

■ BAFU ABTEILUNG KLIMA

Erhebung Verwertung Deponiegas über Fackelanlagen in der Schweiz 1990 bis 2014

Schlussbericht

23.9.2016



Consaba GmbH
Wankdorffeldstrasse 102
3014 Bern

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Sektion Industrie und Feuerungen
3003 Bern

Tel: 031 / 333 02 84, Mobile 079 / 671 11 46
Mail: bauen@consaba.ch, www.consaba.ch

Inhaltsverzeichnis

Dieser Bericht ist in folgende Kapitel unterteilt:

1 Einleitung	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Fragen des internationalen Expertenteams.....	4
1.3 Bildung von Deponiegas	5
2 Zielsetzung / Vorgehen.....	6
2.1 Zielsetzung	6
2.2 Vorgehen.....	6
3 Entwicklung der Abfallentsorgung in der Schweiz	8
3.1 Situation vor der Inkraftsetzung der TVA.....	8
3.2 Entwicklung der Regulierungen im Abfallwesen.....	8
3.2.1 Ablagerungsverbot für organisches Material	9
3.2.2 Kehrichtverbrennungsanlagen in der Schweiz	9
4 Abschätzung der deponierten Abfallmengen	10
4.1 Historische Betrachtungen zur Abfallentsorgung	10
4.2 An Entsorgungssystem angeschlossene Einwohner.....	10
4.3 Abfallmengen und deren Behandlung.....	11
5 Erhebung der Daten zu den geordneten Deponien.....	14
5.1 In Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgte Menge Methangas.....	14
5.2 Datengrundlagen (geordnete Deponien)	14
5.2.1 Liste der Deponien und ihre technische Ausrüstung	14
5.2.2 Umfrage bei Deponiebetreibern.....	15
5.2.3 Technische Ausrüstung zur Entgasung/Verwertung	15
5.2.4 Betriebsdauer der Deponien	16
5.2.5 Erhebung der Deponiegasmengen nach Verwertungsart	17
5.2.6 Kategorien der Verwertungsart (geordnete Deponien).....	17
5.3 Vorgehen bei der Datenerhebung (geordnete Deponien)	18
5.3.1 Datenrecherche.....	18
5.3.2 Analyse und Hochrechnung.....	19
6 Ergebnisse	20
6.1 Aufteilung in Kategorien	20
6.2 Charakteristik der Deponiegasemissionen nach Deponiekategorie 22	
6.2.1 Kategorie 1 – Aktive Entgasung mit Verwertung (Motor; Fackel; Kessel)	22
6.2.2 Beispiel Deponie der Kategorie 1	23
6.2.3 Methodik der Hochrechnung.....	25
6.2.4 Hochrechnung für Deponien der Kategorie 1	26
6.2.5 Kategorie 2 – aktive Entgasung mit thermischer Behandlung (Fackel; Kessel; Nichtkatalytische Oxidation; FLOX-Brenner)	26
6.2.6 Kategorie 3 – aktive Entgasung ohne Methanelimination (Biofilter, Aerobisierung).....	27
6.2.7 Kategorie 4 – Deponien ohne aktive Entgasung (freie Ausströmung in Atmosphäre)	28

7 Schlussfolgerung	29
7.1 Gesamtübersicht	29
7.2 Der Einfluss der Kategorien	30
7.2.1 Deponiegas in Fackelanlagen.....	31
7.2.2 Prognose bis 2050	34
7.2.3 Fazit.....	35
8 Anhang	36
8.1 Umfrage.....	36
8.2 Ergebnisse der Umfrage	38
8.3 Liste der Deponien und ihre technischen Ausrüstung	39
8.4 Kehrichtverbrennungsanlagen Erstinbetriebnahmen	40
8.5 Vergleich historisch deponierte Abfallmengen mit im Deponiemodell BAFU IPCC 2006 verwendeten Mengen	41
8.6 Anteil in geordneten Deponien abgelagerte Abfälle	42
8.7 Abbildungsverzeichnis	44
8.8 Tabellenverzeichnis.....	46
8.9 Glossar	47

Dokument: Schlussericht Fackelgas 2016_09_23

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) führt die Datenbank des Schweizerischen Klimagasinventars, in der die Klimagasemissionen der Schweiz berechnet werden. Die Daten werden jährlich im Rahmen der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls an die UNFCCC übermittelt (für weitere Informationen siehe www.bafu.admin.ch/climate-reporting). Neben vielen anderen klimarelevanten Gasemissionen müssen auch die Methangasemissionen aus schweizerischen Abfalldeponien aufgeführt werden.

Die Berechnung dieser Methanemissionen erfolgt nach folgender Formel:
Methangasemissionen = Methangasmenge – Verwertung – Entsorgung

- Methangasmenge
aus den abgelagerten Abfallmengen nach einer Formel der IPCC berechnet (Methangas-Prognose)
- Verwertung
in Gasmotoren und thermischen Verwertungsanlagen (Kessel- und Muffelanlagen) verbrannte Menge Methangas
- Entsorgung
in Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgte Menge Methangas

Während für die verwertete Menge (Verwertung) Messwerte vorliegen, wurde ursprünglich für die in Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgte Menge Methangas mangels Messdaten eine Annahme von 10% der theoretisch nach dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 prognostizierten Menge Methangas getroffen.

1.2 Fragen des internationalen Expertenteams

Dem internationalen Expertenteam (Expert Review Team ERT), welches die jährlichen Submissionen des Klimagasinventars begutachtet, erschien die oben erwähnte Annahme von 10% für den Bereich Entsorgung zu wenig begründet. Es wurde eine genauere Herleitung verlangt.

Das Expertenteam stellte dazu anlässlich der Review im Herbst 2014 folgende Fragen:

ERT: Activity data for CH₄ flared and CH₄ used in co-generation units are indicated on the Table 8-7 of NIR. Could you provide detailed explanation of methodology to measure or estimate amount of CH₄ recovery?

Als erste Antwort hat das BAFU Folgendes festgehalten:

BAFU: The amount of CH₄ used in co-generation stems from the Swiss statistics of renewable energies (SFOE 2013a). Due to the fact that no reliable data for the amount of CH₄ flared exists, this value is assumed to be 10% of the total amount of CH₄ occurring from waste disposal sites. FOEN experts for waste disposal sites believe that this share is probably underestimating the actual amount that is flared. It is planned to further investigate this to try to come up with a better estimate, but it cannot be said yet whether this will succeed.

Mit dieser Antwort waren die Experten nicht zufrieden:

1.2. The ERT consider that your explanation to estimate amount of CH₄ flared is not sufficient. Could you elaborate your statements of “probably underestimating the actual amount”? What is the basis for this assumption? Also, in order to evaluate the methodology, please provide the detailed calculations (on spread sheets, if possible) for the amount of CH₄ recovered, including measured/estimated data, related parameters and assumptions for whole time series for flared and used in co-generation units.

Mit der vorliegenden Studie soll deshalb die in der Schweiz auf Deponien abgefackelte Menge Methangas besser abgeschätzt werden.

1.3 Bildung von Deponiegas

In Abfalldeponien, in denen organisches Material abgelagert ist, wird durch den biologischen Abbauprozess Methangas erzeugt.

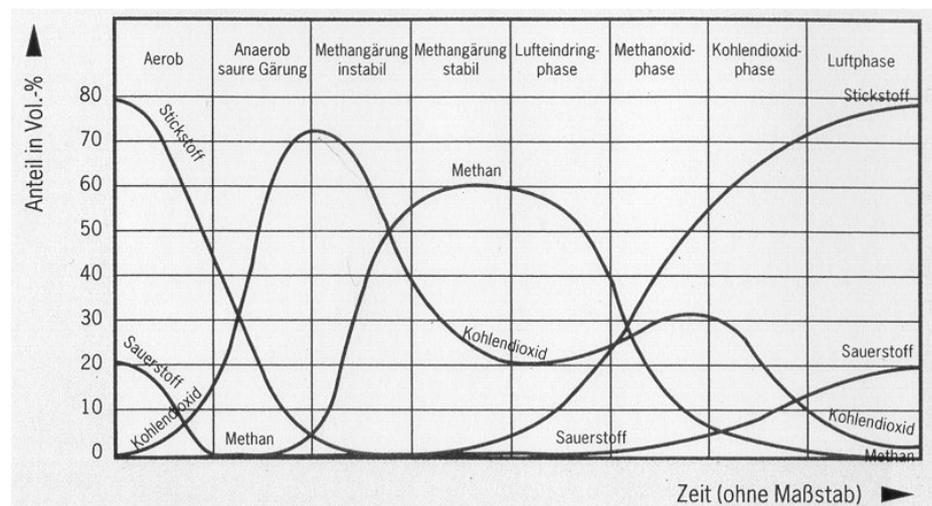


Abbildung 1 Verlauf Methanisierungsphasen Quelle: BAFU

Aus dem Diagramm wird deutlich, wie die Methangasproduktion in der Deponie stattfindet. Wichtig ist zu erkennen, dass es sich nicht um einen linearen Prozess handelt. Vielmehr wird er von sehr vielen Faktoren beeinflusst, gebremst oder beschleunigt. Jede Deponie hat ihr eigenes Verhalten. Innerhalb einer Deponie können unterschiedliche Methanisierungsphasen herrschen. Die Produktion von Deponiegas wird aufgrund der erfolgten jährlichen Ablagemengen mit der First Order Decay (FOD) Methode gemäss 2006 IPCC Reporting Guidelines¹ berechnet.

Die Berechnung bildet diese Prozesse möglichst gut ab, ist und bleibt aber eine Prognose mit vielen Unsicherheitsfaktoren.

Hinzu kommen weitere Einflussfaktoren wie die unterschiedliche Einbauart, die geometrische Form des Deponiekörpers und die unterschiedliche technische Ausrüstung zur Erfassung und Behandlung von Deponiegas.

¹ 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Intergovernmental Panel on climate change

2 Zielsetzung / Vorgehen

2.1 Zielsetzung

Mit einer Zusammenstellung aller in der Schweiz seit 1990 betriebenen Reaktordeponien, deren technischen Ausrüstung, ihrem Betriebsverhalten sowie den abgelagerten Abfallmengen sollen die Grundlagen erarbeitet werden, um die in Fackelanlagen verwertete Menge Methangas über den Betrachtungszeitraum von 1990 bis 2014 genauer beziffern zu können.

Diese Periode entspricht dem Zeitraum, in dem die Werte im Klimainventar abzubilden sind. Wo Messwerte vorhanden sind, sollen diese beschafft und ausgewertet werden. Wo keine Messwerte vorhanden sind, soll mit Abschätzungen und Hochrechnungen gearbeitet werden.

Erste Abschätzungen der auf den geordneten Deponien abgelagerten Abfallmengen haben, insbesondere für die im Zeitraum vor 1990, Abweichungen von den bisher vom BAFU für die Berechnung der Gasprognose verwendeten Abfallmengen ergeben. Um hier Datensicherheit zu erlangen, soll im Rahmen dieser Studie die gesamthaft auf Deponien abgelagerte Abfallmenge verifiziert werden.

2.2 Vorgehen

In einem ersten Schritt werden die in der Schweiz im Zeitraum ab 1950 auf Deponien abgelagerten Abfallmengen aufgrund von historischen Recherchen abgeschätzt und mit den bisher im BAFU für die Methangas-Prognose verwendeten Abfallmengen verglichen. Diese Abfallmengen stellen die zentralen Inputdaten für das „Deponiemodell BAFU IPCC 2006“ dar, welches auf dem für die Schweiz parametrisierte FOD-Modell gemäss IPCC 2006 beruht.

Glossar

Weiter soll mit Hilfe einer Umfrage bei Betreibern von Deponien und mittels Recherchen in Archivdaten die im Zeitraum von 1990 bis heute in Fackeln und fackelähnlichen Anlagen entsorgte Menge Methangas quantifiziert werden. Anhand der Betrachtung der Entwicklung der Abfallentsorgung in der Schweiz und dem Ermitteln der Abfallmengen vor 1990 soll beurteilt werden, wie Ablagerungen vor 1990 das Resultat beeinflussen.

Der vorliegende Bericht basiert deshalb auf der Auswertung der Daten aller in der Schweiz bekannten „geordneten“ Deponien. Dies sind meist Deponien mit einem Volumen von mehr als 100'000m³. Kleinere und „wilde“ Deponien wurden nicht erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass dort auch keine Installationen zur Verwertung und Entsorgung von Deponiegas vorhanden waren.

Die Erhebung 2015 hat folgenden Inhalt:

- Darstellung der Entwicklung der Abfallentsorgung in der Schweiz mit Verifizierung der vorhandenen historischen Abfallmengen (Kapitel 3)
- Verifizierung der in der Schweiz seit 1950 gesamthaft auf Deponien abgelagerten Abfallmengen (Kapitel 4)
- Erhebung und Darstellung der Daten zu den geordneten Deponien (mittels Umfrage bei Betreibern und Sachverständigen; Analyse der Daten von gut dokumentierten Anlagen, Hochrechnung auf die Gesamtmenge der geordneten Deponien; Kapitel 6)
- Quantifizierung der in Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgten Mengen Methangas (Kapitel 7)

3 Entwicklung der Abfallentsorgung in der Schweiz

3.1 Situation vor der Inkraftsetzung der TVA

Bis in die 1950er Jahre wurde der Abfall in der Regel in Tobel, Gruben, Flüssen und auf Feldern entsorgt. Später begannen die Gemeinden mit der Sammlung und der Ablagerung in „wildem“, bzw. ungeordneten Deponien. Die Abfallmengen wurden quantitativ nicht erfasst. Nach und nach entstanden in den Städten die ersten Kehrichtverbrennungsanlagen. Erst jetzt wurde hier und da die Menge oder das Gewicht der Abfälle registriert. Ein Grossteil der Bevölkerung war aber bis Ende 60er Jahre nicht an ein Entsorgungssystem angeschlossen.

Erst mit zunehmender Regulierung des Abfallwesens wurden die Abfälle ab ca. 1976 in sogenannten „geordneten“ Deponien abgelagert. Nur diese geordneten Deponien verfügten vermehrt über technische Ausrüstungen zur Erfassung und Entsorgung des Methangases. Somit wurde auch nur auf diesen Anlagen Methangas in Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgt. Dies wurde 1991 mit der Einführung der TVA für Reaktordeponien obligatorisch. Im Anschluss daran wurden einige bestehende Deponien saniert und nachgerüstet.

3.2 Entwicklung der Regulierungen im Abfallwesen

Erst mit der Zunahme der Bevölkerung und dem Grösserwerden der Entsorgungsprobleme in den Städten wurde die Abfallentsorgung zum Thema für gesetzliche Regelungen und vermehrt zur Aufgabe der öffentlichen Hand. Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Regulierung des Abfallwesens in der Schweiz.

Jahr	Gesetz	Inhalt	Deponietechnik
1955	Gewässerschutzgesetz	Keine gewässerverunreinigenden Stoffe in Gewässern	Rottedeponie
1971	Revision Gewässerschutzgesetz	Schliessung von gewässergefährdenden Deponien	Sandwichdeponie
1976	Deponierichtlinie	Deponieklassen / Deponieaufbau	Geordnete Deponie
1986	Abfall-Leitbild	Schliessung der Kreisläufe, Verwertung oder Endlagerung	Endlagerkonzept
1991	Technische Verordnung über Abfälle TVA	Bewilligungspflicht, Anforderungen an Planung, Standort, Technik, Betrieb, Abfallstatistik	Inertstoffdeponie Reststoffdeponie Reaktordeponie
2000	Änderung der TVA	Verbot der Ablagerung von organischen Abfällen	

Abbildung 2 Quelle: Archiv BAFU „Deponierung in der Schweiz: Überblick Situation bis zum Ablagerungsverbot für organische Abfälle in der TVA“

Mit der Inkraftsetzung der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) am 1. Februar 1991, wurden klare Anforderungen an die Entgasung von Deponien festgelegt. Seither müssen die Deponien (Reaktordeponien), in denen organische Abfälle abgelagert wurden, über Anlagen zur Erfassung, Ableitung, Verwertung oder Behandlung des Deponiegases verfügen (Anhang 2 Ziffer 24 TVA). Kleinere Deponien, bei denen sich eine Verwertung nicht lohnte, wurden lediglich mit Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen zur Entsorgung des Deponiegases ausgerüstet.

Auf grösseren Deponien wurden neben Fackelanlagen auch Gasmotoren zur Verwertung von Deponiegas zur Stromproduktion installiert. Die Fackelanlagen mussten so dimensioniert sein, dass sie bei Ausfall der Gasmotoren die anfallende Menge Deponiegas vollständig übernehmen konnten.

In der TVA wurde gleichzeitig die Überwachung dieser Anlagen definiert (Art. 28 TVA). Die Betreiber waren demnach verpflichtet, die Anlagen funktionsfähig und permanent in Betrieb zu halten und mindestens zweimal jährlich von der Behörde überprüfen zu lassen. Somit unterstanden und unterstehen diese Anlagen einer regelmässigen Wartung und einer permanenten Überwachung, was in den allermeisten Fällen zu einem Betriebsstundenanteil von mehr als 95% führte.

Die Menge des in Gasmotoren verwerteten Deponiegases wurde in der Regel messtechnisch erfasst. Die Mengen, die über die Fackelanlagen entsorgt wurden, wurden nicht auf allen Deponien gemessen. Trotz der installierten Absauganlagen kann nie die gesamte Menge des in der Deponie produzierten Gases erfasst, verwertet oder entsorgt werden. Ein Teil davon emittiert immer über die Oberfläche in die Atmosphäre. In moderneren Anlagen wurden auch diese Oberflächenemissionen periodisch gemessen und quantifiziert.

3.2.1 Ablagerungsverbot für organisches Material

Seit dem Jahr 2000 ist in der Schweiz das Ablagern von organischem Material verboten. Die Produktion von Methangas in Deponien ist seit diesem Zeitpunkt stark zurückgegangen.

3.2.2 Kehrichtverbrennungsanlagen in der Schweiz

In der Schweiz wurden bereits in den 60er Jahren die ersten Kehrichtverbrennungsanlagen in Betrieb genommen. Als Folge davon wurde immer weniger Hauskehricht in Deponien abgelagert.

Die Daten der Inbetriebnahme der schweizerischen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) sind in der Tabelle im Anhang 8.4 dargestellt.

4 Abschätzung der deponierten Abfallmengen

4.1 Historische Betrachtungen zur Abfallentsorgung

Die folgenden Betrachtungen basieren auf Recherchen im Archiv des BAFU, Befragungen von Abfallverantwortlichen in verschiedenen Kantonen (Basel, Bern, Luzern, Zürich), Angaben des Bundesamtes für Statistik BfS und der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG.

4.2 An Entsorgungssystem angeschlossene Einwohner

Gemäss den Recherchen im Archiv des BAFU und aus Befragungen von Sachverständigen in den oben aufgeführten Institutionen sind über die Entwicklung der an ein Entsorgungssystem² angeschlossenen Einwohner nur sehr spärliche Informationen vorhanden. Erst ab den 1970er Jahren stehen Zahlen zur Verfügung. Sie sind aber immer noch unvollständig. Die folgende Tabelle und die Abbildung zeigen eine Zusammenstellung, eine Abschätzung der Entwicklung (bis 1970 Zahlen aus Archiv BAFU ab 1990 Zahlen Abfallstatistik BAFU).

Jahr	Einwohner total CH	An Entsorgungssystem angeschlossene Einwohner	
1950	4'717'200	30%	1'415'160
1960	5'360'153	45%	2'412'069
1970	6'193'064	54%	3'344'255
1980	6'335'243	96%	6'081'833
1990	6'750'693	100%	6'750'693
2000	7'204'055	100%	7'204'055
2010	7'870'134	100%	7'870'134

Tabelle 1 Anteil der an ein Entsorgungssystem angeschlossenen Einwohner

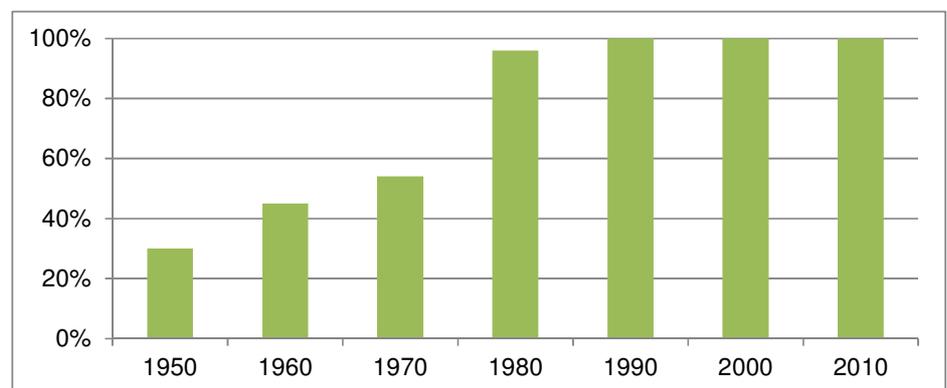


Abbildung 3 Anteil der an ein Entsorgungssystem angeschlossenen Einwohner (Schätzung)

Erst seit 1990 sind alle Einwohner der Schweiz an ein Entsorgungssystem angeschlossen.

² „An ein Entsorgungssystem angeschlossen“ bedeutet hier, dass in diesem Gebiet eine regelmässige Sammlung und Entsorgung der Abfälle durch die öffentliche Hand erfolgt

4.3 Abfallmengen und deren Behandlung

Aus verschiedenen historischen Dokumenten und Statistiken können einzelne Angaben zu den spezifischen Abfallmengen pro Kopf entnommen und verglichen werden.

Jahr	kg/EW*a BFS		kg/EW*a Kanton Luzern	Verschie- dene Quellen BUS / SR 27	Basel Statis- tisches Jahrbuch
	total	ohne Sepa- ratsammlung	Haus- kehricht	Hauskehricht	Kehrlicht + Sperrgut
1950	250	250			146
1960	280	260			186
1970	309	280	303	261	259
1980	444	359	337	360	392
1990	603	434	441	427	414
2000	659	362			
2010	706	349			

Tabelle 2 Spezifische Abfallmengen; Vergleich verschiedener Literaturangaben

Die Angaben aus diesen verschiedenen Quellen zeigen, dass die Grössenordnungen der spezifischen Abfallmenge pro Einwohner ungefähr übereinstimmen (siehe auch Anhang 8.5).

Über die gesammelten Mengen und die Entsorgungsart (Deponie, KVA, Kompostierung, usw.) sind bis in die 80er Jahre nur vereinzelt Angaben vorhanden.

Die Angaben zu den Jahren 1990 bis 2010 wurden aus aktuellen Zahlen der Abfallstatistik ergänzt. Seit 2000 gilt das Ablagerungsverbot für organische Abfälle. Weil zu diesem Zeitpunkt noch zu wenig Verbrennungskapazität vorhanden war, wurden noch über diesen Zeitpunkt hinaus Sondergenehmigungen zu deren Ablagerung ausgestellt.

In einer Zusammenstellung der „Abfallmengen in der Schweiz seit 1932 nach Art der Behandlung“ aus dem Archiv des BAFU, ist folgende Entwicklung der Anteile der Entsorgungsarten dargestellt:

Jahr	wilde Deponie	geordnete Deponie	Kompos- tierung	Verbrennung in KVA
1930	86%	0%	4%	10%
1940	84%	0%	4%	13%
1950	82%	0%	3%	15%
1955	81%	0%	3%	16%
1960	63%	1%	4%	32%
1970	44%	2%	5%	48%
1980	4%	15%	4%	76%
1990	1%	19%	0.5%	80%
2000	0%	11%	0.5%	88%
2010	0%	0%	0	100%

Tabelle 3 Anteil der entsorgten Mengen nach Entsorgungsart an der gesamten Abfallmenge

In der untenstehenden Grafik sind die Entsorgungswege - ungeordnete Deponie – geordnete Deponie – Verbrennung - Kompostierung aufgrund historischer Angaben (Handskizze aus dem BAFU-Archiv vom 13.6.1984) dargestellt. Die Zahlen ab 1990 stammen aus der Abfallstatistik des Bundesamtes für Statistik BfS. Die Angaben beziehen sich auf die gesamten entsorgten Abfallmengen, ohne Separatsammlungen.

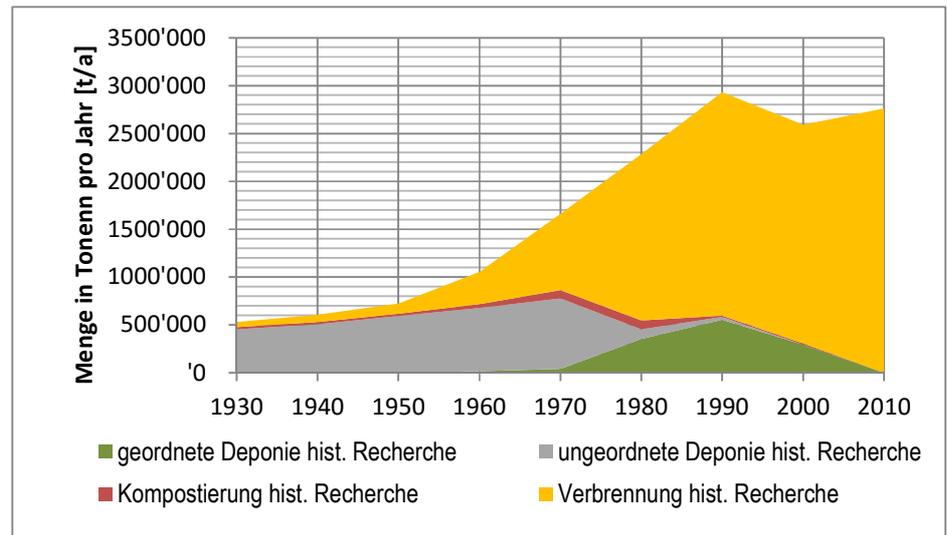


Abbildung 4 Anteil der entsorgten Mengen nach Entsorgungsart (historische Recherche)
Quelle: Archiv BAFU „Entwicklung der Abfallmengen in der Schweiz seit 1932 nach Art der Behandlung“ ab 1990 BfS

Die obenstehenden, aus der historischen Recherche hergeleiteten Abfallmengen, werden in der nächsten Grafik mit den Abfallmengen, die für das Depo- niemodell BAFU IPCC 2006 verwendet wurden und mit den gemäss Erhebung 2015 deponierten Mengen (nur geordnet abgelagerte Abfälle; siehe Kap. 5) verglichen. Es zeigt sich, dass die Werte auch da ungefähr übereinstimmen.

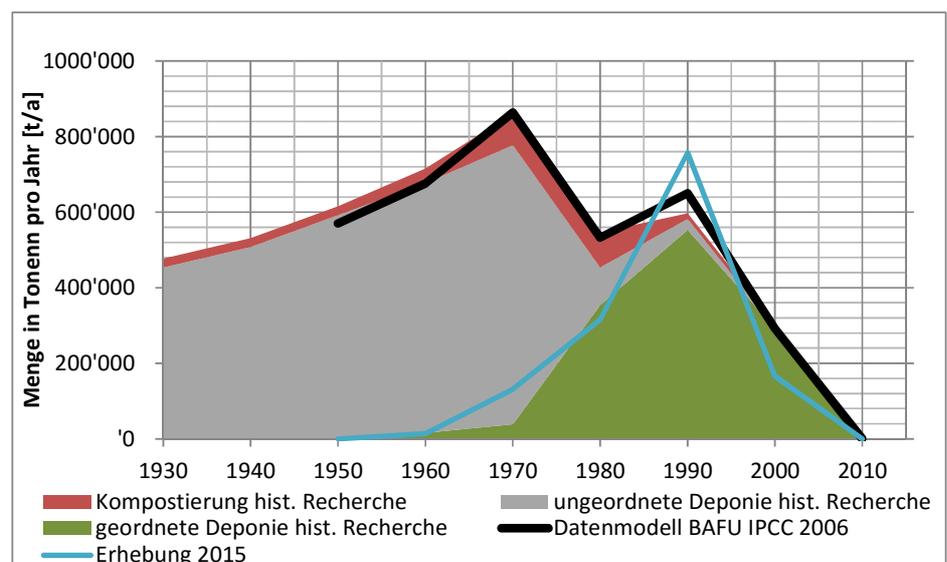


Abbildung 5 Vergleich Mengen historische Recherche (geordnet/ungeordnet), Depo- niemodell BAFU IPCC 2006, Erhebung 2015

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die im Deponiemodell BAFU IPPC 2006 verwendeten Abfallmengen ungefähr der Wirklichkeit entsprechen. Wichtig ist die Erkenntnis, dass in der Zeit bis 1980 die deponierten Abfälle noch meist in sogenannten „wilden“ bzw. ungeordneten Deponien abgelagert wurden, die über keine Gasfassungssysteme verfügten. In der späteren Diskussion der Ergebnisse wird der Einfluss dieser wilden Deponien auf den Betrachtungszeitraum 1990 bis 2014 besprochen und dargestellt.

5 Erhebung der Daten zu den geordneten Deponien

5.1 In Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgte Menge Methangas

Für die Erhebung 2015 der in Fackeln oder fackelähnlichen Anlagen entsorgten Deponiegasmengen wird wie folgt vorgegangen:

- Sichtung der vorhandenen Unterlagen und Zusammenstellung des Inventars der aktiven und geschlossenen Reaktordeponien inklusive abgelagerte Mengen in der Schweiz seit 1990.
- Erhebung der technischen Ausrüstung (Fackelanlage; Gasmotoren) und Betriebsweise anhand von Dokumenten und Messdaten
- Wo keine oder wenig Daten vorliegen wird eine Umfrage bei Betreibern oder Kantonen durchgeführt.
- Bilden und Darstellen von „typischen“ technischen Kategorien nach Art der Ausrüstung, der Betriebsart und soweit möglich der ausgewerteten Messdaten
 - technisch gut ausgerüstete Deponien mit Gasverwertung in Motoren
 - technisch gut ausgerüstete Deponien ohne Gasmotoren, nur Fackelanlagen
 - Deponien mit technischer Ausrüstung zur Gasabsaugung (Biofilter oder Aerobisierung)
 - Deponien ohne technische Ausrüstung zur Gasabsaugung (passives, freies Ausströmen von Deponiegas in die Atmosphäre)
- Abschätzung (Hochrechnung) der in Fackelanlagen entsorgten Gasemissionen anhand der Zuteilung zu den vier genannten Kategorien. Je nach Qualität der vorhandenen (Mess-)Daten in jährlichen bzw. 5-jährlichen Schritten.

Obschon einige der „geordneten“ Deponien bereits vor 1990 den Betrieb eingestellt haben, erzeugen sie nach wie vor Methangasemissionen, die für den genannten Betrachtungszeitraum relevant sein können.

5.2 Datengrundlagen (geordnete Deponien)

5.2.1 Liste der Deponien und ihre technische Ausrüstung

Die TVA definiert folgende drei Deponietypen:

- Inertstoffdeponien
- Reststoffdeponien
- Reaktordeponien/Schlackendeponien

Seit dem Jahr 2000 ist die Ablagerung von Hauskehricht in der Schweiz verboten. Seither werden zwar noch organisch belastete Abfälle abgelagert, diese dürfen aber den Grenzwert von 50'000mg/kg TOC (5 Gewichts-%) nicht überschreiten. Die Bildung von Methan aus diesen Abfällen ist nicht mehr wahrscheinlich. Eine Ausnahme bildeten Deponien in Gebieten, in denen es noch keine KVA gab oder die keine ausreichende Kapazität hatten, um den gesamten Kehricht der Region zu verbrennen. Deshalb wurden in einigen wenigen Deponien auch nach dem Ablagerungsverbot noch Ausnahmegewilligungen zur Ablagerung von Kehricht erteilt.

In den folgenden Betrachtungen werden also nur Reaktordeponien bzw. Deponien mit einem Reaktorkompartiment berücksichtigt.

Obwohl die TVA die Kantone und den Bund verpflichtet, eine Liste der in der Schweiz in Betrieb stehenden Deponien zu führen, gibt es erst seit Kurzem eine solche vollständige Liste. Um trotzdem eine Liste der zwischen 1990 und 2014 in Betrieb stehenden Deponien zu erhalten, wurden weitergehende Recherchen angestellt. Folgende Dokumente dienten als Grundlage:

- (Mehrjahres-)Abfallstatistik BAFU / BUWAL
- Umfrage bei Deponiebetreibern
- Eigene Recherchen im Internet (auf Websites von Betreibern, Kantonen, Verbänden)
- Online-Kataster von Kantonen und Bundesstellen (Altlastenkataster)
- Angaben von Kantonen
- Angaben über abgelagerte Abfallmengen und technische Ausrüstung der Deponien; Oester Messtechnik Thun
- Erhebung des Bundesamtes für Energie (BFE)

Die im Anhang 8.3 beigelegte Liste zeigt die wichtigsten in der Schweiz betriebenen Reaktordeponien, auf denen organische Abfälle (Hauskehricht) abgelagert wurden. Zudem ist daraus ersichtlich, von wann bis wann organische Abfälle abgelagert wurden. Deponien, in denen keine organischen Abfälle abgelagert wurden (Inertstoffdeponien, Schlackenkompartimente auf Reaktordeponien, Reststoffdeponien, Inertstoffdeponien für ausschliesslich sauberen Aushub) sind in dieser Liste nicht enthalten.

5.2.2 Umfrage bei Deponiebetreibern

Da beim BAFU keine detaillierten Daten vorhanden sind, wurde bei einigen als repräsentativ erachteten Deponien eine Umfrage durchgeführt. Anhand des im Anhang 8.1 beigelegten Fragebogens wurden die Betreiber gebeten, ihre Angaben über abgelagerte Mengen, Ausrüstung, Verwertung usw. für die Jahre 1990 bis heute einzutragen.

Nur wenige Betreiber konnten gut verwendbare und vollständige Daten liefern. Wegen der bereits abgelaufenen Aufbewahrungspflicht sind die Daten teilweise bereits nicht mehr vorhanden. Die Umfrage lieferte bei einzelnen Deponien dennoch gute Resultate. Mehrheitlich sind die Daten aber zu lückenhaft um daraus eine Charakteristik über den Umgang mit dem Deponiegas (Verwertung, Abfackelung usw.) ableiten zu können. Die Liste der angefragten Deponien mit der Beurteilung der Ergebnisse, ist im Anhang 8.2 beigelegt.

5.2.3 Technische Ausrüstung zur Entgasung/Verwertung

Aufgrund der Bestimmungen der am 1. Februar 1991 in Kraft gesetzten TVA, mussten die Reaktordeponien mit Anlagen zur Entgasung ausgerüstet werden. Zur Entsorgung bzw. Verwertung des abgesaugten Deponiegases wurden meist Fackelanlagen, Gasmotoren oder Heizkessel eingesetzt. Beim Anfall von Schwachgasen (Deponiegas mit tiefen Methangehalten) oder geringen Mengen wurden vereinzelt Biofilter oder Kompostmieten eingesetzt. Diese dienten aber hauptsächlich der Geruchsverminderung. Methan wird in diesen Anlagen nur ganz schwach abgebaut. Die Wirkung dieser Anlagen ist vernachlässigbar.

5.2.5 Erhebung der Deponiegasmengen nach Verwertungsart

Während des Betriebs der Deponien musste aus Sicherheitsgründen permanent die Gasqualität (CH_4 ; O_2 ; CO_2) überwacht werden. Meist wurden folgende zusätzlichen Daten erfasst:

- Gesamte abgesaugte Deponiegasmenge Nm^3/Jahr
- Gesamte in Gasmotoren verwertete Gasmenge Nm^3/Jahr
- Gesamte in Heizkesseln / Muffelöfen verwertete Gasmenge Nm^3/Jahr
- Gesamte über Fackelanlage thermisch entsorgte Gasmenge Nm^3/Jahr

Aufgrund des Verbotes der Ablagerung von Hauskehricht ist die Menge verwertbaren Deponiegases seit dem Jahr 2000 stark zurückgegangen. Die Verwertung und die Messung der Mengen wurden immer uninteressanter. Verwertungsanlagen und die dazugehörigen Messinstrumente wurden abgebaut und nicht mehr ersetzt. Nur noch die minimalen, für den sicheren Betrieb der Anlage notwendigen Instrumente und Datenerfassungssysteme wurden weiter betrieben. Die entsprechenden Daten sind oft nur in Jahresberichten erfasst. Viele dieser Dokumente, insbesondere solche aus den 80er- und 90er-Jahren, sind bereits entsorgt oder können nur noch mit grossem Aufwand zugänglich gemacht werden. Es gibt nur wenige Deponien deren Daten noch weitgehend lückenlos vorhanden sind.

Zur weiteren Betrachtung wurden die geordneten Deponien in vier Kategorien eingeteilt. Dies erlaubt es, die verwerteten Deponiegasmengen aufgrund einiger typischer Deponien mit guter Datengrundlage und anhand der abgelagerten Abfallmengen und pro Deponiekategorien auf gesamtschweizerische Werte der geordneten Deponien hochzurechnen.

5.2.6 Kategorien der Verwertungsart (geordnete Deponien)

Folgende vier Kategorien wurden gebildet:

- KAT 1 aktive Entgasung mit Verwertung (Motor; Fackel; Kessel)
- KAT 2 aktive Entgasung mit thermischer Behandlung (Fackel; Kessel; Nichtkatalytische Oxidation (Voxibox); FLOX-Brenner)
- KAT 3 aktive Entgasung ohne Methanelimination (Biofilter, Aerobisierung)
- KAT 4 Deponien ohne aktive Entgasung (freie Ausströmung in die Atmosphäre)

Die Kategorien teilen sich wie folgt auf:

Kategorie	Anzahl	Relevantes Volumen m^3
1= aktiv Motor und Fackel / Kessel	11	8'320'000
2= aktiv Fackel / Kessel/ Voxibox / FLOX-Brenner	16	4'040'000
3= aktiv Biofilter / Atmosphäre	2	450'000
4= passiv ohne Entgasung / Atmosphäre	24	3'590'000

Tabelle 5 Deponien nach Kategorien

Bei den Kategorien 3 und 4 (25% nach Volumen; Abbildung 6) wird das Methan nicht oxidiert und strömt ungehindert in die Atmosphäre aus.

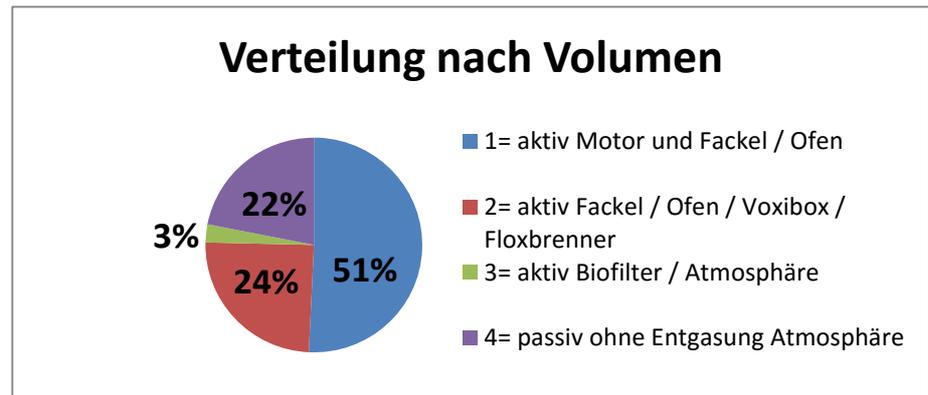


Abbildung 6 Volumenanteil der vier Kategorie der geordneten Deponien

5.3 Vorgehen bei der Datenerhebung (geordnete Deponien)

5.3.1 Datenrecherche

Wie bereits oben beschrieben, wurden bei einigen als repräsentativ erachteten Deponien mittels einer Umfrage Betriebsdaten nachgefragt (siehe Kapitel 5.2.2.). Spätestens seit der Inkraftsetzung der TVA 1991 waren die Deponien verpflichtet, ihre Anlagen zu warten und zu überwachen. Zur Dokumentation der Kontrollen und Überwachungen wurden Daten erhoben und Jahresberichte erstellt. Viele dieser Berichte sind schon 10 Jahre alt oder älter. Wie bereits oben beschrieben, sind diese Berichte und Daten oft bereits nicht mehr vollständig verfügbar. Die Daten wurden auch in sehr unterschiedlicher Qualität erhoben und festgehalten. Nur ganz wenige Daten sind noch elektronisch zugänglich. Konnten noch Daten gefunden werden, mussten diese meist aus mehreren Berichten, Messprotokollen usw. zusammengetragen und erfasst werden. Bei lückenhaften Daten wurden die Zwischenwerte interpoliert oder aufgrund bruchstückhafter Angaben und weiteren Informationen selber berechnet.

Oft fehlen die Angaben zu den abgelagerten Mengen und es sind nur Angaben zur Gasverwertung vorhanden. Bei einzelnen, meist neueren Anlagen, sind die Daten aber doch in genügender Qualität vorhanden. Teilweise bestehen sogar Angaben zu den Restemissionen über die Oberfläche (FID-Messungen).³

Für die Deponien der Kategorie 1 konnten die Daten durch intensive Recherchen bei verschiedenen Quellen recht gut erhoben werden.

Für die andern Kategorien sind sehr viel weniger Daten und oft nur lückenhafte vorhanden. Für eine weitere Bearbeitung muss hier auf Erfahrungswerte und Abschätzungen zurückgegriffen werden.

Die Angaben zu den Volumen stammen ebenfalls aus verschiedenen Quellen. Die Gesamtvolumen konnten meist recht zuverlässig ermittelt werden. Die Schwierigkeit besteht darin abzuschätzen, wie viel von diesen Volumen für die Ablagerung von Hauskehricht (organischer Abfall) verwendet wurde. Nur der organische Abfall ist schlussendlich relevant zur Bestimmung der Deponie-

³ FID Flammen-Ionisations-Detektor zur Messung der Kohlenwasserstoffemissionen an der Deponieoberfläche

gasmengen. Viele Deponien haben auch noch Bau- oder Sperrgutabfälle angenommen, deren Gasproduktionspotential sehr gering ist.

5.3.2 Analyse und Hochrechnung

Wegen der fehlenden Daten müssen die Ergebnisse der Auswertung von vorhandenen Daten anhand der Kategorisierung der Deponien auf die Gesamtmenge hochgerechnet werden. Zudem müssen die Ergebnisse über die Zeit verteilt zugeordnet werden. Dabei wurde wie folgt vorgegangen und in der Tabelle im Anhang 8.3 zusammenfassend dargestellt:

- Erstellung Inventar der Deponien
- Erfassen Betriebszeitraum, Zeitraum der Ablagerung organischer Abfälle
- Erstellen von Quervergleichen und weiteren Recherchen
- Ermitteln der technischen Ausrüstung zur Fassung, Behandlung und Entsorgung von Deponiegas (Tabelle Anhang 8.3)
- Erfassen der Betriebszustände (Betrieb Gasmotor; Heizung; Fackel; Biofilter; Aerobisierung) soweit möglich, Verifizierung durch Vergleich mit Messdaten
- Einteilung der Deponien in die Kategorien
- Ermitteln der relevanten Volumen/Ablagerungsmengen und Darstellung der Ablagerungsmengen organischer Abfälle über der Zeitachse
- Erstellung der Gasprognose pro Kategorie (mit dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 unter Verwendung der deponierten Abfallmengen pro Kategorie als Inputdaten) und Bestimmung des %-Anteils als Basis für die Hochrechnung der Einzelergebnisse pro Kategorie aus den gut dokumentierten Beispielen
- Datenerhebung, Berechnungen mehrerer Beispiele pro Kategorie, Erstellung Grafiken und Grundlagen für Hochrechnung
- Erstellung Hochrechnung mit Bezug zur gesamten Gasmenge

6 Ergebnisse

6.1 Aufteilung in Kategorien

Die folgende Grafik zeigt die Verteilung der Anzahl geordneter Deponien nach Art der Gasbehandlung, eingeteilt in die Kategorien 1-4, über die Zeit. Es zeigt sich, dass mehr als die Hälfte dieser Deponien technisch hochstehend ausgerüstet waren und folglich das Deponiegas mit hoher Effizienz genutzt oder thermisch entsorgt haben.

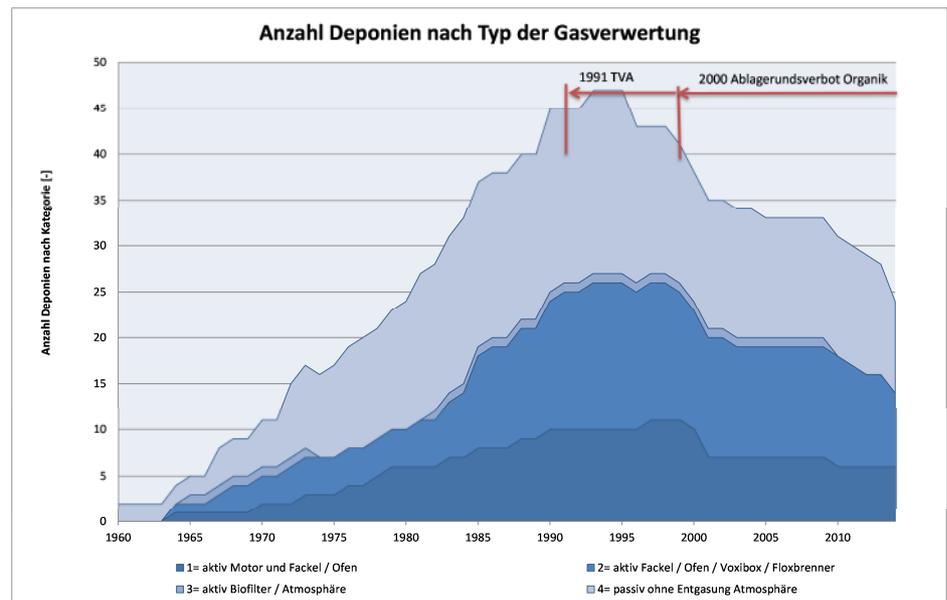


Abbildung 7 Anzahl Deponien nach Kategorie

Berücksichtigt man die Volumina, zeigt sich, dass dieser hohe Ausbaustandard für $\frac{3}{4}$ bzw. 75% des abgelagerten Abfalls gilt. Aufgeführt auf der Zeitachse, präsentiert sich die Verteilung der Ablagerungen in den verschiedenen geordneten Deponiekategorien wie folgt (Mengen aus vorliegender Erhebung 2015):

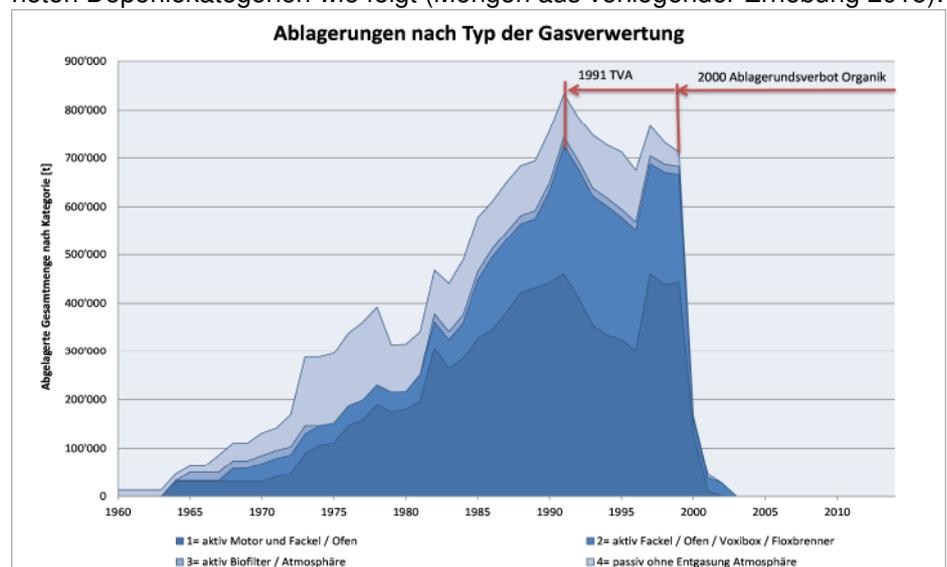


Abbildung 8 Ablagerungsmengen nach Kategorie (Mengen aus Erhebung 2015)

Als Basis für die Beurteilung dienten die Angaben zu den bewilligten Volumina der Deponien, die organische Abfälle annehmen und ablagern durften (Reaktordeponien, früher unter der Bezeichnung „geordnete“ Deponien).

Die folgende Grafik zeigt die Gegenüberstellung der abgelagerten Mengen aus der Erhebung 2015 bei den „geordneten“ Deponien (blau) und der gesamten Abfallmenge gemäss Abfallstatistik BAFU (schwarze Linie). Die Differenz (grau), in der Zeit vor 1985, zeigt schätzungsweise die Menge an Abfällen, die auf sogenannten „wildem“, ungeordneten Deponien abgelagert wurde. Die Differenz nach 1985 zwischen der Abfallmengen aus der Erhebung 2015 (blau) und der Abfallstatistik BAFU (schwarz bzw. grau), erklärt sich durch die lineare Hochrechnung aus den wenigen vorhandenen Daten auf die Gesamtmenge anhand der bewilligten Deponievolumina sowie der linearen Verteilung der Hochrechnung über die Jahre. Da die Ablagerungen in Wirklichkeit nicht linear verteilt stattgefunden haben, erscheinen die Zahlen aus der Abfallstatistik BAFU plausibler. Für die weiteren Berechnungen, insbesondere im Deponiemodell BAFU IPCC 2006, wurden deshalb die Abfallmengen gemäss der Abfallstatistik BAFU zu Grunde gelegt. Die Abfallmengen aus der Erhebung 2015 wurden lediglich für die proportionale Verteilung auf die verschiedenen Kategorien verwendet.

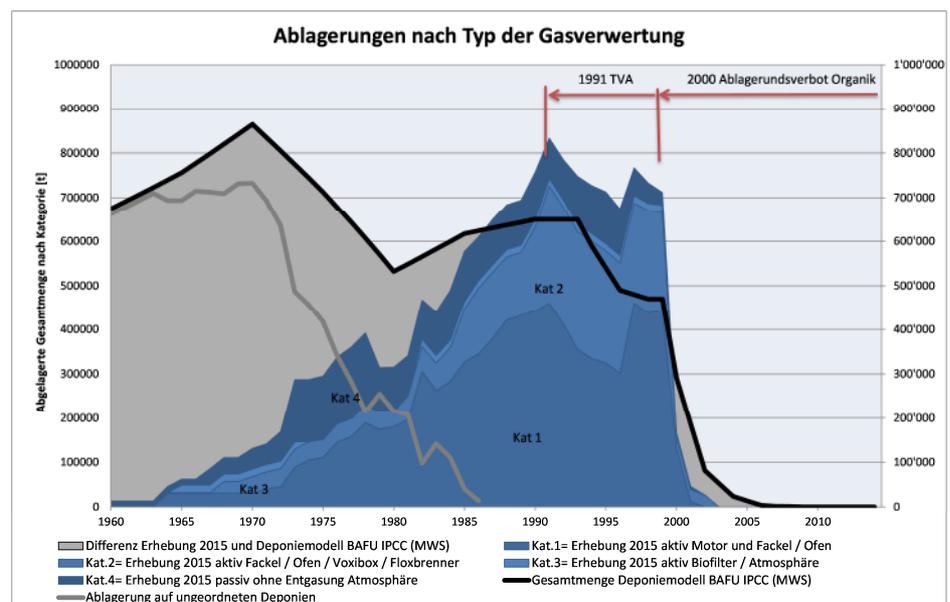


Abbildung 9 Ablagerte Abfallmengen nach Deponiemodell BAFU IPCC 2006; bzw. Abfallstatistik BAFU sowie nach Kategorien gemäss Erhebung 2015

Aufgrund der Abfallmengen aus der Erhebung 2015 wurde mit Hilfe des Deponiemodells BAFU IPCC 2006 die Gasprognose pro Kategorie berechnet und diese in Relation zur Gesamtmenge gesetzt. Die untenstehende Tabelle zeigt die proportionale Verteilung der prognostizierten Gasmenge pro Kategorie inkl. der Menge die in den ungeordneten Deponien anfällt:

Aufteilung der Kategorien in Bezug auf das Modell IPCC in %	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Kat.1= aktiv Motor und Fackel / Ofen	33	35	37	38	39	40	41	42	44	47	49	49	47	46	46	46	45	45	45	45	45	44	44	44	44
Kat.2= aktiv Fackel / Ofen / Voxibox / Floxbrenner	11	12	14	16	17	19	20	22	23	24	25	25	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23	22	22
Kat.3= aktiv Biofilter / Atmosphäre	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2	2	2	2	2	2	2	2	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Kat.4= passiv ohne Entgasung Atmosphäre	14	14	14	14	14	14	15	15	15	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rest "ungeordnete Deponien"	41	38	34	31	28	25	22	20	16	12	9	11	13	14	16	16	17	17	17	18	18	18	18	18	18
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 6 Anteil der auf den einzelnen Deponiekategorien 1 bis 4 inkl. den ungeordneten Deponien anfallenden Methangasmenge in Bezug auf die gesamte nach dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Methanmenge.

Diese Verteilung bildet die Basis für die Hochrechnungen.

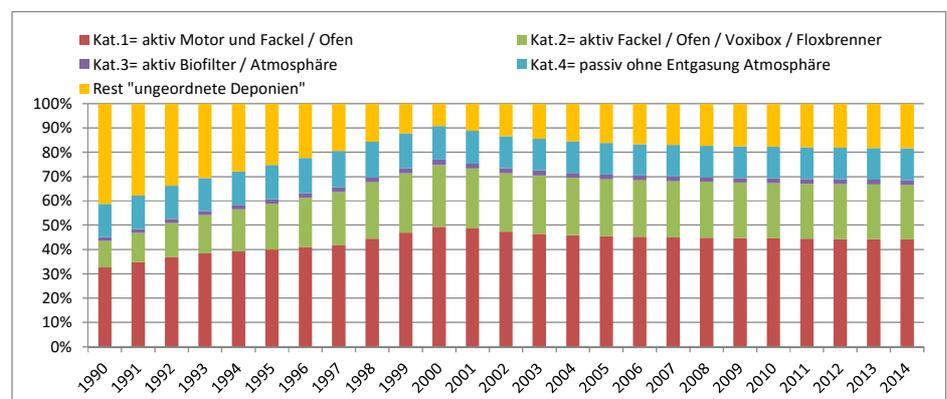


Abbildung 10 Anteil der auf den einzelnen Deponiekategorien 1 bis 4 inkl. den ungeordneten Deponien anfallenden Methangasmenge in Bezug auf die gesamte nach dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Methanmenge.

6.2 Charakteristik der Deponiegasemissionen nach Deponiekategorie

6.2.1 Kategorie 1 – Aktive Entgasung mit Verwertung (Motor; Fackel; Kessel)

Diese Kategorie beinhaltet grössere und oft jüngere Deponien, die sich für eine Deponiegasverwertung mit Gasmotoren eignen. Alle diese Anlagen mussten mit einer Fackelanlage ausgerüstet sein, die im Notfall, bei Ausfall des Gasmotors, die gesamte Menge Deponiegas entsorgen konnte. Teilweise wurden neben den Gasmotoren auch noch Heizkessel oder Muffelöfen zur Gebäudeheizung installiert. Gasmotoren, Heizkessel und Fackelanlagen wurden teilweise bei grossem Deponiegasaufkommen auch parallel betrieben. Als Muster für solche Nutzungen konnten die Daten folgender Deponien ausgewertet werden:

- Deponie Türliacher
- Deponie Uttigen
- Deponie Steinigand
- Deponie Teuftal
- Deponie Cholwald
- Deponie Elbisgraben

6.2.2 Beispiel Deponie der Kategorie 1

In diesem Kapitel wird die typische Charakteristik einer geordneten Deponie dargestellt. Es handelt sich hier um eine neuere Deponie, die vollumfänglich nach den Vorschriften der im Jahr 1991 neu in Kraft getretenen TVA erstellt und betrieben wurde. Das heisst, dass die Deponie von Anfang an über eine Basisabdichtung, eine Sickerwasserreinigungsanlage und über technisch gut aufgerüstete Anlagen zur Entgasung und Gasverwertung bzw. Entsorgung verfügte.

Zu Beginn der Ablagerungen wurde das anfallende Deponiegas über die Fackelanlage thermisch entsorgt. Ca. zwei Jahre nach der Inbetriebnahme wurden Gasmotoren zur Verwertung des Deponiegases installiert. Gleichzeitig verfügte die Deponie über eine Muffelanlage, aus der Wärme für die Heizung der Gebäude ausgekoppelt werden konnte.

Bei Ausfall eines oder aller Anlagenteile der Verwertung stand immer noch die Fackelanlage zur Verfügung, mit der die gesamte anfallende Gasmenge entsorgt werden konnte. Dank der detaillierten Datenerfassung stehen für diese Art von Anlagen (Daten aus 6 Anlagen) relativ gute und über den gesamten Zeitraum der Einlagerung organischer Abfälle und des Betriebs der Verwertungsanlage reichende Betriebsdaten zur Verfügung.

Durch das regelmässige Monitoring und die FID-Messungen an der Oberfläche stehen in diesem Fall auch Angaben zu den Restemissionen über die Oberfläche (punktiert dargestellt) zur Verfügung.

Die untenstehende Grafik zeigt die erfassten Betriebsdaten anhand dieser Beispielanlage und ist repräsentativ für einige in dieser Zeit erstellte oder nachgerüstete Deponien. Die darin dargestellte Gasprognose wurde mit dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnet.

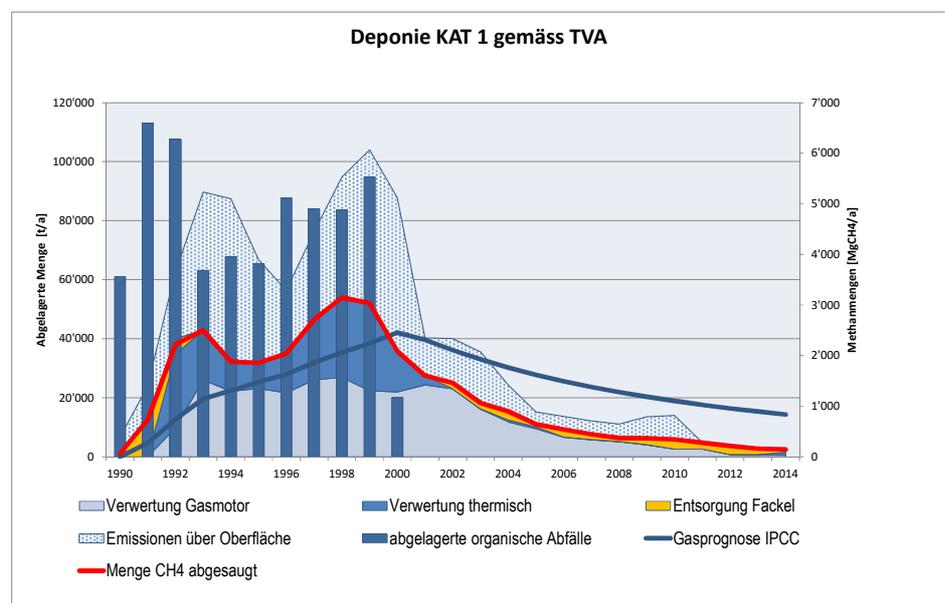


Abbildung 11 Betriebsdaten der Beispeldeponie der Kategorie 1, die nach den Regeln der TVA erstellt und betrieben wurde. Zum Vergleich ist die Gasprognose, welche anhand der abgelagerten Mengen mit dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnet wurde, dargestellt.

Die Grafik zeigt:

- Die Summe der über die Entgasungsanlage abgesaugten und gemessenen (rote Linie) und die über die Oberfläche entwichenen Methanmenge (Emissionsmessung FID) übersteigt die gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Methanmenge (blaue Linie) stark.
- Im vorliegenden Fall haben sich die thermische Verwertung (blau) und die Entsorgung über die Fackel (gelb) ergänzt. D.h. die gesamte erfasste Gasmenge wurde entweder in den Gasmotoren, dem Muffelofen oder der Fackelanlage verwertet bzw. entsorgt.
- Die Emissionen über die Oberfläche nehmen mit zunehmendem Alter ab bzw. der Erfassungsgrad steigt mit zunehmendem Alter an.

Die folgende Tabelle zeigt die auf der Deponie gemessene Menge Methan bzw. deren prozentualer Anteil für folgende Bereiche:

- über die Entgasungsanlage abgesaugte Menge Methan
- in den Gasmotoren bzw. dem Muffelofen verwertete Menge Methan und den Anteil in % in Bezug auf die nach Deponiemodell IPCC 2006, für diese Deponie individuell berechnete, gesamte Methanmenge
- in der Fackelanlage entsorgte Menge und deren Anteil in % in Bezug auf die nach Deponiemodell IPCC 2006 berechnete gesamte Methanmenge
- über die Oberfläche in die Atmosphäre ausgetretene Menge
- Mg zeigen reale Werte; %Spalten wurden auf max. 100% reduziert.

Jahr	Gasprognose Q=berechnet mit Deponie- modell BAFU IPCC 2006	Menge CH4 abgesaugt Q=berechnet aus Jahresbericht	Verwertung Gasmotor Q=berechnet aus Jahresbericht	Verwertung thermisch (Muffelofen) Q= berechnet aus Jahresbericht	Entsorgung Fackel Q= berechnet aus Jahresbericht	Emissionen über Oberfläche FID Q= aus Jahresbericht	Anteile Methanverwertung in % auf Basis individuelle Gasprognose berechnet mit Deponiemodell BAFU IPCC 2006		
							Gasmotor	Muffelofen	Fackel
	[Mg CH4/Jahr]	[Mg CH4/Jahr]	[Mg CH4/Jahr]	[Mg CH4/Jahr]	[Mg CH4/Jahr]	[Mg CH4/Jahr]	[%]	[%]	[%]
1990	0	59	0	0	55	324	0%	0%	0%
1991	270	733	0	0	729	661	0%	0%	100%
1992	744	2'220	570	1'454	304	1'322	77%	100%	41%
1993	1145	2'499	1'518	988	0	2'725	100%	86%	0%
1994	1310	1'881	1'293	587	0	3'220	99%	45%	0%
1995	1482	1'855	1'348	506	0	2'041	91%	34%	0%
1996	1629	2'042	1'262	786	0	1'237	77%	48%	0%
1997	1863	2'710	1'519	1'192	0	1'734	82%	64%	0%
1998	2061	3'149	1'567	1'582	0	2'380	76%	77%	0%
1999	2239	3'036	1'303	1'733	0	3'028	58%	77%	0%
2000	2453	2'087	1'278	809	0	3'032	52%	33%	0%
2001	2313	1'604	1'418	186	0	745	61%	8%	0%
2002	2106	1'460	1'340	2	119	874	64%	0%	6%
2003	1924	1'064	936	9	119	1'007	49%	0%	6%
2004	1763	897	689	37	173	513	39%	2%	10%
2005	1620	642	556	35	52	245	34%	2%	3%
2006	1493	537	381	12	143	260	26%	1%	10%
2007	1379	446	332	4	109	264	24%	0%	8%
2008	1277	369	296	4	69	274	23%	0%	5%
2009	1185	362	232	6	124	430	20%	1%	10%
2010	1101	342	151	2	189	469	14%	0%	17%
2011	1025	277	152	1	123	0	15%	0%	12%
2012	957	213	41	3	169	0	4%	0%	18%
2013	894	159	34	10	115	0	4%	1%	13%
2014	836	140	28	59	53	0	3%	7%	6%

Tabelle 7 Gemessene Gasmengen der Verwertung (Gasmotor / Muffelofen) bzw. Entsorgung (Fackel), sowie der Emissionen über Oberfläche einer realen Deponie.

Aus der Abbildung 11 ist deutlich erkennbar, dass die Gasproduktion in Wirklichkeit viel intensiver war als die mit dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechneten Prognosewerte. Dies ist auf die moderne Technik die intensive Entgasung und die regelmässige Wartung zurück zu führen.

Die untenstehende Grafik (rote Balken) zeigt den Einsatz der Fackelanlage im Zusammenspiel mit den Gasmotoren wiederum exemplarisch an obenstehendem Praxisbeispiel. Daraus wird deutlich, dass die abgesaugten Gasmengen nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen möglichst vollständig verwertet wurden. Die Fackelanlage war nur zu Beginn der Betriebsaufnahme der Deponie und dann nach Ende der Ablagerungen und dem Abbau der Gasmotoren in Betrieb.

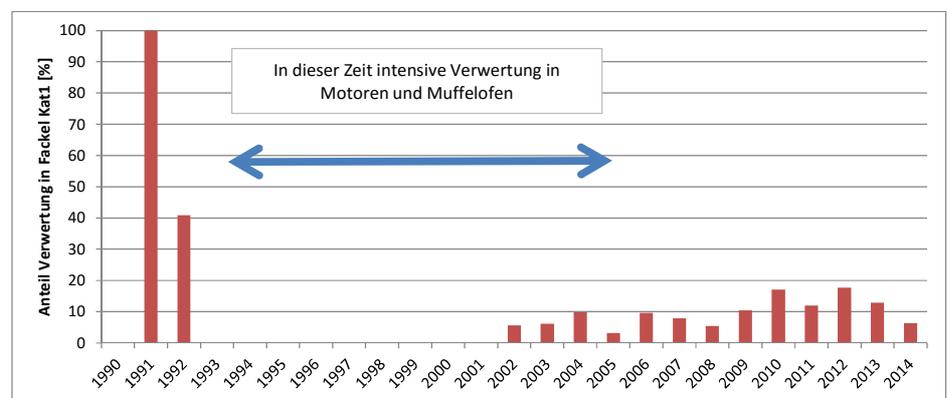


Abbildung 12 Anteil der in der Fackelanlage entsorgten Menge in Bezug auf die nach Deponiemodell IPCC 2006 berechnete gesamte Gas (s.a. Tabelle 7).

Zu Beginn des Betriebs der Deponie waren noch keine Gasmotoren in Betrieb. Deshalb weist die Entsorgung des Gases über die Fackelanlage einen hohen Anteil auf. Es ist gut erkennbar, dass in der Zeit danach, während der intensiven Nutzung des Gases in den Gasmotoren und der thermischen Verwertung im Muffelofen, die Fackel nicht oder nur in Notsituationen (hier wegen der geringen Menge nicht sichtbar) im Einsatz stand. Mit dem Muffelofen wurde das Gebäude beheizt. Diese Charakteristik der intensiven Nutzung trifft grundsätzlich für alle Deponien der Kategorie 1, insbesondere im Betrachtungszeitraum 1990 bis 2014, zu.

6.2.3 Methodik der Hochrechnung

Um eine generelle Aussage über den Anteil der auf Deponien der verschiedenen Kategorien in Fackelanlagen verwerteten Menge Methangas über die Zeit von 1990 bis 2014 machen zu können, wurden die Anteile der Entsorgung über Fackelanlagen pro Kategorie wie folgt ermittelt:

- Ermitteln bzw. Erfassen der Messwerte der realen Anlagen
- Berechnen des Anteils des Gases pro Anlage das über die Fackelanlage entsorgt wurde.
- Bilden des Mittelwertes dieser Anteile aus allen Anlagen von denen Messwerte vorhanden waren. Dieser Wert wird als Wert für die gesamte Kategorie betrachtet.
- Berechneter Mittelwert für Anteil Fackel je Kategorie multipliziert mit dem Anteil der jeweiligen Kategorie an der Gasprognose für die gesamte Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006 (geordnete und ungeordnete Deponierung).

6.2.4 Hochrechnung für Deponien der Kategorie 1

Für die Hochrechnung auf die gesamte Kategorie 1 standen Betriebswerte aus 6 von 11 Anlagen in ausreichend guter Qualität zur Verfügung.

Untenstehende Tabelle und Grafik zeigen den %-Anteil des Deponiegases, in Bezug auf die gesamte Gasmenge gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006, das in der Deponiekategorie 1 über Fackelanlagen entsorgt worden ist.

Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
%-Anteil Verwertung Fackel Kat.1	0.4	8.9	4	2.8	2.8	2.8	2.4	3.2	3.5	3.2	2.2	1.9	2.0	1.6	1.8	1.5	1.9	1.7	1.6	1.8	3	2	1.3	1.0	0.5

Tabelle 8 %-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 1.

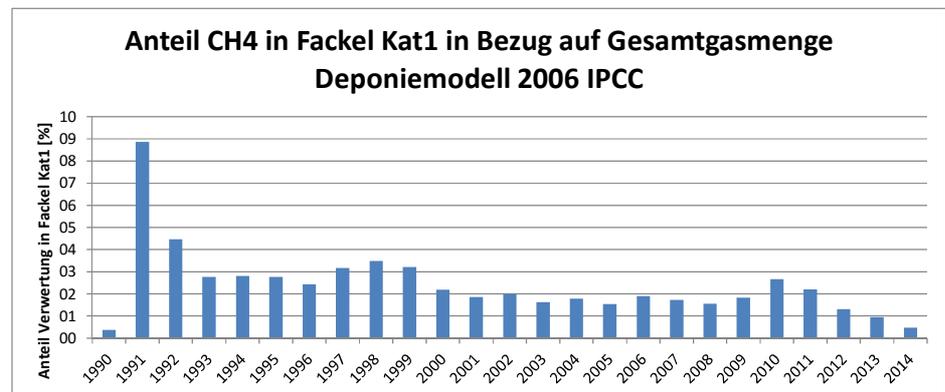


Abbildung 13 %-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 1

6.2.5 Kategorie 2 – aktive Entgasung mit thermischer Behandlung (Fackel; Kessel; Nichtkatalytische Oxidation; FLOX-Brenner)

Diese Kategorie beinhaltet oft ältere Deponien, bei denen Entgasungsanlagen erst eine gewisse Zeit nach Beginn der Ablagerung installiert wurden, oder kleinere Deponien, in denen sich eine Gasverwertung nicht gelohnt hätte bzw. aufgrund fehlender Einspeise- und Nutzungsmöglichkeiten auf die Deponiegasnutzung verzichtet werden musste.

Leider ist die Datenlage für diese Kategorie von Deponien sehr schlecht. Es konnten keine repräsentativen Messdaten ermittelt werden, bei denen sowohl die Einbaumengen (Menge deponierter Abfälle) als auch die abgesaugte und entsorgte Gasmenge über mehrere Jahre nachvollziehbar vorhanden sind. Zumindest seit der Inkraftsetzung der TVA (1991) wurden diese Fackelanlagen grundsätzlich das ganze Jahr über betrieben und unterhalten. Man kann also davon ausgehen, dass ein Grossteil des erfassten Gases über Fackelanlagen verbrannt wurde. Vielerorts wurden Entgasungsanlagen nachgerüstet. Mit einem regelmässigen Monitoring wurden die Anlagen meist gut gewartet und in Funktion gehalten.

Es stellt sich hier die Frage des Erfassungsgrades. Der Erfassungsgrad beschreibt den Anteil der erfassten Gasmenge am gesamten Gasaufkommen gemäss Gasprognose.

Aufgrund der Erfahrung des Autors, welcher lange Zeit im Monitoring und Betriebsunterhalt von Deponien tätig war, kann davon ausgegangen werden, dass der Erfassungsgrad in der Regel zwischen 30 und 60% liegt. Diese Menge wurde zu einem sehr hohen Anteil (>95%) in der Fackelanlage verbrannt. Dies wurde zwar regelmässig in Monitoringberichten festgehalten, stehen aber nicht mehr zur Verfügung, weil die Aufbewahrungsfrist abgelaufen ist.

Aufgrund der Kenntnisse der vorhandenen Deponien und deren Betriebszeit wurde der Erfassungsgrad für die Kategorie 2 abgeschätzt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Anlagen in den Jahren 1993 bis 2005 meist sehr gut betrieben und unterhalten wurden. In der Zeit davor waren zum Teil ungenügende, schlecht gewartete oder keine Entgasungsanlagen vorhanden. In der Zeit danach mussten die Fackelanlagen, aufgrund der vorangehenden guten Verwertung, oft mit Schwachgas (Methangehalt < 35 Vol.-%) und teilweise intermittierend betrieben werden.

Die Hochrechnung erfolgt mit der gleichen Methode wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben.

Untenstehende Tabelle und Grafik zeigen den %-Anteil des Deponiegases, in Bezug auf die gesamte Gasmenge gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006, das in der Deponiekategorie 2 über Fackelanlagen entsorgt worden ist.

Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
%-Anteil Verwertung Fackel Kat.2	4.1	4.8	5.8	7.2	8.6	9.5	10	11	12	12	12	11	10	10	10	9.4	9.0	8.8	8.5	8.2	7.9	7.7	7.4	7.2	6.9

Tabelle 9 %-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 2

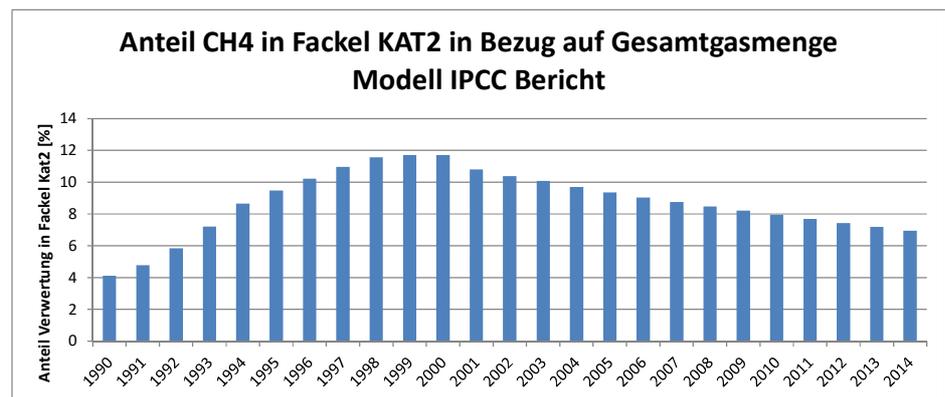


Abbildung 14 %-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 2

6.2.6 Kategorie 3 – aktive Entgasung ohne Methanelimination (Biofilter, Aerobisierung)

Diese Deponien verfügen zwar über ein, wenn auch meist einfaches, Entgasungssystem. Die Ableitung des Deponiegases in einen Biofilter dient in den allermeisten Fällen lediglich der Geruchsminderung und dem Explosionsschutz. Bei der Absaugung wird das Gas mit viel Luft vermischt. So wird die untere Explosionsgrenze deutlich unterschritten und somit die Explosionsgefahr eliminiert. Eine relevante Oxidation von Methan konnte in Biofiltern bisher nicht nachgewiesen werden. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass das aus solchen Deponien abgesaugte und in Biofilter geleitete Methan gas unverändert in die Atmosphäre emittiert wird.

Anders ist es bei Anlagen mit einer Aerobisierung. Hier findet zweifellos eine Oxidation des Methans bzw. eine Überführung der Deponie vom anaeroben in den aeroben Zustand statt. Letzteres bewirkt, dass Methan erst gar nicht entsteht und das organische Material in der Deponie in einem aeroben Prozess direkt in Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) abgebaut wird.

Anlagen zur Aerobisierung wurden erst in den letzten paar Jahren und nur vereinzelt installiert. Unter anderem wurden in den letzten Jahren mehrere Projekte als CO₂-Kompensationsprojekte realisiert. Heute ist der Einfluss auf den Klimaschutz noch gering, kann aber in Zukunft durch die Realisierung von weiteren Projekten ansteigen.

Da es in der vorliegenden Studie um die in Fackelanlagen entsorgte Menge Methangas geht, wird auf den Anteil dieser Kategorie nicht weiter eingegangen.

6.2.7 Kategorie 4 – Deponien ohne aktive Entgasung (freie Ausströmung in Atmosphäre)

Bei den Deponien dieser Kategorie handelt es sich vorwiegend um alte, schon lange in Betrieb stehende Deponien, die lange vor der Inkraftsetzung der TVA den Betrieb aufgenommen haben und auf denen entweder nur kleine Mengen oder nur wenig Hauskehricht abgelagert wurden (siehe Abbildung 6). Sie repräsentieren den aus der Erhebung 2015 bekannten Teil der „wilden“ bzw. ungeordneten Deponien. Da der biologische Abbauprozess schon seit sehr langer Zeit im Gange ist, ist der heutige Einfluss auf die Gasemissionen nur schwer abzuschätzen und wird mit der Gasprognose wahrscheinlich eher überschätzt.

In früheren Zeiten wurden die abgelagerten Abfälle nur wenig oder gar nicht verdichtet, es konnte also Wasser eindringen, der biologische Abbauprozess konnte stattfinden und das Gas konnte durch die porösen Schichten leicht an die Oberfläche gelangen und in die Atmosphäre ausströmen. Oft wurden Abfälle auch zuerst kompostiert oder verbrannt bevor sie eingebaut wurden. Andererseits gibt es sicher Deponien in denen der Abbauprozess durch fehlendes Wasser gestoppt wurde oder in denen der Abfall mit einer dicken dichten Schicht überdeckt wurde und das Methan so in einer Gasblase gefangen ist und bleibt. Eine genaue Aussage kann hier nicht gemacht werden.

Dennoch sind aus diesen Deponien Emissionen vorhanden. Diese könnten in Zukunft durch Klimaschutzprojekte weiter eliminiert werden.

Da aber auf diesen Deponien aufgrund des heutigen Kenntnisstandes nie Fackelanlagen installiert waren, ist diese Kategorie von Deponien für die Bestimmung des Anteils in Fackelanlagen entsorgtem Methangas nicht relevant.

7 Schlussfolgerung

7.1 Gesamtübersicht

In der folgenden Grafik sind die Gesamtergebnisse wie folgt dargestellt.

- Gesamte Ablagerungsmengen gemäss Abfallstatistik BAFU und daraus resultierende Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006
(in untenstehender Grafik grau markiert)
- Abgelagerte Mengen in geordneten Deponien der Kategorien 1-4 (Ergebnisse der Erhebung 2015 aus Statistiken und der Umfrage bei den Betreibern) und daraus resultierende Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006
(in untenstehender Grafik gelb und orange markiert)
- Ablagerungsmengen für ungeordnete Deponierung (historische Recherchen Kapitel 4) und daraus resultierende Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006
(in untenstehender Grafik blau markiert)
- In Gasmotoren und Kesselanlagen verwertete Mengen gemäss BFE (Schweiz. Statistik der erneuerbaren Energien, WKK Statistik, Bundesamt für Energie, 2013)
(in untenstehender Grafik schwarz markiert)

Die Grafik zeigt folgendes:

- Der Einfluss der „wilden“, bzw. ungeordneten Deponien ist im Betrachtungsraum 1990 bis 2014 zwar untergeordnet und stark abnehmend, hat aber immer noch einen Anteil von rund einem Drittel der gemäss Gasprognose anfallenden Methanmenge.
- Die Abfallmengen der Erhebung 2015 für die Kategorien 1-4 und diejenigen der Abfallstatistik BAFU, welche als Inputdaten für das Deponiemodell BAFU IPCC 2006 verwendet werden, können mit historischen Werten in ihrer Grössenordnung und dem Verlauf bestätigt werden.
- Die in dieser Studie hochgerechneten Mengen des in Gasmotoren und Heizkesseln verwerteten Methangases entsprechen ungefähr den, in der Statistik des Bundesamtes für Energie (BFE) ausgewiesenen Mengen.
- Die in der Erhebung 2015 erfassten und teilweise hochgerechneten Abfallmengen und die daraus resultierende Gasprognose sind zu linear, d.h. gleichmässig über die Betriebszeit verteilt und deshalb etwas zu stark rechts in der Grafik angeordnet.
- In der Erhebung 2015 wurde für die abgelagerte Menge eine zeitlich zu uniforme Verteilung angenommen. Der Boom der Deponien lag in den Jahren 1985 bis 1995, in welchen die deponierten Mengen wahrscheinlich höher waren als in der Figur dargestellt. Dafür waren die effektiv deponierten Mengen nach 1995 entsprechend geringer, was zu einer Verschiebung der Gasprognose in die Zukunft führt.

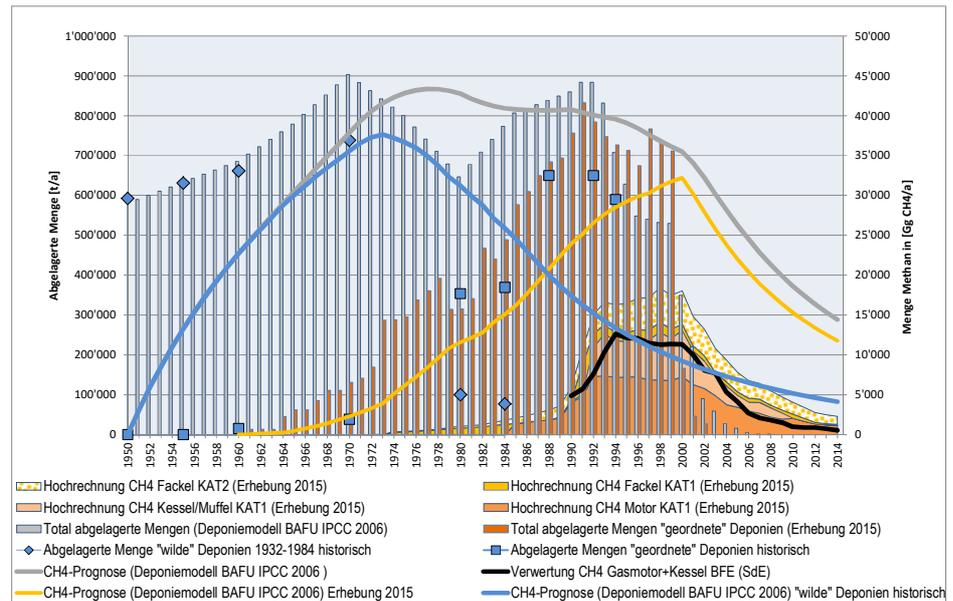


Abbildung 15 Gesamtübersicht abgelagerte Mengen; Gasprognosen gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006; Verwertung in den Kategorien 1 und 2; historische Werte

7.2 Der Einfluss der Kategorien

Da nur auf den Deponien der Kategorien 1 und 2 Fackelanlagen installiert waren, sind auch nur die Ergebnisse dieser beiden Kategorien massgebend.

In der Kategorie 1 wurde das Methangas am intensivsten genutzt. Hier waren Gasmotoren, Heizkessel, Muffelöfen und Fackelanlagen installiert. Dementsprechend wurde, solange Gasmotoren und /oder Heizkessel in Betrieb standen, grosser Wert auf einen hohen Erfassungsgrad und einen hohen Anteil an Verwertung zur Erzeugung von Strom und Heizwärme gelegt. Fackelanlagen waren in dieser Phase nur in Notsituationen im Einsatz.

Anders war das zu Beginn der Deponierung und nach gänzlicher Ausserbetriebnahme der Motoren. In diesen Phasen standen meist nur Fackelanlagen zur Entsorgung des Deponiegases zur Verfügung, somit wurde in der Regel 100% des erfassten Gases über diese Anlagen entsorgt. Auf einzelnen Deponien wurden noch Heizkessel betrieben, die natürlich Priorität hatten vor der Entsorgung über Fackelanlagen. In der Phase gegen Ende der motorischen Nutzung, in der die Motoren wegen geringeren Gasmengen oder schwachem Methangehalt oft nur noch teilweise in Betrieb standen, wurde das anfallende Gas ebenfalls über die Fackelanlagen entsorgt.

Bei den Deponien der Kategorie 2 musste das anfallende Methangas aus Sicherheits- und Emissionsschutzgründen verbrannt werden. Auch hier wurden die Anlagen stets in gutem Zustand in Betrieb gehalten. Regelmässiges Monitoring und die Pflicht der Behörden zu jährlich mindestens zwei Kontrollen gewährleisteten dies.

Bei Deponien der Kategorie 3 und 4 wurden keine Anlagen zur Entsorgung von Methangas erstellt. Erst in den letzten Jahren werden vermehrt Anlagen zur Aerobisierung oder zur Verbrennung von Schwachgas installiert. Diese haben aber im Moment noch einen kleinen Anteil an der Methanelimination. In Zukunft könnten diese Anlagen an Bedeutung gewinnen.

7.2.1 Deponiegas in Fackelanlagen

Für das Klimainventar ist die Gesamtsumme des in Fackelanlagen entsorgten Methangases relevant. Dazu werden die beiden Kategorien 1 und 2 zusammengezählt. Die folgenden Tabellen und Grafiken enthalten den Anteil in Fackelanlagen verbrannten Methangases in Bezug auf die gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Gasprognose für die gesamte, geordnet und ungeordnet abgelagerte Abfallmenge.

Kategorie 1

Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
%-Anteil Verwertung Fackel Kat. 1	0.4	8.9	4	2.8	2.8	2.8	2.4	3.2	3.5	3.2	2.2	1.9	2.0	1.6	1.8	1.5	1.9	1.7	1.6	1.8	3	2	1.3	1.0	0.5

Tabelle 10 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).

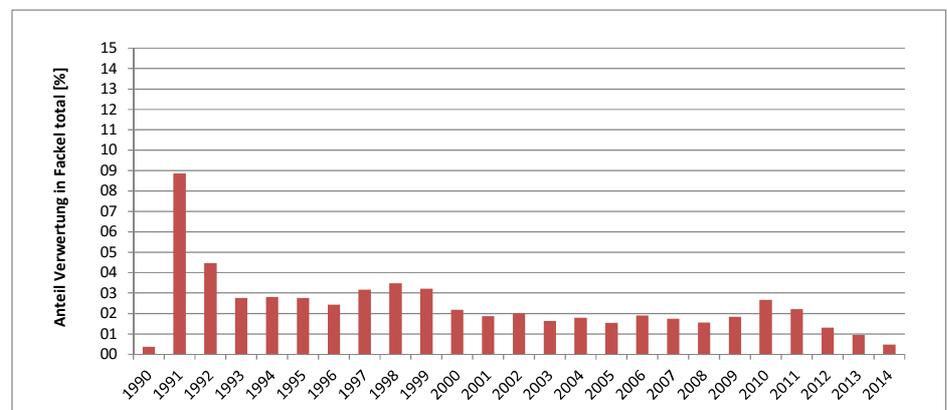


Abbildung 16 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).

Kategorie 2

Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
%-Anteil Verwertung Fackel Kat.2	4.1	4.8	5.8	7.2	8.6	9.5	10	11	12	12	12	11	10	10	10	9.4	9.0	8.8	8.5	8.2	7.9	7.7	7.4	7.2	6.9

Tabelle 11 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).

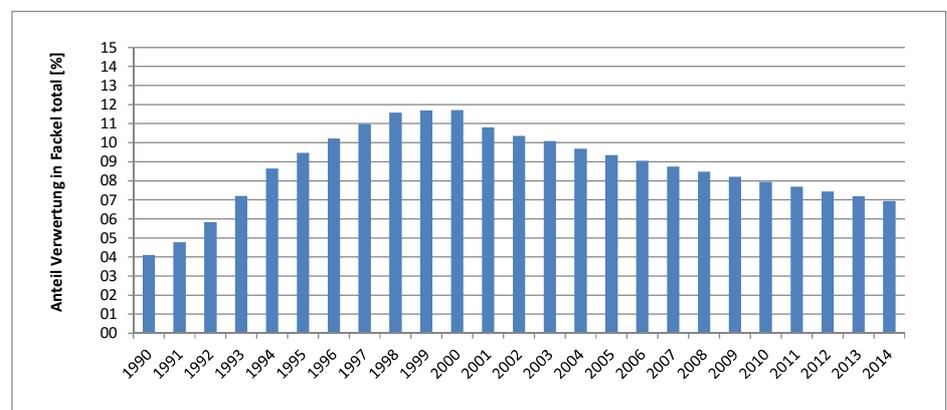


Abbildung 17 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).

Summe Kategorie 1+2

Es zeigt sich, dass der Anteil in der Zeit von 1990 bis 2014 durchwegs über 10% gelegen ist. Mit dem Rückgang der Gasmenge und der immer schwieriger werdenden Verwertung über Gasmotoren nach 2009, steigt der Anteil der über die Fackelanlagen entsorgten Menge in der Kategorie 1, analog zu der Situation vor der Inbetriebnahme der Gasmotoren (1991/92), kurzzeitig leicht an. Weil die Gasproduktion in den Deponien insgesamt aber stark abnimmt, sinkt auch die Entsorgung über die Fackelanlagen weiter und erreicht ab 2012 Werte unter 10%.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
%-Anteil Verwertung Fackel Kat 1	0.4	8.9	4.5	2.8	2.8	2.8	2.4	3.2	3.5	3.2	2.2	1.9	2.0	1.6	1.8	1.5	1.9	1.7	1.6	1.8	2.7	2.2	1.3	1.0	0.5
%-Anteil Verwertung Fackel Kat 2	4.1	4.8	5.8	7.2	8.6	9.5	10	11	12	12	12	11	10	10	9.7	9.4	9.0	8.8	8.5	8.2	7.9	7.7	7.4	7.2	6.9
Total Anteil in Fackelanlagen entsorgtes Methangas	4.5	14	10	10	11	12	13	14	15	15	14	13	12	12	11	11	11	10	10	10	11	10	9	8.1	7.4

Tabelle 12 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 und der Kategorie 2, bzw. insgesamt in Fackel-Anlagen entsorgte Gasmenge in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen.

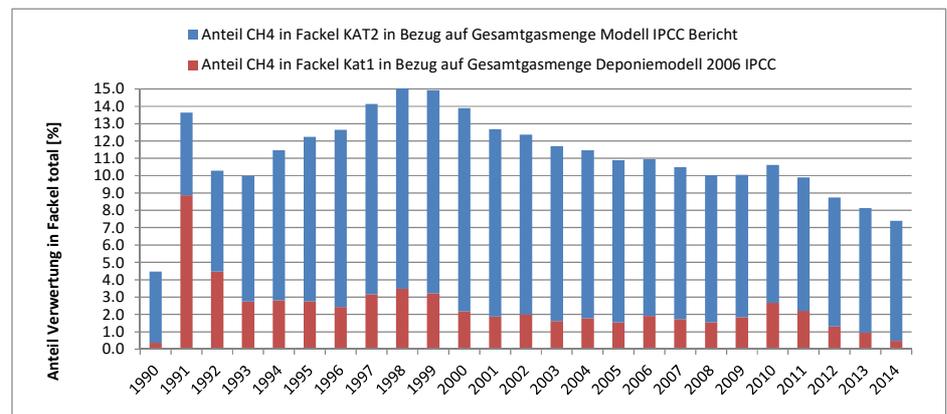


Abbildung 18 Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 und Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen

Anteil an Verwertung nach Verwertungsart

Als Vergleich und Gesamtübersicht sind hier die gesamten Mengen an verwertetem Methangas aller Kategorien nach Verwertungsart, Fackel, Gasmotor, Kessel/Muffelöfen sowie die nicht erfassten Emissionen über die Oberfläche dargestellt.

Anteil an Verwertung nach Verwertungsart	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Anteil Verwertung in Fackelanlagen	4.5	14	10	10	11	12	13	14	15	15	14	13	12	12	11	11	11	10	10	10	11	9.9	8.7	8.1	7.4
Anteil Verwertung in Kessel- und Muffelanlagen	0.2	0.8	9.0	13	11	11	13	13	16	15	16	12	11	7.9	8.3	5.7	4.6	6.0	5.4	4.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.5
Anteil Verwertung in Gasmotoren	9.9	12	18	19	18	19	19	18	19	19	21	18	18	16	13	13	12	12	10	9.7	11	9.4	8.1	7.8	7.8
Anteil nicht verwertet	85	74	63	58	59	58	56	54	50	52	49	56	59	64	67	70	72	72	74	76	78	81	83	84	84

Tabelle 13 Prozent-Anteil Methangas nach Verwertungsart in Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006

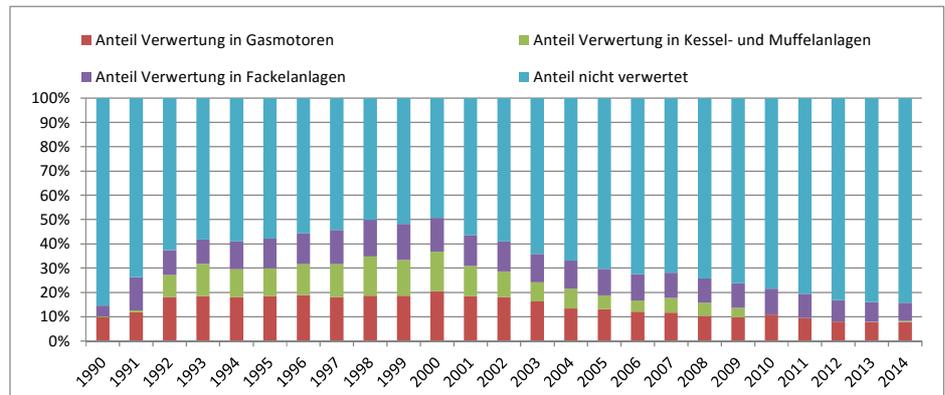


Abbildung 19 Prozent-Anteil Methangas nach Verwertungsart in Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006

Aufteilung der anfallenden Mengen Methangas pro Kategorie in %.

Aufteilung der Kategorien in Bezug auf das Modell IPCC in %	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Kat 1= aktiv Motor und Fackel / Ofen	33	35	37	38	39	40	41	42	44	47	49	49	47	46	46	46	45	45	45	45	45	44	44	44	44
Kat 2= aktiv Fackel / Ofen / Voxibox / Floxbrenner	11	12	14	16	17	19	20	22	23	24	25	25	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23	23	22	22
Kat 3= aktiv Biofilter / Atmosphäre	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Kat 4= passiv ohne Entgasung Atmosphäre	14	14	14	14	14	14	15	15	15	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Rest "ungeordnete Deponien"	41	38	34	31	28	25	22	20	16	12	9	11	13	14	16	16	17	17	17	18	18	18	18	18	18
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 14 Prozent-Anteil Methangas in den verschiedenen Kategorien sowie den ungeordneten Deponien im Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006

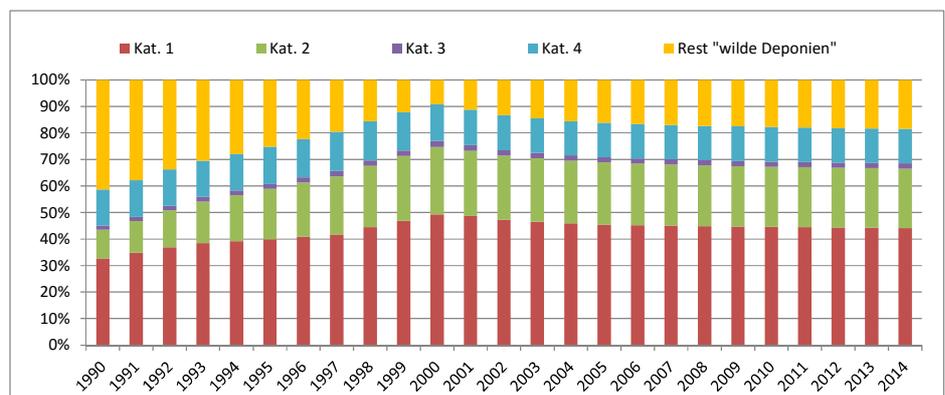


Abbildung 20 Prozent-Anteil Methangas in den verschiedenen Kategorien sowie ungeordnete Deponien im Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006

7.2.2 Prognose bis 2050

In der folgenden Tabelle wird versucht, aus den erhobenen Daten, den vorhandenen Erfahrungswerten sowie der Abschätzung des technologischen Fortschritts, eine Prognose der über Fackelanlagen oder fackelähnlichen Anlagen in Zukunft entsorgte Deponiegasmenge, abzuschätzen.

Periode	1990 bis 1994	1995 bis 1999	2000 bis 2004	2005 bis 2009	2010 bis 2014	2015 bis 2019	2020 bis 2024	2025 bis 2029	2030 bis 2034	2035 bis 2039	2040 bis 2044	2045 bis 2049	2050 bis 2054
Fackel KAT1+2 Deponiemodell BAFU IPCC 2006	10	14	12	10	9	10	11	9	7	5	3	2	1

Tabelle 15 Mittelwerte Anteil Verwertung in Fackelanlagen für die Kategorie 1 und 2 in den Betrachtungsperioden 1990 bis 2014 sowie Prognose 2015 bis 2054.

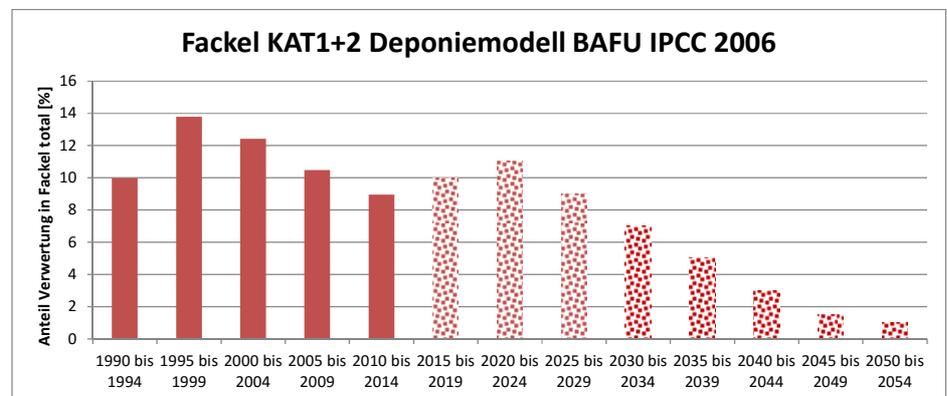


Abbildung 21 Mittelwerte Anteil Verwertung in Fackelanlagen für die Kategorie 1 und 2 in den Betrachtungsperioden 1990 bis 2014 sowie Prognose 2015 bis 2054

7.2.3 Fazit

- Die Ergebnisse zeigen Trends, Charakteristiken und Grössenordnungen.
- Mit Fackelanlagen wurde im Betrachtungszeitraum 1990 bis 2014 zwischen 8 und 15% der prognostizierten Gasmenge entsorgt.
- Der Einfluss der Wirkung der Aerobisierung zum Methanabbau wird in Zukunft zunehmen und möglicherweise für das Klimagasinventar relevant werden.
- Längerfristig nimmt die Methanproduktion in den Deponien weiter ab. Das gleiche gilt für die Methankonzentration im Deponiegas. Somit wird auch die Entsorgung über Fackelanlagen oder fackelähnlichen Anlagen abnehmen.

Bern; den 23. September 2016

Consaba GmbH

Antonio Bauen

8 Anhang

8.1 Umfrage

Betreff: Datenerhebung für Klimagasinventar der Schweiz von 1990 bis 2014

Sehr geehrter Herr

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) führt die Datenbank des Schweizerischen Klimagasinventars, in der die Klimagasemissionen der Schweiz berechnet werden. Die Daten werden jährlich im Rahmen der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls an die UNFCCC übermittelt (für weitere Informationen siehe www.bafu.admin.ch/ghginv). Nebst vielen anderen klimarelevanten Gasemissionen sind auch die Methangasemissionen aus Reaktordeponien relevant. Die Produktion von Deponiegas wird aufgrund der erfolgten jährlichen Ablagemengen mit der First Order Decay (FOD) Methode gemäss IPCC (1996 Guidelines) berechnet.

Je nach Grösse und Art der deponierten Abfälle wurden die Deponien in der Schweiz mit unterschiedlichen Instrumenten und Anlagen zur Erfassung und Verwertung bzw. Entsorgung von Deponiegas ausgerüstet. Uns sind lediglich die in Verwertungsanlagen (Gasmotoren; Heizkesseln) verwerteten gesamtschweizerischen Gasmengen aufgrund der Statistik der erneuerbaren Energien des Bundesamts für Energie (BFE) bekannt, nicht jedoch die Mengen an Gas, die in Fackeln verbrannt wurden. Deshalb mussten in der Bilanz der Klimagase der Schweiz pauschale Annahmen über die abgefackelten Gasmengen getroffen werden. Diese Annahmen wurden in der letzten Review des Schweizerischen Klimagasinventars 2013 durch Experten der UNFCCC als zu ungenau beurteilt und das BAFU ist aufgefordert, genauere Angaben zu erheben.

Die für eine bessere Quantifizierung der Gasmengen notwendigen Daten, die für die Zeitspanne von 1990 bis heute erhoben werden sollten, sind möglicherweise nicht mehr vollständig vorhanden. Aus diesem Grund verfolgen wir das Ziel, aufgrund von einigen typischen Deponie-Beispielen und Betriebssituationen eine Modellrechnung zu erstellen und anhand dieser typisierten Modelle auf die Gesamtheit der Schweizerischen Deponien zu schliessen. Damit diese Modellrechnung auf möglichst praxisnahe Daten abgestützt werden kann, sind wir auf Ihre Mithilfe angewiesen. Da Ihre Anlage im Zeitraum von 1990 bis heute in Betrieb stand und nach unseren Informationen mit einer Entgasungsanlage ausgerüstet war, benötigen wir von Ihnen für Ihre Deponie folgende Grundlagendaten:

Angaben zur Ablagerung organischer Abfälle:

- Beginn der Ablagerung
- Ende der Ablagerung
- jährliche Ablagerungsmenge

Technische Ausrüstung der Deponie:

- Entgasungsanlage
- Fackelanlage
- Gasmotor zur Erzeugung von Strom wurde die Abwärme des Gasmotors verwertet?
- Verwertung nur in Heizkessel bzw. Einspeisung in Erdgasnetz

Zur einfachen Erfassung finden Sie in der Beilage eine Excel-Tabelle zum Eintragen der Daten.

Wir bitten Sie, uns die Informationen nach Möglichkeit **bis zum 23. Dezember 2014** zukommen zu lassen. Falls es Ihnen nicht möglich sein sollte, die Daten bis dahin zusammenzustellen, wären wir froh um eine kurze Mitteilung, damit wir zusammen mit Ihnen schauen können, ob Sie uns allenfalls in irgendeiner Form Unterlagen (z. B. Jahresberichte o. ä.) zur Verfügung stellen könnten, aus denen wir die Daten selbst zusammensuchen könnten.

Bei Fragen oder Diskussionsbedarf wenden Sie sich bitte an Hr. Antonio Bauen, bauen@consaba.ch, Tel. 079 671 11 46.

Selbstverständlich werden Ihre Daten vertraulich behandelt und nur in zusammengefasster und anonymisierter Form veröffentlicht.

Besten Dank für Ihre Mitarbeit und freundliche Grüsse
Rainer Kegel

Rainer Kegel, dipl. Natw. ETH, MAS Umwelttechnik und -management
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Sektion Industrie und Feuerungen
Worbentalstrasse 68, 3063 Ittigen, Postadresse: 3003 Bern
Tel +41 58 462 80 72
Fax +41 58 464 01 37
rainer.kegel@bafu.admin.ch
<http://www.bafu.admin.ch/luft>

8.2 Ergebnisse der Umfrage

Die bei relevanten Deponien durchgeführte Umfrage hat folgende Ergebnisse erbracht:

Liste der Deponien für die Umfrage Klimaschutz / Deponiegasverwertung	
Anlagenname	Ergebnis Umfrage
Reaktordeponie Bärengaben (Würenlingen)	keine Rückmeldung
Reaktordeponie Gummersloch	Verweis auf BfKA Daten von BfKA lückenhaft
Reaktordeponie Steinigand	Daten über gesamte Lebensdauer es fehlt Verwertung und Fackel
Reaktordeponie Uttigen	Daten über gesamte Lebensdauer es fehlt Verwertung und Fackel
Reaktordeponie Teuftal	nur Beschreibung; 1985 in Betrieb 4 verschieden grosse Fackeln Typ Hofstetter bis 1989, danach Verwertung des Gases in Gasmotoren (Gaswerk der BKW AG) bis 2007, Ab 2007 bis Sept. 2014 BHKW mit angepasster Leistung (KEV unterstützt), Sept. 2014 Abschaltung; 1989 bis 2007 reine Stromproduktion, Ab 2007 bis Sept. 2014 mit Abwärmennutzung Ab 2014 Aerobisierung
Reaktordeponie Türlacher	Daten über gesamte Lebensdauer es fehlt Verwertung und Fackel
Reaktordeponie Elbisgraben	gute Daten 100% verwertet
Reaktordeponie Hintern Chestel	keine Rückmeldung
Reaktordeponie Sass Grand	Lückenhafte Angaben Fackel nur kurz 97-99; Aerobisierung mit Fackelbetrieb seit 2008 sonst Emissionen in Atmosphäre
Reaktordeponie Cholwald	sehr gute Angaben ab 1990 --> siehe Diagramm
Reaktordeponie MKD Pflumm	keine Rückmeldung
Reaktordeponie Härkingen AG	keine Rückmeldung
Reaktordeponie Mühletobel Berg	keine Rückmeldung
Reaktordeponie Chrüzlen	keine Entgasung kein Material mit mehr als 5% Organik
Reaktordeponie Riet	keine Entgasung; FID seit 1988 alle 3 Jahre 104; 204; 20; 59;22;11 tCH4 pro Jahr auf 9ha
Reaktordeponie Tambrig	Verweis auf Daten bei P.Oester

8.3 Liste der Deponien und ihre technischen Ausrüstung

siehe separate Beilage „Tabelle Liste der Deponien Anhang 8_3“

8.4 Kehrichtverbrennungsanlagen Erstinbetriebnahmen

Kanton	Anlage	in Betrieb seit
ZH	Zürich Josefstrasse ERZ	1904
BS	Basel IWB	1943
SG	Buchs VfA	1960
ZH	Hinwil KEZO	1963
ZH	Winterthur Stadtwerk	1965
GE	Genève Les Cheneviers SIG	1966
BE	Biel MUEVE	1967
ZH	Horgen ZVHO	1967
AG	Buchs AG	1969
ZH	Zürich Hagenholz ERZ	1969
AG	Turgi	1970
NE	Colombier VADEC	1971
ZH	Dietikon Limeco	1971
LU	Emmenbrücke REAL	1971
VS	Gamsen Oberwallis	1971
VS	Uvrier UTO	1971
NE	La Chaux-de-Fonds VADEC	1972
SG	St.Gallen	1972
GL	Niederurnen Linth	1973
AG	Oftringen ERZO	1974
BE	Bern EWB (2012 ersetzt durch EWB Forsthaus)	1975
GR	Trimmis GEVAG	1975
SG	Bazenheid ZAB	1976
VS	Monthey SATOM	1976
SO	Zuchwil KEBAG	1976
LU	Luzern (2015 ersetzt durch Perlen Renergia)	1983
TG	Weinfeldern KVA Thurgau	1996
FR	Posieux SAIDEF	2001
BE	Thun AVAG	2003
VD	Lausanne TRIDEL	2006
TI	Giubiasco ACR	2009

8.5 Vergleich historisch deponierte Abfallmengen mit im Deponiemodell BAFU IPCC 2006 verwendeten Mengen

Die in Kapitel 4.3 in dieser Studie hergeleiteten historisch deponierten Abfallmengen werden in der separaten Beilage „Tabelle Historischer Vergleich Anhang 8.5“ den im Deponiemodell BAFU IPCC 2006 als Inputdaten verwendeten Mengen gegenübergestellt.

8.6 Anteil in geordneten Deponien abgelagerte Abfälle

Die folgende Tabelle zeigt die in geordneten Deponien abgelagerten Abfallmengen in Bezug auf die gesamte in Deponien (ungeordneten und geordneten) abgelagerten Abfallmenge.

Die Zahlen beruhen auf den Erhebungen 2015.

Year	MSW	in "geordneten" Deponien abgelagerte Menge nach Erhebung 2015	berechneter Anteil der in "geordneten" Deponien abgelagerten Menge nach Erhebung 2015 an der Gesamtmenge abgelagerten Abfallmengen MSW
	t	t	%
1950	570'240		
1951	580'389		
1952	590'619		
1953	600'929		
1954	611'320		
1955	621'792		
1956	632'344		
1957	642'977		
1958	653'691		
1959	664'485		
1960	675'360	13'282	2%
1961	691'142	13'282	2%
1962	707'098	13'282	2%
1963	723'226	13'282	2%
1964	739'526	45'608	6%
1965	756'000	62'274	8%
1966	777'024	62'274	8%
1967	798'336	85'651	11%
1968	819'936	110'651	13%
1969	841'824	110'651	13%
1970	864'000	131'175	15%
1971	834'624	141'486	17%
1972	804'816	169'264	21%
1973	774'576	287'781	37%
1974	743'904	288'019	39%
1975	712'800	295'564	41%
1976	678'542	337'876	50%
1977	643'378	360'577	56%
1978	607'306	391'958	65%
1979	570'326	314'619	55%
1980	532'440	315'527	59%
1981	548'966	341'063	62%
1982	565'734	468'005	83%
1983	582'746	440'702	76%
1984	600'002	489'486	82%
1985	617'500	577'501	94%
1986	624'000	610'096	98%
1987	630'500	650'057	103%
1988	637'000	684'370	107%
1989	643'500	694'410	108%
1990	650'000	757'017	116%

Fortsetzung nächste Seite

Year	MSW	in "geordneten" Deponien	berechneter Anteil der in "geordneten"
	t	t	%
1991	650'000	832'986	128%
1992	650'000	784'901	121%
1993	650'000	747'930	115%
1994	590'000	727'222	123%
1995	540'000	713'138	132%
1996	490'000	674'816	138%
1997	480'000	767'003	160%
1998	470'000	732'913	156%
1999	470'000	711'998	151%
2000	291'681	166'183	57%
2001	186'656	45'868	25%
2002	81'630	26'923	33%
2003	52'728	0	0%
2004	23'826	0	0%
2005	13'692	0	0%
2006	3'558	0	0%
2007	1'495	0	0%
2008	1'186	0	0%
2009	0	0	0%
2010	0	0	0%
2011	0	0	0%
2012	0	0	0%
2013	0	0	0%
2014	0	0	0%

8.7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Verlauf Methanisierungsphasen Quelle: BAFU	5
Abbildung 2	Quelle: Archiv BAFU „Deponierung in der Schweiz: Überblick Situation bis zum Ablagerungsverbot für organische Abfälle in der TVA.....	8
Abbildung 3	Anteil der an ein Entsorgungssystem angeschlossenen Einwohner (Schätzung)	10
Abbildung 4	Anteil der entsorgten Mengen nach Entsorgungsart (historische Recherche) Quelle: Archiv BAFU „Entwicklung der Abfallmengen in der Schweiz seit 1932 nach Art der Behandlung“ ab 1990 BfS 12	
Abbildung 5	Vergleich Mengen historische Recherche (geordnet/ungeordnet), Deponiemodell BAFU IPCC 2006, Erhebung 2015	12
Abbildung 6	Volumenanteil der vier Kategorie der geordneten Deponien	18
Abbildung 7	Anzahl Deponien nach Kategorie	20
Abbildung 8	Ablagerungsmengen nach Kategorie (Mengen aus Erhebung 2015).....	20
Abbildung 9	Abgelagerte Abfallmengen nach Deponiemodell BAFU IPCC 2006; bzw. Abfallstatistik BAFU sowie nach Kategorien gemäss Erhebung 2015	21
Abbildung 10	Anteil der auf den einzelnen Deponiekategorien 1 bis 4 inkl. den ungeordneten Deponien anfallenden Methangasmenge in Bezug auf die gesamte nach dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Methanmenge.	22
Abbildung 11	Betriebsdaten der Bespieldeponie der Kategorie 1, die nach den Regeln der TVA erstellt und betrieben wurde. Zum Vergleich ist die Gasprognose, welche anhand der abgelagerten Mengen mit dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnet wurde, dargestellt.	23
Abbildung 12	Anteil der in der Fackelanlage entsorgten Menge in Bezug auf die nach Deponiemodell IPCC 2006 berechnete gesamte Gas (s.a. Tabelle 7).....	25
Abbildung 13	%-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 1	26
Abbildung 14	%-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 2	27
Abbildung 15	Gesamtübersicht abgelagerte Mengen; Gasprognosen gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006; Verwertung in den Kategorien 1 und 2; historische Werte	30
Abbildung 16	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).....	31
Abbildung 17	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).....	31

Abbildung 18	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 und Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen.....	32
Abbildung 19	Prozent-Anteil Methangas nach Verwertungsart in Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006	33
Abbildung 20	Prozent-Anteil Methangas in den verschiedenen Kategorien sowie ungeordnete Deponien im Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006	33
Abbildung 21	Mittelwerte Anteil Verwertung in Fackelanlagen für die Kategorie 1 und 2 in den Betrachtungsperioden 1990 bis 2014 sowie Prognose 2015 bis 2054	34

8.8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Anteil der an ein Entsorgungssystem angeschlossenen Einwohner.....	10
Tabelle 2	Spezifische Abfallmengen; Vergleich verschiedener Literaturangaben	11
Tabelle 3	Anteil der entsorgten Mengen nach Entsorgungsart an der gesamten Abfallmenge.....	11
Tabelle 4	Deponien in der Schweiz, in denen organische Abfälle abgelagert wurden (grün = Ablagerung organischer Abfälle >5%TOC; blau = Betrieb ohne Ablagerung organischer Abfälle >5%TOC)	16
Tabelle 5	Deponien nach Kategorien.....	17
Tabelle 6	Anteil der auf den einzelnen Deponiekategorien 1 bis 4 inkl. den ungeordneten Deponien anfallenden Methangasmenge in Bezug auf die gesamte nach dem Deponiemodell BAFU IPCC 2006 berechnete Methanmenge.	22
Tabelle 7	Gemessene Gasmengen der Verwertung (Gasmotor / Muffelofen) bzw. Entsorgung (Fackel), sowie der Emissionen über Oberfläche einer realen Deponie.	24
Tabelle 8	%-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 1.	26
Tabelle 9	%-Anteil Verwertung Deponiegas in Fackelanlagen in Kategorie 2	27
Tabelle 10	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).....	31
Tabelle 11	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 2 in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen (gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006).....	31
Tabelle 12	Anteil Verwertung in Fackel-Anlagen in % für Deponien der Kategorie 1 und der Kategorie 2, bzw. insgesamt in Fackel-Anlagen entsorgte Gasmenge in Bezug auf die gesamte Gasmenge der geordnet und ungeordnet deponierten Mengen.....	32
Tabelle 13	Prozent-Anteil Methangas nach Verwertungsart in Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006	32
Tabelle 14	Prozent-Anteil Methangas in den verschiedenen Kategorien sowie den ungeordneten Deponien im Bezug zur gesamten Gasprognose gemäss Deponiemodell BAFU IPCC 2006	33
Tabelle 15	Mittelwerte Anteil Verwertung in Fackelanlagen für die Kategorie 1 und 2 in den Betrachtungsperioden 1990 bis 2014 sowie Prognose 2015 bis 2054.	34

8.9 Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BfS	Bundesamtes für Statistik
BUS	frühere Bezeichnung BAFU
BUWAL	frühere Bezeichnung BAFU
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
EAWAG	Eidg. Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz,
FID	Flammenionisationsdetektor
FLOX	flammenlose Oxidation
FOD	First Order Decay
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
O ₂	Sauerstoff
TOC	total organic carbon
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WKK	Wärmeerkraftkopplung