

Aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle

Technische Realisierung, Bau und Inbetriebnahme, Kosten, Ergebnisse und Erfahrungen zum Betrieb, Monitoring

Dr.-Ing. K.-U. Heyer, Dr.-Ing. K. Hupe, Dipl.-Ing. A. Koop, Prof. Dr.-Ing. R. Stegmann

IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner

Schellerdamm 19-21, 21079 Hamburg, <http://www.ifas-hamburg.de>

1 DAS EMISSIONSVERHALTEN VON DEPONIE- UND ALTABLAGERUNGEN UND IN SITU STABILISIERUNGSMABNAHMEN

1.1 Langfristiges Emissionsverhalten von Abfallablagerungen

Aufgrund der biologischen und chemisch-physikalischen Prozesse in Siedlungsabfalldeponien entstehen Sickerwasser- und Deponiegasemissionen. Diese Emissionen müssen in der Deponienachsorge solange kontrolliert, erfasst und behandelt werden, bis sie auf ein umweltverträgliches Belastungsniveau abgeklungen sind.

Bei geordneten Deponien ist eine Erfassung und Behandlung des Sickerwassers voraussichtlich über viele Jahrzehnte notwendig (Heyer et al., 1998). Bei Altablagerungen, die häufig weder über eine Basisabdichtung noch eine Sickerwasserfassung 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 erhebliche Kosten aufzuwenden.

In den ersten Jahren und ggf. Jahrzehnten nach Abschluss einer Deponieverfüllung kann das entstehende Deponiegas mit einem aktiven Gaserfassungssystem gefasst und verwertet werden. Mit zunehmender Ablagerungsdauer verringert sich in der fortgeschrittenen stabilen Methanphase die Gasproduktion soweit, dass eine wirt-

schaftliche Deponiegasverwertung nicht mehr möglich ist. Gleichwohl ist eine kontrollierte Erfassung und Entsorgung der verbleibenden Gasmengen aus Gründen des Umweltschutzes und der Gefahrenabwehr weiterhin erforderlich. Dies gilt auch für viele bebaute Altablagerungen, die nicht über eine Gaserfassung verfügen.

Eine Sicherung von Deponien und Altablagerungen kann durch das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung erfolgen, wenn die Hauptsetzungen abgeklungen sind. Für abzusaugende Restgasmengen kommt dann ggf. eine Schwachgasbehandlung in Frage. Durch eine Oberflächenabdichtung werden die Sickerwasseremissionen reduziert, was zu einer unerwünschten Konservierung des verbleibenden Emissionspotenzials führen kann. Bei einem Versagen der Oberflächenabdichtung ist aber wieder mit belastetem Sickerwasser und möglicherweise erneuter Deponiegasproduktion zu rechnen, d.h. mit einer Sicherung allein erfolgt keine Sanierung im Sinne der kontrollierten Schadstoffreduktion der Abfallablagerung.

1.2 Verfahren zur in situ Stabilisierung

Vor dem erläuterten 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 Altablagerungen im Wesentlichen zwei in situ Stabilisierungsverfahren eingesetzt werden (Abbildung 1):

- Befeuchtungs- und Bewässerungsverfahren, z.B. bei basisgedichteten, jüngeren Abfallablagerungen mit höherem Anteil bioverfügbarer Organik zur Intensivierung anaerober Abbauprozesse (Hupe et al., 2003)
- Belüftungsverfahren, z.B. bei bebauten Altablagerungen ohne Basisabdichtung, bei älteren Abfallablagerungen bzw. bei geringerem Anteil bioverfügbarer Organik und abnehmender Deponiegasproduktion

Belüftungsverfahren zur aeroben in situ Stabilisierung werden mittlerweile auf der Altdeponie Neumühle in Amberg, der Altdeponie Kuhstedt im Landkreis Rotenburg (Wümme) und auf der Deponie Milmersdorf im Landkreis Uckermark eingesetzt.

Allen Standorten gemeinsam ist die grundsätzliche Zielstellung, das Emissions- und resultierende Gefährdungspotenzial kontrolliert und in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum zu reduzieren, um damit wirtschaftliche Deponieabschluss- und Nachsorge- oder Sicherungsmaßnahmen ergreifen zu können.

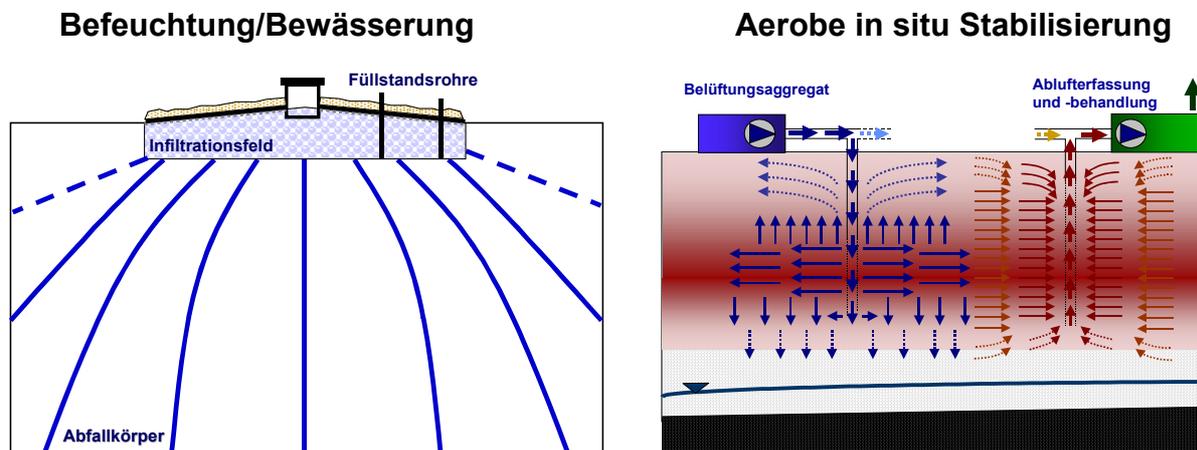


Abb.1: Verfahren zur in situ Stabilisierung zur Verkürzung der Deponienachsorge

Die aerobe in situ Stabilisierung ist auch geeignet, wenn Abfallablagerungen bereits bebaut sind oder unter den 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. Gewerbe oder Wohnbebauung) abgedeckt werden kann.

1.3 Grundsätzliche Prozesse und Auswirkungen bei der aeroben in situ Stabilisierung

Grundsätzlich laufen bei der Belüftung folgende Prozesse im Deponiekörper ab (Heyer et al., 1997, Heyer, 2003, Ritzkowski et al., 2001):

- 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. Der erhöhte Kohlenumsatz während

der in situ Belüftung führt folglich zu einer schnelleren Stabilisierung der organischen Substanz.

- 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 und Ammonium) auf.
- Die Nachsorgezeiträume für den Emissionspfad Sickerwasser verkürzen sich bei der in situ Belüftung gegenüber strikt anaeroben Bedingungen mindestens um mehrere Jahrzehnte. Die Nachsorgephase ist nach Belüftungsende zwar noch nicht als beendet anzusehen, der Nachsorgeaufwand reduziert sich jedoch ganz erheblich, weil aufwendige 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 die Bildungsrate von Kohlendioxid und Wasser (letzteres in vernachlässigbarer Größenordnung) 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 et al., 1997).

2 ZIELE UND UMSETZUNG DER AEROBEN IN SITU STABILISIERUNG DER ALTDEPONIE NEUMÜHLE

Bei der aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle, Stadt Amberg, wird die sofortige Gefahrenabwehr für die Bebauung und die beschleunigte, kontrollierte Reduzierung von Restemissionen angestrebt.

Im Sommer und Herbst 2001 wurde die bauliche und technische Ausführung der Anlagen zur Belüftung sowie Ablufferfassung und -behandlung vorgenommen. Im Dezember 2001 erfolgte die Inbetriebnahme.

Im Folgenden werden die Angaben zum Standort, zum Stabilisierungsverfahren und zur technischen Realisierung zusammengefasst. Es werden die bisherigen Betriebserfahrungen seit der Inbetriebnahme bis zum Sommer 2003 und das geplante weitere Vorgehen erläutert.

2.1 Angaben zur Altdeponie

Die Altdeponie Neumühle im Nordwesten der Stadt Amberg wurde von 1935 bis 1967 mit Bauschutt, Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbe- und Industrieabfällen sowie industriellen Schlacken und Galvanikschlammern verfüllt. Sie hat eine Fläche von ca. 9 ha, eine Ablagerungsmächtigkeit von 3 - 9 m und ein Gesamtvolumen von ca. 420.000 m³.

Auf dem nördlichen Teil der Deponiefläche wurden nach Ende der Verfüllung überwiegend Gewerbebetriebe und einige Wohngebäude angesiedelt. Der südliche Teil wird größtenteils durch einen Reitclub genutzt (Reit- und Sandplätze).

Aufgrund der vorhandenen Schadstoffemissionen bestand vor der gastechnischen Sanierung ein Gefährdungspotenzial, so dass Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden mussten. Hier sind Grundwasserbelastungen und insbesondere die Deponiegasproduktion zu nennen. Aus den festgestellten Methankonzentrationen in der Bodenluft leitete sich vor Inbetriebnahme des Stabilisierungsverfahrens ein mögli-

ches Explosionsrisiko auch im Bereich der bestehenden Bebauung ab. Dabei ist davon auszugehen, dass dieser kritische Zustand ohne eine gastechnische Sanierung noch über viele Jahre angehalten hätte.

Herkömmliche Sicherungen z.B. nach den technischen Vorgaben der TA Siedlungsabfall wären aufgrund der Bebauung und Nutzung des Geländes schwierig und überaus kostenaufwendig gewesen. Es mussten deshalb andere Problemlösungen gefunden werden, die eine kontrollierte Reduzierung des Gefährdungspotenzials in Verbindung mit daran angepassten Sicherungsmaßnahmen zum Ziel haben.

2.2 Grundprinzip der aeroben in situ Stabilisierung und technisches Konzept der Niederdruck-Belüftung

Das **technische Konzept** der Belüftung des gesamten Deponiekörpers der Altdeponie Neumühle besteht darin, über das System von insgesamt 29 Gasbrunnen mit einer aktiven Belüftung soviel Luftsauerstoff in den Deponiekörper einzubringen, dass die Methangehalte in der Bodenluft deutlich reduziert und eine beschleunigte aerobe Stabilisierung der abgelagerten Abfälle erzielt werden. Gleichzeitig wird die schwachbelastete Abluft kontrolliert erfasst und behandelt. Die Belüftung erfolgt mit niedrigen Drücken und wird an den Sauerstoffbedarf angepasst.

Jeder **Gasbrunnen** ist über eine Gassammelleitung mit einer Verteilerstation (VZA) verbunden. Dort kann die Einzelleitung sowohl an die Hauptleitung zur Belüftung als auch an die Hauptsammelleitung zur Ablufferfassung angeschlossen werden.

Das **Verteilersystem zur Belüftung** ist über die Hauptversorgungsleitung mit der Gasverdichterstation zur Belüftung verbunden. Das **Gassammelsystem zur Ablufferfassung** ist mit einer Kondensatabscheidung versehen und über die Hauptabsaugleitung mit dem Verdichtersystem zur Ablufferfassung verbunden. Von dort wird die Abluft der Abluftreinigungsstufe zugeführt.

Als „Herzstück“ der Niederdruckbelüftung wird eine **Gasverdichterstation** zur Belüftung und Abluftabsaugung eingesetzt. Die Gestaltung und der Betrieb der Belüftungs- und Ablufferfassungsanlagen soll derart erfolgen, dass im automatisierten

Normal- oder Regelbetrieb

- auf der Abluftseite keine explosionsgefährlichen Atmosphären auftreten,
- ein hoher Nutzungsgrad des zugeführten Sauerstoffs erreicht wird,
- auf bebauten Abfallablagerungen wie der Altdeponie Neumühle der Gebäudeschutz gegen migrierendes Deponiegas sicher gewährleistet wird.

Die gesamten Verdichteraggregate zur Belüftung und Ablufferfassung einschließlich Schalt- und Steuerschränken werden in einem mobilen Containern installiert.

Die Kontrolle der Funktionsfähigkeit aller technischen Einrichtungen auf den Deponien erfolgt regelmäßig. Über eine automatische Datenfernübertragung wird der Regelbetrieb kontinuierlich überwacht und gesteuert. Bei einer Abschaltung der Anlage ist so sichergestellt, dass Betriebsstörungen schnell erkannt und kurzfristig beseitigt werden.

Die installierten Einrichtungen einschließlich 32 Gaskontrollpegel sind in Abbildung 2 eingetragen worden.

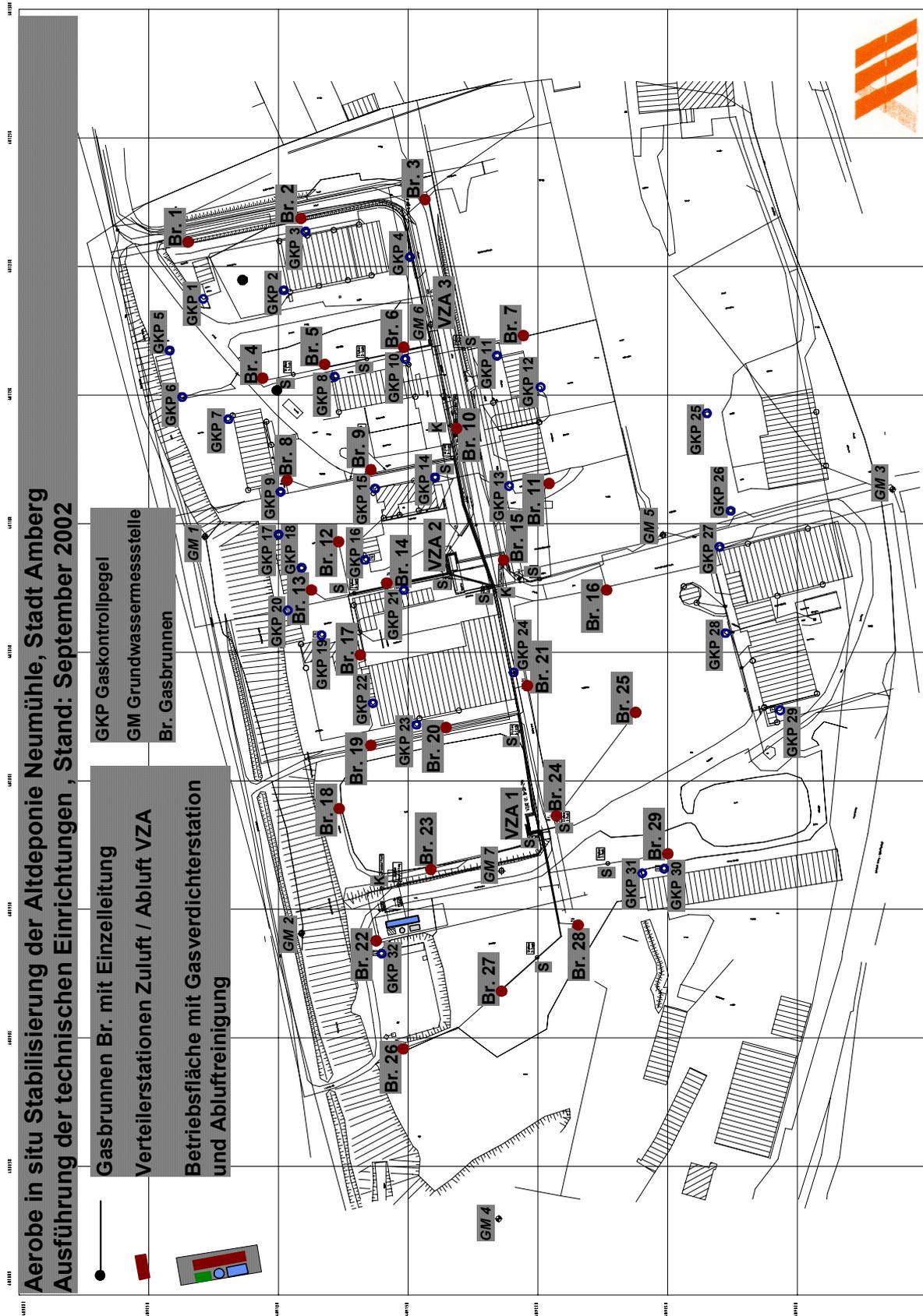


Abb. 2: Bauliche Einrichtungen zur in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle

3 BAUMAßNAHMEN, TECHNISCHE REALISIERUNG DER ANLAGEN ZUR STABILISIERUNG

3.1 Voruntersuchungen zur aeroben in situ Stabilisierung 1999

Bereits im August 1999 erfolgten Voruntersuchungen zur Überprüfung, ob die innovative Niederdruck-Belüftung geeignet ist, um die Altdeponie Neumühle zu stabilisieren. Neben der Klärung dieser Frage dienten die Ergebnisse zur Optimierung und Dimensionierung der Anlagentechnik, z.B. der Anzahl und Gestaltung der Gasbrunnen sowie der Dimensionierung der Gasverdichterstation.

Die Dimensionierung der Verdichterstation zur Belüftung und Ablufferfassung hängt u.a. vom Sauerstoffbedarf und von den Gaswegigkeiten und dem Fließverhalten der zugeführten Luft im Deponiekörper ab. Die Belüftungstests und die Erfahrungen an den drei Standorten haben hier erhebliche standortspezifische Unterschiede zwischen den Überdrücken an den Belüftungsbrunnen bzw. am Verdichter zur Belüftung und den Belüftungsvolumina im Deponiekörper ergeben: während in Teilbereichen der Altdeponie Neumühle ein Überdruck von ca. 40 mbar erforderlich war, um über einen Gasbrunnen 120 m³/h an Luft in den Deponiekörper einzupressen, konnten bei der Deponie Milmersdorf in Brandenburg bei nur 17 mbar Überdruck über 300 m³/h an Luft über einen Gasbrunnen zugeführt werden. Diese beträchtlichen Unterschiede unterstreichen die Notwendigkeit von Voruntersuchungen, um standortspezifische technische Anlagen konzipieren zu können.

3.2 Bau von Gasbrunnen, Gasleitungen und Gasverteilerstationen

Im Jahr 2000 und im 1. Halbjahr 2001 erfolgten die Planung, Ausschreibung und Beauftragung der baulichen und technischen Einrichtungen, die zur aeroben in situ Stabilisierung erforderlich sind.

Der Bau der Gasbrunnen, Gasleitungen, der drei Gasverteilerstationen sowie ergänzender Anlagen zur Infrastruktur sowie zum Deponiegas-/Bodenluftmonitoring wurden von der Firma Ferrum Rohrleitungsbau GmbH, Dinkelscherben, im Sommer und Herbst 2001 ausgeführt:

- Bau von 29 Gasbrunnen (Brunnenkopf unterflur in Schächten) im August 2001
 - Bau der Sammelleitungen (weitgehend unterflur) zwischen Gasbrunnen und Gasverteilerstation von August bis Oktober 2001
- Aufgrund der ungünstigen Gefälleverhältnisse mussten zwischen 27 Gasbrunnen und den Gasverteilerstationen zusätzliche Tiefpunkte ausgebildet werden, die mit Syphons zur automatischen Kondensatabscheidung versehen wurden. Die Gestaltung der Syphons wurde auf den zu erwartenden Regelbetrieb während der Stabilisierung, insbesondere die erforderlichen Über- und Unterdrücke ausgelegt. Die Syphons sind über Schachtbauwerke kontrollierbar. In den Schächten sind Auffangwannen für einen eventuellen Kondensatanfall eingesetzt worden.
- Bau von 32 Gaskontrollpegeln bevorzugt in der Nähe von Gebäuden im September 2001
 - Aufstellung und Montage der drei Gasverteilerstationen VZA 1 - 3 im September und Oktober 2001
 - Bau der beiden Hauptleitungen zur Zuluftversorgung und Ablufferfassung, Setzen von drei Kondensatsammeltanks in den Tiefpunkten der Hauptabluftleitung im Oktober und November 2001

3.3 Bau und Installation der Gasverdichterstation und der Abluftbehandlungsanlage, Datenfernübertragung

Der Bau der Gasverdichterstation zur Zuluftversorgung und Ablufferfassung erfolgte durch Firma Haase Energietechnik, Neumünster. Über diese Firma wurde ferner eine autotherme, nichtkatalytische Abluftreinigungsanlage für die ersten Monate des Stabilisierungsbetriebs angemietet.

Die Aufstellung und Installation der Gasverdichterstation und der Abluftreinigungsanlage erfolgten im November 2001. Über einen Festnetztelefonanschluss ist eine Datenfernübertragung zur Kontrolle und Steuerung des Stabilisierungsbetriebs aufgebaut worden. Zusätzlich wurde ein Alarmsystem installiert, dass bei Anlagenstörungen eine automatische Benachrichtigung per Telefon ausführt.

Der Betriebsplatz, Zuwegungen etc. wurden im November 2001 hergerichtet. Die Flächen und Anschlüsse für ein Biofilter/Biowäscher-Verfahren in der zweiten Phase der Abluftreinigung wurden hergerichtet. Im Dezember 2001 wurde die sicherheitstechnische Abnahme aller relevanten Einrichtungen zur gastechnischen Stabilisierung, insbesondere Gasbrunnen, Leitungssysteme, Gasverteilerstationen, Gasverdichterstation („Schwachgasentsorgungsanlage“) mit den Gasverdichtern, der Sicherheitstechnik und der Abluftreinigungsanlage („Vocsi-Box“) durchgeführt. Daraufhin erfolgte die offizielle Inbetriebnahme.

4 BETRIEB DER ANLAGEN ZUR IN SITU STABILISIERUNG

4.1 Beginn Gasabsaugung / Ablufferfassung

Ab Dezember 2001 wurde der reguläre Stabilisierungsbetrieb aufgenommen. In der ersten Phase der in situ Stabilisierung wurden alle Gasbrunnen zur Ablufferfassung eingesetzt, um durch eine kontrollierte Übersaugung einen maximalen Ablufferfassungsgrad über alle 29 Gasbrunnen zu erreichen. In dieser ersten Phase wurde der Untergrund folglich noch nicht belüftet, um sicherzustellen, dass kein Methan infolge unkontrollierter Gasbewegungen im Untergrund in Richtung der Gebäude migrieren kann. Durch den alleinigen Absaugbetrieb war die Bewegungsrichtung der methanhaltigen Bodenluft stets von den Gebäuden weg zu den Gasbrunnen hin gerichtet, um so jegliche Gefährdung infolge des Stabilisierungsbetriebs zu vermeiden.

4.2 Beginn der Parallelbelüftung

Anfang April 2002 wurde mit der Belüftung im Parallelbetrieb begonnen, nachdem im gesamten Deponiekörper der Methangehalt der Bodenluft 2 Vol.-% CH₄ (< 40% der unteren Explosionsgrenze) für einen längeren Zeitraum unterschritten hatte. Es werden bevorzugt die Deponiebereiche belüftet, in denen im Monitoringprogramm ein Sauerstoffmangel festgestellt wurde.

Die Steuerung des Stabilisierungsbetriebs erfolgt über das Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner, das auch wesentliche Teile des Monitoringprogramms zur Erfassung des Gashaushalts im Deponiekörper erfüllt.

4.3 Monitoringprogramm

Mit einem differenzierten Monitoringprogramm werden Verlauf und Auswirkungen der in situ Stabilisierung erfasst und gezielt gesteuert. Die wesentlichen Elemente des Monitoringprogramms sind:

- Aufzeichnung aller Betriebswerte an der Gasverdichterstation
- Einzelbeprobung der Gasbrunnen
- Einzelbeprobung der Gaskontrollpegel
- FID-Begehungen zur Ermittlung diffuser Ausgasungen über die Oberfläche
- Feststoffbeprobungen
- Grundwasserbeprobungen
- Kondensatkontrolle (Menge, Zusammensetzung)
- Setzungsmessungen und Dokumentation eventueller Gebäudeschäden

4.4 Verlauf der Stabilisierung, Auswirkungen auf den Deponiekörper

Im Folgenden werden die bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen zur in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle zusammengefasst.

4.4.1 Betriebswerte der Gasverdichterstation und Abluftreinigung

In Abbildung 3 oben sind die bisher abgesaugten Volumina und die korrespondierenden Drücke ab Beginn des Regelbetriebs eingetragen. Ab April 2002 ist der Beginn der Belüftung ebenfalls eingefügt worden.

In der unteren Grafik von Abbildung 3 ist die Abluftzusammensetzung, die sich als Mischwert aus der erfassten Bodenluft aller abgesaugten Gasbrunnen ergibt, aufgetragen.

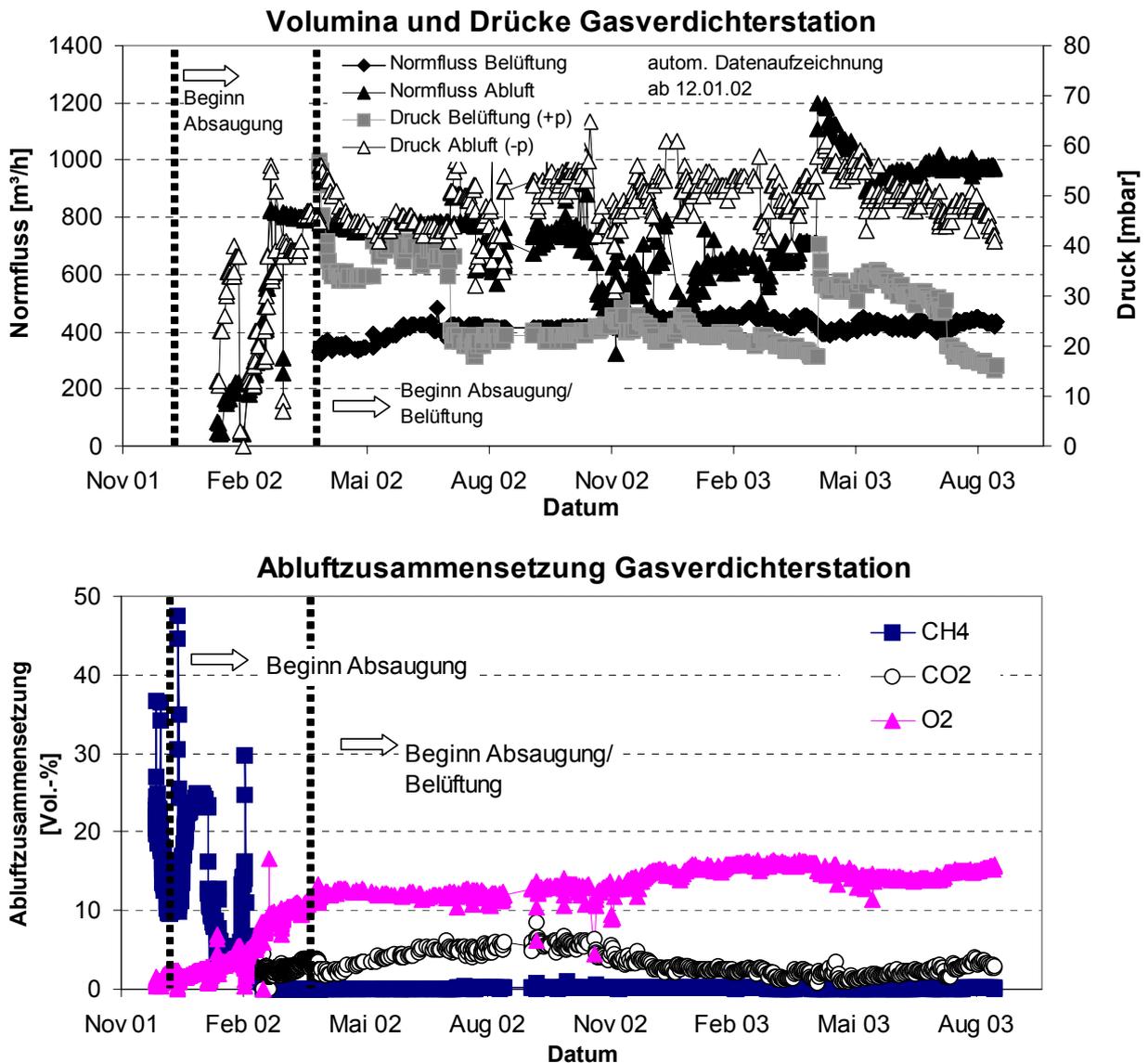


Abb. 3: Volumina und Drücke zur Belüftung und Ablufferfassung, Abluftzusammensetzung an der Gasverdichterstation

Es ergab sich folgende Entwicklung in der ersten Phase der Stabilisierung:

- Anfänglich waren noch nennenswerte Methangehalte im Abluftstrom enthalten. Infolge der geringen Gasproduktion im Deponiekörper und der kontrollierten Übersaugung nahmen diese Methankonzentrationen jedoch kontinuierlich ab.

- Aufgrund der kontrollierten Übersaugung kam es zu einem allmählichen Anstieg des Sauerstoffgehalts in der Bodenluft. Ein Teil des derart zugeführten Sauerstoffs wurde zu Kohlendioxid umgesetzt, so dass bereits mit dieser Betriebsweise in weiten Bereich der Altdeponie ein belüftungsähnlicher Zustand zur Aerobisierung eingestellt werden konnte.
- Die Abluftvolumina wurden allmählich gesteigert, bis sie ein Niveau von ca. 1.000 m³/h erreicht hatten. Mit diesem Abluftvolumen und dem korrespondierenden Unterdruck kann ein sehr hoher Erfassungsgrad im Deponiekörper sichergestellt werden, wie die nachfolgenden Ergebnisse noch näher zeigen.
- Der Methangehalt sank im Frühjahr 2002 auf nahezu 0 Vol.-%, so dass die autotherme, nichtkatalytische Abluftreinigung („Vocsi-Box“) außer Betrieb genommen wurde, da sie für die Hochtemperatur-Oxidationsprozesse einen Mindest-Methangehalt von 0,4 Vol.-% benötigt.
- Daraufhin wurde der Biofilter in Betrieb genommen, über den seitdem die Abluftreinigung erfolgt.

4.4.2 Veränderung der Gaszusammensetzung/Bodenluft im Deponiekörper

In den Abbildungen 4 und 5 ist für ausgewählte Gasbrunnen und Gaskontrollpegel die Beschaffenheit der Bodenluft vor Inbetriebnahme der in situ Stabilisierung und in der bisherigen Stabilisierung aufgetragen.

Es ergab sich folgende Entwicklung des Gashaushalts:

- Vor Beginn der Stabilisierung waren unterschiedliche Methankonzentrationen im Deponiekörper festzustellen. Im südlichen Deponiebereich wie der Wiese am Betriebsplatz traten im Ausgangszustand Methangehalte über 60 Vol.-% auf. Im mittleren Deponiebereich gab es ebenfalls noch erhöhte Methankonzentrationen bis zu 50 Vol.-%. Im nördlichen Deponiebereich waren die Ausgangsbelastungen deutlich geringer, aber mit über 15 Vol.-% und noch bis 40 Vol.-% im Sinne einer potenziellen Gefährdung infolge Gasmigration immer noch nennenswert.
- Durch die kontrollierte Übersaugung konnte nach einigen Wochen in allen Deponiebereichen eine deutliche Reduzierung auf unter 2 Vol.-% Methan, in vielen Fällen bereits auf nahezu 0 Vol.-% erreicht werden.

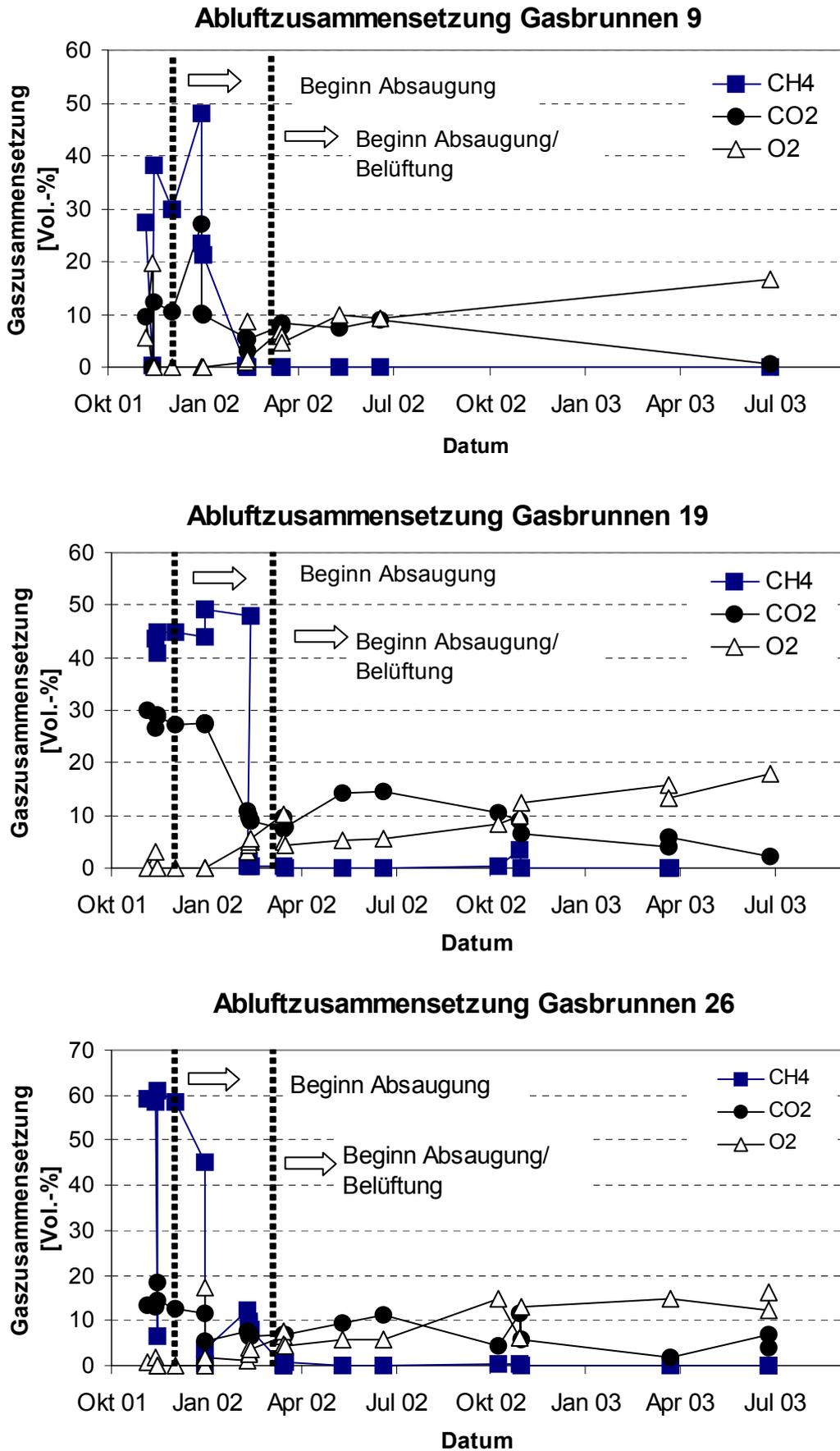


Abb. 4: Abluftzusammensetzungen an 3 Gasbrunnen (Position siehe Abb. 2)

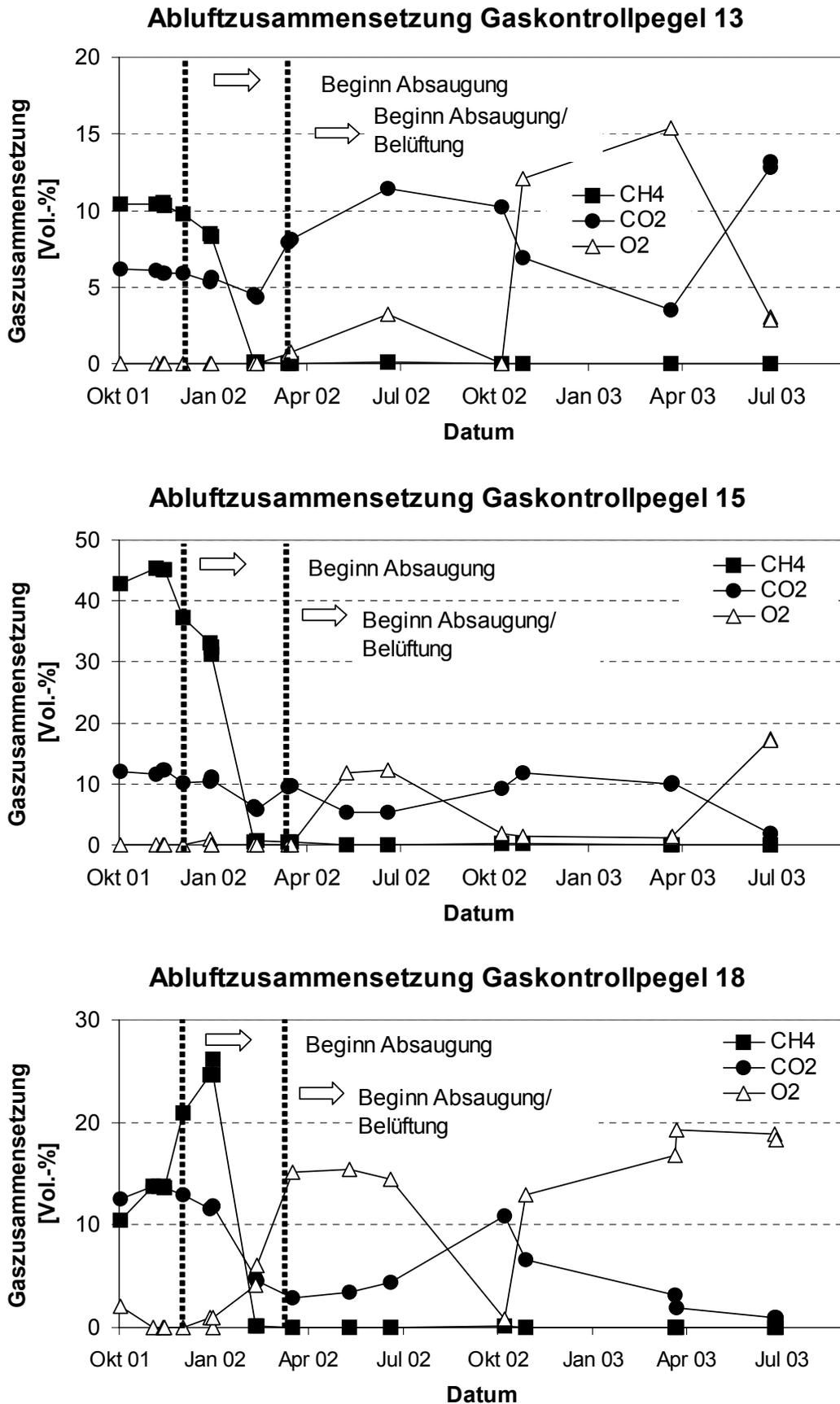


Abb. 5: Abluftzusammensetzung an 3 Gaskontrollpegeln (Position siehe Abb. 2)

- An ausgewählten Gasbrunnen insbesondere im südlichen und mittleren Deponiebereich wurde Anfang April 2002 die Belüftung aufgenommen, um dort die aeroben Abbauprozesse zu intensivieren. Es wird stöchiometrisch mehr Luft bzw. Luftsauerstoff zugeführt als es für die aeroben Abbauprozesse eigentlich erforderlich wäre. Mit dieser Vorgehensweise wird sichergestellt, dass sich trotz des sehr inhomogenen Deponiekörpers keine erneute Methanproduktion in Teilbereichen entwickelt, die zu einer Gefährdung der Bebauung führen könnte.
- Das **erste Hauptziel der in situ Stabilisierung** der Altdeponie Amberg, die **sofortige Gefahrenabwehr** für die bestehende Bebauung und für die intensive Nutzung der Altdeponie, wurde damit **erreicht**:
 - Die Fließrichtung des Deponiegases bzw. Methans in der Bodenluft war jeweils von den Gebäuden weg gerichtet.
 - Der Methangehalt nahm kontinuierlich ab und ist mittlerweile deutlich unter einer Gefährdungsschwelle hinsichtlich Explosionen oder gesundheitlichen Gefährdungen.
 - In allen Gasbrunnen und in allen Gaskontrollpegeln konnten über eine differenzierte Steuerung der Belüftung und Ablufferfassung diese geringen und weiter abnehmenden Restmethangehalte eingestellt werden.
- Für das **zweite Hauptziel der in situ Stabilisierung**, der **beschleunigte Abbau der biologisch verfügbaren Organik** zur **langfristigen Gefahrenabwehr**, wird der Belüftungsbetrieb über insgesamt 2 – 3 Jahre weitergeführt.
- In der bisherigen positiven Entwicklung der in situ Stabilisierung zeigt sich auch der Erkenntnisgewinn der Voruntersuchungen von 1999. Aufgrund der damaligen Untersuchungsergebnisse konnte über die Planung mit 29 Gasbrunnen ein optimiertes und kostengünstiges Gaserfassungssystem gebaut werden, das einen möglichst hohen Erfassungsgrad zur Belüftung und Ablufferfassung ermöglicht, andererseits jedoch die erforderlichen baulichen Eingriffe auf den Privatgrundstücken und im Bereich der Reitanlagen so gering wie möglich hält.

4.4.3 Weitere Ergebnisse des Stabilisierungsbetriebs und Monitoringprogramms

Die weiteren Ergebnisse des Stabilisierungsbetriebs und des begleitenden Monitoringprogramms können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- **Geruchs- noch Lärmemissionen:**

Im Stabilisierungsbetrieb sind bisher weder nennenswerte Geruchs- noch Lärmemissionen aufgetreten. Da sich im weiteren Stabilisierungsbetrieb die Abluftbelastung eher noch reduziert, werden in Verbindung mit dem Weiterbetrieb der Biofilter keine relevanten Geruchsemissionen mehr erwartet.

- **Feststoffbeprobungen:**

Am 21.08.2001 wurden begleitend zu den Gasbrunnenbohrungen 10 Feststoffproben aus dem Deponiekörper entnommen. Bei acht Feststoffproben waren die Glühverlust- (2 - 8 Masse-%) und Kohlenstoffgehalte (2 - 5 Masse-%) gering. Bei zwei Feststoffproben waren die organischen Gehalte deutlich höher, wobei dies eher auf Kunststoffe und biologisch nicht verfügbare Anteile zurückzuführen ist.

Insgesamt weisen die Glühverlustwerte und Kohlenstoffgehalte darauf hin, dass noch ein geringer biologisch verfügbarer Anteil im Deponiegut enthalten ist. Ein nennenswerter Anteil des Glühverlusts und Kohlenstoffgehalts wird allerdings von biologisch kaum oder nicht verfügbaren Abfallstoffen gebildet (u.a. Kunststoffe, z.T. Holz, Leder etc.).

- **FID-Begehungen der Oberfläche der Altdeponie:**

Ab Herbst 2001 wurden FID-Begehungen der Oberfläche der Altdeponie zur Ermittlung diffuser Ausgasungen durchgeführt. Es wurden bevorzugt Bereiche an den Gebäuden und potenzielle Gasaustrittsstellen untersucht.

Bei der ersten stichpunktartigen Beprobung im November 2001 vor Beginn der Stabilisierung konnten maximale Ausgasungen an der Oberfläche von 150 ppm gemessen werden, z.B. in gepflasterten Bereichen auf den Privatgrundstücken.

Im April 2002 konnten dort während des Stabilisierungsbetriebs keine Ausgasungen mehr festgestellt werden. Maximale Gasaustritte in anderen Bereichen der Altdeponie lagen bei max. 17 ppm und können als unproblematisch eingestuft werden. Im Juli 2003 konnten während der FID-Begehung der Altdeponie keinerlei diffusen Ausgasungen mehr festgestellt werden.

- **Setzungsmessungen:**

Auf der Altdeponie Neumühle ist es nach Aufnahme der aeroben in situ Stabilisierung zu Setzungen bzw. Sackungen gekommen, die auf einem Grundstück zu Gebäuderissen geführt haben. Es handelt sich dabei um Setzungen, die über längere Zeiträume ohnehin aufgetreten wären und folglich nicht um zusätzliche, sondern beschleunigte Setzungen.

Die Setzungen und Sackungen erfolgen hauptsächlich in Bereichen, wo auch schon in den letzten Jahren/Jahrzehnten Setzungen auftraten und z.T. zu Gebäudeschäden führten.

Im Abwägungsprozess zwischen den unerwünschten, langfristig aber ohnehin auftretenden Setzungen und der Gefahrenabwehr ist bedeutsam, dass gerade bei den betroffenen Gebäuden infolge der aeroben in situ Stabilisierung eine Abwendung der potenziellen Gefährdung durch Deponiegas und der resultierenden Explosionsrisiken in kurzer Zeit erreicht werden konnte. So betragen die Methankonzentrationen in den Gaskontrollpegeln direkt an den Gebäuden vor Beginn der Stabilisierung in Teilbereichen 33 – 50 Vol-% CH₄. Die Methanbelastungen liegen dort nunmehr durchgängig unter 0,5 Vol.-% CH₄.

Laut Aussage eines unabhängigen Sachverständigen besteht keine unmittelbare Gefahr für die Gebäude oder die darin Beschäftigten bzw. die Bewohner.

- **Grundwasserbeprobung, Grundwasserstände:**

Es erfolgt eine turnusgemäße Grundwasserbeprobung an den Grundwassermessstellen. Ferner erfolgte eine Überprüfung aller Gasbrunnen auf Wassereinstau und Einmessung der Wasserstände.

- **Kondensatanfall und Kondensatbeschaffenheit:**

Nach Inbetriebnahme der in situ Stabilisierung fiel in den ersten sechs Monaten in den drei Kondensattanks wenig Kondensat an. Im Sommer 2002 kam es zum ersten Wasseranfall (10 – 50 l/Tag) im Kondensattank an der Gasverdichtestation, so dass eine Wasserprobe zur Einzelstoffanalytik entnommen wurde. Relevante Inhaltsstoffe treten nur in sehr geringer Konzentration auf oder liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Es konnte z.B. kein Nitrit, Cyanid-Gesamt und Cyanid-leicht freisetzbar nachgewiesen werden, der Fluoridgehalt liegt mit 0,24 mg/l deutlich unter den Prüfwerten für Sickerwasser und Leitparametern für Grundwasser (LfW-Merkblatt Nr. 3.8/1). Nitrat hat nur eine geringe Konzentration

von 2,5 mg/l (TVO-Grenzwert: 50 mg/l). Die organischen Leitparameter BTEX, PCB, LHKW und PAK liegen alle unter den Bestimmungsgrenzen. MKW waren mit 0,1 mg/l nachweisbar, lagen aber ebenfalls deutlich unter den Prüfwerten. Der Phenolindex war zwar etwas erhöht, dem wurde jedoch aufgrund der möglichen Quereinflüsse im Analyseverfahren keine nennenswerte Bedeutung beigemessen. Aufgrund der äußerst geringen Belastungen der Wasserprobe wurde vom Wasserwirtschaftsamt die Erlaubnis erteilt, das Wasser der Kondensattanks direkt in die kommunale Kanalisation einzuleiten.

4.5 Weiteres Vorgehen auf der Altdeponie Neumühle

Das weitere Vorgehen auf der Altdeponie Neumühle gestaltet sich folgendermaßen:

- Fortsetzung Ablufferfassung als kontrollierte Übersaugung zur Aerobisierung des Deponiekörpers
- Belüftung der Bereiche des Deponiekörpers, wo noch zusätzlicher Sauerstoffbedarf insbesondere im tieferen Deponiebereich besteht, um die Beschleunigung über den aeroben biologischen Abbau zu bewirken
- Weiterbetrieb der Biofilter
- Fortführung des umfangreichen Monitoringprogramms, zusätzlich Messungen zur Funktion des Biofilters
- Fortlaufende Überwachung und Anpassung bzw. Optimierung des Stabilisierungsbetriebs durch gezielte Steuerung der Belüftung und Ablufferfassung
- Ab 2004: Reduzierung des Stabilisierungsbetriebs in Teilbereichen, um dort die Wirkung der Maßnahme, die nachhaltige Überführung des Deponiekörpers in einen emissionsarmen Zustand, zu überprüfen.

5 KOSTEN DER AEROBEN IN SITU STABILISIERUNG MIT DER NIEDERDRUCKBELÜFTUNG

In Abhängigkeit des standortspezifisch festzulegenden technischen Aufwands der Belüftungseinrichtungen, der vorgesehenen Stabilisierungsdauer, der Belüftungs-

kapazität und weiterer Rahmenbedingungen können die Kosten für die Deponie-stabilisierung erheblich variieren.

Die 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 Deponie-körpervolumen in einer Größenordnung von 1 - 3 €/m³ liegen (Tabelle 1). Werden die Belüftungskosten auf das Zuluft-/Abluftvolumen bezogen, das vom Anteil des zu stabilisierenden Deponievolumens (biologisch verfügbarer Anteil im Deponiekörper) und der resultierenden Belüftungskapazität bestimmt wird, so ergeben sich Kosten zwischen 0,014 und 0,036 €/m³ zugeführtes und abgesaugtes Gasvolumen. Pauschale und verallgemeinerbare Angaben sind daher nicht möglich, weil Deponien neben dem Volumen sehr unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen aufweisen (Sauerstoffbedarf, Ablagerungsmächtigkeit, Längen der Leitungssysteme, Anzahl Gasverteilerstationen, Bebauungssituation, Infrastruktur usw.).

Tab. 1: Grundkosten für Investitionen und Betrieb der aeroben in situ Stabilisierung mit der Niederdruckbelüftung an drei Standorten

Bauteil /Leistung	Amberg	Kuhstedt	Milmersdorf
Investitions- und Betriebskosten (Netto)¹⁾	650.000,-- €	650.000,-- €	640.000,--²⁾ €
Deponievolumen (gesamt)	420.000 m ³	220.000 m ³	580.000 m ³
Spezifische Kosten (Bezug m³ Deponievolumen)	1,5 €/m³	3,0 €/m³	1,1 €/m³
Belüftungsleistung max.	900 m ³ /h	2.400 m ³ /h	2.400 m ³ /h
Spezifische Kosten (Bezug m³ Zuluft/Abluft)	0,036 €/m³	0,014 €/m³	0,014 €/m³

1): Nettokosten für Infrastruktur, Baustelleneinrichtung, Gasbrunnen, Leitungssysteme, Gasverteilerstationen, Verdichterstation, Abluftbehandlung, Betriebskosten für 2- 3 Jahre, ohne Monitoringmaßnahmen, Planung, Genehmigungen, Gutachten, Berichtswesen, Dokumentation, und weiteren Nebenkosten wie z.T. wissenschaftliche Begleitung

2): In Milmersdorf waren bereits 14 Gasbrunnen vorhanden, die zur Belüftung genutzt werden können

Die Belüftungsdauer beträgt voraussichtlich etwa 2 - 3 Jahre. Bei allen drei Projekten liegt der bauliche und technische Aufwand insgesamt etwas höher, da sie als geför-

derte 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 bzw. bebauten Altablagerungen mitgenutzt werden können:

- Bestehende Gasbrunnen und Leitungssysteme können zur Belüftung und Abluffterfassung mitgenutzt werden wie z.B. auf der Deponie Milmersdorf
- Bestehende Infrastruktur wie Stromanschlüsse, Betriebswege, Einzäunungen, Gebäude etc. wie z.B. bei der Altdeponie Neumühle, Stadt Amberg

Abschätzungen ergeben bei günstigen bis durchschnittlichen Standortrahmenbedingungen und dem optimierten, standardisierten Stabilisierungsbetrieb Kosten in der Größenordnung von ca. 0,5 - 1 €/m³ Deponieinhalt. Nur bei ungünstigen Rahmenbedingungen (z.B. sehr kleine Altdeponien ohne bestehende Infrastruktur) können die Kosten auf 2 - 3 €/m³ Deponieinhalt ansteigen. Diesen Kosten sind die beträchtlichen Einsparmöglichkeiten bei der Erfassung und Behandlung von Sickerwasser oder belastetem Grundwasser und beim Einsatz alternativer Oberflächenabdichtungen zum Deponieabschluss gegenüberzustellen. Bei bebauten Altdeponien ist die Weiternutzung des Standorts für Wohnen, Gewerbe oder auch Freizeitaktivitäten von beträchtlicher finanzieller Bedeutung sowohl für die Anwohner und Firmen wie auch für die zuständige Kommune.

Weiterhin wird die Belüftungstechnik mit den nunmehr vorliegenden Erfahrungen zur Niederdruckbelüftung wirtschaftlich und technisch optimiert. Zusätzlich bestehen Möglichkeiten zur Kostenreduzierung, wenn technische Einrichtungen wie die Verdichteranlagen zur Belüftung und Abluffterfassung 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

oder Kommunen, die häufig nicht genug und ausreichend qualifiziertes Personal haben, folgende Vorteile:

- 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
- eigenes Personal wird nicht gebunden, z.B. für Berichte und Dokumentationen für Genehmigungs- und Überwachungsbehörden
- Abstimmung und Integration in weitere Maßnahmen zur Stilllegung und Nachsorge oder auch höherwertigen Folgenutzung im Rahmen eines „Gesamtpakets“
- weitere Nachsorgemaßnahmen können damit kostengünstig in externe Dienstleistungen integriert werden, z.B. Erfassung und Behandlung von belastetem Grundwasser oder Sickerwasser, Kontroll- und Unterhaltungsmaßnahmen, jährliche Berichte zum Deponieverhalten als Grundlage zur Entlassung aus der Deponienachsorge und zur gefahrlosen Nutzung bebauter Altablagerungen

6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit der aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle und vergleichbarer Deponien und Altablagerungen wird das Ziel verfolgt, die Schadstoffemissionen der abgelagerten Abfälle nachhaltig und kontrolliert zu vermindern, den Aufwand wie die Dauer von Deponienachsorgemaßnahmen zu reduzieren und soweit erforderlich Gefahrenabwehr bei bestehender Bebauung zu betreiben. Die Belüftung des Deponiekörpers zur beschleunigten Stabilisierung biologisch verfügbarer organischer Bestandteile zeichnet sich nach umfangreichen Laboruntersuchungen, Vorversuchen und den Betriebserfahrungen im großtechnischen Betrieb als ein kostengünstiges und effektives Verfahren ab, um dieses Ziel zu erreichen. Es wird die Niederdruck-Belüftung mit einem geringen Energiebedarf auf den drei Deponiestandorten mit z.T. ganz unterschiedlichen Ausgangsbedingungen hinsichtlich Deponievolumen, abgelagerter Abfälle, Alter und Bebauungssituation eingesetzt und kontinuierlich optimiert.

Im Sommer und Herbst 2001 wurde die bauliche und technische Errichtung der Anlagen zur Belüftung sowie Ablufferfassung und -behandlung zur aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle, Stadt Amberg, vorgenommen. Im Dezember 2001 erfolgte die Inbetriebnahme.

Es werden die standortspezifisch realisierten technischen Einrichtungen zur in situ Stabilisierung und zum Monitoring dargestellt und der Verlauf der Baumaßnahmen mit den erforderlichen Anpassungen an die örtlichen Gegebenheiten erläutert.

Nach dem Bau und der sicherheitstechnischen Abnahme erfolgte im Dezember 2001 die offizielle Inbetriebnahme der Stabilisierungsanlage. In der ersten Phase der in situ Stabilisierung wurden alle Gasbrunnen zur Ablufferfassung eingesetzt, um durch eine kontrollierte Übersaugung einen maximalen Ablufferfassungsgrad zu erreichen. Anfang April 2002 wurde mit der Belüftung im Parallelbetrieb begonnen.

Mit einem differenzierten Monitoringprogramm werden Verlauf und Auswirkungen der in situ Stabilisierung kontinuierlich erfasst und gezielt gesteuert.

Die bisherige Stabilisierung verlief sowohl technisch als auch von den Emissionen her ohne nennenswerte Probleme. Der Deponiekörper war nach wenigen Wochen nahezu frei von Methangas. Das erste Hauptziel der in situ Stabilisierung der Altdeponie Amberg, die sofortige Gefahrenabwehr für die bestehende Bebauung der Altdeponie, wurde somit erreicht. Über das Monitoringprogramm werden die weiteren Auswirkungen der in situ Stabilisierung ermittelt.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Vorhaben zur in situ Stabilisierung der Altdeponie Neumühle bisher erfolgreich umgesetzt wurde. Es hat keine wesentlichen Abweichungen vom geplanten Ablauf der Stabilisierung gegeben. Von daher kann davon ausgegangen werden, dass das Pilotvorhaben erfolgreich fortgesetzt und abgeschlossen werden kann.

In Abhängigkeiten der Deponierandbedingungen und des technischen wie betrieblichen Belüftungsaufwands können Kosten zwischen 0,5 und 3 € je m³ zu stabilisierendem Deponievolumen entstehen.

Dieses innovative Stabilisierungsverfahren ist ein wesentlicher Schritt zum Abschluss von vielen Deponien und zur technischen, zeitlichen und finanziellen Überschaubarkeit der Deponienachsorge wie der Sanierung von Altablagerungen. Im Anschluss an die Belüftung können Einsparungen bei der Erfassung und Behandlung von Sickerwasser erzielt und alternative Oberflächenabdichtungen aufgebracht werden. Die innovative Niederdruckbelüftung zur biologischen Stabilisierung von Abfallablagerungen nach dem patentierten AEROflott®-Verfahren wird von der Vorgabe bestimmt, keinerlei Abstriche beim Umweltschutz zu machen. Es sollen vielmehr ökologisch zielführende Wege zur besseren Umweltverträglichkeit von Deponien und Altablagerungen beschrrieben werden, die gegenüber den bestehenden Nachsorge- und Sicherungstechniken zu Kostensenkungen führen. Die bisherigen Betriebsergebnisse lassen erwarten, dass dieses Ziel mit der gewählten Verfahrenskette, der in situ Belüftung und den nachfolgend darauf abgestimmten Sicherungsmaßnahmen, erreicht werden kann. Es ist zudem eine höherwertige bzw. bei bebauten Altablagerungen gefahrlose Folgenutzung möglich, über die die Kosten zur in situ Stabilisierung mit gedeckt werden können.

7 LITERATUR

DepV – Deponieverordnung: Verordnung über Deponien und Langzeitlager – in der Fassung des Beschlusses des Bundeskabinetts vom 24. Juli 2002

Heyer, K.-U., Stegmann, R. 1997. Langfristiges Gefährdungspotential und Deponieverhalten von Ablagerungen. Bericht zum Teilvorhaben TV 4 im BMBF-Verbundvorhaben „Deponiekörper“, Projektträger PTAWAS (Umweltbundesamt Berlin), unveröffentlicht.

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 (Hrsg.: R. Stegmann, G. Rettenberger, W. Bidlingmaier, H.-J. Ehrig), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 199-217.

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. (2003): Kontrollierte Bewässerung und Belüftung von Deponien – Praxiserfahrungen. In: 8. Münsteraner Abfallwirtschaftstage

(Hrsg.: B. Gallenkemper, W. Bidlingmaier, H. Doedens, R. Stegmann), Fachhochschule Münster, LASU.

Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Stegmann, R. 2001. Aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt - Hintergründe, Potenziale, Möglichkeiten - 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

Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Stegmann, R. 2002. Laufende wissenschaftliche Begleitung, u.a. dokumentiert in: Aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt - Laboruntersuchungen und Praxisbezug - In: Deponietechnik 2002, 3. Hamburger Abfallwirtschaftstage 14.-15. Februar 2002, Hamburger Berichte, Band 18, Hrsg.: R. Stegmann, G. Rettenberger, H.-J. Ehrig, W. Bidlingmaier, Verlag Abfall aktuell

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

TASi - Technische Anleitung Siedlungsabfall: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, vom 14. Mai 1993.