

## Kritische Faktoren für die Klimarelevanz von Deponierückbauprojekten

David Laner, Johann Fellner, Niclas Svensson und Joakim Krook

1.	Einleitung .....	538
2.	Material und Methoden .....	538
2.1.	Einflussfaktoren und Datensätze.....	539
2.2.	Ökobilanz und Sensitivitätsanalyse .....	541
3.	Ergebnisse .....	542
4.	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	545
5.	Literatur.....	546

Im Rahmen der gegenständlichen Studie wurden wesentliche Faktoren für die Klima-bilanz des Rückbaus von Siedlungsabfalldeponien bestimmt und ihre jeweilige Bedeutung quantitativ untersucht. Zunächst wurden acht Faktoren identifiziert, die sich jeweils auf Unterschiede in den Standort-, den Projekt- oder den Systembedingungen für Deponierückbauprojekte beziehen. Anhand eines Ökobilanzmodells wurden anschließend die Netto-Beiträge zum Ausstoß an Treibhausgasen – Treibhauspotential über hundert Jahre – für insgesamt 2.916 Szenarien, die die Grundlage für die Beurteilung des Einflusses der Faktoren auf die Klimabilanz des Deponierückbaues bildeten, ermittelt. Basierend auf Sensitivitätsanalysen zeigte sich, dass der Rückbau von Siedlungsabfalldeponien vor allem dann einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leistet, wenn die deponierten Abfälle noch einen relevanten Anteil abbaubarer Kohlenstoffverbindungen enthalten und das Deponiegas derzeit nicht oder unvollständig erfasst und behandelt wird. Außerdem ist es aus Klimaperspektive erstrebenswert, möglichst weitgehende Aufbereitungstechnologien beim Deponierückbau einzusetzen, um die Rückgewinnung von Metallen und die energetische Verwertung heizwertreicher Fraktionen zu maximieren. Der größte Nutzen aus der energetischen Verwertung ergibt sich in Situationen, in denen der produzierte Strom und die produzierte Wärme in Systeme abgegeben werden, die zu einem großen Anteil durch fossile Energieträger gespeist werden. Die Erkenntnisse aus der Arbeit leisten einen wesentlichen Beitrag zur Prospektion und Implementierung klimafreundlicher Deponierückbauprojekte.

## 1. Einleitung

In Europa gibt es hunderttausende geschlossene Siedlungsabfalldeponien, die mit langfristigen Umweltauswirkungen bzw. langen Nachsorgezeiträumen und entsprechenden Landnutzungseinschränkungen verbunden sind [17]. Der Rückbau von Deponien ist eine Möglichkeit zur Vermeidung negativer Umweltauswirkungen von Altdeponien und zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus den abgelagerten Abfällen. Obwohl Deponierückbauprojekte in der Vergangenheit primär unter den Aspekten des vorsorgenden Grundwasserschutzes sowie der Sicherung ausreichender Deponievolumina durchgeführt wurden (vgl. [13]), wurde in den letzten Jahren die Sicht der Deponie als Quelle für wertvolle Rohstoffe verstärkt in den Vordergrund gerückt (z.B. [7, 12, 18]). Neben technologischen Entwicklungen, bedarf es für die intensivierete Rückgewinnung von Rohstoffen aus Deponien auch der Diskussion und Anpassung politischer und rechtlicher Bedingungen in Bezug auf den Deponierückbau. Das betrifft Initiativen auf strategischer Ebene, z.B. stärkere Selbst-Versorgung mit kritischen Rohstoffen, genauso wie konkrete Fragestellungen im Rahmen des Abfallrechts, z.B. Deponieabgabenbefreiung für Sortierrückstände aus Deponierückbauprojekten (vgl. [8]). Da der Klimaschutz ein prioritäres gesellschaftliches Ziel ist, ist der potentielle Beitrag von Deponierückbauprojekten zur Abschwächung der globalen Erwärmung wesentlich für die Förderung entsprechender Initiativen.

Bisher wurde der Beitrag des Deponierückbaus zum Klimaschutz ausschließlich im Rahmen spezifischer Fallstudien bewertet, die unterschiedliche Ergebnisse lieferten. Während einige Studien zu dem Ergebnis kommen, dass der Rückbau von Deponien zu Einsparungen an Treibhausgasen gegenüber der normalen Bewirtschaftung führt (vgl. [3, 6]), stellt der Deponierückbau in anderen Fällen eine Netto-Belastung hinsichtlich des Beitrags zur globalen Erwärmung dar (vgl. [2, 19]). Dadurch wird deutlich wie komplex sich Deponierückbauprojekte gestalten können und welche Rolle dabei die jeweiligen Randbedingungen spielen. Für eine belastbare Bewertung des Beitrages des Deponierückbaus zum Klimaschutz ist es notwendig, ein systematisches Verständnis des Einflusses unterschiedlicher Faktoren und ihrer Interaktionen auf das Ergebnis zu erlangen. Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, eine generische Grundlage zur Beurteilung des Beitrages unterschiedlicher Faktoren zur Klimabilanz von Deponierückbauprojekten zu schaffen. Dazu wird ein innovativer Modellierungsansatz gewählt, der die Ausprägung unterschiedlicher Faktoren anhand von konkreten Datensätzen abbildet und den Einfluss ihrer Variation auf das Ergebnis der Ökobilanz im Rahmen einer globalen Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Studie bezieht sich vordergründig auf (geschlossene) Siedlungsabfalldeponien in Europa, die nach dem Stand der Technik bewirtschaftet werden. Die Bewertungsergebnisse dienen schließlich dazu, Empfehlungen bezüglich der Förderung klimafreundlicher Deponierückbauprojekte abzugeben.

## 2. Material und Methoden

Der Modellierungsansatz zur Untersuchung der Bedeutung unterschiedlicher Faktoren in Bezug auf den Beitrag von Deponierückbauprojekten zur globalen Erwärmung ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Anhand bestehender Studien [2, 3, 5, 6, 9, 19] können

acht Faktoren identifiziert werden, die im Rahmen früherer Bewertungen betrachtet wurden und einen relevanten Einfluss auf das Treibhauspotential des Deponierückbaus hatten. Je nach Faktor werden zwei bis drei unterschiedliche Ausprägungen anhand konkreter Datensätze definiert, wobei diese jeweils eine realistische Bandbreite abbilden. Die Faktoren werden im Rahmen einer Ökobilanz miteinander in Form von Szenarien verknüpft und der Beitrag zur globalen Erwärmung anhand des Treibhauspotentials (THP<sub>100</sub>) ermittelt. Jedes Szenario stellt eine einzigartige Kombination der unterschiedlichen Faktor-Ausprägungen dar, was in Summe in 2.916 Szenarien resultiert (vgl. Bild 1). Anhand von globalen Sensitivitätsanalysen wird anschließend der Effekt der Variation bestimmter Faktoren auf die Szenarioergebnisse untersucht. Dadurch können kritische Faktoren für die Klimabilanz des Deponierückbaus identifiziert und ihre Bedeutung quantifiziert werden. Für eine detailliertere Beschreibung des methodischen Ansatzes wird auf Laner et al. [14] verwiesen.

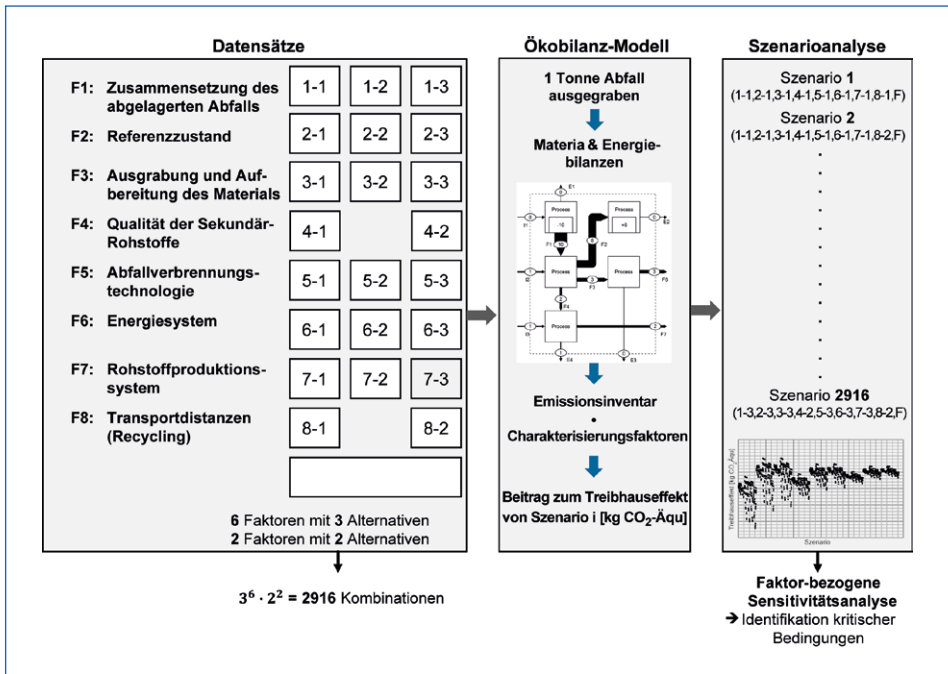


Bild 1: Modellansatz zur Untersuchung der Bedeutung spezifischer Faktoren für die Klimabilanz von Deponierückbauprojekten

adaptiert nach Laner, D.; Cencic, O.; Svensson, N.; Krook, J.: Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining. Environmental Science & Technology, 2016

## 2.1. Einflussfaktoren und Datensätze

Jeder der acht Faktoren in Tabelle 1 besteht aus einem Satz an Modellparametern, die im Rahmen der alternativen Datensätze variiert werden (für Details zu den Datensätzen siehe [14]). Zwei der Faktoren sind deponiespezifisch und betreffen die Zusammensetzung

des abgelagerten Abfalls (F1) sowie den Referenzzustand (F2) bezüglich der aktuellen und zukünftigen Bewirtschaftung der Deponie – vor allem Deponiegasfassung und -behandlung und weitere Nachsorgemaßnahmen. Die Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle ist von zentraler Bedeutung, einerseits, für die potentiell verfügbare Menge an Wertstoffen und, andererseits, für das verbliebene Potential zur Bildung von Deponiegas, das je nach Bewirtschaftung im Fall des Nicht-Rückbaus (= Referenzzustand), zum Teil freigesetzt und zum Teil oxidiert bzw. verwertet wird. Die Variation der Zusammensetzung beruht auf Feldstudien zahlreicher Siedlungsabfalldeponien, die anhand von drei alternativen Datensätzen zusammengefasst werden. Die Variation des Referenzzustandes in Bezug auf Deponiegasmanagement deckt die Praxis in Europa ab und reicht von keiner aktiven Deponiegasbewirtschaftung (F2-1) bis zu aktiver Gasfassung und anschließender Verwertung in einem Blockheizkraftwerk (F2-3). Faktor 3 (Extraktion und Aufbereitung) bezieht sich auf die Realisierung des Deponierückbauprojektes und repräsentiert das Niveau der Aufbereitung des ausgegrabenen Materials in Bezug auf das Ausbringen von Wertstofffraktionen und die Abscheidung von Störstoffen. Die Effizienz der Aufbereitung wird für jede Materialfraktion (11 Fraktionen) in Abhängigkeit der jeweiligen Technologie festgelegt. So variieren beispielsweise die Abscheidegrade für Eisen von 45 % (F3-1, mobile Sortieranlage) über 70 % (stationäre Anlage) bis zu 90 % (potentiell mögliche Sortiertiefe). Die verbleibenden Faktoren betreffen die systemische Ebene, da sie nicht direkt durch das Deponierückbauprojekt bestimmt werden, sondern externe Gegebenheiten (z.B. Energiesystem, Rohstoffproduktionssystem, durchschnittliche Transportdistanzen usw.) darstellen. Faktor 4 bildet den Markt für Sekundärrohstoffe und das damit in Verbindung stehende Substitutionspotential von Primärrohstoffen durch die Wertstoffrückgewinnung ab. Aufgrund der Schwankungsbreite in der Literatur wird hier lediglich zwischen niedrigem (Substitutionsfaktoren 0,2 bis 0,6) und hohem (Substitutionsfaktoren 0,6 bis 1,0) Sekundärrohstoffpotential unterschieden. Faktor 5 behandelt die Effizienz der Abfallverbrennung und geht in allen drei Fällen von einer Rostfeuerung mit jeweils unterschiedlicher Auskoppelung von Wärme und Strom aus. Basierend auf Daten zu europäischen Rostfeuerungsanlagen [15] werden Datensätze für niedrige, mittlere und hohe Effizienz der energetischen Verwertung definiert. Faktor 6 betrifft das Energiesystem in dem das Rückbauprojekt angesiedelt ist und unterscheidet Systeme mit hohem Anteil fossiler Energieträger, einen europäischen Durchschnitt und Systeme mit vorwiegend erneuerbaren Energieträgern basierend auf Datensätzen der ecoinvent Datenbank [4]. Unterschiedliche Materialproduktionssysteme werden durch Faktor 7 abgebildet, der auf Daten zum Treibhauspotential von primären und sekundären Produktionsprozessen beruht [1]. Der letzte Faktor steht in Zusammenhang mit durchschnittlichen Transportdistanzen im Zuge der Verwertung der Wertstoffe sowie zur Entsorgung von Reststoffen. Hier wird ebenfalls nur zwischen einem Datensatz mit kurzen (typisch für mitteleuropäische Verhältnisse) und einem Datensatz mit langen (typisch für z.B. Schweden) Distanzen unterschieden.

Tabelle 1: Relevante Faktoren (inkl. Ausprägungsalternativen) für die Klimabilanz des Deponierückbaus

Faktor	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
F1: Abfallzusammensetzung	<i>Reiche</i> Deponie mit höherem organischem Anteil	Durchschnittl. (Alt-)Deponie	<i>Arme</i> Deponie mit niedrigem organischem Anteil
F2: Referenzzustand	Kein Gasmanagement	Gasfassung u. Oxidation	Gasfassung u. Verwertung
F3: Extraktion und Aufbereitung	Mobile Sortieranlage	Stationäre Sortieranlage	Max. mögliche Sortiertiefe (Potential)
F4: Sekundärrohstoffpotential	Niedrig	–	Hoch
F5: Verbrennungstechnologie	Abfallverbrennung: niedrige Effizienz, nur Strom	Abfallverbrennung: durchschn. Effizienz, Strom und Wärme	Abfallverbrennung: hohe Effizienz, Strom und Wärme
F6: Energiesystem	Hoher Anteil fossiler Energieträger	Europäischer Durchschnitt	Hoher Anteil erneuerbarer Energieträger
F7: Materialproduktions-system	Wenig effizient und hoher Anteil Fossiler	Durchschnittl. Produktionsmix	Hoch effizient und niedriger Anteil Fossiler
F8: Transportdistanzen für Sekundärrohstoffe	Kurz	–	Lang

## 2.2. Ökobilanz und Sensitivitätsanalyse

Der Beitrag eines Deponierückbauprojektes zum Treibhauspotential wird für die funktionale Einheit von einer Tonne ausgegrabenem Abfall ermittelt. Im Rahmen des Ökobilanzmodells wird anhand von Energie- und Materialbilanzen ermittelt, wie sich die ausgegrabenen Abfallfraktionen (insgesamt werden 11 Fraktionen unterschieden) auf die unterschiedlichen Outputflüsse verteilen. Durch die Erzeugung von Produkten aus dem deponierten Material kommt es zu Gutschriften, da diese Primärprodukte bzw. alternative Strom- und Wärmeproduktion ersetzen. Neben direkten Emissionen an Treibhausgasen (vor allem Methan) stellen der Verbrauch von Energie und Materialien zur Ausgrabung, Aufbereitung, Transport und Verarbeitung der Materialien Belastungen für das Deponierückbauprojekt dar. Die treibhausrelevanten Emissionen werden auch für den Referenzzustand (= Nicht-Rückbau der Deponie) bilanziert und schließlich von den Emissionen des Deponierückbaus in Abzug gebracht. Der Beitrag eines Deponierückbauprojektes zur globalen Erwärmung wird durch das Treibhauspotential (über 100 Jahre,  $THP_{100}$ ) ausgedrückt und kann positiv (Netto-Emission an Treibhausgasen) oder negativ (Netto-Einsparung von Treibhausgasen) sein.

Direkte Emissionen im Rahmen des Deponierückbaus bzw. im Falle des Nicht-Rückbaus (Referenzzustand) stehen primär mit der Produktion und Freisetzung von Deponiegas (davon Methan) in Zusammenhang. Das Deponiegaspotential des abgelagerten Abfalls sowie des re-deponierten ausgegrabenen Abfalls (= Feinfraktion) wird basierend auf der jeweiligen Abfallzusammensetzung bzw. dem Gehalt an abbaubarem organischen

Kohlenstoff entsprechend der Default-Werte der IPCC-Methode zur Erstellung von Treibhausgasinventaren [11] berechnet. Das produzierte Deponiegas besteht aus 50 % CO<sub>2</sub> und 50 % CH<sub>4</sub> (bezogen auf Volumen). Spurengase werden in der Bilanzierung vernachlässigt und CO<sub>2</sub> aus der Mineralisierung organischer Substanz wird, gemäß Empfehlung des IPCC, als klimaneutral betrachtet (THP<sub>100</sub> = 0). Das produzierte CH<sub>4</sub> wird zum Teil in der Oberflächenabdeckung oxidiert (Oxidationsrate von 20 % für geschlossene Deponien) und der freigesetzte Anteil wird anhand des Charakterisierungsfaktors von 28 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kg CH<sub>4</sub> für die Berechnung des Treibhauspotentials herangezogen (vgl. [10]).

Zur Analyse des Effektes der Variation unterschiedlicher Faktoren auf das Treibhauspotential wird eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt [16]. Für den Datensatz der 2916 Szenarioergebnisse wird untersucht, wie sich die Wahl unterschiedlicher Datensätze für einen Faktor, direkt und in Verbindung mit der Variation anderer Faktoren, auf die Szenarioergebnisse auswirkt. Die Sensitivität des Ergebnisses in Bezug auf die Änderung eines bestimmten Faktors wird durch Varianz-basierte Sensitivitätsindizes ausgedrückt. Der Sensitivitätsindex 1. Ordnung (S<sub>i</sub>) gibt die direkten Effekte der Änderung eines Faktors auf das Ergebnis an und wird entsprechend Gleichung 1 berechnet. F<sub>i</sub> ist Faktor i, F<sub>-i</sub> sind alle Faktoren außer F<sub>i</sub>, Y ist das Modellergebnis, E<sub>F<sub>-i</sub></sub> ist der Erwartungswert des Ergebnisses über alle möglichen Realisierungen von F<sub>-i</sub> bei fixem F<sub>i</sub>. V<sub>F<sub>i</sub></sub> ist die Varianz der Erwartungswerte der verschiedenen Alternativen von Faktor i, die durch die gesamte Varianz über alle Ergebnisse, V(Y), dividiert wird. Der Zähler in Gleichung 1 kann als die Reduktion der Ergebnisvarianz interpretiert werden, die durch die Fixierung von Faktor i erreicht wird (groß: Variation in Faktor i hatten einen großen direkten Effekt auf das Ergebnis, klein: Variation in Faktor i hatten einen kleinen direkten Effekt auf das Ergebnis).

$$S_i = \frac{(V_{F_i}(E_{F_{-i}}(Y|F_i)))}{V(Y)} \quad (1)$$

Der Gesamt-Sensitivitätsindex (S<sub>Ti</sub>) gibt die direkten Effekte und Interaktionseffekte der Änderung eines bestimmten Faktors auf das Ergebnis an. In der Berechnungsformel in Gleichung 2 entspricht der Zähler dem Effekt 1. Ordnung von F<sub>-i</sub> (also die erwartete Reduktion in der Ergebnisvarianz, wenn alle Faktoren außer Faktor i fixiert werden können), sodass die Subtraktion dieses Terms von der Gesamtvarianz über alle Ergebnisse den Beitrag aller möglichen Kombinationen von Faktor i zur Ergebnisvarianz ergeben. Durch die Subtraktion von S<sub>i</sub> von S<sub>Ti</sub> kann der Sensitivitätsindex aufgrund von Interaktionseffekten, S<sub>Hi</sub>, (S<sub>Hi</sub> = S<sub>Ti</sub> - S<sub>i</sub>) ermittelt werden, der die Effekte höherer Ordnung der Faktorvariation auf das Ergebnis ausdrückt.

$$S_{T_i} = 1 - \frac{(V_{E_{F_{-i}}}(E_{F_i}(Y|F_{-i})))}{V(Y)} \quad (2)$$

### 3. Ergebnisse

Der Mittelwert über alle Szenarioergebnisse ergibt eine geringfügige Einsparung an Treibhausgasen von -80 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne ausgegrabenen Abfall gegenüber der Aufrechterhaltung des Status Quo. Insgesamt kommt es in 50 % der Szenarien zu

Netto-Einsparungen an Treibhausgasen und in 50 % der Szenarien zu Netto-Emissionen. Die gegenständliche Analyse zielt jedoch nicht auf die Bestimmung des mittleren Beitrags eines (generischen) Deponierückbauprojekts zur globalen Erwärmung ab, sondern hat das Ziel die beobachtete Streuung der Szenarioergebnisse durch die Variation verschiedener Einflussfaktoren zu erklären. Dementsprechend steht hier der Schwankungsbereich der Szenarioergebnisse im Mittelpunkt, der von einer Einsparung von -1.550 bis zu einer zusätzlichen Belastung von 640 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne ausgegrabenen Abfall reicht (vgl. Extremwerte in Bild 2).

Die Ergebnisse der Varianz-basierten Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 2 für die acht untersuchten Faktoren dargestellt. Die drei Faktoren mit den größten Gesamteffekten auf das Ergebnis sind der Referenzzustand (F2 trägt 38 % zum Gesamteffekt bei), das Hintergrund-Energiesystem (Beitrag von F6: 24 %) und die Zusammensetzung des abgelagerten Abfalls (Beitrag von F1: 16 %). Eine Änderung des Referenzzustands (= alternative Deponiebetreuung im Falle des Nicht-Rückbaus) wirkt sich vorwiegend direkt (also nicht in Interaktion mit anderen Faktoren) auf das Ergebnis aus, was vorwiegend an den direkten Methanemissionen liegt, die in die Treibhausgasbilanz (als Einsparungen) eingehen und nicht mit anderen Faktoren in Zusammenhang stehen. Dagegen hat die Variation des Energiesystems sowohl einen maßgeblichen direkten als auch Interaktionseffekt auf das Ergebnis, was die Bedeutung des Energiesystems für sich (Konsum/Produktion von Strom und Wärme) und in Zusammenhang mit der Variation anderer Faktoren (z.B. unterschiedliche Aufbereitung und Ausbringung heizwertreicher Fraktionen) unterstreicht. Änderungen bei der Abfallzusammensetzung wirken sich dagegen primär in Verbindung mit anderen Faktoren auf das Treibhauspotential aus. So hängen beispielsweise Einsparungen/Belastungen durch den Gehalt an heizwertreichen Materialien im Abfall auch von der Aufbereitungstechnologie (F3), der Abfallverbrennungstechnologie (F5), sowie dem Energiesystem im Hintergrund (F6) ab.

Tabelle 2: Varianz-basierte Sensitivitätsindizes zur Abbildung des direkten Effekts ( $S_i$ ), des Interaktionseffekts ( $S_{Hi}$ ), sowie des Gesamteffekts ( $S_{Ti}$ ) der Änderung von Faktor i auf die Szenarioergebnisse (Aufgrund von Doppelzählungen kann  $\sum S_{Ti}$  größer 1 sein)

Faktor	$S_i$ (direkter Effekt)	$S_{Hi}$ (Interaktionseffekt)	$S_{Ti}$ (Gesamteffekt)
F2 Referenzzustand	0,45	0,06	0,51
F6 Energiesystem	0,15	0,17	0,32
F1 Zusammensetzung des abgelagerten Abfalls	0,02	0,19	0,21
F5 Abfallverbrennungstechnologie	0,05	0,09	0,14
F3 Ausgrabung und Aufbereitung des Materials	0,02	0,09	0,11
F4 Qualität der Sekundärrohstoffe	0,03	0,01	0,04
F7 Rohstoffproduktionssystem	0,01	0,01	0,02
F8 Transportdistanzen (Recycling)	0,00	0,00	0,00
<b>Summe</b>	<b>0,72</b>	<b>0,62</b>	<b>1,34</b>

Die drei wichtigsten Faktoren (F2, F6, F1) erklären etwa 77 % der Effekte ((0,51+0,32+0,21)/1,34) aufgrund von Faktorvariationen auf das Ergebnis. Außerdem können 10 % der Gesamteffekte auf die Variation der Effizienz der Abfallverbrennung

(F5) und etwa 8 % auf die gewählte Sortiertechnologie zur Aufbereitung des ausgegrabenen Materials im Rahmen des Projekts (F3) zurückgeführt werden. Die verbleibenden Faktoren spielen eine untergeordnete Rolle und erklären nur knapp 5 % der Faktoreffekte auf das Ergebnis, wobei die Qualität der Sekundärrohstoffe (F4) wichtiger ist als das Rohstoffproduktionssystem im Hintergrund (F7) und die Transportdistanzen im Zuge des Recyclings (F8) praktisch keine Rolle für das Treibhauspotential des Deponierückbaus spielen.

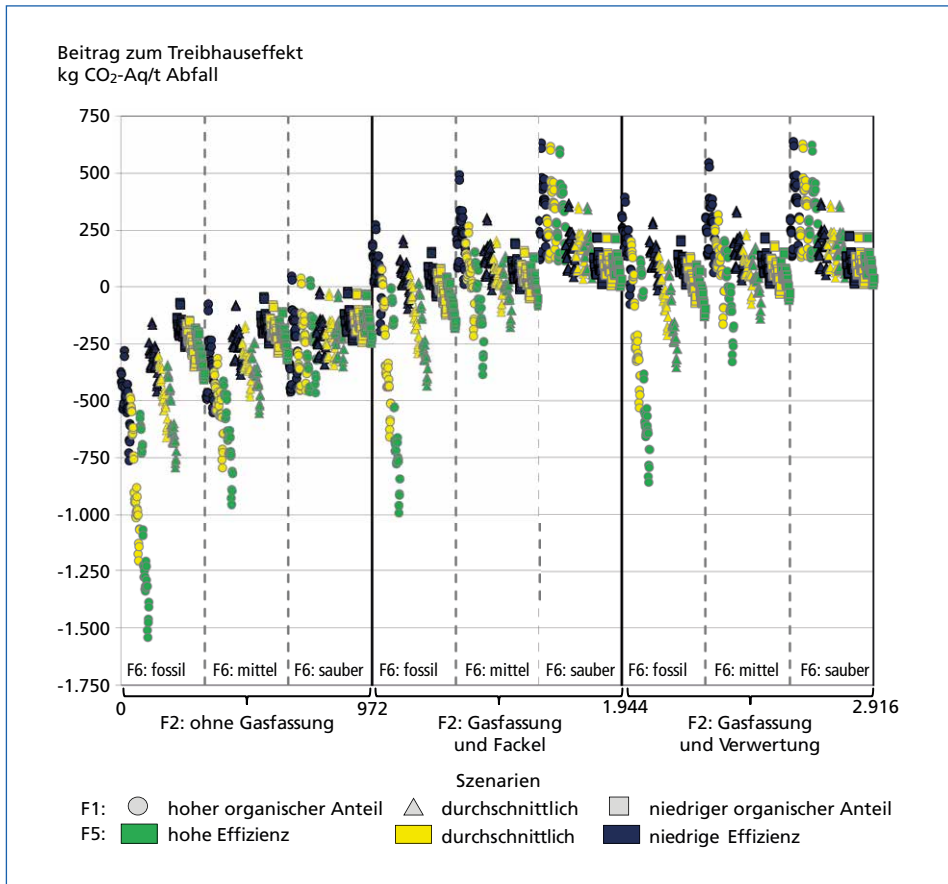


Bild 2: Szenarioergebnisse gruppiert nach den vier wichtigsten Faktoren (größter Gesamteffekt), die insgesamt fast 90 % der beobachteten Streuung der Szenarioergebnisse erklären: F2 – Referenzzustand, F6 – Energiesystem, F1 – Abfallzusammensetzung, F5 – Verbrennungstechnologie

adaptiert nach Laner, D.; Cencic, O.; Svensson, N.; Krook, J.: Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining. Environmental Science & Technology, 2016

In Bild 2 sind die Szenarioergebnisse entsprechend der vier wichtigsten Faktoren (vgl. Tabelle 2) gruppiert. Daraus ist ersichtlich, dass je nachdem ob im Referenzzustand (F2) eine Gasfassung erfolgt oder nicht, große Unterschiede in den Szenarioergebnissen



zu beobachten sind. Im Fall keiner Fassung und Behandlung von Deponiegas im Referenzzustand, besteht ein großes Potential für Treibhausgaseinsparungen durch den Deponierückbau und in den meisten Fällen kommt es zu Netto-Einsparungen (linkes Drittel in Bild 2). Die absolut größten Einsparungen treten für Szenarien auf, die Deponien mit hohem organischen Anteil (Kreise in Bild 2) in Regionen mit fossil dominiertem Energiesystem (linkes Unter-Drittel im linken Drittel in Bild 2) und unter Anwendung hoch effizienter Verbrennungsanlagen (grüne Symbole in Bild 2) repräsentieren. Sofern eine Deponiegasfassung im Referenzzustand vorhanden ist, führt Deponierückbau generell zu geringeren Treibhausgaseinsparungen bzw. in vielen Fällen auch zu Netto-Emissionen (mittleres und rechtes Drittel in Bild 2). Besonders problematisch sind in diesem Zusammenhang Deponierückbauprojekte, die von einer Deponie mit hohem organischen Anteil ausgehen und in einem Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieträger angesiedelt sind. Generell gilt, dass ein Deponierückbauprojekt in einem *sauberen* Hintergrundenergiesystem nur dann zu Netto-Einsparungen an Treibhausgasen führt, wenn die Deponie im Referenzzustand keine Gasfassung besitzt. In Bezug auf die Zusammensetzung des abgelagerten Abfalls lässt sich beobachten, dass diese wesentlich für die Streuung der Szenarioergebnisse ist. So erzielen Szenarien, die von einer Deponie mit hohem organischen Anteil ausgehen die höchsten Einsparungen und auch die höchsten Belastungen. Einerseits liegt das an den hohen potentiellen Einsparungen durch die Rückgewinnung von Materialien und die vermiedenen Emissionen im Referenzzustand. Andererseits verursachen die relativ hohen fossilen Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung im Fall eines sauberen Hintergrundenergiesystems zusätzliche Emissionen. Szenarien, die von Deponien mit niedrigeren organischen Anteilen und niedrigeren Wertstoffgehalten (repräsentativ für ältere Siedlungsabfalldeponien mit bereits gut abgebautem organischen Material), streuen hingegen viel weniger und führen in manchen Fällen zu moderaten Netto-Einsparungen bzw. Netto-Belastungen. Dementsprechend stellt der Rückbau alter Deponien mit bereits gut abgebautem organischen Material kein großes Potential für Netto-Einsparungen an Treibhausgasen dar.

## 4. Diskussion und Schlussfolgerungen

In Übereinstimmung mit der Literatur zeigte die Analyse im Rahmen der gegenwärtigen Studie, dass der Beitrag zum Treibhauspotential je nach Deponierückbauprojekt stark schwankt. Um möglichst klimafreundliche Strategien für den intensivierten Rückbau von Deponien zu entwickeln ist es daher notwendig, die treibenden Faktoren für die Klimarelevanz von Deponierückbauprojekten zu identifizieren und Empfehlungen abzugeben, die zur Entwicklung möglichst klimaschonender Projekte führen. Obwohl in der Vergangenheit Deponierückbauprojekte nicht primär aufgrund ihrer klimatischen Auswirkungen, sondern eher aufgrund von Aspekten des (vorsorgenden) Grundwasserschutzes, des Landnutzungsdrucks oder der Schaffung neuen Deponieraums durchgeführt wurden, kann ihr potentieller Beitrag zum Klimaschutz einen weiteren Anreiz für die Rückgewinnung und Verwertung von Materialien aus Deponien darstellen. In bestimmten Fällen ist jedoch davon auszugehen, dass die potentiellen Einsparungen

an Treibhausgasen keinen bedeutenden Treiber für den Deponierückbau darstellen. So spielen Treibhausgase beispielsweise bei der Sanierung von alten Deponien mit bereits gut abgebauten Abfällen (mit geringem Restgasbildungspotential) eine untergeordnete Rolle. Aus Klimasicht sollten daher vordergründig Deponien für Rückbauprojekte ausgewählt werden, die noch einen relevanten Anteil abbaubarer Kohlenstoffverbindungen enthalten und bei denen das Deponiegas derzeit nicht oder unvollständig erfasst und behandelt wird. Sofern eine Deponiegasfassung vorhanden ist, können Rückbauprojekte ebenfalls mit Einsparungen an Treibhausgasen verbunden sein. Eine besondere Herausforderung stellt die Entwicklung von Deponierückbauprojekten in Regionen mit Energiesystemen dar, die einen großen Anteil erneuerbarer Energieträger besitzen, dar. In solchen Regionen kommt es praktisch fast nur dann zu Einsparungen an Treibhausgasen, wenn eine Deponie rückgebaut wird, die im Referenzzustand über kein Gasmanagement verfügt. Abgesehen von wesentlichen Standortbedingungen, sollten Deponierückbauprojekte grundsätzlich unter Anwendung möglichst weitgehender Sortier- und Aufbereitungstechnologie umgesetzt werden. Während der höhere Energieverbrauch in Bezug auf die Rückgewinnung von Metallen aus Klimasicht immer gerechtfertigt ist, verhält es sich in Bezug auf die maximale Ausbringung von Ersatzbrennstoffen differenzierter. In Regionen mit sauberem Hintergrund-Energiesystem führt die gesteigerte Verbrennung heizwertreicher Abfälle mit hohen fossilen Anteilen gegebenenfalls zu Netto-Emissionen an Treibhausgasen. In jedem Fall gilt jedoch, dass je effizienter die energetische Verwertung erfolgt, desto größer sind auch die positiven Effekte in Bezug auf die Klimabilanz. Daher wären in Regionen mit einer heterogenen Abfallverbrennungsinfrastruktur, Deponierückbauprojekte im Einzugsgebiet hoch effizienter Anlagen grundsätzlich zu priorisieren.

Die gegenständliche Studie lieferte Erkenntnisse, die es ermöglichen generische Rahmenbedingungen zu definieren, unter denen Deponierückbauprojekte einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die jeweilige Bedeutung unterschiedlicher Faktoren für die Prospektion potentiell attraktiver Deponierückbauprojekte wurde analysiert und könnte in Zukunft als Entscheidungshilfe bei der Identifikation von (aus Klimaperspektive) vielversprechenden Projekten dienen. Neben der quantitativen Analyse von Leitfaktoren für die Auswahl von Deponierückbauprojekten, konnten aus den Ergebnissen der Studie auch Folgerungen für die möglichst klimafreundliche Umsetzung von Rückbauprojekten abgeleitet werden. Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen, gilt es in Zukunft kritische Parameter bei der Implementierung von Deponierückbauprojekten unter jeweils (gegebenen) unterschiedlichen Randbedingungen weiter zu untersuchen. Außerdem sollten in Zukunft bei der Bewertung von Deponierückbauprojekten weitere ökologische Wirkungskategorien (z.B. Ressourcenverbrauch, Humantoxizität) und ökonomische Indikatoren berücksichtigt werden.

## 5. Literatur

- [1] Brogaard, L.K.; Damgaard, A.; Jensen, M.B.; Barlaz, M.; Christensen, T.H.: Evaluation of life cycle inventory data for recycling systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014. 87(0): S. 30–45

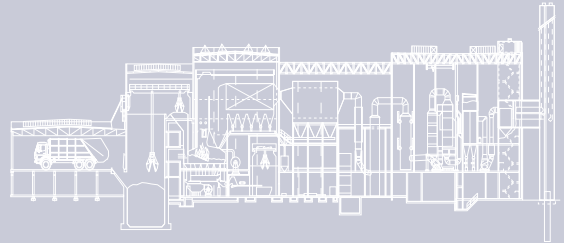
- [2] Danthurebandara, M.; van Passel, S.; Machiels, L.; van Acker, K.: Valorization of thermal treatment residues in Enhanced Landfill Mining: environmental and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2015. 99: S. 275–285
- [3] Danthurebandara, M.; van Passel, S.; van Acker, K.: Environmental and economic assessment of ‘open waste dump’ mining in Sri Lanka. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015. 102: S. 67–79
- [4] Ecoinvent Association: ecoinvent database. 2017, ecoinvent Association: Dübendorf, Switzerland
- [5] Frändegård, P.; Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.: A novel approach for environmental evaluation of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 2013. 55: S. 24–34
- [6] Frändegård, P.; Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.: Resource and Climate Implications of Landfill Mining. *Journal of Industrial Ecology*, 2013. 17(5): S. 742–755
- [7] Gäth, S.; Nispel, J.: Ressourcenpotenzial von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. In: Müll und Abfall. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2011, S. 61–67
- [8] Greedy, D.: Landfilling and landfill mining. *Waste Management & Research*, 2016. 34(1): S. 1–2
- [9] Gusca, J.; Fainzilbergs, M.; Muizniece, I.: Life Cycle Assessment of Landfill Mining Project. *Energy Procedia*, 2015. 72: S. 322–328
- [10] IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 1535
- [11] IPCC: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 5: Solid Waste. 2000, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme: Kanagawa, Japan. S. 419–439
- [12] Jones, P.T.; Geysen, D.; Tielemans, Y.; van Passel, S.; Pontikes, Y.; Blanpain, B.; Quaghebeur, M.; Hoekstra, N.: Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 2013. 55: S. 45–55
- [13] Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.: Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 2012. 32(3): S. 513–520
- [14] Laner, D.; Cencic, O.; Svensson, N.; Krook, J.: Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining. *Environmental Science & Technology*, 2016
- [15] Reimann, D.O.: CEWEP Energy Report III. 2013, CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants): Würzburg/Brussels
- [16] Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T.; Campolongo, F.; Cariboni, J.; Gatelli, D.; Saisana, M.; Tarantola, S.: *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. 2008, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [17] van Liedekerke, M.; Prokop, G.; Rabl-Berger, S.; Kibblewhite, M.; Louwagie, G.: Progress in the management of Contaminated Sites in Europe. European Union (Hrsg.): Joint Research Centre: JRC Reference Reports. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014
- [18] van Passel, S.; Dubois, M.; Eyckmans, J.; de Gheldere, S.; Ang, F.; Jones, P. T.; van Acker, K.: The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production*, 2013. 55: S. 92–102
- [19] Winterstetter, A.; Laner, D.; Rechberger, H.; Fellner, J.: Framework for the evaluation of anthropogenic resources: A landfill mining case study – Resource or reserve? *Resources, Conservation and Recycling*, 2015. 96(0): S. 19–30

# Abfallverbrennungsanlagen – Deutschland –



**ABFALLVERBRENNUNGSANLAGEN**  
– Deutschland – 2014 | 2015  
2016 (ISBN: 978-3-944310-26-8)

Herausgeber: Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Hardcover: 581 Seiten  
mit farbigen Abbildungen  
Preis: **68,00 EUR**



In diesem Buch werden die Ergebnisse der fortgeschriebenen Untersuchung über thermische Abfallbehandlungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland vorgelegt. Es werden dargestellt:

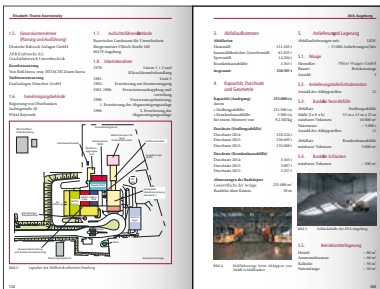
53 Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, davon:

- 52 Siedlungsabfallverbrennungsanlagen
- 1 Sonderabfallverbrennungsanlage.

Die Recherche gibt umfassende Angaben zu Technik und Umweltauswirkungen der thermischen Behandlungsanlagen und ist mit einem ersten Beispiel aus dem Bereich Sonderabfallverbrennung erweitert worden.

Die Qualität der Erhebung ist hinsichtlich der technischen Angaben ebenfalls erweitert worden. Lücken hinsichtlich der Daten wurden teilweise geschlossen, wie ein Vergleich mit der Untersuchung von 1994 zeigt. Dies ist auf die erhebliche Mithilfe zahlreicher Anlagenbetreiber zurückzuführen. Die vorgelegte Veröffentlichung ist als Zwischenbericht zu verstehen, die Arbeiten werden weitergeführt. Daher werden Anlagenbetreiber und -hersteller um kritische Durchsicht und Korrektur gebeten.

Die weiteren Untersuchungen werden sich auf die fehlenden deutschen Abfallverbrennungsanlagen, aber auch auf weitere Länder erstrecken.



Bestellungen unter [www.vivis.de](http://www.vivis.de)  
oder

Dorfstraße 51  
D-16816 Nietzwerder-Neuruppin  
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10  
E-Mail: [tkverlag@vivis.de](mailto:tkverlag@vivis.de)

**vivis**  
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4**

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-35-0 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017  
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.  
Erfassung und Layout: Sandra Peters, Janin Burbott-Seidel, Claudia Naumann-Deppe,  
Anne Kuhlo, Gabi Spiegel, Cordula Müller, Ginette Teske  
Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.