

Aufwandsschätzung für die Deponiesickerwasser- und Gasbehandlung im Nachsorgezeitraum

Cost Estimation for the Treatment of Refuse Dump Seepage and Gas during the Period of Aftercare

Von B. Mayr

Kurzfassung/Summary

Die Behandlungskosten für Deponiesickerwasser und -gas im Nachsorgezeitraum von Deponien werden mit einem mathematischen Modell beschrieben. Das Modell wurde anhand einer Erhebung des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Nachsorgekosten von Deponien“ im Zeitraum Mai bis September 1995 entwickelt. Es soll helfen, die Höhe der gesetzlich verlangten Sicherstellung gemäß Wasserrechtsgesetznovelle 1990, § 31b zu ermitteln.

A mathematical model has been developed for the cost of treating dump seepage and gas during the period of dump aftercare. The model was developed using the results of a committee on "Aftercare Cost of Dumps" between May and September 1995. The model is intended to help determine the magnitude of legal guarantee required under the provisions of Water Right Amendment 1990, § 31b.

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Benennung
A_{Deponie}	m ²	Deponiefläche
c_{CH_4}	–	Methangehalt (volumsbezogen)
c_F	–	Abflußbeiwert
C_{org}	kg/t	organischer Kohlenstoffanteil
CSB_B	mg/l	Bezugswert zur Ermittlung des chemischen Sauerstoffbedarfs
CSB_t	mg/l	Chemischer Sauerstoffbedarf nach t Jahren Deponierung
K_{SIWA}	öS/a	Jahreskosten der SIWA-Reinigung
K_{GAS}	öS/a	Jahreskosten der Gasbehandlung
k_{SIWA}	öS/m ³ _{SIWA}	Spezifische Kosten der SIWA-Reinigung
k_{GAS}	öS/Nm ³ _{GAS}	Spezifische Kosten der Gasbehandlung
NS	mm/a	Jahresniederschlag
Org. TS	–	Anteil an Schlamm oder Kompost im Müll
Q_{GAS}	Nm ³ _{GAS} /h	Stündl. Gasanfall
Q_{SIWA}	m ³ /a	SIWA-Jahresmenge
$Q_{\text{Schütt}}$	t/a	Jährliche Schüttmenge
t	a	Alter der Deponie
t_{LZ}	a	Gesamte Laufzeit der Deponie
T	°C	Deponieinnentemperatur
V_{Deponie}	m ³	Deponiekubatur
μ	–	Erfassungsgrad

1. Einleitung

Die Wasserrechtsgesetznovelle 1990 verlangt im § 31b, daß die Überwachung und die Betreuung einer Deponie während der vermutlichen Dauer der Gewässergefährdung sichergestellt erscheint (AAEV, 1991). Da die Höhe dieser Sicherstellung nicht exakt definiert ist und von zahlreichen technischen und kaufmännischen Faktoren abhängt, wurde der ÖWAV-Arbeitsausschuß „Nachsorgekosten von Deponien“ konstituiert. Die vorliegende Arbeit wurde durch diesen Ausschuß angeregt und dient der Grundlagenermittlung der Kostenstruktur der Deponiesickerwasser- und Deponiegasbehandlung einer österreichischen Deponie nach dem derzeit geltenden Stand der Technik.

Die Datenbasis stammt aus einer Fragebogenerhebung im Zeitraum Mai bis September 1995 bzw. aus der Literatur (Mayr, 1994; Wenger-Oeh n und Braun, 1994). Da die Qualität der Angaben der retournierten Fragebögen sowohl in technischer, aber auch kaufmännischer Hinsicht starken Schwankungen unterworfen ist, kann das vorgestellte Gleichungssystem nur als Anhaltswert gelten.

Das vorliegende Formelwerk gilt ausschließlich für den Fall der „Direkteinleitung“ gemäß dem 207. BGBl. vom 24. 9. 1992, Emissionsverordnung 613 (EmV. 613), da alle heute in Österreich betriebenen Sickerwasserreinigungsanlagen (SRA) das aufbereitete Wasser direkt in die Gewässer ableiten. Im Fall der aktiven Gaserfassung durch Absaugung des Deponiekörpers wurde nur die thermische Entsorgung des Deponiegases in einer Fackelanlage berücksichtigt. Andere technische Verwertungsmöglichkeiten, wie etwa die Energiegewinnung durch eine Kraft-Wärme-Kupplung, werden nicht behandelt. Die angegebenen Formeln basieren, falls sinnvoll, auf bereits in der Literatur vorgestellten Zusammenhängen oder sind auf empirisch-formaler Grundlage erstellt.

Konstanten:

Benennung	Wert	Einheit	Verwendung
K_1	–0,5	–	Abflußkonstante in Gl. (1)
K_2	0,336	–	Belastungskonstante in Gl. (3)
K_3	0,0607	–	Belastungskoeffizient in Gl. (3)
K_4	0,04	a ⁻¹	Abbaukonstante in Gl. (4) und (7)
$Y_{\text{Gas/NS}}$	1,65	–	Ertragskoeffizient in Gl. (9)
K_{monod}	250	mm/a	Monodkonstante in Gl. (9)
K_{lag}	600	mm/a	Verzögerungsglied in Gl. (9)
K_5	1280	öS/m ³	SIWA-Kostenkonstante in Gl. (10)
K_6	25 000	m ³ /a	Mengenkonstante in Gl. (10)
K_7	2800	mg/l	Belastungskonstante in Gl. (10)
K_8	0,33	–	Belastungsexponent in Gl. (10)
K_9	15,5	öS/m ³	Gaskostenkonstante in Gl. (12)
K_{10}	–0,6	–	Mengenexponent in Gl. (12)

2. Modellbildung zur Berechnung der Deponiesickerwasser- und Gasemissionen und der resultierenden Behandlungskosten

2.1 Deponiesickerwasser (SIWA): Mengen und Belastung

Deponiesickerwasser ist als an der Deponiebasis oder an sonstigen inneren oder äußeren Begrenzungen aus dem Deponiekörper an die Atmosphäre austretendes Wasser definiert (EmV. 613). Die Menge ergibt sich aus einer hydrologischen Bilanz der Mülldeponie hauptsächlich aus der Differenz zwischen Niederschlag, Oberflächenabfluß, Verdunstung, Rückhalt und Bedarf bzw. Verbrauch aufgrund der mikrobiologischen Vorgänge (Dahm, 1994).

Die Datenbasis zur Ermittlung bzw. zur Überprüfung eines Berechnungsmodells stellt sich als sehr klein heraus. Von 67 im österreichischen Bundesabfallwirtschaftsplan erfaßten Deponien verfügen nur zehn über eine Behandlungsanlage. Der Auswertung sind acht Anlagen zugrundegelegt. Die Basisdaten stammen zum Teil aus den Fragebögen, allerdings wurde auch bereits publiziertes Zahlenmaterial verwendet (Koch, 1991; Mayr, 1994; Wenger-Oehn und Braun, 1994).

Der Vergleich mit den technischen Lösungen in anderen westeuropäischen Ländern, wie etwa Holland oder Deutschland, ergibt keine verbesserte Beurteilungsmöglichkeit zur Verifizierung des vorgeschlagenen Modells, da sich die gesetzlichen Anforderungen zum Teil erheblich unterscheiden. Beispielsweise beträgt der Emissionsgrenzwert für Direkteinleitung für den Parameter CSB in Deutschland 200 mg/l im Vergleich zu 50 mg/l in Österreich. Ebenso wird die Rückführung von flüssigen Reststoffen, etwa Konzentrate aus Umkehrosmoseanlagen, in Deutschland im Regelfall nicht genehmigt.

2.1.1 Sickerwasseranfall in Abhängigkeit der Deponiefläche

2.1.1.1 Abflußbeiwert

Der Abflußbeiwert gibt an, welcher Teil der auf die Deponiefläche auftreffenden Nieder-

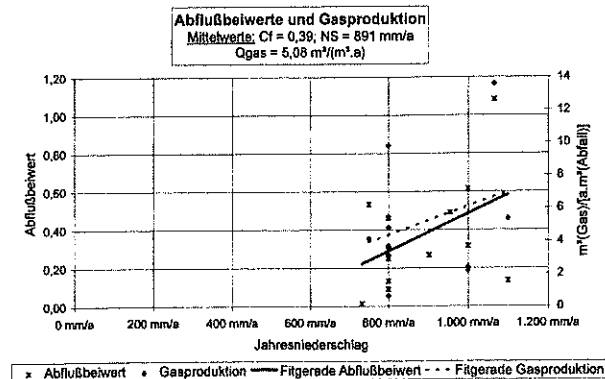


Abb. 1. Abhängigkeit des Abflußbeiwerts c_F vom Niederschlag und Zusammenhang Jahresniederschlag – spezifische Gasproduktion; österreichische Deponien

schlagsmenge im Jahresmittel als Sickerwasser an der Deponiebasis austritt. Der Abflußbeiwert ist starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Um diese Unregelmäßigkeiten auszugleichen, wird das Sickerwasser im Regelfall in Speicherbecken zwischengespeichert.

Der Abflußbeiwert hängt von zahlreichen Faktoren, u. a. Niederschlagsmenge, Müllverdichtung, Flankenneigung, Müllfeuchte, Art der Oberflächenabdeckung, Schütthöhe usw., ab. Aus der Auswertung der eingegangenen Fragebögen ergab sich ausschließlich hinsichtlich der jährlichen Niederschlagsmenge eine signifikante Aussage (Abb. 1):

$$c_F = \frac{NS}{1000} + K_1 \quad (1)$$

$$K_1 = -0,5$$

Gültigkeitsbereich:

$$750 < NS < 1100, \quad 0,2 < c_F < 0,6$$

Die Gleichung gilt für in Betrieb befindliche Deponien mit einer Basisabdichtung nach dem derzeitigen Stand der Technik. Relevante Abweichungen können durch eine SIWA-Rückführung ($0 < c_{F,Rück} < c_F$), dichte Topabdeckung ($0 < c_{F,Top} < c_F$), große offene Schüttbereiche ($c_F < c_{F,Schütt} < 1$) etc. auftreten. In Klimaten mit Jahresschneefall von weniger als 750 mm kann ein optimaler Wassergehalt ($c_F = 0$) durch Sickerwasserkreislaufführung gewährleistet werden (Kemmerling et al., 1988).

Gleichung (1) liefert folgende Werte: $0,2 < c_F < 0,6$. Diese Daten entsprechen den Literaturangaben (Dahm, 1994; Ehrig, 1989).

2.1.1.2 SIWA-Anfall

Die gesamte Sickerwassermenge wird unter Verwendung des Abflußbeiwerts wie folgt bestimmt:

$$Q_{SIWA} = \frac{NS}{1000} \cdot c_F \cdot A_{Deponie} \quad (2)$$

Aus Gln. (1) und (2) ergibt sich somit, daß die SIWA-Menge rechnerisch nur von der Deponiefläche und vom Niederschlag abhängig ist. Andere deponietechnische Faktoren finden im Modell keine Beachtung und könnten daher in der Praxis zu einem anderen Ergebnis führen.

2.1.2 Kontaminationsgrad des Sickerwassers

Generell weist SIWA aufgrund der unterschiedlichen Abfallfraktionen eine komplexe Fracht von Schadstoffen auf (Koch, 1990; Flögl, 1993; Dahm, 1994; Mayr et al., 1994). Eine theoretische Betrachtung ergibt, daß die Schadstoffkonzentration – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – von folgenden Faktoren beeinflusst wird: Anteil an Schlamm und Kompost, Dauer der Ablagerung, Niederschlagsmenge, Schütthöhe, Temperatur im Deponiekörper, Sickerwasserrückführung und Müllverdichtung.

Der Summenparameter chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) wird als Leitparameter zur Beschreibung der Schadstoffbelastung des SIWA benützt, da aufgrund der strengen gesetzlichen Anforderung bei diesem Parameter im Regelfall die höchste prozentuelle Reinigungsleistung erzielt werden muß.

Die Auswertung der Fragebögen (Mayr und Lengyel, 1995) hat signifikante Abhängigkeiten der Sickerwasserkontamination einerseits vom Gehalt an Schlämmen und Kompost (Org. TS) und andererseits von der Dauer der Ablagerung (t) ergeben. Diese beiden Maßzahlen werden im folgenden formalmathematisch zur Ermittlung des jeweils aktuellen chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB_t) verknüpft, indem in einem ersten Schritt eine Bezugs- CSB -Konzentration (CSB_B) als Funktion des Schlamm- und Kompostanteils ermittelt wird. Mit einer zweiten Gleichung wird nachfolgend die zeitliche Veränderung in Anlehnung an das Gasprognosemodell nach Tabasaran-Rettenberger (Tabasaran, 1987) beschrieben.

2.1.2.1 Schadstoffgehalt in Abhängigkeit des Schlamm- und Kompostanteils

Die Auswertung mittels einer formalen Ausgleichskurve führt zu dem in Abb. 2 dargestellten Ergebnis. Deutlich ist die starke Beeinflussung der CSB -Konzentration durch den Schlamm- und Kompostanteil zu erkennen.

$$CSB_B = e^{\frac{Org. TS + K_2}{K_3}} \quad (3)$$

$K_2 = 0,336, K_3 = 0,0607$
 Gültigkeitsbereich: $0,0 < Org. TS < 0,3$

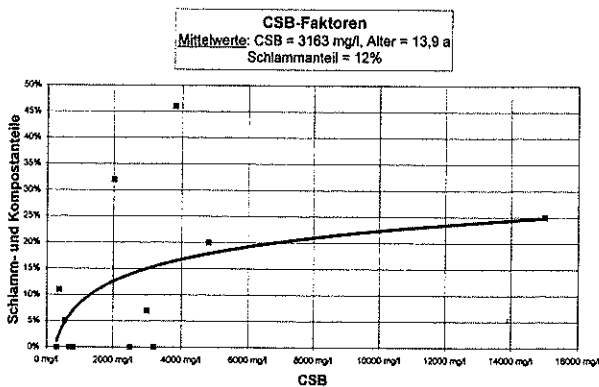


Abb. 2. SIWA-Belastung in Abhängigkeit des Schlamm- und Kompostanteils

Der Einfluß der Schütthöhe bzw. der Niederschlagsmenge konnte nicht eindeutig quantifiziert werden und wird daher nicht berücksichtigt. Aufgrund der Datenbasis gilt Gl. (3) nur für den Typ der Reaktordeponie mit großen Anteilen von Hausmüll oder hausmüllähnlichem Gewerbemüll. Für Industriemüll- und Schlackendeponien kann die Formel keine korrekten Ergebnisse liefern, da in diesen Fällen die aufwandsrelevanten Parameter üblicherweise im Bereich der Anorganik anzutreffen sind.

2.1.2.2 Abhängigkeit von der Dauer der Ablagerung

Das mathematische Modell der zeitlichen Abnahme der Sickerwasserbelastung in Anlehnung an die Gasprognose nach Tabasaran-Rettenberger führt zu folgender Gleichung:

$$CSB_t = CSB_B \cdot 10^{-K_4 \cdot (t-13,9)} \quad (4)$$

$K_4 = 0,04$

Gültigkeitsbereich: $2 < t < 50$

2.2 Technische Grundlagen: Deponiegas

In diesem Abschnitt wird bewußt auf eine Beschreibung der Grundlagen der Deponiegasbildung, -sammlung, -entsorgung oder -verwertung verzichtet, da dies bereits durch den ÖWAV-Arbeitsausschuß „Deponie“ der Fachgruppe Abfallwirtschaft durch den Regelblattentwurf „Entgasung von Deponiekörpern“ (Gollob, 1995) beschrieben wurde.

Das nachstehende, auf auswertbaren Fragebögen basierende Formelwerk soll eine rasche Beurteilung der Nachsorgekosten österreichischer Deponien ermöglichen. Der Auswertung sind zwölf Anlagen zugrundegelegt, allerdings wurde auch bereits publiziertes Zahlenmaterial verwendet (Steinlechner et al., 1995; Erhart-Schippke, 1995; Reinhardt et al., 1995).

2.2.1 Methangehalt im Mittel

Nach Tabasaran lassen sich folgende vier Deponietypen aufgrund ihrer Gaszusammensetzung unterscheiden (Tabelle 1).

Tabelle 1. Unterscheidung von Deponiegastypen nach Tabasaran und Rettenberger, 1987; Angaben in Vol. %

Gastyp	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
1	55	45	-	-
2	40	30	6	24
3	45	35	1	18
4	35	30	5	30

- Gastyp 1: reines Deponiegas.
- Gastyp 2: Gastyp 1 wird durch Lufteintritt an einem Leck im Gaserfassungssystem verdünnt.
- Gastyp 3: Luft wird durch den Deponiekörper angesaugt, dabei wird O₂ mikrobiell veratmet, N₂ bleibt unbeeinflusst.
- Gastyp 4: Kombination aus Typ 2 und 3.

Im Mittel der ausgewerteten Fragebögen ergibt sich der in Gl. (5) genannte Wert. Er wurde für diese Richtlinie als ausreichend eingestuft, da erst bedeutende Abweichungen die Gasbehandlungs- und damit die Nachsorgekosten beeinflussen.

$$c_{CH_4} = 0,45 \quad (5)$$

Gültigkeitsbereich: $0,3 < c_{CH_4} < 0,55$

Gemäß Tabelle 1 wird bei diesem Methangehalt Falschluff über den Deponiekörper ins Entgasungssystem angesaugt. Dies dürfte auch aufgrund von Praxiserfahrungen der Realität entsprechen. Die

über dem Deponiekörper angesaugte Luftmenge ist dem Methangehalt indirekt proportional.

Signifikante Abweichungen der Gasbehandlungskosten ergeben sich allerdings im Regelfall erst bei Unterschreitung eines minimalen Methangehaltes (ca. 30 Vol. %) bei Verzicht auf Errichtung einer aktiven Gaserfassung.

2.2.2 Spezifische Gasproduktion abhängig von der Ablagerungsdauer

2.2.2.1 Theoretische Gasbildung nach Tabasaran-Rettenberger

Das Gasbildungsmodell kann als bekannt vorausgesetzt werden (Tabasaran, 1987). Es gilt jedoch nur für den Fall einer ausreichenden Feuchte (> 30 %) des Müllkörpers.

Gassumme gesamt

$$G_e = 1,868 \cdot C_{org} \cdot (0,014 \cdot T + 0,28) \quad (6)$$

Gassumme zum Zeitpunkt t

$$G_t = G_e \cdot (1 - 10^{(-K_4 \cdot t)}) = 1,868 \cdot C_{org} \cdot (0,014 \cdot T + 0,28) \cdot (1 - 10^{(-K_4 \cdot t)}) \quad (7)$$

$K_4 = 0,04$

Erfaßbare Gasmenge bis zum Zeitpunkt t

$$G_f = G_t \cdot \mu \quad (8)$$

2.2.2.2 Einfluß des Niederschlags

Bei Jahresniederschlägen kleiner als 750 mm kann diese Mindestfeuchte unterschritten werden (Kemmerling et al., 1988). Die Auswertung der Fragebögen ergab eine eindeutige Korrelation der Gasproduktion mit dem Jahresniederschlag (Abb. 1). Dieser Einfluß wurde daher in das obige Modell inkorporiert. Zwei formalmathematische Modelle der Biotechnologie werden zur Beschreibung herangezogen. Das MONOD-Modell bewirkt eine Abnahme der Gasproduktion bei Niederschlagswerten kleiner als 800 mm/a, dieser Effekt wird durch das sogenannte Lag-(oder Verzögerungs-)Glied verstärkt. Die Konstanten wurden empirisch ermittelt.

$$G_{f, NS} = G_f \cdot Y_{Gas/NS} \cdot NS / (K_{monod} + NS) \cdot (1 - e^{(-NS/K_{lag})}) \quad (9)$$

$$Y_{Gas/NS} = 1,65$$

$$K_{monod} = 250$$

$$K_{lag} = 600$$

Gültigkeitsbereich: $400 < NS < 1400$

Dieses Modell wird angewandt, indem es bezüglich einer bestimmten Müllmenge durchgerechnet wird, woraus sich durch Integration über sämtliche zeitgleichen Werte die Gasmengenganglinie der Gesamtdeponie ergibt.

Die errechnete Gasmenge ($G_{f, NS}$) ist im Regelfall aus einer Tonne abgelagerten Mülls förderbar. Die jährliche bzw. stündliche Gasmenge zu einem bestimmten Zeitpunkt muß durch Integration über die jeweils abgelagerte Müllmenge errechnet wer-

den. Als Resultat erhält man die Gasmengenganglinie der Gesamtdeponie.

2.3 Modell zur Ermittlung der aktuellen Behandlungskosten

Die Ermittlung eines Berechnungsmodells zur Bestimmung der Sickerwasser- und Gasbehandlungskosten stützt sich auf die ÖWAV-Fragebögen aus dem Jahr 1995. Technische Änderungen der Sickerwasser- und Gasbehandlung können die Kostenfunktionen wesentlich beeinflussen. Eine Wertsicherung ist nicht enthalten.

2.3.1 Sickerwasserbehandlungskosten

Für die Sickerwasserreinigung können nur Kosten für die Direkteinleitung des gereinigten Abwassers in einen Vorfluter angegeben werden, da nur diese Variante in Österreich realisiert worden ist. Auf die Beschreibung der Kosten bestehender Indirekteinleitungen (mittlere Kosten: 225,-/m³, Abb. 3) wird verzichtet, da dies im Regelfall nicht der geltenden Emissionsverordnung 613 entspricht und daher nach dem 27. September 1997 nur mit einer speziellen Genehmigung weiterbetrieben werden kann.

Die Gl. (10) stellt die Behandlungskosten pro Kubikmeter in Funktion der Sickerwassermenge einerseits und der Belastung andererseits dar. Ein indirekter exponentieller Ansatz beschreibt die Abhängigkeit von der Menge ausreichend gut, da die Behandlungskosten bei kleineren Anlagen aufgrund des im wesentlichen identischen Betreuungs-, Wartungs- und regelungstechnischen Aufwands überproportional steigen (Abb. 3).

Der Belastung des Sickerwassers wird durch einen Potentansatz Rechnung getragen.

$$k_{SIWA} = K_5 \cdot e^{\frac{Q_{SIWA}}{K_6}} \cdot \left(\frac{CSB_t}{K_7} \right)^{K_8} \quad (10)$$

$$K_5 = 1280$$

$$K_6 = 25000$$

$$K_7 = 2800$$

$$K_8 = 0,33$$

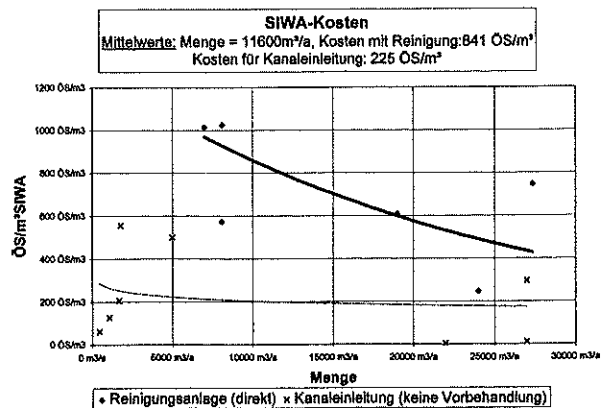


Abb. 3. Reinigungskosten als Funktion der SIWA-Menge; Meßwerte österreichischer Deponien

Gültigkeitsbereich: $2000 < Q_{SIWA} < 80\,000$
 $500 < CSB_B < 30\,000$
 Direkteinleitung gemäß
 EmV. 613

Die Jahreskosten der Sickerwasserbehandlung ergeben sich somit zu:

$$K_{SIWA} = k_{SIWA} \cdot Q_{SIWA} \quad (11)$$

2.3.2 Gasbehandlungskosten

Da im Fall der Deponiegasbehandlung von einer einheitlichen Entsorgungstechnik mittels einer Fackelanlage ausgegangen und der Methangehalt als keine relevante Einflußgröße ausgeschieden wird, kann zur Ermittlung der spezifischen Kosten der in Gl. (12) aufgestellte einfache Zusammenhang zwischen Entgasungskosten und Deponiegasmenge angesetzt werden.

$$k_{GAS} = K_9 \cdot Q_{GAS}^{K_{10}} \quad (12)$$

$$K_9 = 15,5$$

$$K_{10} = -0,6$$

Gültigkeitsbereich: $20 < Q_{GAS} < 500$

Die Jahreskosten der Gasbehandlung ergeben sich somit zu:

$$K_{GAS} = k_{GAS} \cdot Q_{GAS} \cdot 24 \cdot 365 \quad (13)$$

3. Ergebnisse und deren Diskussion

3.1 Berechnungsbeispiel Musterdeponie

Die Ermittlung der tatsächlichen Entsorgungskosten wird in diesem Kapitel für eine sogenannte „Musterdeponie“ vorgeführt und soll den einfachen Rechengang illustrieren.

3.1.1 Basisdaten

Die Basisdaten dieser Musterdeponie entsprechen dem Mittelwert der eingegangenen, auswertbaren ÖWAV-Fragebögen.

Jahresniederschlag	890 mm/a
Fläche	33 400 m ²
Kubatur	486 000 m ³
jährliche Schüttmenge	34 960 t/a
Schüttbeginn	1981
Alter der Deponie	13,9 Jahre
Betriebsdauer der Deponie	20 Jahre
Schlammanteil	0,12

Annahmen zur Berechnung des Gasmodells:	
org. Kohlenstoffanteil	180 kg/t Müll
Deponieinnentemperatur	20 °C
Gas-Erfassungsgrad	0,4

3.1.2 Ergebnisse

3.1.2.1 Sickerwassermenge und -belastung

Gleichung (1) liefert den Abflußbeiwert:

$$c_F = \frac{890}{1000} - 0,5 = 0,39$$

Mit Gl. (2) ergibt sich die jährliche Sickerwassermenge:

$$Q_{SIWA} = \frac{890}{1000} \cdot 0,39 \cdot 33\,400 = 11\,593 \text{ m}^3/\text{a}$$

Ermittlung der Belastung, ausgedrückt durch den Summenparameter *CSB*:

Gleichung (3): Bezugs-*CSB*:

$$CSB_B = e^{\frac{0,12 + 0,336}{0,0607}} = 1831 \text{ mg/l}$$

Gleichung (4): *CSB* nach 13,9 Jahren:

$$CSB_t = 1831 \cdot 10^{-0,04 \cdot (13,9 - 13,9)} = 1831 \text{ mg/l}$$

3.1.2.2 Gasmenge

Gleichung (6) ergibt:

$$G_e = 1,868 \cdot 180 \cdot (0,014 \cdot 20 + 0,28) = 188 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{Müll}}$$

Gleichung (7) führt zu folgender Gassumme nach 13,9 Betriebsjahren:

$$G_t = 188 \cdot (1 - 10^{(-0,04 \cdot 13,9)}) = 136,0 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{Müll}}$$

mit Gl. (8) ergibt sich die förderbare Gasmenge zu:

$$G_f = 136,0 \cdot 0,4 = 54,4 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{Müll}}$$

Schließlich führt Gl. (9) zur niederschlagsabhängigen effektiven Gasmenge:

$$G_{f,NS} = 54,4 \cdot 1,65 \cdot 890 / (250 + 890) \cdot (1 - e^{(-890/600)}) = 54,2 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{Müll}}$$

Die jährliche bzw. stündliche Gasmenge zu einem bestimmten Zeitpunkt wird durch Integration über die jeweils abgelagerte Müllmenge errechnet, damit ergibt sich die Gasmengenganglinie der Gesamtdeponie (Abb. 4).

Der Niederschlagseffekt ist in dieser Darstellung durch die Variation von 600 über 890 bis 1200 mm/a verdeutlicht. Für das Jahr 1995 (Laufzeit 13,9 Jahre) folgt ein mittlerer Gasanfall von 225 Nm³/h.

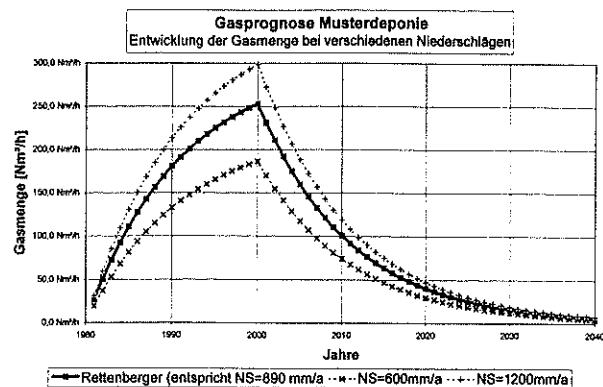


Abb. 4. Gasmengenganglinie mit Niederschlagseinfluß

3.1.2.3 Kostenabschätzung für das Jahr 1995

SIWA: Gl. (10) liefert die spezifischen Behandlungskosten:

$$k_{SIWA} = 1280 \cdot e^{-\frac{11593}{25000}} \cdot \left(\frac{1831}{2800}\right)^{0.33} = 699,75/m^3$$

dies führt zu jährlichen Gesamt-Sickerwasserentsorgungskosten (Gl. (11)) von:

$$K_{SIWA} = k_{SIWA} \cdot Q_{SIWA} = 699,75/m^3 \cdot 11593 m^3/a = 8112200,-/a$$

GAS: aus Gl. (12) folgt der spezifische Gasbehandlungspreis:

$$k_{GAS} = 15,5 \cdot Q_{GAS}^{-0.6} = 15,5 \cdot 225^{-0.6} = 0,60/Nm^3$$

Bevor die jährlichen Gasbehandlungskosten errechnet werden können, muß die aktuelle Gasmenge ermittelt werden (Abb. 4). Anschließend liefert Gl. (13) die Jahreskosten zu dem gewünschten Zeitpunkt in Abhängigkeit der jeweiligen Gasentsorgungskosten zu:

$$K_{GAS} = k_{GAS} \cdot Q_{GAS} \cdot 24 \cdot 365 = 0,60 \cdot 225 \cdot 24 \cdot 365 = 1183000,-/a$$

3.1.2.4 Nachsorgekosten bis 40 Jahre nach Schüttende

Die zukünftigen jährlichen Nachsorgekosten werden auf identische Art wie zuvor ermittelt. Das Ergebnis der Modellrechnung führt zu dem in Abb. 5 dargestellten Kostenverlauf. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Gas- und Sickerwasserbehandlungskosten zusammen. Andere Kosten werden nicht berücksichtigt.

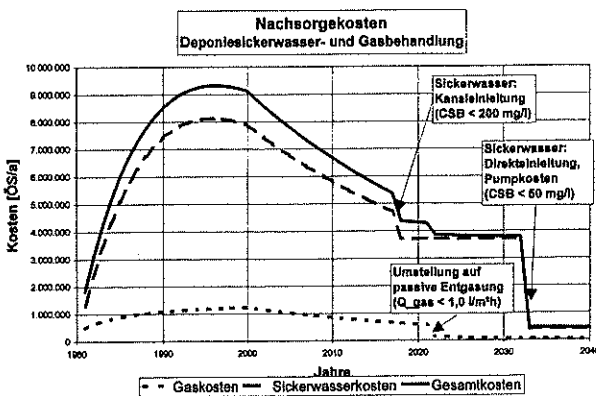


Abb. 5. Sickerwasser- und Gasbehandlungskosten im Betriebs- und Nachsorgezeitraum

Deutlich ist der Kostenanstieg im Großteil der Schüttphase (1981 bis 2001), allerdings verflacht die prognostizierte Kostenkurve aufgrund der bereits wieder abnehmenden Sickerwasserbelastung nach 15 Jahren Betrieb. Die Kosten der Gasbehandlung betragen im Regelfall zwischen 15 und 20 % der Sickerwasserreinigungskosten.

Die Kostensprünge der Sickerwasserreinigung sind durch die Unterschreitung der Grenzwerte für Indirekt- ($CSB < 200 \text{ mg/l}$) bzw. Direkteinleitung ($CSB < 50 \text{ mg/l}$) begründet. Die Kosten für Indirekteinleitung werden aufgrund der Mittelwertbildung aus den ÖWAV-Fragebögen (Mayr und Lengyel, 1995) mit 225 öS/m^3 angenommen (Abb. 3), während für die Direkteinleitung nur die Kosten der Ableitung mit 25 öS/m^3 angesetzt werden.

Die Kostenreduktion der Gasbehandlung ist durch die Umstellung von aktiver auf passive Entgasung verursacht. Als Grenzwert zur Umstellung wird ein spezifischer Gasanfall von $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ angesetzt. Als Behandlungspreis bei passiver Entgasung werden $0,50 \text{ öS/m}^3$ Gas angenommen.

3.2 Sensitivitätsanalyse der Modellvariablen

Die Sensitivitätsuntersuchung dient zur Abschätzung des Einflusses der verschiedenen Modellvariablen auf die Ergebnisfunktion. Die Sensitivitätsanalyse für das Gasmodell unterbleibt an dieser Stelle, da das benützte Modell bereits in der Literatur eingehend diskutiert worden ist (Tabasaran, 1987; Steinlechner et al., 1994).

Ausgehend von den Behandlungskosten der Musterdeponie für das Jahr 1995, werden die Modellvariablen „jährliche Niederschlagsmenge (NS)“, „organischer Schlammanteil (Org. TS)“ und „Deponiealter (t)“ im jeweiligen Gültigkeitsbereich geändert und das Ergebnis in Abb. 6 dargestellt.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, daß die Kostenfunktion des Berechnungsmodells am empfindlichsten auf eine Änderung der Niederschlagsmenge reagiert. Generell führt eine höhere Niederschlagsmenge zu erhöhten Gesamtbehandlungskosten, allerdings flacht die Kurve bei einer Änderung $> +10\%$ deutlich ab. Dies ist auf sinkende mengen spezifische Behandlungskosten in größeren Anlagen zurückzuführen und ist in Gl. (10) durch die negative Exponentialfunktion mathematisch begründet.

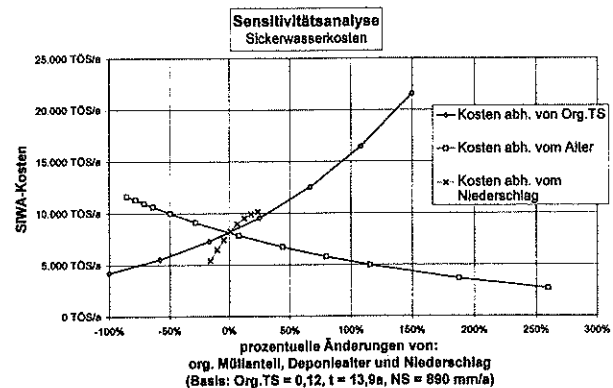


Abb. 6. Sensitivitätsuntersuchung der Sickerwasserbehandlungskosten

Ein größerer organischer Schlammanteil führt ebenfalls zu einer Zunahme der Behandlungskosten. Die Kurve zeigt einen starken Kostenanstieg im obersten Teil des Gültigkeitsbereichs (Gl. (3)). Da dieser Bereich auf wenigen Einzeldaten begründet ist, kann das Modell für Werte von $0,2 < \text{Org. TS} < 0,3$ eventuell zu einer überhöhten Kostenabschätzung führen.

Sinkende Kosten ergeben sich mit zunehmendem Deponiealter, wobei im Gültigkeitsbereich von Gl. (4) eine Kostenreduktion um 78 % zwischen dem 2. und 50. Jahr prognostiziert wird. Sprunghafte Kostenänderungen, die etwa durch eine Änderung der Behandlungstechnik oder durch eine Reinvestition der Anlagentechnik verursacht werden könnten, sind im vorgestellten Modell nicht berücksichtigt.

3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen im Vergleich zu den Meßwerten österreichischer Deponien

Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Kostenerhebungen aus den OWAV-Fragebögen mit den jeweiligen Ergebnissen der Modellrechnungen. Die Angabe des jeweiligen Fehlers bezieht

sich auf die Abweichung der Modellkosten von den Ist-Kosten. Bei einem erheblichen Teil der Fragebögen konnte ein Kostenvergleich aufgrund fehlender Mindestangaben, die in Pkt. 3.1.1 aufgelistet sind, nicht durchgeführt werden. Diese Datensätze sind mit „Daten nicht ausreichend“ gekennzeichnet.

Datensätze, die mit „außerhalb des Gültigkeitsbereiches“ bezeichnet sind, erfüllen eine oder mehrere Voraussetzungen der Gln. (1), (3), (4), (5) nicht.

Wie bereits einleitend erwähnt, verfügen in Österreich derzeit nur wenige Deponien über eine eigene Anlage zur Aufbereitung von Sickerwasser. Zumeist wird es daher, zeitlich befristet, in kommunale Kläranlagen eingeleitet. Da die Angabe einer Abweichung in diesen Fällen aufgrund nicht vergleichbarer Voraussetzungen sinnlos ist, sind diese Fälle in Tabelle 2 durch die Anmerkung „Kanal“ gekennzeichnet.

Eine Betrachtung der verbleibenden Datensätze 1–4 und 6 zeigt, daß die Modellrechnung die tatsächlichen Sickerwasserbehandlungskosten mit einer Abweichung von +16 % im Mittel prognostiziert. Diese in Anbetracht der Komplexität des Modellansatzes geringe positive Abweichung

Tabelle 2. Plausibilitätsuntersuchung: Vergleich der erhobenen Daten (Mayr und Lengyel, 1995) mit den jeweiligen Modellprognosen. Ab Datensatz 8 verfügen die Deponien nicht mehr über eine eigene Reinigungsanlage, das Abwasser wird dort in einer kommunalen Kläranlage behandelt. Daher können die Sickerwasserbehandlungskosten nicht mehr direkt verglichen werden

Datensatz	Sickerwasser-Kosten			Gaskosten		
	Ist	Modell	Fehler	Ist	Modell	Fehler
Nr. 1	7 100 000 öS/a	7 021 305 öS/a	-1 %	380 000 öS/a	965 983 öS/a	154 %
Nr. 2	11 570 000 öS/a	13 480 986 öS/a	17 %	1 300 000 öS/a	1 593 722 öS/a	23 %
Nr. 3	3 465 810 öS/a	2 967 227 öS/a	-14 %	480 000 öS/a	649 268 öS/a	35 %
Nr. 4	15 334 286 öS/a	18 462 946 öS/a	20 %			
Nr. 5	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 6	4 431 133 öS/a	6 997 349 öS/a	58 %			
Nr. 7	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 8	außerhalb des Gültigkeitsbereichs			530 000 öS/a	965 983 öS/a	82 %
Nr. 9	außerhalb des Gültigkeitsbereichs			Daten nicht ausreichend		
Nr. 10	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 11	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 12	1 000 000 öS/a	3 470 746 öS/a	Kanal	160 000 öS/a	698 387 öS/a	336 %
Nr. 13	2 700 000 öS/a	3 658 861 öS/a	Kanal	Daten nicht ausreichend		
Nr. 14	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 15	225 000 öS/a	2 796 650 öS/a	Kanal	10 372 500 öS/a	1 491 626 öS/a	-86 %
Nr. 16	außerhalb des Gültigkeitsbereichs			2 223 000 öS/a	1 163 620 öS/a	-48 %
Nr. 17	Daten nicht ausreichend			1 100 000 öS/a	965 983 öS/a	-12 %
Nr. 18	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 19	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 20	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 21	8 000 000 öS/a	4 974 812 öS/a	Kanal	1 390 000 öS/a	1 472 042 öS/a	6 %
Nr. 22	Daten nicht ausreichend			270 000 öS/a	751 223 öS/a	178 %
Nr. 23	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 24	2 500 000 öS/a	2 519 337 öS/a	Kanal	300 000 öS/a	902 813 öS/a	201 %
Nr. 25	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 26	29 840 öS/a	459 529 öS/a	Kanal	Daten nicht ausreichend		
Nr. 27	außerhalb des Gültigkeitsbereichs			650 000 öS/a	1 392 797 öS/a	114 %
Nr. 28	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		
Nr. 29	außerhalb des Gültigkeitsbereichs			Daten nicht ausreichend		
Nr. 30	Daten nicht ausreichend			Daten nicht ausreichend		

führt somit hinsichtlich der Nachsorgekosten zu einer eher sicheren Kostenermittlung. Dies ist aufgrund der Unsicherheiten in bezug auf Standzeiten bzw. Abschreibungszeiten der im Einsatz befindlichen Anlagen positiv zu beurteilen.

Das Gaskostenmodell führt im Mittel ebenfalls zu 82 % überhöhte Behandlungskosten. Diese erhebliche Abweichung wird in bezug auf die gesamten Nachsorgekosten gedämpft, da die Gasbehandlungskosten im Mittel nur etwa 20 % der Sickerwasserbehandlungskosten betragen. Der im Regelfall überhöhte Kostenansatz läßt Spielraum für eventuell notwendige Sanierungsarbeiten an der Gaserfassung, die häufig durch Setzungen des Deponiekörpers beeinträchtigt wird.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf einer Erhebung im Rahmen des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Nachsorgekosten von Deponien“, wurde ein Kostenermittlungsverfahren zur Bestimmung der Sickerwasser- und Gasbehandlung im Nachsorgezeitraum von Deponien präsentiert. Das Modell wurde unter folgenden Voraussetzungen entwickelt und kann nur unter identischen Prämissen realistische Ergebnisse liefern:

- Einhaltung der Gültigkeitsbereiche aller Gleichungen.
- Aufbereitung der Sickerwässer bis auf Direkt-einleitungsqualität gemäß der Emissionsverordnung 613, 207 BGBl., 24. 9. 1992 (EmV. 613).
- Rückführung der Konzentrate aus Umkehrosmoseanlagen auf den Deponiekörper ist genehmigt.
- Entsorgungskosten anderer Rückstände aus der Sickerwasserreinigung (Überschußschlamm, beladene Aktivkohle) sind nicht berücksichtigt.
- Aktive Gaserfassung durch Absaugung des Deponiekörpers mit thermischer Entsorgung des Deponiegases in einer Fackelanlage.

Die Plausibilitätsuntersuchung zeigt, daß im Regelfall mit einer geringfügig erhöhten Nachsorgekostenabschätzung gerechnet werden muß. Dies ist aufgrund der noch mangelnden Betriebserfahrung mit Sickerwasserbehandlungsanlagen positiv zu bewerten, da über die Anlagenstandzeiten und damit notwendige Reinvestitionen noch keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen.

Eine exaktere Abschätzung der Nachsorgekosten kann für jene Deponien durchgeführt werden, die bereits jetzt über eigene Behandlungsanlagen verfügen.

Danksagung

Für die aktive Mitarbeit und zahlreichen Anregungen sei allen Mitgliedern des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Nachsorgekosten von Deponien“ herzlich gedankt. Insbesondere Hr. Dipl.-Ing. F. Rieckh und Hr. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. W. Lengyel unterstützten die vorliegende Arbeit in fachlicher Hinsicht.

Literatur

- AAEV (1991): Allgemeine Abwasseremissionsverordnung, BGBl. Nr. 74, 179. Verordnung, Wien.
- Dahm, W. (1994): Sickerwasserreinigung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Neuruppin.
- Ehrig, H.-J. (1989): Sickerwassermenge und -qualität. Die Abhängigkeit von Deponietechnik und -alter. Entsorgungspraxis Spezial 9 (11), 6.
- Em.V.613 (1992): Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldéponien, BGBl. Nr. 207, 613. Verordnung, Wien.
- Erhart-Schippék, W. (1995): Gashaushalt, Deponiegasnutzung und Emissionsminderung an Hausmülldeponien in der Steiermark. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Ic, Graz.
- Flögl, W. (1993): Allgemeine Aspekte der Sickerwasser-aufbereitung. In: A.S.A. Süd (Hrsg.): 1. Österreichisches Sickerwasser-Seminar, Judenburg.
- Gollob, M. (1995): Entgasung von Deponiekörpern. ÖWAV-Regelblattentwurf, ÖWAV, Wien.
- Kemmerling, W., Lechner, P., Pawlick, R. (1988): Richtlinien für Mülldeponien. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft und Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- Koch, F. (1991): Fortschrittliche Verfahrenskonzepte zur Sickerwasserreinigung. Österr. Wasserwirtschaft 43 (9/10), 250–259.
- Mayr, B. (Hrsg.) (1994): Tagungsband zum 2. Österreichischen Sickerwasserseminar, A.S.A. Süd, Bad Gleichenberg.
- Mayr, B., Lengyel, W. (1995): ÖWAV-Fragebögen zur Ermittlung der Nachsorgekosten österreichischer Deponien. Arbeitsausschuß „Nachsorgekosten von Deponien“, ÖWAV, Wien.
- Mayr, B., Novak, S., Horvat, P., Gaisch, F., Narodslawsky, M., Moser, A. (1994): Hochleistungsbiologie und Membrantrenntechnik zur Abwasserreinigung: Fallstudie Deponiesickerwasser. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 46 (7/8), 195–202.
- Reinhardt, T., Dach, J., Schwing, E., Jäger, J. (1995): Abbaukinetik und Emissionspotential der biologisch-mechanischen Behandlung von Restmüll und der anschließenden Deponierung. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 47 (1/2), 6–15.
- Steinlechner, E., Berghold, H., Cate, F. M., Jungmeier, G., Spitzer, J., Wutzl, C. (1994): Möglichkeiten der Vermeidung und Nutzung anthropogener Methanemissionen. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- Tabasaran, O., Rettenberger, G. (1987): Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen. In: Hösel, G., Bilitewski, N., Schenkel, W., Schnurer, H. (Hrsg.): Müllhandbuch Bd. 1, Erich Schmidt, Berlin.
- Wenger-Oehn, H., Braun, R. (1994): Untersuchungen zum Einsatz von Membranbioreaktorsystemen. Entsorgungspraxis 11, 49–57.
- Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Mayr, Ingenieurkonsulent für Verfahrenstechnik, Wittekweg 9/4, A-8010 Graz.