

Emissionsminderung und Verwertung Deponiegas in der Stilllegungs- und Nachsorgephase mittels Tiefenentgasung
Bestimmung des Gasbildungspotentials bei der Umsetzung der mittel- bis langfristig abbaubaren Organik
Optimierte Verwertung von schwachmethanhaltigem Deponiegas sowie Folgenutzung
Praktische Erfahrungen der längerfristigen Nutzung von schwachmethanhaltigem Deponiegas

J. Forsting, CDM Smith Consult GmbH, Germany. juergen.forsting@cdmsmith.com

KURZFASSUNG

In Siedlungsabfalldeponien entsteht methanhaltiges Deponiegas (starkes Treibhausgas) bei der Umsetzung biogener Organik. Dieses anfallende Deponiegas muss nach Deponieverordnung erfasst und behandelt werden.

Durch das aktive Fassen und Behandeln (u. a. thermische Verfahren) des Deponiegases wird der Deponiekörper gastechnisch stabilisiert, so dass es in naher Zukunft zu keiner weiteren Methanproduktion kommen wird. Auch werden unkontrollierte Methanaustritte, welche in die Atmosphäre entweichen und als Treibhaus fungieren, durch das aktive Fassen und qualifizierte Behandeln unterbunden.

Zur Minimierung/Unterbindung von Treibhausgasemissionen, zur Stabilisierung des Deponiekörpers über den Gaspfad und der damit verbundenen Verkürzung der Stilllegungs- und Nachsorgephase ist es angebracht, Optimierungsmaßnahmen am Gaserfassungssystem vorzunehmen. Idealerweise lässt sich eine solche *in situ* Stabilisierung mit mittlerweile gängigen Technologien zur Schwachgasbehandlung und einer möglichen Wärmenutzung kombinieren. Unter Einhaltung bestimmter Kriterien lassen sich solche nachhaltigen Stabilisierungsmaßnahmen auch durch Programme im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative fördern.

ABSTRACT

Methane landfill gas (strong greenhouse gas) is produced in residential waste landfills during the conversion of biogenic organics. According to the Landfill Ordinance this landfill gas must be collected and treated.

As a result of the active handling and treatment (including thermal processes) of the landfill gas the landfill body is stabilized, so that methane production will not occur in the near future. Also, uncontrolled methane streams, which escape into the atmosphere and act as greenhouse gas, are prevented by active compaction and qualified treatment.

In order to minimize / eliminate greenhouse gas emissions, stabilize the landfill body via the gas path and shorten the decommissioning and aftercare phase, it is appropriate to carry out optimization measures on the gaseous detection system. Usually, such an *in situ* stabilization can be combined with conventional technologies for low-gas treatment and a possible heat utilization. While adhering to certain criteria, such sustainable stabilization measures can also be promoted through programs within the framework of the National Climate Protection Initiative.

1. AUSGANGSSITUATION

Das in Siedlungsabfalldeponien und Altablagerungen durch anaerobe Abbauprozesse entstehende Deponiegas trägt zu einem nicht unerheblichen Teil zum Treibhausgaseffekt bei. Immerhin besteht das Deponiegas aus ungefähr 65 Vol.-% Methan (CH₄) und knapp 35 Vol.-% Kohlendioxid (CO₂) sowie einer Vielzahl an Spurenstoffen. Ursprünglich wurden Deponiegaserfassungs- und Behandlungssysteme primär zur energetischen Nutzung des Deponiegases sowie der sofortigen Gefährdungsabwehr des Umfeldes durch Fassen explosibler Gase eingesetzt. Mit zunehmendem Deponiealter und der daraus resultierenden rückläufigen Deponiegasmengen treten insbesondere *in situ* Stabilisierungsmaßnahmen sowie Emissionsminderungen in den Vordergrund.

1.1. Treibhausgaspotenzial

Die nicht gefassten Emissionen klimarelevanter Treibhausgase aus stillgelegten Deponien tragen zu einem erheblichen Anteil am Klimawandel bei. Unter Anderem trägt das klimarelevante Spurengas Stickstoffdioxid mit zu ca. 6 % zum anthropogen bedingten Treibhauseffekt bei. Die Methanemissionen sind sogar mit einem Anteil von ca. 19 % an diesem Effekt beteiligt (IPCC Sachstandsbericht, 2014). Lt. Rettenberger (2013) beträgt der Anteil der Treibhausgasemissionen (THG), ausgehend von Siedlungsabfalldeponien in der aktiven Phase, ungefähr 40 % bezogen auf den Beitrag der Emissionen des aktuellen Fahrzeugverkehrs.

Verschiedene Untersuchungen stellen in regelmäßigen Abständen immer wieder fest, dass bezogen auf das Gasbildungspotenzial (bestimmt durch unterschiedliche Gasprognosemodelle; theoretisch produzierbare Gasmenge) das sich bildende Deponiegas nicht zu 100 % erfasst bzw. verwertet wird. Während Krümpelbeck (1999) die Erfassungsrate nach Abschluss der Deponien und Aufbringen einer Oberflächenabdeckung/Abdichtung mit 50 – 60 % abschätzte, errechnete das Statistische Bundesamt für den Nationalen Inventarbericht (2013) für die Jahre 1999 bis 2005 lediglich eine Erfassungsrate von 19,3 %.

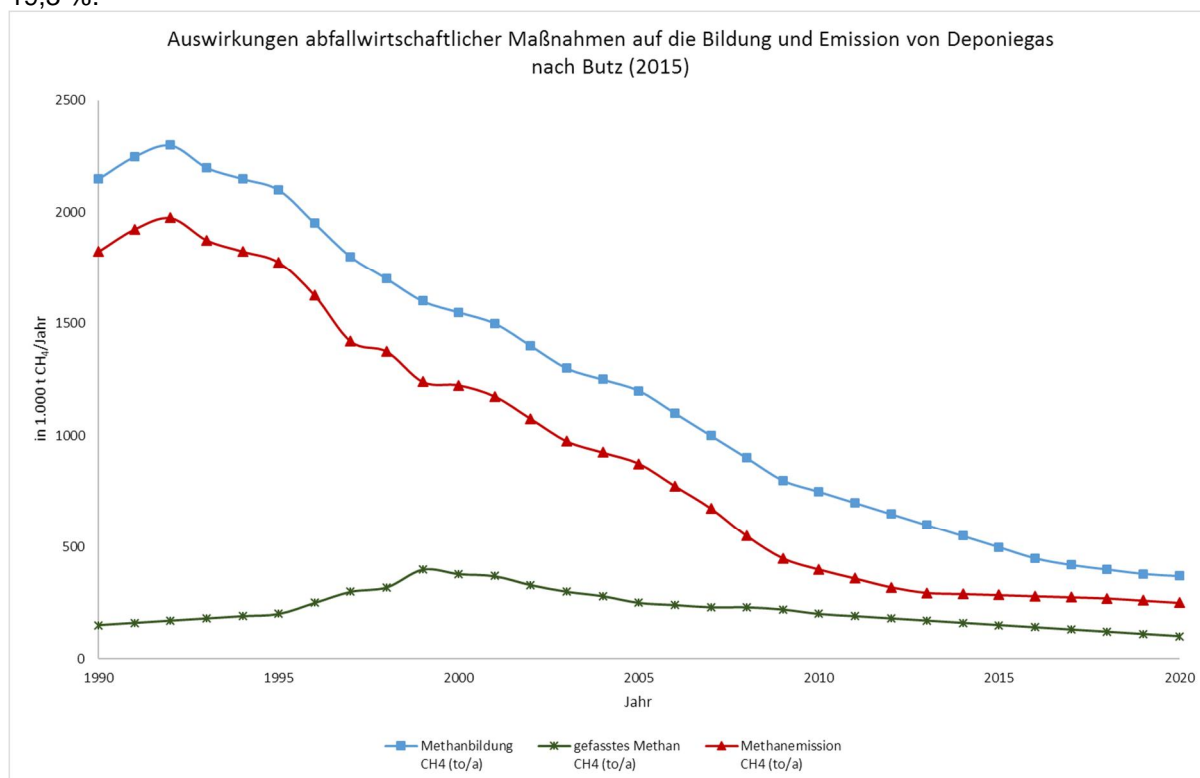


Abbildung 1. Auswirkungen techn. Maßnahmen auf die Bildung und Emission von Deponiegas (nach Butz 2015)

Vielfältige praxisnahe Untersuchungen an bestehenden Gasfassungssystemen zeigen, dass der realistische Erfassungsgrad zwischen 40 – 50 % liegen dürfte. Das bedeutet jedoch, dass noch ein Restgaspotenzial von min. 50 – 60 % verbleibt. Zu berücksichtigen ist, dass die Deponiegasbildung

ausschließlich aus Abfallablagerung vor 2005 erfolgt, da ab diesem Zeitpunkt keine organischen Abfälle in Deutschland mehr eingelagert wurden.

In den letzten Jahren wurden vermehrt bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien zurückgehende Deponiegasmengen festgestellt. Diese zurückgehenden Gasmengen sind nicht zwingend darauf zurückzuführen, dass der überwiegende Teil an Organik ausgetragen wurde und eine zunehmend stabilisierte Deponie vorliegt. Vielmehr zeigen die praktischen Erfahrungen, dass mäßig bis schlechte Deponiegasfassungsanlagen überwiegend dazu beitragen.

Der Kurvenverlauf der noch vorhandenen Methanemissionen (rote Linie mit Dreieckmarkierung) zeigt auf, dass ohne zusätzliche technische Maßnahmen noch erhebliche Methanemissionen über einen längeren Zeitraum auftreten und zum Treibhauseffekt beitragen.

Im Nationalen Treibhausgasinventarbericht des Umweltamtes haben Methanemissionen aus Deponien einen hohen Stellenwert. Von mäßig bis schlecht besaugten Siedlungsabfalldeponien sowie den in Frage kommenden 400 bis 600 Altdeponien gehen zukünftig immer noch erhebliche Klimabelastungen durch andauernde Methanemissionen aus. Schätzungen zeigen, dass beim Einsatz einer *in situ* Stabilisierung die vermeidbare Menge an Methanemissionen in Deutschland auf ungefähr 1 Mio. Tonne (to.) beziffert werden kann. Unter der Berücksichtigung, dass Methan 21 bis 25 mal die Atmosphäre stärker belastet als Kohlendioxid, könnten für Deutschland: 21 Mio. to. CO₂ – Äquivalente eingespart werden (Hupe, K. et al, 2014).

Dieses große Potenzial gilt es durch geeignete Optimierungsmaßnahmen am Gasfassungssystem erheblich zu reduzieren. Die Zielsetzung sollte sein, technische Maßnahmen umzusetzen, die zur einer Beschleunigung der biologischen Abbauprozesse und somit zu einer Minimierung der Emissionen über einen überschaubaren Zeitraum führen. Dies kann nur über die stoffliche Entfrachtung biologisch verfügbarer Organik über bestehende, optimierte Gasfassungselemente erfolgen, da nahezu der gesamte Kohlenstoffaustrag aus Deponien über den Gaspfad erfolgt.

2. LÖSUNGSANSATZ ZUR OPTIMIERTEN FASSUNG DES ANFALLENDEN DEPONIEGASES

Primäres Ziel sollte es deshalb sein, bestehende Gasfassungssysteme und Elemente dahingehend zu optimieren, dass die vorhandene Restorganik bestmöglich umgesetzt wird.

2.1. Voruntersuchungen zur Bestimmung des Optimierungspotenzials

Im Vorfeld der eigentlichen technischen Optimierung des Gasfassungssystems, der Umstellung der Gasfassung auf spezielle Tiefenbesaugung für eine *in situ* Stabilisierung und Aerobisierung, sollte grundsätzlich eine Bestandsaufnahme des Deponiekörpers bzw. des vorhandenen Systems erfolgen.

Da viele der untersuchten Deponien und Abtlagerungen mindestens eine qualifizierte Abdeckung wenn nicht sogar eine abschließende Oberflächenabdichtung aufweisen, sind an den meisten Standorten weitere Untersuchungsmaßnahmen wie Probebohrungen zur Erfassung von Bohrgut und der daraus zu bestimmenden Gasbildungsrate (Atmungsaktivität AT₄, Gasbildungsrate GB₂₁ oder vgl.-bar.) nicht durchzuführen. Im Zuge weiterer Optimierungsmaßnahmen (z. B. Neuerstellung von zusätzlichen Gasbrunnen etc.), welche der zuständigen Genehmigungsbehörde anzuzeigen sind, sind solche weitergehenden Untersuchungen sicherlich umzusetzen.

Um einen generellen Erfolg einer *in situ* Stabilisierungsmaßnahme zu erzielen, sollten mindestens folgende Untersuchungen (Auswahl) durchgeführt werden:

Tabelle 1. vorzunehmende Untersuchungen zur Bestimmung des Optimierungspotenzials

Bezeichnung	Beschreibung Maßnahme
Kamerabefahrung	zur Überprüfung der Gasbrunnen: zur Untersuchung der Beschaffenheit der Gasbrunnen (Filterzustand, Tiefe, Wasserstand); Ziel der Untersuchung: Aufnahme des IST-Zustandes; Feststellung des baulichen Zustandes des Gasbrunnens; Feststellung von Scherungen, Quetschungen, Verschlüssen, Wasserständen etc.;
Tiefenzonale Erkundungsmaßnahmen	an den Gasbrunnen - zeitlich begrenzte Entnahme von Deponiegas mit Messung der Gasqualität;

	<p>Kohlenmonoxidkonzentration CO in ppm; Kohlendioxidkonzentration CO₂ in Vol.-%, Methankonzentration CH₄ in Vol.-%, Sauerstoffkonzentration O₂ in Vol.-%) Temperatur im Gasbrunnen über die Tiefe; Ziel der Untersuchung: Feststellung der Gaszusammensetzung über die Gesamttiefe; Bestimmung von biologisch aktiven Bereichen sowie ersten aeroben Abbauzonen; erste Bestimmung des Gaspotenzials; erste Bestimmung von Undichtigkeiten in Vertikalgasbrunnen;</p>
Zeitmessungen	<p>zeitlich begrenzte Entnahme von Deponiegas mit Messung der Gasqualität über die Zeit zur Beurteilung der im Umfeld der Gasbrunnen vorhandenen Gasqualitäten; kurzzeitiger Gasabsaugversuch; Ziel der Untersuchung: erste Bestimmung des (Rest-)Gaspotenzials des Gasbrunnens;</p>
Emissionsmessungen	<p>im Umfeld der Gasbrunnen werden Emissions- messungen durchgeführt. Ziel der Untersuchung: Überprüfung der Dichtigkeit des oberen Gasbrunnenbereiches, Bestimmung der Randgängigkeiten des Gasbrunnens und somit Kurzschluss (Eintrag von oberflächennahen Luftsauerstoff), „Verdünnung“ des abgesaugten Deponiegases;</p>

Im Anschluss erfolgt die Erstellung eines Konzeptes mit einer Potenzialstudie, die Lösungsansätze für die weitere Vorgehensweise beschreibt.

2.2. Einsatz tiefenfilterter Gasbrunnen

Beim Anlegen eines gezielten nahezu flächendeckenden Unterdruckes an das Gesamtsystem mittels tiefenfilterter Gasbrunnen werden in einem ersten Schritt endproduktthemmende Stoffe, welche bei nichtaktiver Gasfassung bewirken, dass anaerobe Abbauprozesse, und somit die Methanbildung, zum Stillstand kommt, abgetragen. Durch den über den angelegten Unterdruck über die Deponieoberfläche eindringende Luftsauerstoff erfolgt in Randbereichen eine schrittweise Umsetzung der vorhandenen biologischen abbaubaren Organik; eine aerobe Umsetzung, genannt Aerobisierung. Der Luftstoff wird gänzlich umgesetzt (veratmet). Weitere tiefere Bereiche mit einem erhöhten, noch nicht umgesetzten biologischen Anteil werden durch die Gleichgewichtsverlagerung anaerob aktiviert. Die sich mit zunehmender Besaugung fortschreitende Sauerstofffront bewirkt des Weiteren, dass sich die restliche Organik aerob umsetzen kann und die auftretende Emissionen endgültig abebben.

Der Einsatz speziell tiefenfilterter Gasbrunnen eignet sich zur Restgasfassung ausgezeichnet, da das anfallende Deponiegas nahezu vollständig erfasst wird. Zudem werden durch das gezielte Anlegen eines gleichmäßigen Unterdruckes am Deponiekörper auch keine Methanemissionen über die Oberfläche zugelassen. Je nach Mächtigkeit des abzusaugenden Abfallkörpers, der Beschaffenheit des Abfallinventars und der örtlichen Gegebenheiten erfolgt ein spezifischer Ausbau der Gasbrunnen mit individueller Festlegung der Filterstrecke.

Bei dem Einsatz tiefenfilterter Gasbrunnen werden folgende Ziele erreicht:

2.2.1. Stufe 1: Anaerobe *in situ* Stabilisierung

Intensivierung und Beschleunigung der anaeroben Abbauprozesse durch Anlegen eines gezielten Unterdruckes; Minimierung bzw. Verhinderung der vorliegenden Endproduktthemmung (Krümpelbeck, 1999) durch Einstauung (Partialdruckverschiebung, Gradientenverlagerung) von nicht erfasstem Deponiegas; dadurch erneute Aktivierung der anaeroben Abbauprozesse. Dies hat zudem zur Folge,

dass die Milieutemperatur wieder in den für die Anaerobier optimalen mesophilen Bereich (35 – 40 °C) überführt wird;

2.2.2. Stufe 2: Aerobe *in situ* Stabilisierung

Parallel als auch nach Beendigung der anaeroben Abbauprozesse (Anaerobe *in situ* Stabilisierung) wird der über die Oberfläche, den Randbereich bzw. über benachbarte Gasbrunnen passiv eingetragene Luftsauerstoff metabolisiert. Aerobe biologische Abbauprozesse verlaufen im Gegensatz zu anaeroben Abbauprozessen aufgrund der deutlich höheren Vermehrungsrate deutlich schneller, so dass eine schnellere Stabilisierung bzw. Auslaugung des Deponiekörpers erfolgt.

Zu Beginn einer *aeroben in situ* Stabilisierung beim Einsatz tiefenfilterter Gasbrunnen werden häufig im Vergleich zu klassischen Gasfassungssystemen erhöhte Methankonzentrationen angetroffen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass es sich bei einer Deponie um einen heterogenen Körper handelt, d. h., eingelagerte Abfallmengen wurden zum Teil mit dichten Zwischenbarrieren eingebaut, so dass der biologische Abbau und damit die Gasfassung der tieferliegenden Bereiche beeinträchtigt, wenn nicht gar gehemmt wird.

Im Vergleich zu klassischen Gasfassungssystemen, welche häufig eine bis zur Oberfläche reichende Verfilterung aufweisen und so in erster Linie den oberen Bereich des Deponiekörpers erfassen (Fassungsgrad von weniger als 30 %), wird bei tiefenfilterten Gasbrunnen nahezu der gesamte Deponiekörper schonend mit einem Unterdruck beaufschlagt, wodurch auch zuvor nicht erfasste und tiefere Bereiche mit einbezogen werden.

3. ERFAHRUNGEN UND ERGEBNISSE

Die Bestimmung der verbliebenen Deponiegasproduktion kann unterschiedlich erfolgen. Neben den klassischen theoretischen Deponiegasprognosemodellen (Rettenberger, Tabasaran, Weber- Modelle u. a.) wird auch vermehrt die FOD-Methode eingesetzt. Bedingt durch das Ende der Ablagerung von organischen Siedlungsabfällen Mitte 2005 ist nach diesem Zeitpunkt eine Ermittlung der Emissionen nach der Default-Methode (UBA – Ansatz 2002) nicht mehr möglich. Aus diesem Grund sind die aufwändigeren Ansätze nach der First-Order Methode (FOD-Methode) erforderlich, die den zeitlichen Verlauf der Methanemissionen als Reaktion der 1. Ordnung beschreiben (Butz 2006).

Die Bestimmung der Methanemission nach dieser Methode erfolgt nach folgender Formel:

$$ME(T) = M \times DOC \times DOC_F \times C \times F \times D \times e^{-(T-TE) \times k} \quad [1]$$

Legende:

ME(T): theoretische Methanemission im Jahr T (Berechnungsjahr) in Mg CH₄/Jahr

T: Berechnungsjahr; für das aktuelle Jahr

M: durchschnittliche jährliche Abfallmenge in Mg Abfall/Jahr; hier mit ~ 26.200 Mg/Jahr

DOC: Gehalt an biologisch abbaubaren Kohlenstoff im Deponiekörper in Mg C_{org}/Mg Abfall

DOC_F: Anteil des unter Deponiebedingungen zu Deponiegas umgewandelten DOC; dimensionslos

C: Methananteil im Deponiegas (dimensionslos)

F: stöchiometrischer Faktor zur Umrechnung des umgesetzten Kohlenstoffes zu Methan (1,33) bzw. Kohlendioxid (3,67); dimensionslos. Verhältnis des Kohlenstoffes im jeweiligen Molekül

D: Anteil des nicht gefassten und nicht biologisch oxidierten Methananteils; dimensionslos

k: Reaktionsgeschwindigkeit der Methanbildung in Abhängigkeit der Halbwertszeit ($k = \ln 2 / T_{1/2}$; T_{1/2} ist die Halbwertszeit HWZ)

In dieser Gleichung wird die Methanemission der Deponie im jeweiligen Berechnungsjahr nach der Default-Methode als Ausgangsbasis ermittelt (Butz 2006).

Grundsätzlich sind die Ergebnisse der Gasprognoseberechnungen mit Unsicherheiten behaftet, da die in die Modelle eingehenden Parameter teilweise nicht in einem ausreichenden Maß quantifizierbar sind. Als Gaspotenzial wird diejenige Gasmenge bezeichnet, die aus einer Tonne Abfall bei den an einer bestimmten Deponie angetroffenen Bedingungen entsteht. Im Labor lässt sich diese Gasmenge in relativ kurzen Zeiträumen bestimmen. Dabei zeigt sich, dass aus einer Tonne Hausmüll unter Laborbedingungen zwischen 120 und 300 m³ Biogas (Deponiegas) gewonnen werden.

Gasmengenprognose (klassisch) - Beispieldeponie
 $t_{1/2} = 5, 7,5$ und 10 Jahre (Einlagerungszeitraum 1973 -1992; im Jahresmittel)

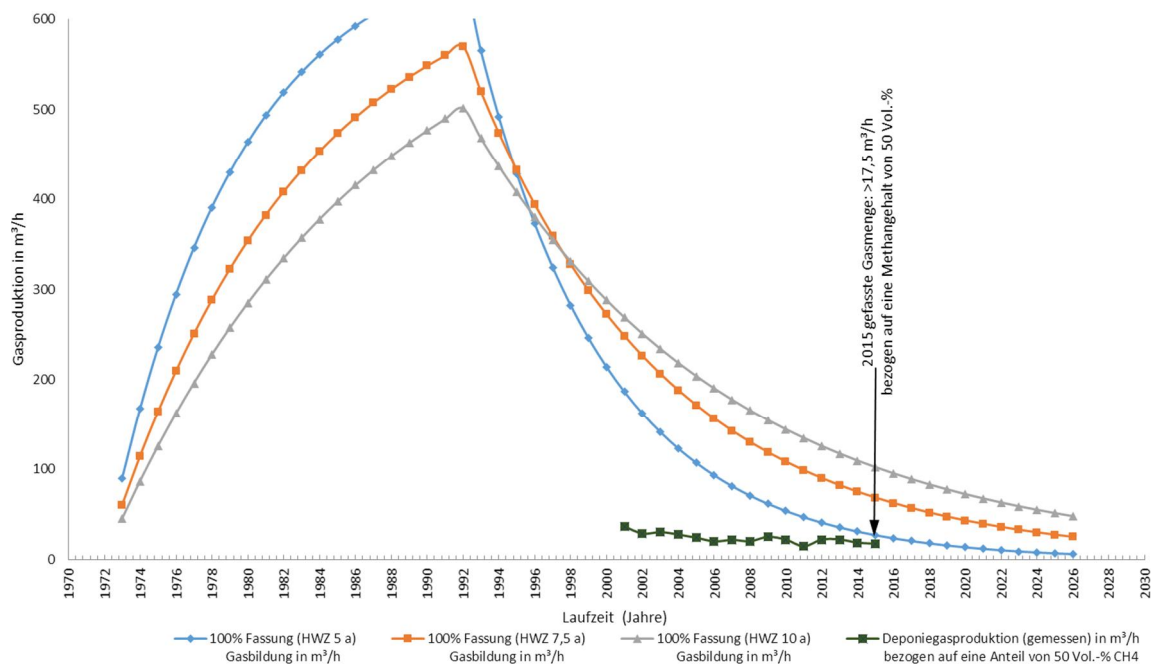


Abbildung 2. Grafische Darstellung der Gasprognose – klassische Bestimmung, exemplarisch

Weiterhin ist anzumerken, dass bedingt durch das Alter der Deponie eher mit höheren Halbwertszeiten **größer 10 Jahre** gerechnet werden sollte, da sich altersbedingt eine langfristige Schwachgasproduktion durch mittel und schwer abbaubarer Organik einstellt. Durch die Optimierung der Gasfassungselemente wird auch Organik mit Halbwertszeiten größer 10 Jahre (Rettenberger 2014) mittelfristig abgebaut, welche ansonsten gastechnisch sehr schwer erfasst werden würde. Mit zunehmenden Alter der Deponie erhöhen sich auch die Halbwertszeiten der biologisch abbaubaren Organik.

Die Bandbreite, in der sich die Deponiegasproduktion nach der Gasprognoseberechnung bei unterschiedlichen Halbwertszeiten bewegen kann, ist in der vorstehenden Abbildung (Abb. 2) beispielhaft dargestellt. Demnach müsste bei einer Halbwertszeit von 5 Jahren im Jahr 2015 noch ungefähr 27 m³/h Deponiegas (bezogen auf einen Methananteil von 50 Vol.-%) gebildet werden. Werden die zuvor beschriebenen Punkte, und hier insbesondere die Zunahme der Halbwertszeiten mit zunehmendem Alter der Deponie, berücksichtigt (Rettenberger 2013), so ergibt sich bei einer Halbwertszeit von 10 Jahren eine Gasproduktion von knapp 100 m³/h Deponiegas. Vorausgesetzt ist, dass das anfallende (produzierte) Deponiegas nahezu gänzlich (Gaserfassungsgrad bei 100 %) erfasst wird.

Diese Annahmen sind theoretisch und stützen sich auf Auswertungen von Bestandsunterlagen und Messergebnissen. Die Wahrheit liegt irgendwo dazwischen, und sollte an dieser Stelle als theoretischer Wert angesehen werden. Weiterführende untersuchende Maßnahmen an bestehenden Gaserfassungssystemen wie eine tiefenzonale Erkundung mit Bestimmung der Gaszusammensetzung in unterschiedlichen Horizonten, Erstellung eines Temperaturprofils, genaue Aufnahme zum baulichen Beschaffenheit des Gasbrunnens führen zu einem genaueren Bild über den Zustand des Gaserfassungssystems und zum Gaserfassungsgrad. Solche untersuchenden Maßnahmen sind in regelmäßigen Abständen zu wiederholen.

4. VERFAHRENSBESCHREIBUNG – OPTIMIERUNG VON GASERFASSUNGSSYSTEMEN

Herkömmlich bestehende Gasbrunnen sind in der Regel oberflächennah (über den gesamten Gasbrunnenbereich) verfiltert. Messungen zeigen immer wieder, dass durch diese Bauweise Luftsauerstoff über die Oberfläche in den Gasbrunnen eingetragen wird und somit eine Verdünnung des Deponiegases erfolgt. Vor diesem Hintergrund wurde ein patentiertes Verfahren für Bestandsbrunnen entwickelt, das den Umbau zu tiefabsaugenden Gasbrunnen ermöglicht.

4.1. Modifikation Gasbrunnen

Je nach Beschaffenheit des bestehenden Gasbrunnens (Befahrbar, freie Filterstrecke, ausreichende Tiefe etc.) und den erfassten Messdaten (Temperaturprofil, Gaszusammensetzung, Kurzschlüsse oder ähnliches) kann ein Umbau erfolgen.

Durch das Einbringen eines Inliners und das Abdichten der oberen Filterstrecke sowie des oberen Kiesfilterbereiches kann der Absaughorizont in tiefliegende Bereiche des Gasbrunnens verlagert werden. Die nachfolgende Prinzipskizze verdeutlicht das Verfahren.

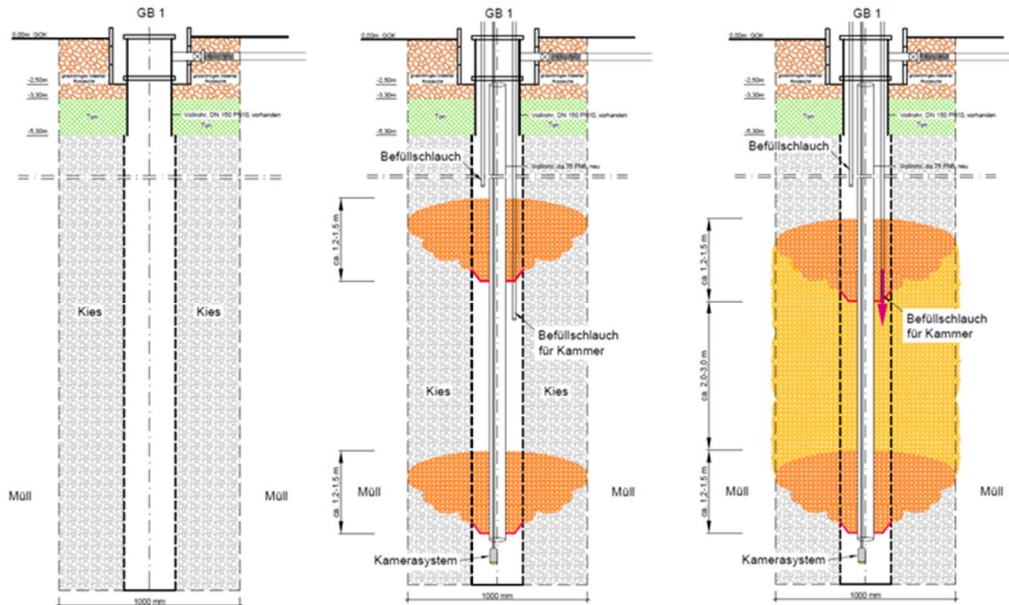


Abbildung 2. Modifikationsstufen zum Ausbau bestehender Gasbrunnen für eine Tiefenbesaugung

4.2. Neuerstellung Gasbrunnen

Sollten infolge von Scherrungen oder anderen Widrigkeiten eine spezielle Modifikation (das Einbringen eines Liners) des Gasbrunnens nicht möglich sein, so sollte darüber nachgedacht werden, in einem ausreichenden Abstand (Verhinderung Kurzschlüsse) zu bestehenden Gasbrunnen Neubohrungen vorzunehmen. Während der Bohrmaßnahmen sollten Bohrgutproben entnommen Analysen (Bestimmung GV, TOC, AT₄, GB₂₁) durchgeführt werden. In Analogie zu den tiefengestaffelten Untersuchungen werden am stehenden Bohrloch die Gaszusammensetzungen in unterschiedlichen Horizonten bestimmt. Unter Berücksichtigung des erbohrten Materials sowie den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen erfolgt im Anschluss der spezielle Ausbau zu einem tiefenverfilterten Gasbrunnen.

5. WIRKUNGSGRAD UND KONTROLLE

Durch den überschaubaren technischen Aufwand zur Errichtung neuer tiefenverfilterter Gasbrunnen und das damit verbundenen gezielte Aufbringen eines gleichmäßigen Unterdruckes auf den Deponiekörper wird ein deutlich verbesserter Gasfangungsgrad erreicht. Des Weiteren können die bestehenden Gasbrunnen als Lufteintragslanzen dienen, so dass über die Gasbrunnen Luftsauerstoff für die aerobe *in situ* Stabilisierung zusätzlich zur Verfügung gestellt werden kann.

Folgende Effekte stellen sich ein:

- Verbesserte Kurzschlussfestigkeit durch aktive und gezielte Besaugung der Gasbrunnen; geringerer Fremdluftanteil in dem abgesaugten Deponiegas;
- Größere Wirkung in der Breite (Einzugsbereiche) durch größeren Unterdruck bei der Besaugung;

- Erhöhter Austrag an organischem Kohlenstoff C_{org} durch verbessertes Besaugungsverhalten (abgesaugte organische Fracht: Fluss in Verbindung mit Methan- und Kohlendioxidgehalten).

Auf zahlreichen Deponiestandorten konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass in der Folge (mittelfristig) weitere Effekte eintreten:

- Aktivierung sowohl der anaeroben als auch der aeroben Umsetzungsprozesse;
- Temperaturerhöhung in den mesophilen Bereich zwischen 35 °C bis 45 °C;
- Schrittweise *in situ* Stabilisierung des Deponiekörpers, ausgehend von der Deponieoberfläche in Richtung Deponiebasis durch Eintrag von Luftsauerstoff in das System bei gezielter Übersaugung.

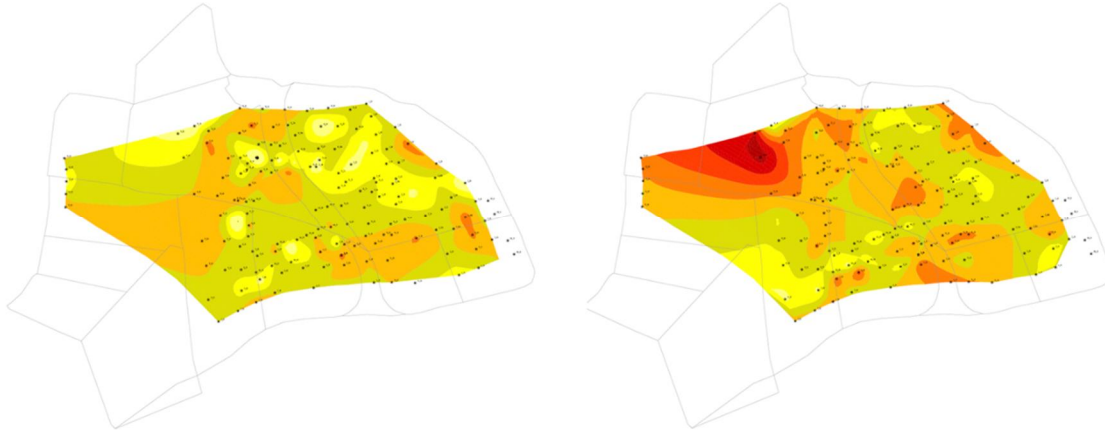


Abbildung 3. Gaserfassungsgrad vor Beginn (linke Abb.) und nach Optimierung (rechte Abb.) – dunklere rote Bereiche werden besser gastechnisch erfasst

6. AUSTRAG CO_2 – ÄQUIVALENTE – BEITRAG ZUM KLIMASCHUTZ – EINSPARUNGEN DURCH UMSETZUNG VON METHAN ZU KOHLENDIOXID

Die Bedeutung des Gaspfades für den Abbau in der anaeroben Phase einer Siedlungsabfalldeponie ist hoch, da der Austrag an organischen Kohlenstoff C_{org} (Indikator für die Stabilisierung einer biologisch aktiven Siedlungsabfalldeponie) über den Gaspfad rund 1.000-mal größer ist als über den Wasserpfad in der Phase nach Stilllegung.

Auch wird über anaerobe Abbauprozesse nahezu das Dreifache an C_{org} im Gegensatz zu aeroben Umsetzungsprozessen ausgebracht. Das aus diesen Abbauprozessen entstehende Deponiegas kann über ein System (optimierte vertikale und/oder horizontale Gasbrunnen) gefasst und behandelt werden.

Ein wesentliches Kriterium zur Erfassung des Wirkungsgrades einer *in situ* Stabilisierung ist somit die Bestimmung des Austrages biogener Organik über den Gesamtkohlenstoff. Hierbei wird die stoffliche Entfrachtung an ausgebrachtem Kohlenstoff über die abgesaugte Gasmenge pro Zeiteinheit gemessen. Als Parameter werden die Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen herangezogen.

Zusätzlicher Synergieeffekt durch die Minimierung der Methanemissionen aus dem Deponiekörper:

Durch das aktive Fassen der Methankonzentrationen im Deponiekörper sowie die thermische Umwandlung des Deponiegases zu Kohlendioxid (CO_2) ergibt sich eine zusätzliche Treibhausgasminimierung, da das CO_2 -Äquivalent für Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren bei einem Faktor 25 liegt (wie zuvor beschrieben). Das bedeutet, dass ein Kilogramm Methan innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 25-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie ein Kilogramm CO_2 . Da dieses Methan jedoch gar nicht in die Umwelt gelangt, sondern direkt zu Kohlendioxid umgewandelt wird, hat es keinen negativen Einfluss auf die Atmosphäre.

Einige praktische Beispiele für die Einsparung von THG-Emissionen beim Einsatz tiefenverteilter Gasbrunnen:

Tabelle 2. Praktische Beispiele – Optimierung Gaserfassung (Auszug an Projekten)

Bezeichnung Deponie	CO ₂ (eq)- Emissions- minderung rechnerisch (to/a)	CO ₂ (eq)- Emissions- minderung praktisch (to/a)	Verbesserung Gaserfassung in % (bezogen auf den Ursprung)
Altbereich Kirschenplantage Sek. I/II Kirschenplantage	3.560	~ 3.000	> 78
Zentraldeponie Lisdorf	5.760	~ 5.300	> 64
Zentraldeponie Illingen	11.272	in Arbeit, Umsetzung 2017	> 90
Zentraldeponie Wilsum	22.632	~ 19.000	> 60
Deponie Simmozheim	2.176	in Arbeit, Umsetzung 2017/18	> 60
Sek. I/II Kirschenplantage	7.750	in Arbeit, Umsetzung 2017/18	119
(...)	8.600	in Arbeit, Umsetzung 2017/18	119
(...)	(...)	(...)	(...)
Gesamt	61.750	~ 10.000	~ 70 % im Mittel

Wie aus der oben aufgeführten Tabelle ersichtlich, können und werden durch Optimierungsarbeiten am Gaserfassungssystem (Verbesserung der Gaserfassung) erhebliche Mengen an Treibhausgasen (über CO₂-Äquivalente) eingespart.

7. FORTLAUFENDE PROJEKTE ZUR NUTZUNG SCHWACHMETHANHALTIGER DEPONIEGASE DURCH EIN FÖRDERPROGRAMM IM RAHMEN DER NATIONALEN KLIMASCHUTZINITIATIVE

An dieser Stelle werden neben der nachhaltigen Sicherung des Deponiekörpers durch eine *in situ* Stabilisierung auch weitere positive, nachhaltige Effekte durch die thermische Nutzung des schwachmethanhaltigen Deponiegases anhand eines Praxisbeispiels vorgestellt.

7.1. Schwachgasnutzung mit Wärmeauskopplung

Das auf einer Deponie optimal gefasste Deponiegas (nach Optimierung der Gaserfassung und Reaktivierung biologischer Abbauprozesse) wird im Zuge einer *in situ* Stabilisierung zunehmend rückläufige Methankonzentrationen aufweisen, so dass in absehbarer Zeit eine mögliche energetische Nutzung zur Stromerzeugung mittels Gasmotoren technisch nicht sinnvoll erscheint. Jedoch könnte über einen sehr langen Zeitraum das zunehmend schwachmethanhaltige Deponiegas thermisch behandelt werden. Da der Deponiebetreiber verantwortlich für die Fassung und Behandlung des Deponiegases ist, werden grundsätzlich im Anschluss an eine mögliche energetische Nutzung des Deponiegases in den meisten Fällen bei Methankonzentrationen zwischen 35 – 25 Vol.-% Hochtemperaturfackeln (HT- Fackeln) zur thermischen Behandlung eingesetzt.

Bei noch niedrigeren Methankonzentrationen werden mittlerweile entwickelte Schwachgasfackelsysteme (bis 12 Vol.-% Methan, teilweise bis kleiner 6 Vol.-% Methan) eingesetzt, welche in Analogie zur HT- Fackel das schwachmethanhaltige Deponiegas thermisch behandeln und entsorgen. Die marktüblichen Schwachgasbehandlungsanlagen können mit Wärmetauchersystemen ausgestattet werden, um die überschüssige Wärmemenge anderen Prozessen zuzuführen und so nutzen zu können. In einem eigenständigen Förderprogramm können solche investiven Maßnahmen finanziell unterstützt werden.

Die dabei erzeugte Wärmemenge kann und sollte anderen Nutzungsbereichen (Wärmesenken) zur Verfügung gestellt werden.

7.2. Kurzvorstellung Wärmenutzung Stadt Saarlouis – Einsatz mobile Wärmespeicher

Der Projektträger Jülich (*ptj*) rief Anfang des Jahres dazu auf, sog. Leuchtturmprojekte auf den Weg zu bringen (Förderaufruf im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für

Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), um wegweisende Modellprojekte im kommunalen Klimaschutz umzusetzen und als nachahmbare ambitionierte Klimaschutzprojekte voranzubringen. In enger Zusammenarbeit mit dem Klimamanagement der Stadt Saarlouis hat CDM Smith eine Projektskizze für den Projektträger erstellt, um Fördergelder für den Einsatz mobiler Wärmesysteme am Standort Lisdorf zu generieren. Dieser wurde Ende 2016 positiv bescheinigt.

Von der überschüssigen Prozesswärme bei *in situ* Stabilisierungsmaßnahmen könnte die nahegelegene Stadt Saarlouis profitieren. Die Stadt weist u. a. an drei benachbarten Grundschulen unterschiedliche Wärmesenken auf und möchte diese Überschusswärme sinnvoll und nachhaltig hier nutzen. Infolge der zwar geringen, jedoch vorhandenen Entfernungen zwischen Wärmeproduktion und Wärmenutzung könnte die Überschusswärme mit mobilen Wärmespeichersystemen an den jeweiligen Ort transportiert werden. Solche mobilen Systeme sind jedoch sehr kostenintensiv in der Anschaffung. Exemplarisch sind die benötigten Wärmemengen der drei ausgewählten Wärmesenken (Stadt Saarlouis, Nutzung der Überschusswärme bei der *in situ* Stabilisierung der Zentraldeponie Lisdorf) an dieser Stelle vorgestellt:

Tabelle 3. Theoretische Menge an CO₂-Äquivalanz – Einsparung

Bezeichnung Gebäude	Primärenergie-träger	Wärmebedarf kW _{therm} /a	Gesamtmenge CO ₂ -Äquivalenz inkl. Vorkette (to/a)
Gebäude 1	Erdgas	497.000	108
Gebäude 1	Fernwärme	630.000	119
Gebäude 1	Fernwärme	602.000	114
Gesamt		1.729.000	341

Das würde bedeuten, dass für alle drei vorangestellten Wärmesenken ein durchschnittlicher stündlicher Wärmebedarf von knapp 197 kW_{therm}/h benötigt werden würde. Natürlich gibt es in der Sommerzeit weniger und in der Winterzeit mehr Bedarf an Wärme.

Infolge der zwar geringen, jedoch vorhandenen Entfernungen zwischen Wärmeproduktion und Wärmenutzung ist es angedacht, mobile Wärmespeichersysteme einzusetzen. Die Speicherung und der Transport der entstandenen Wärme erfolgt in Containern.



Abbildung 4. Schematische Darstellung mobiler Wärmetransport zwischen Wärmequelle und Senke

8. FAZIT

Durch die schrittweise technische Umsetzung der thermischen Behandlung des schwachmethanhaltigen Deponiegases in Kombination mit der lokalen Wärmenutzung werden große Mengen an CO₂-Äquivalenten eingespart. Auch wird durch das aktive Fassen des methanhaltigen Deponiegases und die thermische Umwandlung zu Kohlendioxid ein zusätzlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet, da dieses Methan nicht unkontrolliert in die Atmosphäre entweicht. Die Kombination aus der thermischen Nutzung des Deponiegases im Zuge einer *in situ* Stabilisierungsmaßnahme, der Bereitstellung von Wärme und der mobilen Wärmespeichertechnologie

kann eine ideale und nachhaltige technische Lösung für eine klimaneutrale Bereitstellung von Energie im Umfeld von Siedlungsabfalldeponien darstellen.

Zurzeit werden Richtlinien und Arbeitshilfen für diese und vergleichbare technische Maßnahmen zur Optimierung von Gaserfassungssystemen und der daraus resultierenden Emissionsminderung in enger Zusammenarbeit mit anderen Ingenieurbüros in der Arbeitsgruppe VDI 3899-2 „Emissionsminderung - Deponiegas – Gaserfassungssysteme von Deponien“ (NA 134-01-110 AA) im Fachbereich I „Umweltschutztechnik“ Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung NA134-01-110AA N0046 ausgearbeitet.

QUELLENANGABEN

Butz, W. (2006). Ansatz für die Schätzung der luftseitigen Deponieemissionen für das E-PRTR, Umweltbundesamt, FG III 3.3, *Grundlagen zur Ermittlung der Methanemission nach der FOD - Methode*

Butz, W. (2015). Minderung der Methanemissionen aus Deponien – Unterstützung durch ein Förderprogramm des Bundes zum Klimaschutz, *Seminar, Karlsruhe*

Hupe, K. et al. (2014) Beitrag der Belüftung zum Klimaschutz, *Hamburger Berichte 40*, Deponietechnik 2014

Krümpelbeck, I. (1999) Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien, *Dissertation*, Gesamthochschule Wuppertal

Rettenberger, G. (2013). Deponietage: Deponien heute und in Zukunft – Betrieb, Stilllegung und Nachsorge, vom 22. und 23.10.2013; *Vortrag: Entgasung von Deponien in Deutschland und daraus resultierender Beitrag zum Klimaschutz*, Trier

Rettenberger, G. (2013). Deponiegasemissionen in Deutschland, *Deponiebelüftung als Klimaschutzmaßnahme*, Workshop zum DBU-Vorhaben „ORKESTRA2“, Berlin

Rettenberger, G. (2014). Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013, *Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2011*, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-klimarahmenkonvention-0>

Synthesebericht des Fünften IPCC Sachstandsberichts (2014), Edited by The Core Writing Team *Synthesis Report IPCC*; Rajendra K. Pachauri Chairman IPCC; Leo Meyer Head, Technical Support Unit IPCC