



**Nachhaltige Prozesswärmenutzung  
schwachmethanhaltiger Deponiegase  
bei der gastechnischen Stabilisierung von Deponien  
– ein NKI-Modellprojekt –**

**Jürgen Forsting**

CDM Smith Consult GmbH, Bochum





## Abstract

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. Auf diese Weise lässt sich ein unkontrollierter Methanaustritt in die Atmosphäre (Treibhauseffekt) vermeiden.

Um Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu minimieren bzw. zu verhindern und damit den Deponiekörper über den Gaspfad zu stabilisieren sowie die Stilllegungs- und Nachsorgephase zu verkürzen, ist es angebracht, Optimierungsmaßnahmen am Gaserfassungssystem vorzunehmen. Idealerweise lässt sich eine solche gastechnische *in-situ*-Stabilisierung mit mittlerweile gängigen Technologien zur Schwachgasbehandlung und einer möglichen Wärmenutzung kombinieren. Unter Einhaltung bestimmter Kriterien werden solche nachhaltigen Stabilisierungsmaßnahmen auch durch Programme im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (akt. Kommunalrichtlinie Pkt. 2.12.3 und 2.12.4, [1]) gefördert. Bei derartigen Förderungsmaßnahmen zur Eindämmung des schwachmethanhaltigen Deponiegases kann bei der thermischen Behandlung Überschusswärme anfallen. Diese dezentral gewonnene Wärme lässt sich wiederum an einem anderen Standort nutzen. Durch die Nutzung dieser Überschusswärme werden weitere fossile Energieträger eingespart und zusätzlich zur Treibhausgaseinsparung der Stabilisierungsmaßnahme die THG-Emissionen vermindert. Der vorliegende Beitrag zeigt u. a. eine technische Möglichkeit der dezentralen und mobilen Wärmenutzung anhand von Phase-Change-Material (PCM)-Wärmespeichern auf.

## 1 Ausgangssituation

Die vorhandene, biologisch abbaubare Organik in Siedlungsabfalldeponien wird über einen sehr langen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten umgesetzt. Beim aktiven Absaugen des anfallenden Deponiegases, u. a. mit klassischen Gasfassungssystemen (Kaminziehhöhre, oberflächennah verfilterte Gasbrunnen, Gasrigolen etc.), wird zum jetzigen Zeitpunkt ein relativ geringer Anteil des gebildeten Deponiegases, zwischen 20 – 40 % (BMUB, 2013, [3]), erfasst. Andere Quellen (HEYER ET AL, 2018, [2]) gehen von einem Gaserfassungsgrad zwischen 40 bis 50 % aus. Somit wird ein erheblicher Anteil des gebildeten Deponiegases nicht erfasst. Das dann noch vorhandene Restgaspotenzial (nicht umgesetzte verbleibende Restorganik) kann dann sukzessiv über sehr lange Zeiträume bis zum gänzlichen Abklingen der Methanproduktion überwiegend über die Deponieoberfläche als Treibhausgas THG-Emissionen freigesetzt werden.

Um die noch vorhandene, nicht erfasste Restorganik ebenfalls umzusetzen, bietet es sich an, bestehende Gasfassungssysteme zu optimieren bzw. wieder aktiv zu

besaugen. Dies führt zudem zur Verkürzung der Nachsorgephase (Stabilisierung) sowie zur Emissionsminimierung, wenn die bestehenden Gasfassungssysteme standortspezifisch zielgerichtet geprüft und bei Bedarf auch durch Modifikation bzw. durch Erneuerung optimiert werden.

### 1.1 Zielsetzung der gastechnischen *in-situ*-Stabilisierungsmaßnahme

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

Über anaerobe Abbauprozesse wird nahezu das Dreifache an  $C_{org}$  im Gegensatz zu aeroben Umsetzungsprozessen ausgetragen.

Beim Anlegen eines gezielten, nahezu flächendeckenden Unterdruckes an das Gesamtsystem durch aktive Besaugung, insbesondere durch den Einsatz tiefenverfilterter Gasbrunnen, werden in einem ersten Schritt endprodukt hemmende Stoffe abgetragen. Diese Stoffe bewirken bei nichtaktiver Gasfassung, dass der anaerobe Abbauprozess und somit die Methanbildung zum Stillstand kommen kann. Durch den erzeugten Unterdruck über die Deponieoberfläche und den damit verbundenen Eintrag an Luftsaauerstoff erfolgt in Randbereichen eine schrittweise Umsetzung der vorhandenen biologisch abbaubaren Organik durch aerobe Umsetzung, genannt Aerobisierung. Bei oberflächengedichteten Deponien kann dies durch das Öffnen benachbarter Lufteintragsslanzen bzw. modifizierte Gasbrunnen erfolgen (passiver Eintrag). Der Luftsaauerstoff wird mit zunehmender Tiefe gänzlich umgesetzt (veratmet). Weitere, tiefere Bereiche mit einem erhöhten, noch nicht umgesetzten biologischen Anteil werden durch die Gleichgewichtsverlagerung anaerob aktiviert. Die mit zunehmender Besaugung fortschreitende Sauerstofffront bewirkt des Weiteren, dass sich die restliche Organik aerob umsetzen kann und die auftretenden Emissionen endgültig abebben.

Ein wesentlicher Gradmesser zur optimalen Umsetzung der biologischen Organik ist neben der maximalen Umsetzung des eingetragenen Luftsaauerstoffes (es werden i. d. R. weniger als 0,2 Vol.-%  $O_2$  in der Abluft gemessen) die Bestimmung des organischen Gesamtkohlenstoffes  $C_{org}$ . Dieser wird über die Methan ( $CH_4$ )- und Kohlendioxid ( $CO_2$ )-Messung errechnet.

Zur Feststellung der Wirksamkeit einer gastechnischen Stabilisierungsmaßnahme sollten in verschiedenen Messstellen die Methan-, Kohlendioxid-, und Sauerstoffkonzentrationen erfasst werden. Ziel ist es, bei max. Saugleistung die Sauerstoffkonzentrationen möglichst gering zu halten, um eine maximale Konzentration an Kohlendioxid (> 20 %) zu erhalten. Nur so lassen sich eine optimale Umsetzung des eingetragenen Luftsaauerstoffes und eine maximale anaerobe sowie aerobe Abbaugeschwindigkeit der biogenen Organik erreichen.



Mittels vielfach erfolgreich durchgeführter Stabilisierungsmaßnahmen (aktive, gezielte Besaugung beim Einsatz modifizierter, z. B. tiefenfilterter Gasbrunnen) auf zahlreichen anderen Deponiestandorten konnte u. a. gezeigt werden, dass in der Folge (kurz- als auch mittelfristig) folgende Effekte eintreten:

- kurzfristig: eingestautes Deponiegas wird aktiv gefasst, so dass biologische Abbauprozesse anlaufen; beim Einsatz tiefenfilterter Gasbrunnen erfolgt zudem eine Verbesserung des Gasfassungsgrades durch Reichweitenerhöhung einzelner Gasbrunnen aufgrund des in größerer Tiefe eingebrachten Unterdrucks und der höheren Kurzschlussfestigkeit des Gasbrunnens;
- kurzfristig: bei der Optimierung der Gaserfassung (u. a. durch den Einsatz tiefenfilterter Gasbrunnen) verringert sich der Fremdluftanteil und damit erhöht sich der Austrag an organischer Fracht im abgesaugten Deponiegas (abgesaugte organische Fracht: Fluss in Verbindung mit Methan- und Kohlendioxidgehalten);
- mittelfristig: (Re-)Aktivierung biologischer Abbauprozesse, sowohl anaerober als auch aerober Art bei aktiver Besaugung:
  - Verbesserung des Langzeitverhaltens und somit Verkürzung der Stilllegungs- und Nachsorgephase, indem die Aktivierung biologisch verfügbarer Organik (insbesondere im Bereich der aeroben Umsetzung) vorangetrieben wird;
  - Sukzessive Temperaturerhöhung in den mesophilen Bereich zwischen 35 °C bis 45 °C;
  - Minimierung bzw. Unterbindung der Freisetzung von THG-Emissionen aus der Deponie durch maximale stoffliche Entfrachtung über den Gaspfad (maximaler Austrag an organischem Kohlenstoff  $C_{org}$ );
  - Je nach Abbaugrad der organischen Substanz teilweise oder vollständige Bereitstellung des Deponiegases für eine mögliche wirtschaftliche Nutzung auch in der sogenannten Schwachgasphase über einen definierten Zeitraum. Diese Phase kann auch nur für einzelne Deponieabschnitte angestrebt werden;
  - Im weiteren Verlauf erfolgt für das Gesamtsystem der Übergang zur Aerobisierung (aerobe *in-situ*-Stabilisierung).

## 1.2 Konzeptstudie, Potenzialanalyse und durchzuführende Untersuchungen

Im ersten Schritt (im Rahmen der geförderten Maßnahme) wird eine Konzeptstudie mit integrierter Potenzialanalyse für die zu untersuchende Deponie erstellt. Diese Gesamtanalyse erlaubt es, standortspezifisch das Restgaspotenzial zu bestimmen. Darauf basierend erfolgten die optimale Anlagenauslegung bzw. der verbesserte Gaserfassungsbetrieb.



Im nachfolgenden Unterkapitel sind exemplarische Ergebnisse einer solchen Studie aufgeführt. Für die Potenzialstudie wird das bestehende Gasfassungssystem auf dessen Funktionalität hin untersucht. Ferner wird eine Bestandsaufnahme vorgestellt sowie kurzzeitige Besaugungen (im Rahmen von Vor-Ort-Untersuchungen) der untersuchten Gasbrunnen vorgestellt.

#### 1.2.1 Untersuchende Maßnahmen

Neben der Bestimmung der deponietypischen Gaszusammensetzung (Methan-, Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalte) über die Tiefe eines Vertikalgasbrunnens werden auch die Temperaturen sowie das Neubildungspotenzial (bezogen auf den Einzelvolumenstrom der Gasbrunnen) erfasst.

Auszug aus dem Untersuchungsprogramm und mit Ergebnisauswertungen:

- Kamerabefahrung der Vertikalgasbrunnen;
- Tiefenzonierte Untersuchung mit Bestimmung der Gaszusammensetzung (Kohlenmonoxidkonzentration CO in ppm; Schwefelwasserstoffkonzentration H<sub>2</sub>S in ppm; Kohlendioxidkonzentration CO<sub>2</sub> in Vol.-%; Methankonzentration CH<sub>4</sub> in Vol.-%; Sauerstoffkonzentration O<sub>2</sub> in Vol.-%; Temperatur im Gasbrunnen); Erstellung von Profilen einzelner Gasbrunnen;
- Kurzzeitige Gasabsaugversuche als Zeitmessungen;
- Extern durchgeführte FID-Messungen an der Oberfläche;

Bei der Ermittlung der Konzentrations- und Temperaturprofile über die Gasbrunnentiefe sollen gasproduktive Horizonte innerhalb der Deponie bestimmt und darüber das Gasproduktionspotenzial abgeleitet werden. Damit sich kein Standgas bestimmen lässt, befindet sich der Gasbrunnen während der Messungen unter ständiger Besaugung. Zur Bestimmung der Gasqualität in verschiedenen Ebenen der Gasbrunnen wird die Zusammensetzung und die Temperatur des, dem Pegel zuströmenden Deponiegases in verschiedenen Tiefen (i. d. R. jeden Meter) bestimmt.

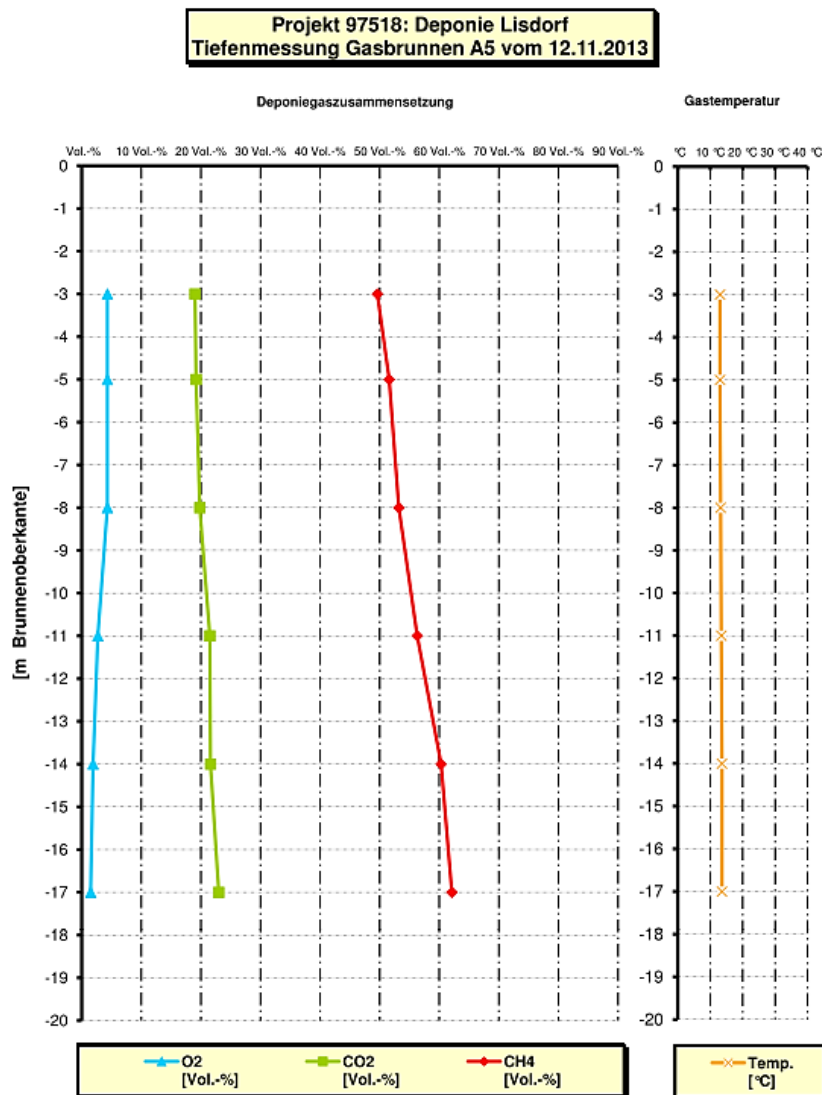


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Tiefenmessung an einem Gasbrunnen (leichte Zunahme der Methankonzentration mit zunehmender Tiefe bei konstanter Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentration sowie Temperatur)

Tiefenzonierte Messungen ermöglichen aufgrund der Analyse der Gasmischungen innerhalb des Gasbrunnens und durch die vergleichsweise hohen Saugflüsse während der Beprobung eine erste „qualitative“ Aussage zur Gasbildung im Deponiekörper. Der messtechnisch erfasste Sauerstoffgehalt ergibt im wesentlichen Aussagen zur Funktionstüchtigkeit des Gasfassungssystems (hier Dichtigkeit des Gasfassungssystems und Aufspüren von Kurzschlüssen im Deponiekörper).

Die untersuchten Gasbrunnen zeichnen sich dadurch aus, dass die Messergebnisse unterschiedliche Werteverläufe über die Tiefe der messbaren Filterstrecke aufzeigen können. Die ermittelten Messwerte für Sauerstoff, Kohlendioxid und Methan verlaufen dabei häufig unterschiedlich. Gleiches gilt für die dazugehörigen Temperaturverläufe.

Bei vergleichbaren Messungen an anderen Deponien lassen sich aktivere und weniger aktive Bereiche über die Tiefe der Gasbrunnen infolge unterschiedlicher Organikgehalte ermitteln.

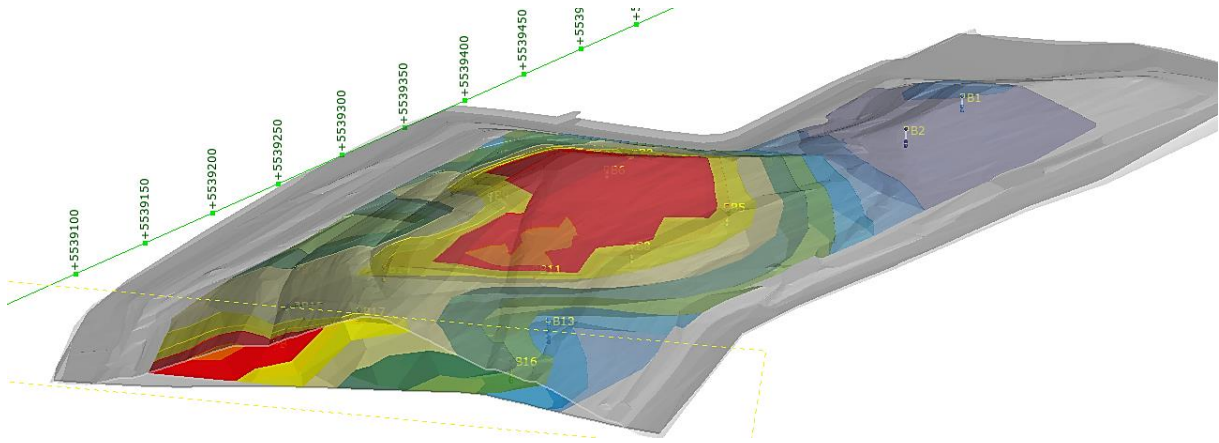


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Tiefenmessung als 3D Modell in einem Deponiekörper – unterschiedlicher Verteilung von Gaszusammensetzungen und Einzelvolumenströme – rote dunklere Bereiche zeigen höhere Energieinhalte auf als die grünlichen bzw. bläulichen Bereiche

Durch die Auswertung der Daten in unterschiedlichen Ebenen wird ein digitales, dreidimensionales Geländemodell erstellt. Anhand dieses Modells lassen sich Optimierungsmaßnahmen ableiten, so dass das anfallende Deponiegas nach Modifikation der Gaserfassung nahezu vollständig erfasst werden kann.

### 1.2.2 Ergebnisse des Restgaspotenzials

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen in diesem vorliegenden Beispiel zeigen, dass die Milieubedingungen durch eine Anreicherung von stark methanhaltigem Deponiegas (in Teilbereichen) gekennzeichnet sind. Da die vorhandene Gasfassung bisher aufgrund fehlender Infrastruktur während der Untersuchungen nicht aktiv betrieben werden konnte, hat sich das Deponiegas im Deponiekörper angesammelt. Aufgrund des Kapfels des Deponiekörpers durch die vorhandenen Dichtungssysteme hat sich in Teilbereichen der Deponie bereits ein Überdruck im System eingestellt. Festgestellte Emissionen über die Oberfläche können hierdurch verursacht werden. Durch eingestautetes Deponiegas hat sich auch der aktive Umsetzungsprozess der Organik über anaerobe Abbauprozesse in Deponiegas stark verlangsamt. Der optimale, mesophile Temperaturbereich von 35 °C bis 45 °C für die anaerobe Umsetzung kann häufig nicht verzeichnet werden.

Die Auswertung der Gaszusammensetzungen im regulären Deponiegasbetrieb ergibt eine grafische, räumliche Darstellung an potenzieller theoretischer Wärmeenergie (sog. Isolinenplan).

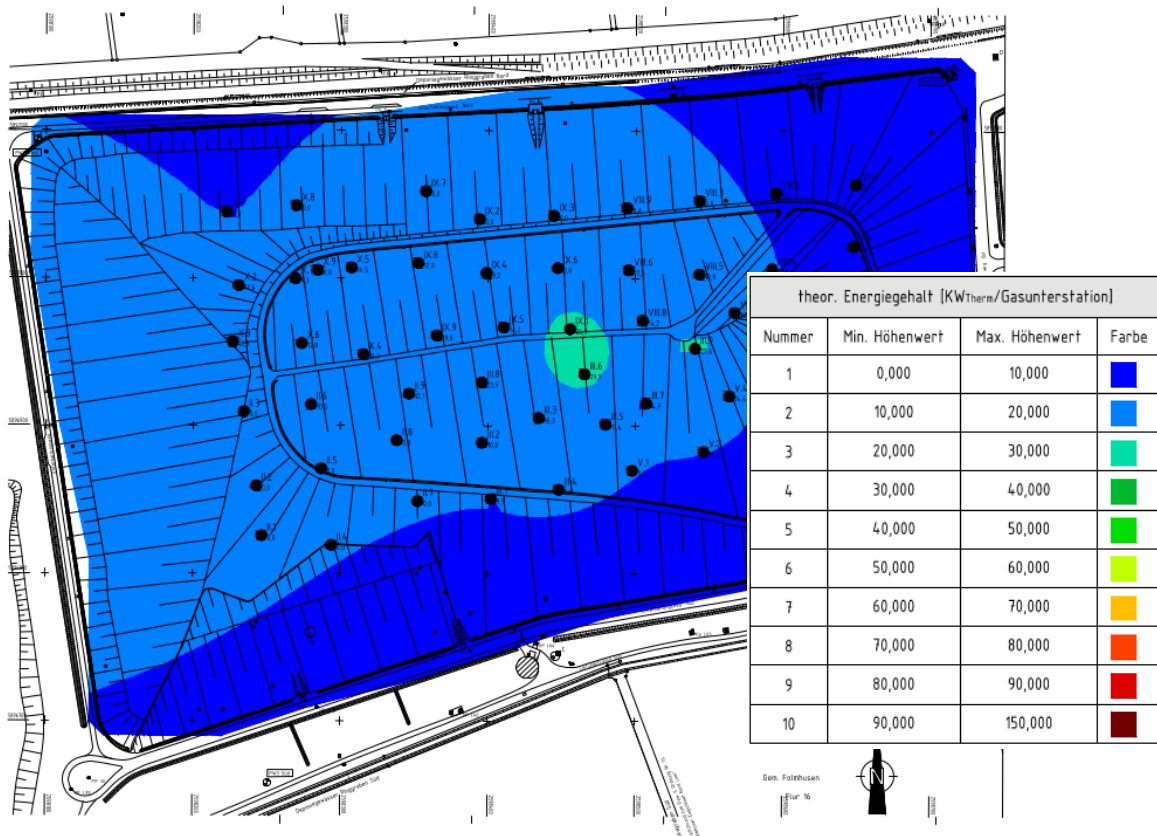


Abbildung 3: Isolinenplan Austrag – Ergebnisse aus der 1. Untersuchungskampagne an theoretischem Energieinhalt  $kW_{therm}$  (relativer Wert Methankonzentration bezogen auf Einzelvolumenstrom) – idealisierte Darstellung

Aus der vorangestellten Abbildung wird ersichtlich, dass bei dieser 1. Untersuchungskampagne eine mäßige Deponiegaserfassung zu verzeichnen ist, bezogen auf den theoretischen Energieaustrag. Insbesondere im östlichen und südlichen Bereich lag dieser Wert im Mittel unterhalb von  $5 kW_{therm}/h$ . Der maximale Austrag (Gesamt) an thermischer Energie lag bei knapp  $430 kW_{therm}$ .

Durch gezielte Einzelbesaugung der Gasbrunnen direkt am Gassammelbalken in der jeweiligen Gasunterstation im Zuge der 2. Untersuchungskampagne ist eine detaillierte Beschreibung des realistischen Gasdargebotes möglich.



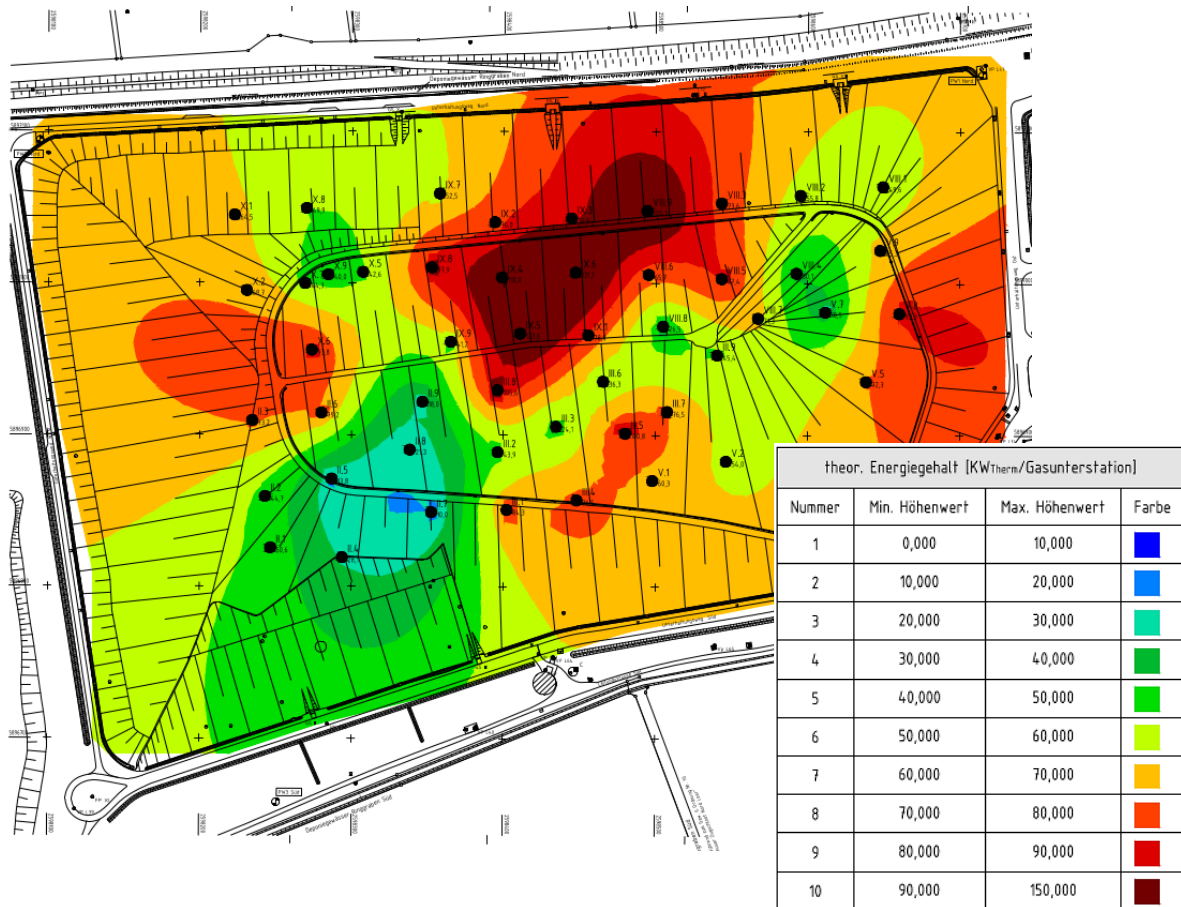


Abbildung 4: Isolinienplan Austrag – Ergebnisse aus der 2. Untersuchungskampagne an theoretischem Energieinhalt  $kW_{therm}$ . (relativer Wert Methankonzentration bezogen auf Einzelvolumenstrom) – idealisierte Darstellung

Durch gezielte Besaugung einzelner Gasbrunnen und auch Deponieabschnitte lässt sich häufig in Verbindung mit einem regelmäßigen Monitoring schon eine deutlich erhöhte Methanfracht aus einem Deponiekörper herausziehen. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich ein mittlerer theor. Energieinhalt von knapp  $65 kW_{therm}$ . pro Gasbrunnen. Gegenüber der Ausgangssituation konnte somit mehr als *das* 13-fache an theoretischem Wärmeenergieausstrag dargestellt werden. Dies ist sicherlich eine kurzzeitige Bestandsaufnahme. Jedoch zeigen die Ergebnisse auf, dass noch ein erhebliches Restgaspotenzial in diesem Deponiekörper vorliegt.

Zusätzlich lässt sich durch Optimierungsmaßnahmen, u. a. an der Gasfassung und in der Behandlung die Stilllegungs- und Nachsorgephase drastisch verkürzen. Auch die klimarelevanten THG-Emissionen werden unmittelbar und nachhaltig vermindert.

Durch ein verbessertes „Deponiegasmanagement“ und die Optimierung von Gasfassungseinrichtungen (u. a. bei temporärer Tiefenbesaugung mittels eines speziellen Liners) gibt es nun die Möglichkeit der aktiven und kontrollierten Besaugung.



Des Weiteren wird durch die optimale Deponiegaserfassung und durch die Ausgestaltung eine verbesserte Durchflusskapazität für Stabilisierungsmaßnahmen erreicht. So ist es möglich, insbesondere Randbereiche oder bereits weiter abgebaute Deponiebereiche stärker zu übersaugen und die aerobe *in-situ*-Stabilisierung voranzutreiben.

## 2 Gasprognosemodelle und Bestimmung Gasdargebot

Zur Anlagenauslegung der Deponiegaserfassung und Behandlung ist es angebracht, neben den empirisch bestimmten Restgasmengen auch anhand aktueller modifizierter Deponiegasprognosemodelle das genaue Gasdargebot zu bestimmen.

Bedingt durch das Ende der Ablagerung von organischen Siedlungsabfällen Mitte 2005 ist zu 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 [4] und [5].

Die IPCC-Richtlinien bieten zwei Methoden zur Abschätzung der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Entsorgung fester Abfälle (also Deponien) an. Die IPCC-Standard-Methode ist eine einfache Massenbilanzberechnung, die die Menge an CH<sub>4</sub> schätzt, die von der Deponie emittiert wird, unter der Annahme, dass das gesamte, gebildete Methan in dem gleichen Jahr, in dem der Abfall abgelagert wurde, gebildet bzw. freigesetzt wird.

Die andere, in den IPCC-Richtlinien beschriebene Methode ist die sogenannte First Order Decay (FOD)-Methode. Die FOD-Methode verwendet die Zeitfaktoren des Abbauprozesses und berücksichtigt die jährlichen Emissionsschätzungen, die diesen Prozess widerspiegeln.

Die Schätzungen der jährlichen Emissionen der beiden Verfahren sind daher nicht vergleichbar. Die FOD-Methode führt zu besseren Schätzungen der jährlichen Emissionen, während die IPCC-Standardmethode z. B. in allgemeinen Studien Vorteile hat.

Die First Order Decay Methode des IPCC enthält verschiedene Faktoren, die die Deponiegasprognose stark beeinflussen können. Nach der FOD-Methode lassen sich diese Faktoren an die Deponieverhältnisse anpassen, damit eine realitätsnähere Deponiegasprognose durchgeführt werden kann. Die gewählten Faktoren sind in frei zugänglichen Tabellen hinterlegt.

Nach Erfahrungen verändert sich der k-Wert (Reaktionsgeschwindigkeitskonstante – Erzeugungsrate als Konstante für Methan, 1/Jahr) der Siedlungsabfälle bis zu 0,13 und der DOC-Wert der Siedlungsabfälle reduziert sich bis zu 0,2 (als gemittelter Parameter über die abgelagerten Inhaltsstoffe).

Die Ergebnisse der angepassten Gasprognosemodelle und der empirisch ermittelten Daten – Messergebnisse aus den Untersuchungen – ergeben dann ein Gesamtbild zum Restgaspotenzial. Dieses abzuschätzen ist Grundvoraussetzung für eine detaillierte nachhaltige Schwachgasbehandlung mit Prozesswärmenutzung.

### 3 Modellprojekt zur Nutzung der Prozesswärme

In den letzten Jahren kommen vermehrt Schwachgasbehandlungssysteme auf den Markt, die neben der Behandlung des Deponiegases auch über eine Wärmeauskopplung verfügen.

#### 3.1 Unterschiedliche Schwachgastechnologien mit Wärmeauskopplung

Die marktüblichen Schwachgasbehandlungsanlagen werden mittlerweile mit Wärmetauschersystemen ausgestattet, um die überschüssige Wärmemenge anderen Prozessen zuzuführen.

Wie zuvor beschrieben, besteht bei allen thermischen Behandlungstechniken die Möglichkeit, die überschüssige Wärme auszukoppeln und in bestehende Systeme einzubinden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die jeweilige Nutzungszeit der einzusetzenden Schwachgastechnik über einen längeren Zeitraum erfolgen kann.

ungefähre Methankonzentration in Vol.-%	Gaserfassung	techn. System	Behandlung/Nutzung
> 65 Vol.-% ~ 35 Vol.-% CH <sub>4</sub>	aktiv	BHKW Motor	Verstromung/Wärmenutzung
> 25 Vol.-% CH <sub>4</sub>	aktiv	Hochtemperaturfackel	Wärmenutzung
> 12 Vol.-% CH <sub>4</sub>	aktiv	Standardschwachgastechnologie	Wärmenutzung
> 3 Vol.-% CH <sub>4</sub>	aktiv	Floxverfahren	Wärmenutzung
< 1 Vol.-% CH <sub>4</sub>	aktiv	RTO - regenerative therm. Oxidation	Wärmenutzung
< 1 Vol.-% CH <sub>4</sub>	passiv	biologische Oberflächenoxidation nach BQS 7-3 < 0,5 l/m <sup>3</sup> *h	n.n.

Abbildung 5: Einsatzbereiche unterschiedlicher Technologien in Abhängigkeit der Methankonzentration

Von großer Relevanz ist hier die Nutzungs- bzw. Laufzeit der einzelnen Techniken, welche durch das Gasdargebot und der Gasqualität bestimmt werden (mögliche Amortisation der Anlagentechnik).

In einem ersten Förderprogramm wurde für das nachfolgende Beispiel im Jahr 2016 auf der Deponie Lisdorf/Saarland durch den Entsorgungsverband Saar (EVS ABW GmbH) eine Schwachgastechnik mit nachgeschalteter Wärmeauskopplung aufgestellt, welche seit 2017 erfolgreich betrieben wird.

#### 3.2 Schwachgastechnik bis 12 Vol.-% CH<sub>4</sub> am Bsp. der Deponie Lisdorf

Bei der installierten Anlage handelt es sich um eine Aktiventgasungsanlage, d. h. es wird mittels Förderaggregaten ein Unterdruck im Leitungssystem aufgebaut, der das Deponiegas in das installierte Fassungssystem saugt. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Gasförderstation zur Schwachgasbehandlung in Containerbauweise, mit einer Fördermenge von bis zu 250 m<sup>3</sup>/h und einer thermischen Leistung von 50 bis maximal 500 kW<sub>therm</sub>.



Abbildung 6: Schwachgasbehandlungsanlage mit Wärmeauskopplung

Die für eine weitere Nutzung der Überschusswärme relevante Wärmeauskopplung ist im Abgasstrom der Schwachgasbehandlungsanlage installiert. Der eigentlichen Wärmeübertragung (direkte Auskopplung der Wärme im Bereich der thermischen Behandlung des schwachmethanhaltigen Deponiegases) ist ein Wasserkreislauf nachgeschaltet. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Plattenwärmetauscher zur Systemtrennung mit Frostschutzmittel für den Wärmekreislauf. Direkt hier kann die Überschusswärme abgezogen werden.

### 3.3 Nachhaltige, dezentrale Nutzung der Überschusswärme

Im Zuge der damaligen Genehmigungsphase zur Errichtung der Schwachgasbehandlungsanlage wurde die Stadt Saarlouis auf dieses Projekt aufmerksam. In unmittelbarer Nähe der Deponie befinden sich unterschiedliche Wärmesenken, welche die bei der thermischen Behandlung des klimaschädlichen Deponiegases entstehende Überschusswärme sinnvoll nutzen könnten. Von der Prozesswärme könnte somit die nahegelegene Stadt Saarlouis profitieren. Die Stadt Saarlouis unterhält unterschiedliche Institutionen (u. a. drei benachbarte Grundschulen), an denen Wärme (Senken) benötigt wird. Infolge der zwar geringen, jedoch vorhandenen Entfernungen zwischen Wärmeproduktion und Wärmenutzung ist angedacht, mobile Wärmespeichersysteme einzusetzen.

Die Überschusswärme kann an der Schwachgasbehandlungsanlage aufgenommen und an eine Wärmesenke transportiert werden. Durch den Wechsel des Aggregatzustandes wird die freigesetzte Wärme der Wärmesenke zugeführt.



Abbildung 7: Wärmetransport – von der Quelle zur Wärmesenke

Das Amt für ökologische Stadtentwicklung der Stadt Saarlouis hat in einem zweiten Schritt, in enger Zusammenarbeit mit CDM Smith Consult GmbH, weitere Fördergelder für ein Leuchtturmprojekt/Antrag beim Projektträger Jülich (*ptj*) bewilligt bekommen.

Es wurde eine Projektskizze erstellt, um die nach der thermischen Behandlung vorhandene Wärmemenge nutzen zu können. Dies erfolgt durch einen weiteren Einsatz mittels eines mobilen Wärmespeichers (PCM Wärmespeicher). Dadurch wird klimaneutral die Überschusswärme bereitgestellt und an dezentrale Orte der Stadt Saarlouis geliefert.

### 3.3.1 Wärmesenke an der Grundschule Vogelsang

Am Beispiel der Grundschule Vogelsang wird die Abgabe der Wärme an der Wärmesenke dargestellt. Die notwendige Heizzentrale befindet sich hierbei im Untergeschoss des Gebäudes. Folgende Wärmemengen werden im Jahresmittel durchschnittlich benötigt:

#### Grundschule Vogelsang

- Jahresenergieeinsatz:  $630 \text{ MWh}_{\text{therm}}/\text{a}$
- Primärenergieträger: Fernwärme
- Entfernung von der Deponie: 6,9 km

Über eine Andockstation wird die produzierte Wärmemenge an externe Systeme abgegeben. Diese Anschlussäulen werden in das fest installierte Rohrleitungsnetz eingebunden. An dieser Stelle erfolgt die Übergabe der Wärme, von Wärmequelle zu Wärmespeicher sowie umgekehrt von Wärmespeicher zu Wärmesenke (Wärmeverbraucher).

### 3.3.2 Anforderungen an den mobilen Latentwärmespeicher

Nach längerer Recherche stellte sich heraus, dass gerade ein sog. Latentwärmespeicher ideal für den vorliegenden Anwendungsfall einsetzbar ist. Mit einem solchen System lassen sich große Wärmemengen transportierbar machen.

Bei einem Latentwärmespeicher wird zusätzlich zur sensiblen Wärmespeicherung (ohne Phasen-, also Aggregatzustandsänderung) die Wärme über einen Phasenwechsel des Mediums gespeichert. Der Phasenwechsel erfolgt hier von fest nach flüssig und umgekehrt. Der große Vorteil bei solchen Systemen ist, dass bei kleinen Temperaturunterschieden wesentlich mehr thermische Energie im Vergleich zu anderen Speichern erhalten werden kann, d. h. sie können in kleinen Temperaturintervallen große Mengen an Energie speichern.

Nach längerer Recherche am Wirtschaftsmarkt wurde die Fa. EnerSolve als ausgewiesener Experte für den Einsatz von thermischen Speichern für regenerative und rationelle Heizungstechnik gefunden. Weitere Anbieter solcher Materialien befinden sich noch im Versuchs- bzw. Aufbaustadium, so dass lediglich dieses Produkt in der Entwurfsplanung berücksichtigt werden konnte.

Der mittlere Wärmeverlust soll möglichst gering gehalten werden. Idealerweise entspricht bei einer geringen Wärmeabstrahlung über die Containerhülle die Außentemperatur des Containers der vorliegenden Umgebungstemperatur. Am Heck des Containers wird die Be- und Entladung über zwei Anschlüsse erfolgen und mit einem Wärmemengenzähler die Wärmemenge erfasst. Die beiden Anschlüsse sind leckagefreie Tankkupplungen aus der Flüssigtransportlogistik mit unterschiedlichen Durchmessern, um ein Vertauschen der Schlauchanschlüsse (Vor- und Rücklauf) zu verhindern.

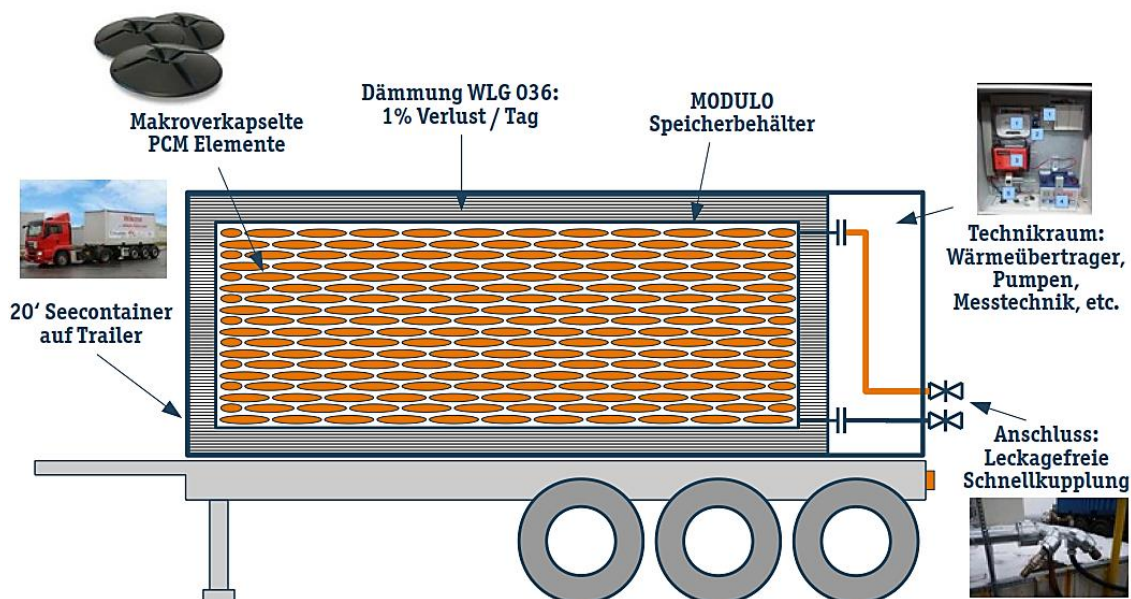


Abbildung 8: Aufbau des MODULO MOBILE (HEINZEN, 2017)

Das Material wird in einem mobilen Überseecontainer mit einem Raumvolumen von knapp 33,1 m<sup>3</sup> untergebracht.

Ein Hauptaugenmerk der weiteren Entwicklung des optimalen Einsatzes eines solchen Latentwärmespeichers wird auf die anzutreffenden Randbedingungen gelegt, welche einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die ökonomischen als auch ökologischen Bedingungen haben. In Abhängigkeit der Be- und Entladetemperaturen (Vor- und Rücklauf), des Bedarfes an Wärmemenge im Bereich der Wärmesenke als auch der Speicherkapazität des Speichers werden u. a. die Standzeiten bestimmt. Eine weitere Zielsetzung dieses Leuchtturmprojektes ist es, in wie weit solche Systeme wirtschaftlich betrieben werden können.

### 3.3.3 Projektstatus

Die baulichen Maßnahmen zum Projekt wurden im Oktober 2019 abgeschlossen. Es werden zurzeit drei mobile Containereinheiten im Einfahrbetrieb gefahren. Des Weiteren wurde die Heizzentrale der Grundschule im Hinblick einer optimalen Energieeinspeisung und -verteilung umfangreich umgebaut. Es wurde ein neues Energiemonitoring implementiert, um eine exakte Analyse der Energieströme zu ermöglichen und eine optimale Anbindung und Auslastung des Wärmespeichers an das vorhandene Heizungssystem zu gewährleisten.

In der jetzigen Einfahrphase der ersten Heizperiode wird sich zeigen, inwieweit noch Optimierungsbedarf bei der Speicherung der Überschusswärme und bei der Abgabe dieser Energie vorliegt.

### 3.3.4 Mögliche Betriebs- und Investitionskosten

Die Stadt Saarlouis hat drei mobile Wärmespeichersysteme aufbauen lassen. Die ungefähren Investitionskosten betragen knapp 480.000 € netto.

Bei diesem Projekt ist zu berücksichtigen, dass der Projektträger Jülich das Projekt mit einem Anteil von 80 % bezuschusst.

Wärmegestehungskosten	Wert					Einheit
Anzahl Zyklen*	200	300	400	500	600	Zyklen/a
Wärmearbeit im Jahr	1.020.000,00	1.530.000,00	2.040.000,00	2.550.000,00	3.060.000,00	kWh/a
Erlöse/Einsparung fossiler Brennstoff	61.200,00	91.800,00	122.400,00	153.000,00	183.600,00	€/a
Investitionskosten	9.600,00	9.600,00	9.600,00	9.600,00	9.600,00	€/a
Ladebezogene Betriebskosten	808,00	1.212,00	1.616,00	2.020,00	2.424,00	€/a
Wärmeeinkauf	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	€/a
Transportbezogene Betriebskosten	23.688,00	35.532,00	47.376,00	59.220,00	71.064,00	€/a
Kosten	34.096,00	46.344,00	58.592,00	70.840,00	83.088,00	€/a
<b>Gewinn/Verlust</b>	<b>27.104,00</b>	<b>45.456,00</b>	<b>63.808,00</b>	<b>82.160,00</b>	<b>100.512,00</b>	<b>€/a</b>
WGK Mobiler LWS	3,34	3,03	2,87	2,78	2,72	ct/kWh
Verkaufspreis	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	ct/kWh
Marge	4,66	4,97	5,13	5,22	5,28	ct/kWh

Abbildung 9: Wirtschaftlichkeitsberechnung zum jetzigen Zeitpunkt unter Berücksichtigung einer Förderquote von 80 %

Die nachfolgend aufgeführten Punkte sind wesentlich für die Wirtschaftlichkeit beim Einsatz eines mobilen Wärmespeichers:

- Ein möglicher Wärmeeinkauf sollte kostengünstig zwischen 0 bis 2 ct/kWh liegen (z. B. Abwärme aus industriellen Anlagen oder Biogasanlagen) – in dem vorliegenden Projekt wird die Überschusswärme ohne Kosten durch den EVS ABW der Stadt Saarlouis zur Verfügung gestellt;
- Eine optimale Kombination wäre der technische Einsatz bei Verbrauchern (Wärmesenken), die ganzjährig einen Wärmebedarf aufweisen und wo die untere Prozesstemperatur (im Rücklauf) unter 50°C liegt;
- Eine erste Wirtschaftlichkeit kann auch schon bei 200 Zyklen pro Jahr erreicht werden; sicherlich ist es jedoch besser mehr Be- und Entladezyklen zu fahren;
- Grundsätzlich kann auch der KWK Bonus für diese Anwendung beantragt werden; im vorliegenden Projekt erfolgt jedoch eine Förderung.

Detaillierte Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit erfolgen noch im Zuge der Optimierung des Einsatzes der drei mobilen Wärmespeicher an zwei ausgewählten Wärmesenken.

#### 4 Theoretisches Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>(eq) der Gesamtmaßnahmen

Neben der kostengünstigen Umsetzung des Projektes gilt es, ein hohes Einsparpotenzial an klimaschädlichen Treibhausgasen – bestimmt als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, CO<sub>2</sub>(eq) – darzustellen. In einem ersten Schritt wird die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub>(eq) bei den jetzigen Energieträgern in den Wärmesenken, bezogen auf Erdgas und Fernwärme, berücksichtigt (Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger).

Des Weiteren wird anhand der Be- und Entladezyklen sowie der abgenommenen Wärmemenge an der Wärmesenke die eingesparte Gesamtmenge an CO<sub>2</sub>-Äquivalente ermittelt.

Primärenergieträger	Wärmeumsatz/ Stunde-kWh/h	Gesamtmenge CO <sub>2</sub> (eq) inkl. Vorkette kg/h	Jahreswärme- umsatz kWh/Jahr	Gesamtmenge CO <sub>2</sub> (eq) inkl. Vorkette to/a
<b>Fernwärme</b>	<b>68</b>	<b>4,3</b>	<b>198.250</b>	<b>38</b>

Abbildung 10: Bestimmung der CO<sub>2</sub>(eq) bezogen auf den Primärenergieträger am Standort der Grundschule Vogelwiese – Stadt Saarlouis



Aus der Tabelle (Abbildung 10) ergibt sich für die Grundschule Vogelsang unter Berücksichtigung einer Teilabnahme der Wärme ein Einsparpotenzial von knapp 38 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr. Hierbei wurden auch die beim An- und Abtransport entstehenden CO<sub>2</sub>-Äquivalente berücksichtigt.

#### 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 ergibt sich eine zusätzliche Treibhausgasminimierung, da das CO<sub>2</sub>-Äquivalent für Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren bei einem Faktor 25 bis 28 liegt. Das bedeutet, dass ein Kilogramm Methan innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 25 bis 28-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie ein Kilogramm CO<sub>2</sub>. Da dieses Methan jedoch gar nicht in die Umwelt gelangt, sondern direkt zu Kohlendioxid umgewandelt wird, hat es keinen negativen Einfluss auf die Atmosphäre.

Über die eigentliche *in-situ*-Stabilisierungsmaßnahme der Deponie Lisdorf kommen noch weitere eingesparte 6.000 Mg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr hinzu, durch gezielten Luftsauerstoffeintrag über den Gesamtzeitraum der Maßnahmen.

#### Literatur

- [1] Literatur Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“ vom 5. Dezember 2019
- [2] Heyer, K.-U., Hupe, K., Stegmann, R. Modifizierte Ansätze zur Quantifizierung der Methanemissionen von Siedlungsabfalldéponien – Ergebnisse eines UFOPLAN-Vorhabens, Beitrag zur Deponietechnik 2018, Seite 299 u. f.; ISBN 978-3-9817572-7-9, 2018
- [3] BMUB (Hrsg.), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2011, Umweltbundesamt 08/2013, Seite 607 und folgend, 2013
- [4] Ansatz für die Schätzung der luftseitigen Deponieemissionen für das E-PRTR, Umweltbundesamt, FG III 3.3, Wolfgang Butz, März 2006, Grundlagen zur Ermittlung der Methanemission nach der FOD - Methode
- [5] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5 Waste, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp> und die daraus erstellte Auswertung (Excel-format)