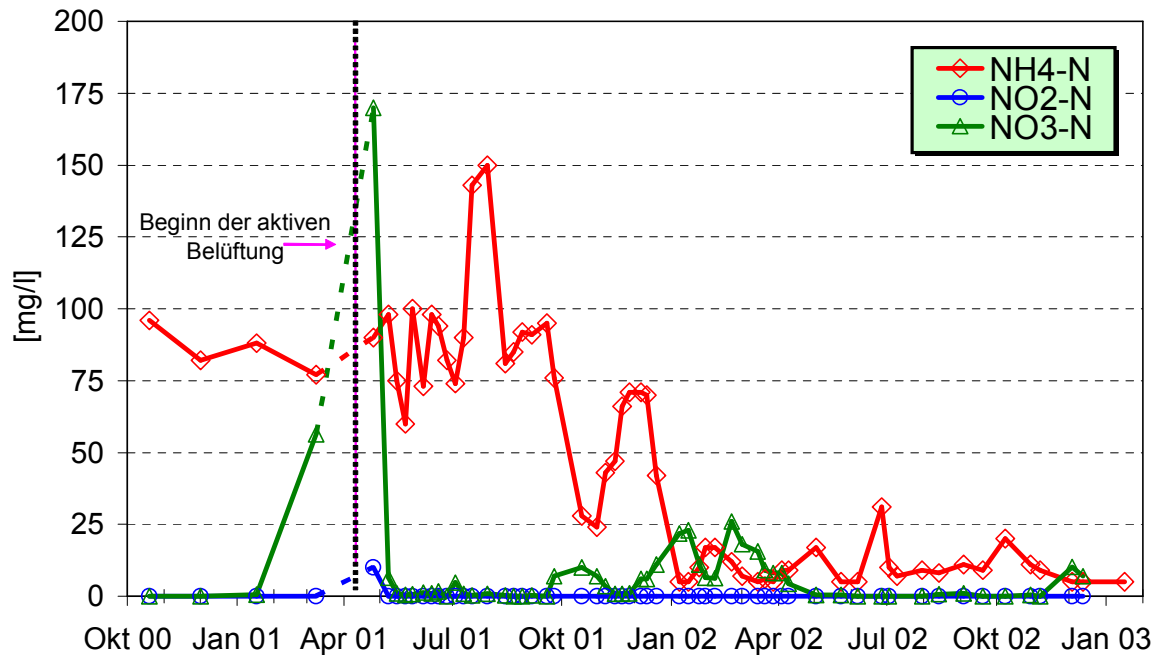


Abbildung 5 Entwicklung der Stickstoffbelastungen im Abstrombereich an einer Grundwassermessstelle bei der in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt (RITZKOWSKI, 2003)

3.2.4 Auswirkungen der in situ Stabilisierung auf den Gashaushalt

Die Auswirkungen der in situ Stabilisierung auf den Gashaushalt ist sowohl am Gesamt-Abluftstrom in der Gasverdichterstation wie an den einzelnen Gasbrunnen zu erkennen.

In der Abbildung 6 ist die Deponiegaszusammensetzung vor Inbetriebnahme der in situ Stabilisierung auf der Deponie Milmersdorf und in den folgenden 10 Monaten der Stabilisierung für den Gesamt-Abluftstrom aufgetragen.

Es ergaben sich folgende Entwicklungen des Gashaushaltes:

- Vor der in situ Stabilisierung lagen die Methangehalte an den Gasbrunnen zwischen 50 und 75 Vol.-%. Die Kohlendioxidgehalte schwankten bei allen Gasbrunnen um die 20 Vol.-%, während kein Sauerstoff vorhanden war.
- Während eines relativ kurzen Absaugbetriebes konnte bei allen Gasbrunnen eine abnehmende Tendenz bezüglich des Methangehaltes festgestellt werden.
- Deutlich zu erkennen ist der im Juni einsetzende Belüftungsbetrieb. Die rasche Abnahme der Methankonzentration bei nahezu konstanten Kohlendioxidgehalten zeigt deutlich den Einfluss der Belüftungsmaßnahmen.

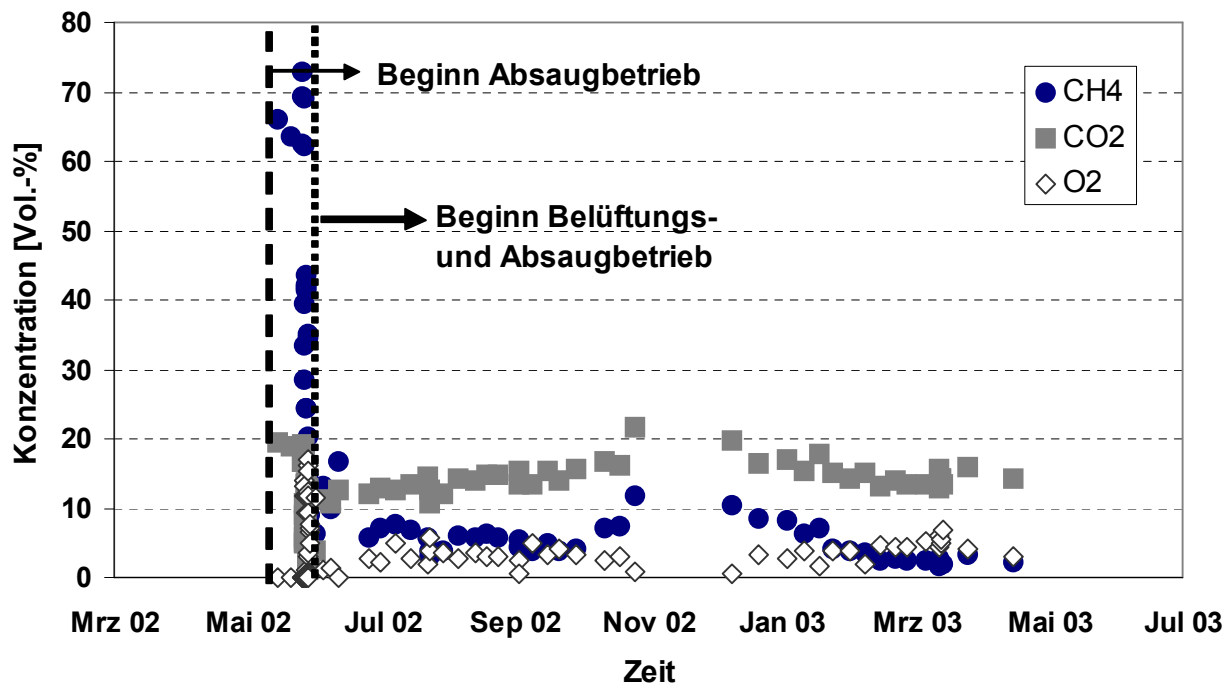


Abbildung 6 Gaszusammensetzung an Abluftsammlerbalken, zu Beginn und während des Stabilisierungsbetriebes, Deponie Milmersdorf

3.2.5 Auswirkungen der in situ Stabilisierung auf den Kohlenstoffumsatz und -austrag über den Gaspfad

Der Kohlenstoffumsatz und –austrag über den Gaspfad kann als Maß für die Intensität und die Beschleunigung der biologischen Abbauprozesse herangezogen werden. Er kann als Fracht über die eingebrachten und abgesaugten Gasvolumina in Verbindung mit der Abluftbeschaffenheit ermittelt werden.

Zum Vergleich und zur Einordnung der Auswirkungen der aeroben in situ Stabilisierung auf der Deponie Milmersdorf wird der Kohlenstoffaustrag abgeschätzt, der sich unter durchschnittlichen anaeroben Milieubedingungen ergeben würde. Dazu werden Ergebnisse von Gasprognoserechnungen herangezogen.

Der tatsächliche Kohlenstoffaustrag („C-Austrag ist“ in Abbildung 7.) infolge der aeroben in situ Stabilisierung der Deponie Milmersdorf liegt nach 16 Monaten Stabilisierungsbetrieb bei etwa 1.700 Mg C_{bio} . Diese Kohlenstofffracht zeigt, dass:

- eine beschleunigte Umsetzung der biologisch verfügbaren Restorganik im Deponiekörper stattfindet,
- seit April 2002 bereits ein nennenswerter Anteil des insgesamt noch verfügbaren Kohlenstoffs kontrolliert mobilisiert und ausgetragen wurde. Die innerhalb kurzer Zeit mobilisierte Kohlenstofffracht beträgt ca. 30% – 50% des gesamten biologisch verfügbaren Kohlenstoffpotenzials im Deponiekörper von 2.500 bis max. 4.200 Mg C_{bio} .

In Abbildung 7 ist der Kohlenstoffaustrag pro Monat seit Beginn der aeroben in situ Stabilisierung im Juni 2002 aufgetragen. Zum Vergleich ist der theoretische Kohlenstoffaustrag unter anaeroben Milieubedingungen (Gasprognoserechnungen und Ergebnisse einer Probeentgasung) hinzugefügt worden.

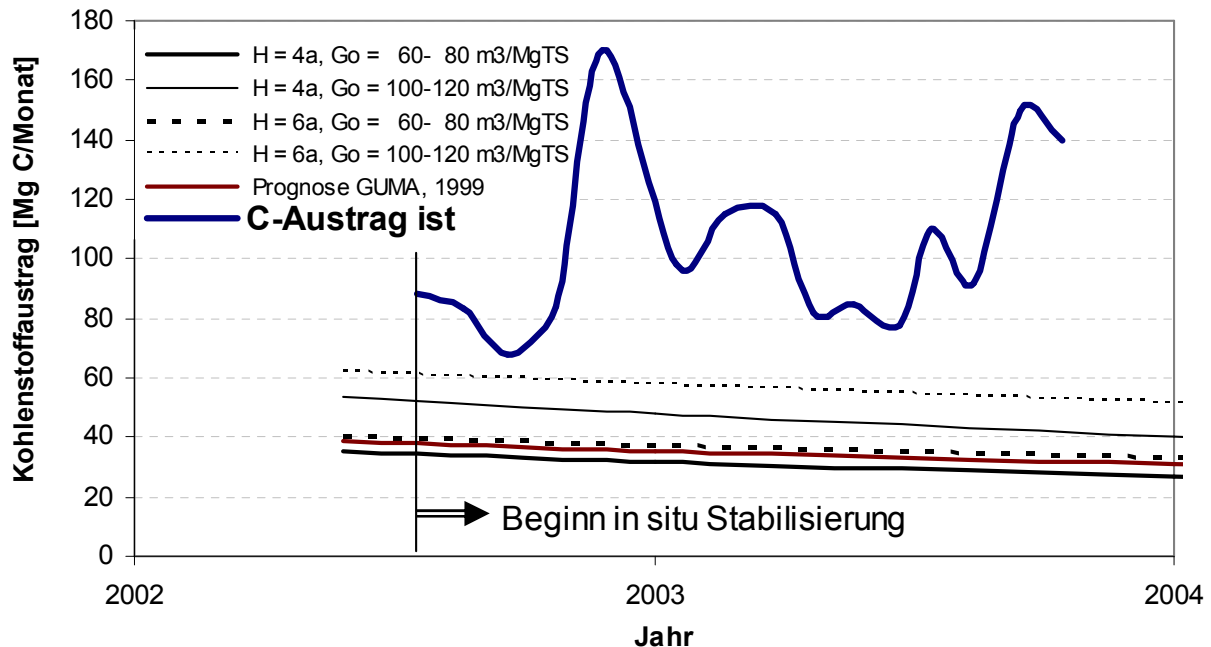


Abbildung 7 Deponie Milmersdorf: Kohlenstoffaustrag pro Monat (C-Austrag ist) ab 2002 infolge der aeroben in situ Stabilisierung, Vergleich mit theoretischem Kohlenstoffaustrag unter anaeroben Milieubedingungen

Die Schwankungen des Kohlenstoffaustrags während der aeroben in situ Stabilisierung sind auf unterschiedliche Betriebsbedingungen zurückzuführen. Der Beschleunigungsfaktor, ausgedrückt als Kohlenstoffaustrag pro Zeiteinheit, liegt gegenüber anaeroben Milieubedingungen mindestens bei etwa 2 bis 3.

3.2.6 Auswirkungen auf die Setzungen

Die Setzungen infolge der biologischen Abbauprozesse bei der Belüftung setzen sich aus zwei Anteilen zusammen:

- Setzungen/Sackungen durch Volumenreduzierungen bei Überführung der biologisch verfügbaren organischen Abfallbestandteile in die Gasphase
- Setzungen/Sackungen durch Schwächung des Stützgerüsts, das die Abfallmatrix darstellt

Voruntersuchungen zur Prognose der Auswirkungen einer aeroben in situ Stabilisierung erlauben eine Abschätzung der zukünftigen Setzungen bzw. Sackungen während der Belüftung. Im späteren Belüftungsbetrieb werden die Setzungen über das begleitende Monitoringprogramm erfasst. Setzungsprognose und -monitoring werden im Folgenden beispielhaft dargestellt.

In Abbildung 8 ist der bisherige Setzungsverlauf unter anaeroben Milieubedingungen für einen Deponieabschnitt von 30 m Ablagerungsmächtigkeit im Kuppenbereich aufgetragen. In der Belüftungsphase ab 2005 sind z.B. im oberen Bereich bei 30 m Ablagerungsmächtigkeit noch bis zu 3 m Setzungen zu erwarten. Diese Setzungen würden sich unter anaeroben Milieubedingungen sonst über sehr lange Zeiträume ausbilden und könnten u.a. die Funktionsfähigkeit einer endgültigen Oberflächenabdichtung beeinträchtigen.

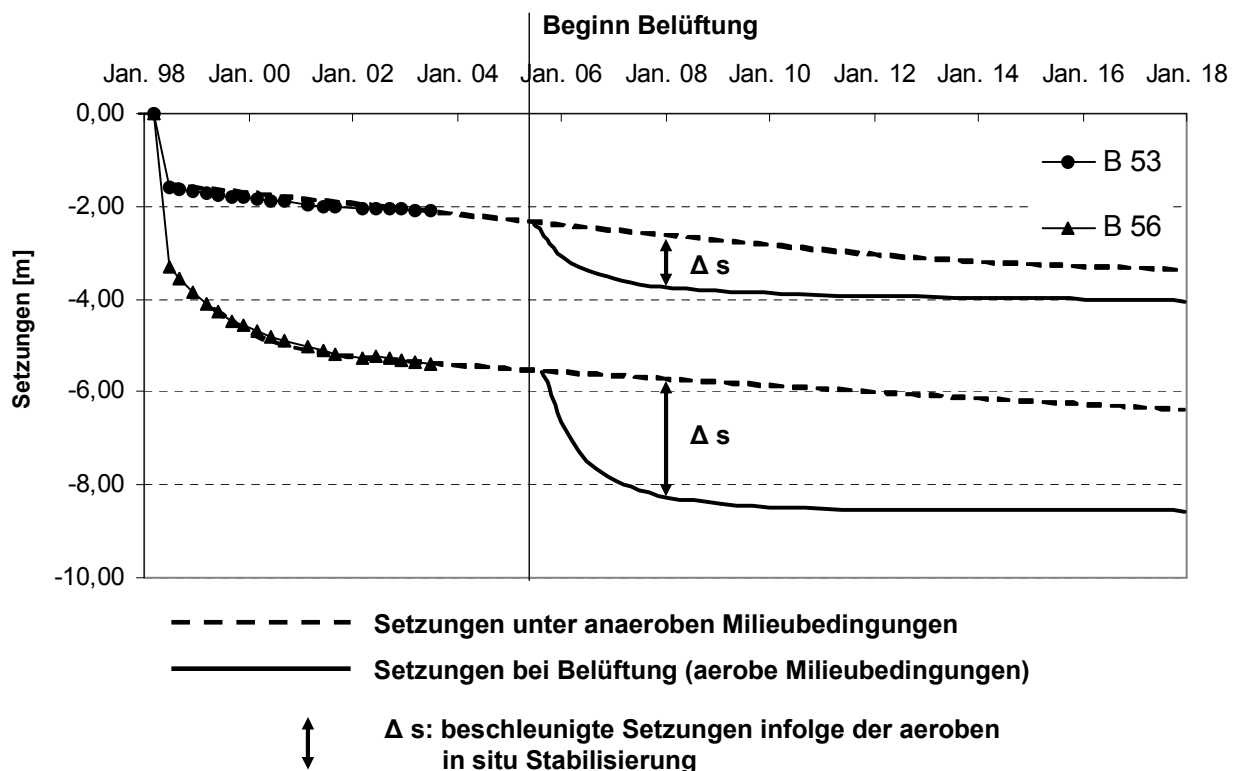
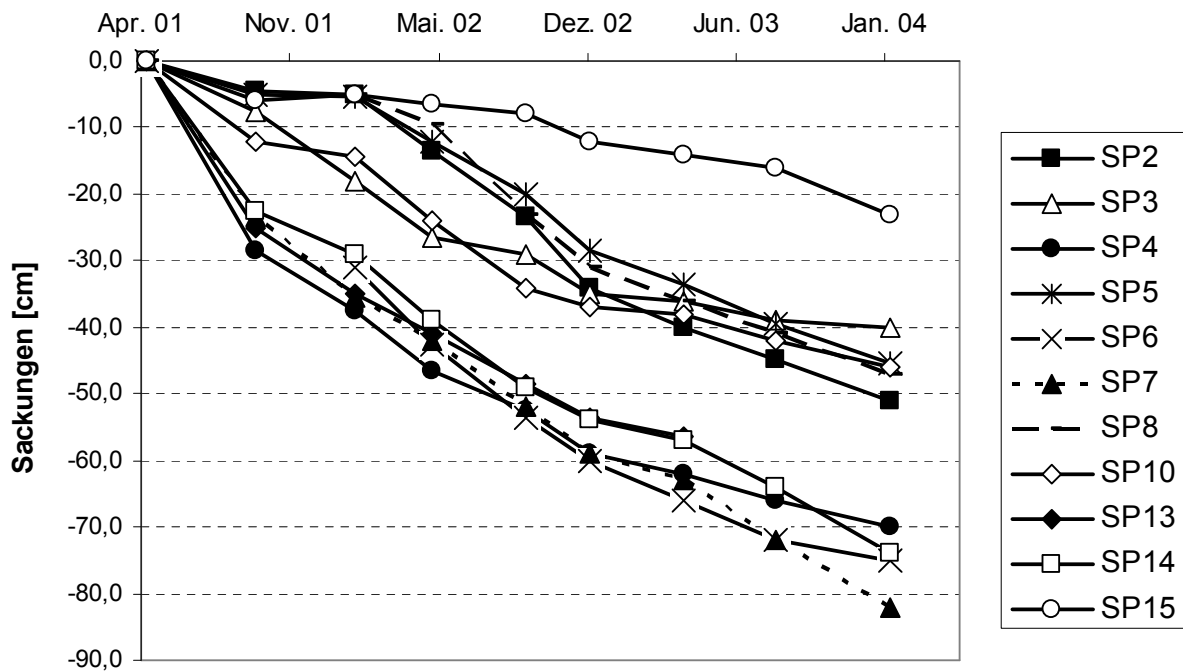


Abbildung 8: Qualitativer Verlauf der Setzungen im Böschungs- und Kuppenbereich eines 30 m mächtigen Deponieabschnitts unter anaeroben und aeroben Milieubedingungen

Bisher hat es an allen drei Standorten, wo die aerobe in situ Stabilisierung bereits durchgeführt wird, nennenswerte Setzungen im Dezimeterbereich gegeben, was auf den beschleunigten Masseabbau und die Schwächung des „Stützgerüsts“, das die verbleibende Abfallmatrix bildet, zurückzuführen ist. Nach drei Jahren Belüftung auf der Altdeponie Kuhstedt sind dort Setzungen bzw. Sackungen zwischen 25 cm und über 90 cm bzw. 2 - 10% der Deponiehöhe aufgetreten, wie es in Abbildung 9 an einigen Setzungspegeln zu erkennen ist.



SP: Setzungspegel

Abbildung 9 Verlauf der Setzungen / Sackungen nach Beginn der in situ Stabilisierung im April 2001, Altdeponie Kuhstedt, bis zu 9 m Ablagerungsmächtigkeit

3.2.7 Auswirkungen auf die Temperaturen und weitere Erfahrungen

Weitere Erfahrungen bei der in situ Stabilisierung:

- Die aerobe in situ Stabilisierung führt überwiegend zu Temperaturen im Deponiekörper zwischen 20 und 50°C. Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Temperaturverteilung im mittleren Deponiebereich der Deponie Kuhstedt, wo auch die Temperaturschichtung über die Tiefe des Deponiekörpers und der Einfluss der Außentemperatur zu erkennen ist. Nennenswerte Temperaturerhöhungen bis in den thermophilen Bereich (50 – 70°C), wie sie bei der Kompostierung bekannt sind, haben sich in wenigen Deponiebereichen der Altdeponie Kuhstedt und Milmersdorf über mehrere Monate eingestellt. Die Temperaturentwicklungen in ihrer Gesamtheit sind eindeutige Anzeichen, dass infolge intensiver aerober Umsetzungsprozesse Wärmeenergie freigesetzt wird.
- Ein Zusammenhang zwischen Sauerstoffzufuhr, Intensität der aeroben Umsetzungsprozesse und Temperaturentwicklung ist feststellbar.
- Austrocknungsprozesse im Deponiekörper aufgrund des erhöhten Luft-/ Gasaustauschs sind bei allen drei Standorten nicht erkennbar.
- Bei der in situ Stabilisierung tritt ein temperaturbedingter Kondensatanfall im Abluftfassungssystem auf. Die Kondensatbelastungen sind bei allen Deponien und Altablagerungen, auf denen die Belüftung durchgeführt wird, sehr gering.

Insgesamt lässt sich bei der Beurteilung der bisherigen Erfahrungen an allen drei Deponiestandorten feststellen, dass mit der gewählten Belüftungstechnik die grundsätzlichen Ziele der beschleunigten Stabilisierung durch eine kontrollierte Reduzierung des Emissionspotenzials erreicht werden können.

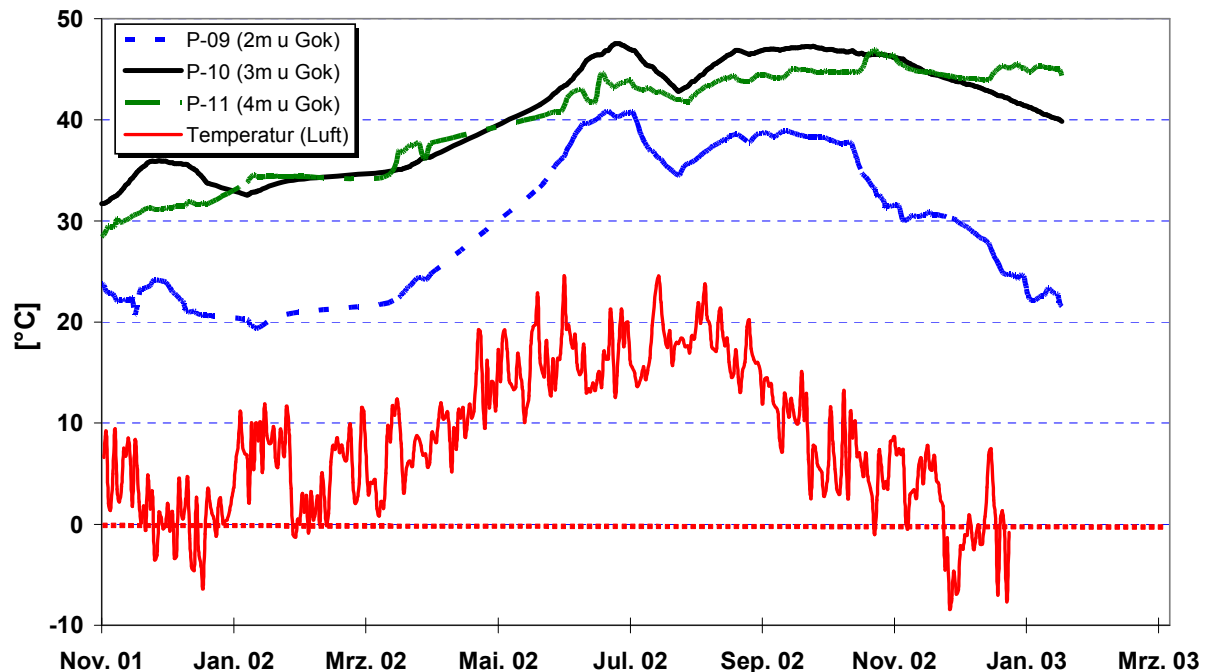


Abbildung 10: Verlauf der Temperaturentwicklung im mittleren Deponiebereich nach Beginn der in situ Stabilisierung im April 2001, Deponie Kuhstedt

4 Kosten und Kosteneinsparungen durch die aerobe in situ Stabilisierung

4.1 Kosten der Niederdruckbelüftung

In Abhängigkeit des standortspezifisch festzulegenden technischen Aufwands der Belüftungseinrichtungen, der vorgesehenen Stabilisierungsdauer, der Belüftungskapazität und weiterer Rahmenbedingungen können die Kosten für die Deponiestabilisierung erheblich variieren.

Die drei derzeit in Betrieb befindlichen Projekte zur Deponiebelüftung und beschleunigten Stabilisierung führen zu Grundkosten für Investitionen und Betrieb von voraussichtlich etwa 650.000,-- €, die bezogen auf das gesamte zu stabilisierende Deponiekörpervolumen in einer Größenordnung von 1 - 3 €/m³ liegen.

Die Belüftungsdauer beträgt voraussichtlich etwa 3 - 4 Jahre. Bei allen drei Projekten liegt der bauliche und technische Aufwand insgesamt etwas höher, da sie als geförderte

Pilotvorhaben mit mehr Ausstattung zur wissenschaftlichen Begleitung und mit technischen Zusatzgeräten für ein umfangreicheres Monitoringprogramm versehen wurden.

Bei der Niederdruckbelüftung bestehen erhebliche Kostensenkungspotenziale, wenn bereits vorhandene Einrichtungen und Infrastruktur auf Deponiestandorten mitgenutzt werden können:

- bestehende Gasbrunnen und Leitungssysteme können zur Belüftung und Abluft- erfassung mitgenutzt werden wie z.B. auf der Deponie Milmersdorf
- bestehende Infrastruktur wie Stromanschlüsse, Betriebswege, Einzäunungen, Gebäude etc.

Abschätzungen ergeben bei günstigen bis durchschnittlichen Standortrahmenbedin- gungen und dem optimierten, standardisierten Stabilisierungsbetrieb Kosten in der Größenordnung von ca. 0,5 - 1 €/m³ Deponieinhalt. Nur bei ungünstigen Rahmenbedin- gungen (z.B. sehr kleine Altdeponien ohne bestehende Infrastruktur) können die Kosten auf 2 - 3 €/m³ Deponieinhalt ansteigen.

Pauschale und verallgemeinerbare Kostenangaben sind folglich nicht möglich, weil Deponien neben dem Volumen sehr unterschiedliche Randbedingungen und Anforde- rungen aufweisen (Sauerstoffbedarf, Ablagerungsmächtigkeit, Längen der Leitungs- systeme, Anzahl Gasverteilerstationen, Bebauungssituation, Infrastruktur usw.).

4.2 Kosteneinsparungen durch die aerobe in situ Stabilisierung

Den Kosten für die aerobe in situ Stabilisierung mit der Niederdruckbelüftung sind beträchtliche Einsparmöglichkeiten in der Deponiestilllegung und Nachsorge gegen- überzustellen, die sich auf die erforderlichen Nachsorgeaufwendungen auswirken:

- Ersatz einer kostenintensiven Oberflächenabdichtung durch an den emissionsarmen Deponiekörper angepasste und langlebige alternative Oberflächenabdichtung, geringere Kosten für Investitionen und Instandhaltung
- bei Altablagerungen geringerer Aufwand bei der Grundwassersanierung und bei technischen Sicherungsmaßnahmen
- bei geordneten Deponien mit Basisabdichtung geringere Betriebskosten bei der Sickerwasserreinigung, frühere Beendigung der Sickerwasserreinigung
- Vermeidung langandauernder diffuser Gasemissionen, die eine Schwachgasbehand- lung erfordern können, u.U. Explosionsgefahren hervorrufen können und die Atmosphäre belasten
- Verkürzung der Nachsorgephase um mehrere Jahrzehnte
- frühere Rekultivierung und Folgenutzung, was besonders in städtischen Ballungs- räumen von wachsender Bedeutung ist

Den Kosten für die Belüftungsmaßnahmen stehen daher beträchtliche Einsparpotenziale gegenüber, so dass mittel- und langfristig mit Kostensenkungen gerechnet werden kann.

4.3 Aerobe in situ Stabilisierung als Dienstleistung

Die Technik und der Betrieb zur Niederdruckbelüftung werden mit den nunmehr vorliegenden Erfahrungen laufend optimiert. Zusätzlich bestehen Möglichkeiten zur Kostenreduzierung, wenn technische Einrichtungen wie die Verdichteranlagen zur Belüftung und Ablufferfassung und die Abluftreinigungsaggregate für die Dauer der Stabilisierungsmaßnahmen gemietet oder geleast werden. Zudem kann der Stabilisierungsbetrieb der Anlagen einschließlich Monitoring und Dokumentation als externe Dienstleistung erbracht werden.

Die zeitlich befristete Anmietung der technischen Ausrüstung oder die vollständige Beauftragung der in situ Stabilisierung als Dienstleistung bietet für Deponiebetreiber folgende Vorteile (HUPE et al., 2003):

- Einbindung des umfassenden Know-hows des Dienstleisters
- keine oder allenfalls geringe Investitionskosten, keine finanziellen Risiken
- Finanzbedarf wird zeitlich gestreckt, Finanzierung kann ggf. über parallel erfolgende oder nachträgliche höherwertige Folgenutzung gedeckt werden
- Betrieb, Wartung und Reparatur über qualifiziertes Fachpersonal
- Anpassung der Aggregate zur Belüftung, Ablufferfassung und Abluftbehandlung an den Stabilisierungsverlauf, dadurch Kostensenkung
- eigenes Personal wird nicht gebunden, z.B. für Berichte und Dokumentationen für Genehmigungs- und Überwachungsbehörden
- reduziertes technisches und wirtschaftliches Betriebsrisiko
- Abstimmung und Integration in weitere Maßnahmen zur Stilllegung und Nachsorge im Rahmen eines „Gesamtpakets“, als externe Dienstleistung, z.B. Erfassung und Behandlung von belastetem Grundwasser oder Sickerwasser, Kontroll- und Unterhaltungsmaßnahmen, jährliche Berichte zum Deponieverhalten als Grundlage zur Entlassung aus der Deponienachsorge

5 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenüber herkömmlichen Verfahren zur Sicherung von Deponien und Altablagerungen allein mittels Abdichtungen sollen durch die in situ Stabilisierung emissionsarme Ablagerungen erzeugt werden. Grundsätzlich kommen zur in situ Stabilisierung Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren oder/und kombinierte Belüftungs- und Absaugverfahren zur Aerobisierung in Frage.

Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren werden insbesondere zur Intensivierung der anaeroben Abbauprozesse eingesetzt, um so u.a. die Deponiegasproduktion und Gasverwertung zu steigern.

Als weiteres Erfolg versprechendes Verfahren zeichnet sich die Belüftung des Deponiekörpers zur beschleunigten Stabilisierung biologisch verfügbarer organischer Bestandteile ab. Mittlerweile wird die Niederdruckbelüftung nach dem *AEROflott*[®]-Verfahren mit einem geringen Energiebedarf auf drei Deponiestandorten optimiert eingesetzt und für mehrere große TASI Deponieklasse II Ablagerungen konzipiert. Die Ausgangsbedingungen unterscheiden sich hinsichtlich Deponievolumen, abgelagerter Abfälle, Alter und Ablagerungsmächtigkeit. Durch die Stabilisierungsmaßnahmen wird das Gefährdungspotenzial signifikant reduziert. An den Stabilisierungsgrad des Deponiekörpers angepasste Oberflächenabdichtungen und eine weniger aufwändige Sickerwasser- und Schwachgasbehandlung eröffnen erhebliche Kosteneinsparpotenziale, welche die Belüftungsmaßnahmen innerhalb weniger Jahre refinanzieren können. Es ist zudem eine höherwertige Folgenutzung möglich, über die die Kosten zur in situ Stabilisierung zusätzlich gedeckt werden können.

In situ Stabilisierungsverfahren sollten nach Auffassung der Verfasser bei entsprechendem Emissionspotenzial der Ablagerung ein obligatorischer Schritt im Rahmen der Stilllegung von Deponien sein, um emissionsarme Deponien zu erzeugen. Die bisherigen Betriebsergebnisse zeigen, dass dieses Ziel mit der gewählten Verfahrenskette, der optionalen Befeuchtung, der in situ Belüftung und den nachfolgend darauf abgestimmten Sicherungsmaßnahmen, erreicht werden kann.

Bei der Planung und Umsetzung dieser Verfahren sind umfangreiche Erfahrungen erforderlich, so dass es sich anbietet, hierfür externe Dienstleistungen einzubinden. Sie können mit weiteren Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen in einem Dienstleistungs-Gesamtpaket zusammengeführt werden.

Die innovativen Stabilisierungsverfahren sind ein wesentlicher Schritt zur Stilllegung von vielen Deponien und zur technischen, zeitlichen und finanziellen Überschaubarkeit der Deponienachsorge wie der Sanierung von Altablagerungen. Insbesondere die aerobe in situ Stabilisierung kann u.a. im Rahmen der Regelungen des §14 (6) der DepV einge-

setzt werden. Daher wird es auch als flankierende Maßnahme im Leitfaden „Deponiestilllegung“ des VKS bzw. der ATV-DVWK (PALM et al., 2003) und in den „LAGA-Eckpunkten zur Beurteilung von Anträgen auf Ausnahmeregelungen nach § 14 Abs. 6 DepV“ (LAGA, 2004) genannt.

6 Literatur

- | | | |
|---|------|---|
| Heyer, K.-U., Hupe, K.,
Stegmann, R. | 2000 | Die Technik der Niederdruck-Belüftung zur in situ Stabilisierung von Deponien und Altablagerungen. Müll und Abfall, 32 (7), 438-443. |
| Heyer, K.-U., Hupe, K.,
Stegmann, R. | 2002 | Technische Umsetzung und Kosten der in situ Stabilisierung mit dem AEROflott-Verfahren: Erfahrungen auf den Altdeponien Kuhstedt, Amberg und Milmersdorf. In: Deponietechnik 2002, Hamburger Berichte 18, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart. |
| Heyer, K.-U. | 2003 | Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Einflüsse auf das Emissionsverhalten organischer und stickstoffhaltiger Verbindungen in Siedlungsabfalldeponien. Dissertation an der TU Hamburg-Harburg, AB Abfallwirtschaft, Hamburger Berichte 21 (Hrsg.: R. Stegmann), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart. |
| Hupe, K., Heyer, K.-U.,
Stegmann, R. | 2002 | Optimierte Oberflächenabdichtungen für stabilisierte Abfallablagerungen – Versuchsfelder auf der Altdeponie Kuhstedt – In: Handbuch der Altlastensanierung (Hrsg.: V. Franzius, K. Wolf, E. Brandt), C.F. Müller Verlag, Heidelberg, Gliederungsnummer 5589 |
| Hupe, K., Heyer, K.-U.,
Stegmann, R. | 2003 | Kontrollierte Bewässerung und Belüftung von Deponien – Praxiserfahrungen. In: 8. Münsteraner Abfallwirtschaftstage (Hrsg.: B. Gallenkemper, W. Bidlingmaier, H. Doedens, R. Stegmann), Fachhochschule Münster, LASU. |
| Hupe, K., Heyer, K.-U.,
Ramthun, A. | 2003 | Stilllegung und Nachsorge von Deponien als Dienstleistung. Müll und Abfall, 04/2003, S. 169 – 176. |
| LAGA ad-hoc AG | 2004 | LAGA-Eckpunktepapier: Fachliche Eckpunkte für die Beurteilung von Ausnahmeanträgen nach § 14 Absatz 6 Deponieverordnung. LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (vom 04.02.04) |

- N.N. 1993 Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TASi - TA Siedlungsabfall) vom 14. Mai 1993, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, Bundesanzeiger Nr. 99a.
- N.N. 1994 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, in der Fassung vom 21. August 2002, BGBl. I S. 3322.
- N.N. 2002 Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV - Deponieverordnung) vom 24. Juli 2002, in der Fassung vom 26. November 2002, BGBl. I S. 4417.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Heerenklage, J., Stegmann, R. 2000 Grundlagen der aeroben in situ-Stabilisierung von Altdeponien. Müll und Abfall, 32 (6), 358-367.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Heerenklage, J., Stegmann, R. 2004 Aktueller Erkenntnisstand zur in-situ Belüftung von Deponien am Beispiel des mehrjährigen Versuches auf der Altdeponie Kuhstedt. In: M. Kühle-Weidemeier (Hrsg.): Abfallforschungstage 2004 – Auf dem Weg in eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-86537-121-3, S. 370 – 391.
- 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.
- Stegmann, R., Rettenberger, G., Bidlingmaier, W., Ehrig, H.-J. (Hrsg.) 2002 Deponietechnik 2002, Hamburger Berichte 18, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart.
- VKS, ATV-DVWK (Hrsg.) 2003 Leitfaden zur „Deponiestilllegung“, Autoren: Palm, A., Schmidt-Tegge, J., Sondermann, W.-D. (2003)

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. Kai-Uwe Heyer

Tel.: 040 / 77 11 07 42

Dr.-Ing. Karsten Hupe

Tel.: 040 / 77 11 07 41

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann

Tel.: 040 / 77 11 07 41

Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Fax: 040 / 77 11 07 43

Prof. R. Stegmann und Partner

Nartenstraße 4a

21079 Hamburg

e-mail: heyer@ifas-hamburg.de

<http://www.ifas-hamburg.de>