

TEXTE

139/2023

Endbericht

Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien

von:

Rainer Stegmann, Kai-Uwe Heyer, Karsten Hupe
IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Hamburg

Gerhard Rettenberger, Rolf Schneider
Ingenieurgruppe RUK GmbH, Stuttgart

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 139/2023

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3714 34 317 0
FB001218

Endbericht

Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien

von

Rainer Stegmann, Kai-Uwe Heyer, Karsten Hupe
IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Hamburg

Gerhard Rettenberger, Rolf Schneider
Ingenieurgruppe RUK GmbH, Stuttgart

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft
Prof. R. Stegmann und Partner
Schellerdamm 19 – 21
21079 Hamburg

Ingenieurgruppe RUK GmbH
Auf dem Haigst 21
70597 Stuttgart

Abschlussdatum:

Oktober 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
Wolfgang Butz

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Zur Ermittlung von Treibhausgasemissionen aus Deponien wird nach IPCC weltweit das gleiche Gasprognosemodell angewendet. Für dessen Anwendung ist nach IPCC für einen Teil der Parameter ein unveränderlicher Wert und für die anderen Parameter ein Wertebereich vorgegeben. Nach den Ergebnissen eines Vorprojektes sind Anpassungen für deutsche Deponien erforderlich. Bei Verwendung von Werten im bisher vorgegebenen Bereich wird insbesondere das Gasbildungspotenzial von Deponien, deren Siedlungsabfälle schon einen längeren Ablagerungszeitraum aufweisen, deutlich überschätzt.

Im UFOPLAN-Vorhaben wird beschrieben, bei welchen Parametern in welchem Umfang für deutsche Deponien Anpassungen erforderlich sind. Dieser Frage wird sich auf unterschiedlichen Wegen wie folgt genähert:

- ▶ Auswertung der hierzu verfügbaren Fachliteratur und des Stands des Wissens.
- ▶ Laborversuche zur Simulation des unterschiedlichen anaeroben Abbauverhaltens im Deponiekörper für die in der Gasprognose unterschiedenen Abfallfraktionen.
- ▶ Untersuchung einer großen Anzahl an Deponien durch Vergleich der in Bohrgutproben festgestellten verbliebenen abbaubaren organischen Substanz zu der mittels Gasprognose für den Zeitpunkt der Bohrung prognostizierten verbliebenen abbaubaren organischen Substanz.
- ▶ Untersuchung einer großen Anzahl an Deponien durch Vergleich der tatsächlich erfassten mit der prognostizierten Deponiegasmenge jeweils unter Beachtung standortspezifischer Charakteristika mit Einfluss auf den Erfassungsgrad.

In einer Parameterstudie werden anschließend Wertekombinationen hergeleitet, mit welchen die Ergebnisse aller Näherungswege am besten abgebildet werden können. Hierbei ergibt sich der für deutsche Deponien geeignetste Satz für die in die Gasprognose einzugebenden Werte.

Abstract

According to the IPCC, the determination of greenhouse gas emissions from landfills worldwide is based on the same gas prognosing model. For its application, a fixed value is specified for some of the parameters and a value range for the remaining parameters. According to the results of a preliminary project, adjustments for German landfills are required. By using values within the given range, in particular the gas-formation potential of landfills where municipal solid waste has already been deposited for a longer period is significantly overestimated.

The UFOPLAN project describes for which parameters and to what extent adjustments for German landfills are required. This problem is approached in different ways as follows:

- ▶ Evaluation of the available literature and the state of the art.
- ▶ Laboratory experiments to simulate the different behaviour of anaerobic degradation in the landfill body for the waste fractions differentiated in the gas prognosis.
- ▶ Research of a great number of landfills by comparing the remaining biodegradable organic matter found in samples of drilled material with the remaining degradable organic matter predicted by gas prognosis for the time of drilling.
- ▶ Research of a great number of landfills by comparing the collected quantity of landfill gas with the gas quantity calculated in the gas prognosis, with consideration of site-specific characteristics with influence on the collection efficiency.

In a following parameter study, value combinations are derived to describe the results of all approximation paths the best. The result of the derivation is a set of suitable values for German landfills which will be used for the gas prognosis.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Anlagenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis.....	15
Zusammenfassung	17
Summary	35
1 Veranlassung.....	51
2 Methodik.....	52
2.1 Projektstruktur	52
2.2 Leistungen im Arbeitspaket A	52
2.3 Leistungen im Arbeitspaket B	52
2.4 Leistungen im Arbeitspaket C	53
2.5 Leistungen im Arbeitspaket D	53
2.6 Leistungen im Arbeitspaket E	54
3 Grundlagen	55
3.1 Gasprognose gemäß FOD-Methode der IPCC.....	55
3.1.1 Prognosemodell	55
3.1.2 Parameter im FOD-Modell.....	57
3.1.2.1 Default values	57
3.1.2.2 Möglichkeiten zum Ansatz von Werten, die von den „default values“ abweichen	60
3.1.3 Ansätze NIR.....	62
3.2 Sachverständigengutachten RUK 2014	65
3.2.1 Kurzbeschreibung der Vorgehensweise	65
3.2.2 Kurzdarstellung des ausgewählten Parametersatzes	65
4 Literaturauswertungen und Datenaufbereitungen, Grundlagen und Erkenntnisse zu den Arbeitspaketen A, C und D	67
4.1 Stand des Wissens und Literaturauswertung zur Absicherung und Anpassung der Werte zur Methanentstehung auf Siedlungsabfalldponien in Deutschland.....	67
4.1.1 Auswertungen zu den Parametern DOC und DOC _f	67
4.1.2 Auswertungen zum Gaspotenzial	71
4.1.3 Vergleich der Methanbildungspotenziale in Nationalen Inventarberichten	74
4.1.4 Auswertungen zum aeroben Kohlenstoffabbau auf Deponien	76

5	Arbeitspaket A: Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modells an die Deponieverhältnisse in Deutschland	82
5.1	Vorgehensweise und Anpassungen bei der Projektdurchführung	82
5.2	Bewertung der Parameter des FOD-Modells für eine Anpassung	82
5.3	Auswahl der Deponiestandorte	85
5.4	Ergebnisse mit dem Parametersatz aus dem Sachverständigengutachten für die betrachteten Deponiestandorte.....	86
5.4.1	Allgemeine Erläuterungen	86
5.4.2	Deponien mit Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung	87
5.4.2.1	Deponie ER	87
5.4.3	Deponien mit Einschränkungen der Gaserfassung.....	91
5.4.3.1	Deponie AR	92
5.4.3.2	Deponie LI	97
5.4.3.3	Deponie MI	101
5.4.4	Zusammenfassender Vergleich der Methanbildung und -erfassung bei Deponien mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdichtung.....	105
6	Ergebnisse Arbeitspaket B: Gaspotenzialbestimmungen und Abfallfeststoffanalysen	111
6.1	Arbeitsprogramm und Einbindung eines weiteren UFOPLAN-Vorhabens zu Methanbildungsraten	111
6.2	Bearbeitungsschritte und Untersuchungsmethoden.....	112
6.3	Ergebnisse zu Pos. 1 und 2: Langzeitgärversuche mit synthetischem Abfall	116
6.3.1	Versuchsablauf der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik	116
6.3.2	Ergebnisse vom Ansatz der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik	117
6.3.3	Auswertung der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik.....	118
6.3.3.1	Prüfung, ob der Abbau in den Langzeitgärversuchen einem anaeroben Abbau unter Deponiebedingungen entspricht	118
6.3.3.2	Unter Laborbedingungen anaerob abbaubarer DOC	119
6.3.3.3	Halbwertszeiten beim Abbau unter Laborbedingungen	136
6.3.4	Ergebnisse aus der Auswertung von erbohrtem Abfall	141
6.3.5	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu Pos. 1 und 2.....	142
6.4	Ergebnisse zu Pos. 3: Untersuchungen an Abfallproben aus Deponien	144
6.4.1	Ablauf der Untersuchungen auf Deponien und Abfallanalysen.....	144
6.4.2	Ergebnisse zum Deponieverhalten und Gasbildungspotenzial der Deponie KI.....	144
6.4.3	Untersuchungsergebnisse an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI	151

7	Ergebnisse zum Arbeitspaket C: Abgleich und Absicherung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B	154
7.1	Zielstellung und Vorgehen	154
7.2	Auswertung und Bewertung der Ergebnisse	154
7.3	Abfallfeststoffanalysen und Biotestes: Statistische Auswertung der beprobten Deponien	156
7.4	Abgleich mit Abfallfeststoffanalysen und Langzeit-Biotests	159
8	Ergebnisse Arbeitspaket D: Ableitung und Überprüfung eines angepassten Parametersatzes	163
8.1	Grundlage für die Ableitung eines angepassten Parametersatzes.....	163
8.2	Ableitung eines angepassten Parametersatzes	165
8.3	Überprüfung des angepassten Parametersatzes	165
8.4	Übertragung des angepassten Parametersatzes auf die Vorgabewerte im NIR	171
8.5	Abschätzung zum Gasfassungsgrad auf deutschen Deponien mit dem angepassten Parametersatz	174
8.6	Zusammenfassende Überprüfung der Ansätze der Variante E.....	179
9	Ergebnisse Arbeitspaket E: Unsicherheiten	182
10	Fazit.....	184
10.1	Zusammenfassendes Fazit zum Vorgehen	184
10.2	Ergänzende Aspekte zur Ermittlung der Methanemissionen von Deponien	186
11	Quellenverzeichnis.....	187

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Durchschnittlicher Methangehalt, Aerobisierungsgrad und Anteil des aeroben Kohlenstoffumsatz (C_{aerob}) auf deutschen Siedlungsabfalldeponien, Bezugsjahr 2014	78
Abbildung 2:	Ablagerungsvolumina von Altablagerungen mehrerer deutscher Bundesländer und einer österreichischen Region	80
Abbildung 3:	Methanbildung bei Deponie ER seit Ablagerungsbeginn	89
Abbildung 4:	Methanbildung bei Deponie ER seit dem Jahr 2010	90
Abbildung 5:	Gegenüberstellung des prognostizierten und des gefassten Methanvolumenstroms bei Deponie ER	90
Abbildung 6:	Mit dem Deponiegas ausgetragener Kohlenstoffmassenstrom bei Deponie ER	91
Abbildung 7:	Methanbildung bei Deponie AR seit Ablagerungsbeginn	95
Abbildung 8:	Methanbildung bei Deponie AR seit dem Jahr 2010	95
Abbildung 9:	Gegenüberstellung des prognostizierten und des gefassten Methanvolumenstroms bei Deponie AR	96
Abbildung 10:	Mit dem Deponiegas ausgetragener Kohlenstoff bei Deponie AR	97
Abbildung 11:	Methanbildung der Deponie LI seit Ablagerungsbeginn	100
Abbildung 12:	Ausschnitt zur Methanbildung der Deponie LI seit dem Jahr 1992	100
Abbildung 13:	Methanbildung der Deponie MI Altbereich seit Ablagerungsbeginn 1970	104
Abbildung 14:	Ausschnitt zur Methanbildung der Deponie MI Altbereich seit dem Jahr 1996	104
Abbildung 15:	Methanbildung der Deponie MI Neubereich seit Ablagerungsbeginn 1995	105
Abbildung 16:	Chemische Zusammensetzung von organischen, biologisch verfügbaren Abfallfraktionen unter besonderer Berücksichtigung der Faserfraktionen	113
Abbildung 17:	Fotos der Probenherstellung und des hierzu verwendeten Materials	116
Abbildung 18:	Langzeitgärversuche - zeitlicher Verlauf der Gasbildung in Form des Abbaus an organischem Kohlenstoff für alle 7 Proben	119
Abbildung 19:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 7	125
Abbildung 20:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 7	126
Abbildung 21:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 5	127

Abbildung 22:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 5	128
Abbildung 23:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 4	129
Abbildung 24:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 4	130
Abbildung 25:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 1	131
Abbildung 26:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 1	131
Abbildung 27:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 2	132
Abbildung 28:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 2	133
Abbildung 29:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 3	134
Abbildung 30:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 3	134
Abbildung 31:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 6	135
Abbildung 32:	Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 6	135
Abbildung 33:	Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die Organik-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 7	137
Abbildung 34:	Langzeitgärversuche – Summe der Gasbildung bei den Proben 4, 5 und 7	138
Abbildung 35:	Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die PPK-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 4 nach Abzug der Organik-Fraktion	138
Abbildung 36:	Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die Holz-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 5 nach Abzug der Organik-Fraktion	139
Abbildung 37:	Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die verbleibenden Fraktionen aus der Summe der Gasbildung bei den Proben 1-3 nach Abzug der Organik-, der Holz- und der PPK-Fraktion	141
Abbildung 38:	Porenwassersättigung / Sickerwassereinstau in unterschiedlichen Deponiebereichen (Beprobungspunkte MP) der Deponie KI	145
Abbildung 39:	Anteile Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Rohasche im Verhältnis zum langfristigen Sauerstoffverbrauch, Deponie KI	147

Abbildung 40:	Vergleich der Anteile Hemicellulose, Cellulose, Lignin im Frischmüll mit den Mittelwerten der Deponie KI	148
Abbildung 41:	Summenlinien des Sauerstoffverbrauchs (Atmungsaktivität AT) von Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 20 Tagen = 480 Stunden	150
Abbildung 42:	Summenlinien der Gasbildung (Gasbildungspotenzial GB) von Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 60 Tagen	151
Abbildung 43:	Beispielabbildung für einen Boxplot mit den im Boxplot dargestellten statistischen Kennwerten	156
Abbildung 44:	Boxplot der Restgaspotenziale der Deponiestandorte AI – PI (Bezug auf TM). (Jahreszahlen hinter dem Deponiebuchstaben = Jahr der Probenahme zur Unterscheidung), Reihenfolge der Deponien auf der x-Achse entspricht dem mittleren Ablagerungsalter	157
Abbildung 45:	Auswertung aller Abfallfeststoffproben der Deponie AI – QI: Glühverlust, AT ₄ und Restgaspotenzial in Abhängigkeit vom Ablagerungsalter (Bezug auf TM)	158
Abbildung 46:	Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie LR	169
Abbildung 47:	Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie NR.	170
Abbildung 48:	Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie TR	171
Abbildung 49:	Jährliche Methanbildung aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E für die Jahre ab 1990	175
Abbildung 50:	Gaspotenzial bei deutschen Deponien im internationalen Vergleich bei den Ansätzen aus dem NIR und den Ansätzen der Variante E	176
Abbildung 51:	Entwicklung der Gaserfassungsgrade aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E für die Jahre ab 1990	177
Abbildung 52:	Vergleich der aus den Abfallproben ermittelten Gasbildung mit der berechneten Gasbildung bei allen Deponien, an denen eine Beprobung stattgefunden hat	179
Abbildung 53:	Vergleich des Ansatzes für DOC x DOC _f bei Variante E mit den Ansätzen im NIR, den Ergebnissen der Langzeitgärversuche und dem Mittelwert und dem Median der Literaturlauswertung	181
Abbildung 54:	Einzelwerte der Literaturlauswertung	181

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Default values für die Halbwertszeit in den 2006 IPCC Guidelines	59
Tabelle 2:	Default values für die k-Werte in den 2006 IPCC Guidelines	59
Tabelle 3:	Default values für den DOC im IPCC-Waste-Modell	60
Tabelle 4:	Im deutschen NIR für den DOC angesetzte Werte einschließlich Begründung im NIR für die gewählten Ansätze im Vergleich zu dem gemäß IPCC-Waste-Modell zugelassenen Wertebereich	64
Tabelle 5:	Im deutschen NIR für den k-Wert und die Halbwertszeit angesetzte Werte im Vergleich zu dem in den 2006 IPCC Guidelines zugelassenen Wertebereich	64
Tabelle 6:	Vergleich der im deutschen NIR und im Sachverständigengutachten für die Halbwertszeit und den DOC _f angesetzten Werte (RUK, 2014)	65
Tabelle 7:	Im deutschen NIR angesetzte Default-Werte, Referenzergebnisse Fachliteratur und Untersuchungen.....	68
Tabelle 8:	Ableitung des gesamtdeutschen und des spezifischen Gaspotenzials mit den Ansätzen aus dem NIR am Beispiel des Jahres 1993	71
Tabelle 9:	Deponiegaspotenziale der organikhaltigen deponierten Abfälle (durchschnittliches Gaspotenzial der Gesamtorganik im Bezugsjahr 1993), Abgleich mit Referenzergebnissen.....	72
Tabelle 10:	Defaultwerte zum Methanbildungspotenzial L ₀ und abgeleitetes Gaspotenzial verschiedener Länder zum Nationalen Inventarbericht (Angaben von 2014, UNFCC, 2014, zit. in Krause et al., 2016)	75
Tabelle 11:	Deponiebeschreibung der Deponie ER	88
Tabelle 12:	Deponieinventar der Deponie ER in Mg	88
Tabelle 13:	Gewerbeabfallzusammensetzung der Deponie ER.....	89
Tabelle 14:	Deponiebeschreibung der Deponie AR	92
Tabelle 15:	Deponieinventar der Deponie AR in Mg	93
Tabelle 16:	Gewerbeabfallzusammensetzung der Deponie AR	94
Tabelle 17:	Deponiebeschreibung der Deponie LI	98
Tabelle 18:	Deponieinventar der Deponie LI in Mg.....	99
Tabelle 19:	Deponiebeschreibung der Deponie MI	101
Tabelle 20:	Deponieinventar der Deponie MI in Mg	102
Tabelle 21:	Anteil des gefassten am prognostizierten Methanvolumenstrom bei Verwendung unterschiedlicher Parametersätze.....	106
Tabelle 22:	Vergleich der Gaserfassungsgrade bei Verwendung unterschiedlicher Parametersätze und der Ergebnisse von	

	Abfallfeststoffuntersuchungen für die Deponien AI – QI mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdichtung	110
Tabelle 23:	Zusammensetzung der für die GB ₂₀₀ -Untersuchungen eingesetzten synthetischen Abfallmischproben.....	114
Tabelle 24:	Wassergehalt (WG), Trockenmassegehalt (TM) und organischer Trockenmassegehalt (oTM) für die Proben zu Beginn der GB ₂₀₀ -Versuche	117
Tabelle 25:	Langzeitgärversuche – Vergleich des beim Versuch erreichten Kohlenstoffabbaus mit den rechnerisch aus dem GB ₂₁ bestimmten Werten	119
Tabelle 26:	Langzeitgärversuche – Aus den Versuchen errechneter DDOCm.....	120
Tabelle 27:	DDOCm – Vergleich zwischen den Ergebnissen der Langzeitgärversuche und den rechnerischen Werten	122
Tabelle 28:	Ermittlung des DDOCm aus dem bei den Langzeitgärversuchen ermittelten Kohlenstoffabbau – Holz- und PPK-Fraktion	123
Tabelle 29:	Ermittlung des DDOCm aus dem bei den Langzeitgärversuchen ermittelten Kohlenstoffabbau – Textilien und Verbundstoffe	123
Tabelle 30:	Deponiestandorte und Untersuchungsprogramm für die beiden UFOPLAN-Vorhaben	144
Tabelle 31:	Zusammensetzung von Abfallproben der Deponie KI, Bezug auf Feuchtmasse FM	146
Tabelle 32:	Ergebnisse der Standard-Analysen, Biotests und des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI (Auszug)	152
Tabelle 33:	Ableitung bioverfügbarer Kohlenstoff DDOCm und Methanbildungspotenzial L ₀ aufgrund der Ergebnisse der Biotests an Abfallproben, MCF _{langfristig} im Gasabsaugbetrieb der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI (Auszug)	161
Tabelle 34:	Ansätze der Varianten A bis E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR.....	166
Tabelle 35:	Anteile der einzelnen Abfallfraktionen an der Deponiegasbildung des Jahres 2018 am Beispiel der Deponie AR.....	167
Tabelle 36:	Vergleich der bisher im deutschen NIR für die Halbwertszeit, den DOC und den DOC _r angesetzten Werte, Vorschlag zur Anpassung zur genaueren Abschätzung der Methanemissionen von Deponien (Klammerwerte geben Schwankungsbreiten bzw. mögliche Unsicherheiten an).....	172
Tabelle 37:	Beurteilung der Unsicherheiten der Eingangsdaten zur Abschätzung der Methanemissionen von Deponien vor dem Hintergrund der IPCC Angaben (IPCC, 2006)	183

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Anlage zum Arbeitspaket A, Kapitel 5: Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modells an die Deponieverhältnisse in Deutschland, Auswertung der Deponiestandorte
- Anlage 2: Anlage zum Arbeitspaket D, Kap. 8: Ergebnis bei Verwendung des angepassten Parametersatzes im Vergleich zu dem im vorlaufenden Sachverständigengutachten verwendeten Parametersatz und zu dem im deutschen NIR bislang verwendeten Parametersatz
- Anlage 3: Anlage zum Arbeitspaket D, Kap. 8.3: Ergebnis der Überprüfung des angepassten Parametersatzes

Abkürzungsverzeichnis

ADF	Säure-Detergenzien-Faser (acid detergent fiber) im stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest
ADL	Säure-Detergenzien-Lignin im stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest
AT₄	Atmungsaktivität, bestimmt über 4 Tage im Laborversuch nach den Vorgaben des Anhang 4 der Deponieverordnung (N.N. 2009)
BMP	Biomechanical methane potential (Biotest zum Methanbildungspotenzial)
C_{org.}	Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall im Jahr der Deponierung in kg C/Mg Abfall bezogen auf die Feuchtmasse FM oder Trockenmasse TM
CH₄ emitted_T	Im Jahr T emittierte Methanmenge in Gg Methan im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
CH₄ generated_T	Im Jahr T gebildete Methanmenge in Gg Methan im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DDOC_m	Masse des deponierten abbaubaren organischen Kohlenstoffs in Gg, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen zersetzt wird
DDOC_{maT}	Zum Ende des Jahres T im Deponiekörper vorhandenes DDOC _m in Gg im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DDOC_{maT-1}	zum Ende des Jahres T-1 im Deponiekörper vorhandenes DDOC _m in Gg im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DDOC_{mdT}	im Jahr T deponiertes DDOC _m im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DDOC_{m de-compT}	im Jahr T anaerob abgebautes DDOC _m im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DepV	Deponieverordnung
DOC	Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall im Jahr der Deponierung in Gg C / Gg Abfall bezogen auf die Feuchtmasse im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DOC_f	Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen anaerob zersetzt wird im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
DOC_i	DOC in der Abfallfraktion i im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
F	Methankonzentration im gebildeten Deponiegas im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
FM	Feuchtmasse in Mg oder Gg
FOD	First Order Decay, Abbau nach 1. Ordnung
GB₂₁	Gasbildung, bestimmt über 21 Tage im Laborversuch nach den Vorgaben des Anhang 4 der Deponieverordnung (N.N. 2009)
Gg	Gigagramm (10 ⁹ Gramm)
GOK	Geländeoberkante
GV	Glühverlust in %TM

ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
k	Abbaukonstante in 1/a (1/Jahr) = $\ln(2) / t_{1/2}$ im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
L₀	Methanbildungspotenzial in Gg CH ₄ im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
MAP	mean annual precipitation = mittlere Jahresniederschlagsmenge in m
MAT	mean annual temperature = mittlere Jahrestemperatur
MBA	Mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage
MCF	methane correction factor = Methan-Korrektur-Faktor 1 - MCF = Anteil der abbaubaren organischen Kohlenstoffverbindungen, die im Ablagerungsjahr aerob abgebaut werden, im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
Mg	Megagramm (10 ⁶) = 1 Tonne
N_{ges.}	Stickstoffgehalt der Abfallfeststoffprobe in %TM oder kg/MgTM
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser im stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe im stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest
NIR	Nationaler Inventarbericht zur Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll
oTM	Organische Trockenmasse bestimmt als Glühverlust in %TM oder kg/MgTM
OX_r	Anteil an Methan, der in der Deponiedeckschicht oxidiert wird im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
PEHD	PE-HD (HDPE) = u. a. für KDB verwendetes Polyethylen mit schwach verzweigten Polymerketten, daher hoher Dichte zwischen 0,94 g/cm ³ und 0,97 g/cm ³ , („HD“ steht für „high density“)
PET	potential evapotranspiration = jährliche Verdunstung (pot. Evapotranspiration) in m
PPK	Mischfraktion aus Papier, Pappe und Kartonagen
R_r	Gefasste und in einer Fackel oder in einer Verwertungsanlage verbrannte (recovered – zurückgewonnene) Methanmenge in Gg Methan im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
SVG	Sachverständigengutachten der Ingenieurgruppe RUK GmbH, 2014: Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien
T	Jahr, für das die Kalkulation durchgeführt wird im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
t_{1/2}	Halbwertszeit in Jahren (a)
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TM	Trockenmasse

W	Masse des deponierten Abfalls in Gg Abfall im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
W_i	Anteil der Abfallfraktion i am Deponiegut bezogen auf die Feuchtmasse im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines
WG	Wassergehalt in %FM
σ	Volumenkonzentration (Gas) in %

Zusammenfassung

Veranlassung

Seit dem 1.6.2005 ist die Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle in Deutschland nicht mehr zulässig. Dennoch sind Methanemissionen aus Deponien auf absehbare Zeit eine Hauptquelle für Treibhausgasemissionen im Abfallbereich.

Die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien erfolgt im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar (NIR) nach der First Order Decay-Methode (FOD-Methode) gemäß den Vorgaben der IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006 IPCC Guidelines). Es erfolgt eine Modellierung des biologischen Abbaus über die Ablagerungsdauer. Grundlage sind Daten und Faktoren, die den Abfällen zum Zeitpunkt der Ablagerung zugeordnet werden. Nationale Ansätze im zugelassenen Wertebereich (range) der 2006 IPCC Guidelines werden genutzt.

Von der gebildeten Methanmenge ist die erfasste Methanmenge abzuziehen. Vom Statistischen Bundesamt werden hierzu für alle Deponien die entsprechenden Daten abgefragt. Demnach ergibt sich nach der letzten Erhebung eine durchschnittliche Erfassungsrate von etwa 24 %. Im internationalen Vergleich ist das sehr wenig. Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage, ob die mit der FOD-Methode berechnete gebildete Methanmenge realistisch ist. Aufgabe des UFOPLAN-Projekts ist es, den Berechnungsansatz der Deponiegasbildung in folgenden Leistungspaketen zu überprüfen:

- ▶ Arbeitspaket A: Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modelles an die Deponieverhältnisse in Deutschland
- ▶ Arbeitspaket B: Laborversuche
- ▶ Arbeitspaket C: Verifizierung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B
- ▶ Arbeitspaket D: Erarbeitung und Begründung von Vorschlägen für angepasste Default-Werte
- ▶ Arbeitspaket E: Schätzung der Unsicherheiten

FOD-Modell und hierfür bislang angesetzte Eingangswerte

Beim FOD-Modell sind folgende Formeln relevant:

$$1) \quad L_o = W * DOC * DOC_i * MCF * F * 16/12$$

- L_o = Methanbildungspotenzial des deponierten Abfalls [Gg CH₄]
- W = Masse des deponierten Abfalls [Gg Abfall]
- DOC = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall im Jahr der Deponierung [Gg C / Gg Abfall]. Angesetzt werden unterschiedliche DOC-Anteile für verschiedene Abfallfraktionen. Damit gilt:
 - DOC_i = Anteil an abbaubarem organischem Kohlenstoff der Abfallfraktion i bezogen auf die Feuchtmasse [Gg C / Gg Abfall]
 - W_i = Anteil der Abfallfraktion i am Deponiegut bezogen auf die Feuchtmasse [-]

- DOC_f = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen anaerob zersetzt wird [-]. Restlicher Kohlenstoff = Kohlenstoff, der über lange Zeit im Deponiekörper verbleibt, ohne anaerob abgebaut zu werden.
- MCF = Methan-Korrektur-Faktor [-];
- $1 - MCF$ = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der im Ablagerungsjahr aerob abgebaut wird
- F = Methankonzentration im gebildeten Deponiegas [-] (0,5)
- $16/12$ = Molekulargewichtsverhältnis CH_4/C [-]
- $DDOC_m$ = $W * DOC * DOC_f * MCF$
= Kohlenstoff, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen zersetzt wird [Gg]

2) $CH_4 \text{ generated}_T = DDOC_{m,T-1} * (1 - e^{-k}) * F * 16/12$

- $CH_4 \text{ generated}_T$ = Im Jahr T aus dem Kohlenstoff, der unter Deponiebedingungen zersetzt wird, gebildete Methanmenge [Gg Methan]
- T = Jahr, für das die Kalkulation durchgeführt wird
- $DDOC_{m,T-1}$ = zum Ende des Jahres T-1 im Deponiekörper vorhandenes $DDOC_m$ [Gg]
- k = Abbaukonstante [$1/a$] = $\ln(2) / t_{1/2}$
- $t_{1/2}$ = Halbwertszeit [a]

3) $CH_4 \text{ emitted}_T = (CH_4 \text{ generated}_T - R_T) * (1 - OX_T)$

- $CH_4 \text{ emitted}_T$ = im Jahr T emittierte Methanmenge [Gg Methan]
- R_T = gefasste und verbrannte Methanmenge [Gg Methan]
- OX_T = Anteil von in der Deponiedeckschicht oxidiertem Methan [-]

Ergebnisse einer Literaturlauswertung

Der Vergleich mit Literaturwerten führt bei den angesetzten Werten für DOC und DOC_f zu folgenden Erkenntnissen:

- ▶ Bei der Fraktion Organik entsprechen die im NIR angesetzten DOC -Anteile von 0,15 und 0,18 im Mittel in etwa den Literaturwerten. Gleiches gilt bei Ansatz eines DOC -Anteils von 0,15 für das Produkt aus $DOC * DOC_f$ als Faktor für das spezifische Gasbildungspotenzial.
- ▶ Bei der Fraktion Garten- und Parkabfälle liegen die im NIR angesetzten DOC -Gehalte etwas unter den Literaturwerten. Die Verfügbarkeit für einen anaeroben Abbau (DOC_f) ist gemäß Literaturrecherche aber geringer als im NIR angesetzt.
- ▶ Bei der Fraktion Papier und Pappe liegt der DOC gemäß Literaturlauswertung eher bei 0,28 - 0,34 anstatt bei dem im NIR angesetzten Wert von 0,4. Das Gasbildungspotenzial von Papier hängt in hohem Maße von der Papierart und dem Ligningehalt ab. So weist Zeitungspapier ein eher geringes Gasbildungspotenzial auf (hoher Ligningehalt), während z.B. Wellpappe ein deutlich höheres Gasbildungspotenzial zeigt (geringer Ligningehalt).
- ▶ Bei der Fraktion Holz (und Stroh) liegt der DOC gemäß Literaturlauswertung eher unter dem im NIR angesetzten Wert von 0,43. Die Verfügbarkeit für einen anaeroben Abbau (DOC_f) ist gemäß Literaturrecherche aber erheblich geringer als im NIR angesetzt (deutlich unter 0,2 anstatt 0,5).
- ▶ Bei der Fraktion Textilien liegen die DOC -Gehalte aus der Literatur etwas höher als der im NIR angesetzte Wert von 0,24. Der Wert im NIR wurde aber auch bei tendenziell höheren Wassergehalten bestimmt, was vermutlich auf die hohe Wasserspeicherkapazität zurückzuführen ist. Angaben zur anaeroben Abbaubarkeit sind in der Literatur nicht verfügbar. Diese wird vom Kunstfaseranteil abhängen.

- ▶ Bei der Fraktion Klärschlamm hängt der DOC-Gehalt vom Wassergehalt bei der Ablagerung ab. Die Ansätze im NIR sind plausibel. Gemäß Literaturwerten weisen die in der Vergangenheit häufig abgelagerten ausgefaulten kommunalen Klärschlämme eine geringe anaerobe Abbaubarkeit unter 0,5 auf.
- ▶ Bei Restmüll der Jahre 1998 - 2003 liegt der DOC gemäß mehrerer Untersuchungen bei 128 bis 132 kgC/MgTM. Sie liegen damit noch unter dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt der bundesweiten Hausmüllanalyse von 1985.
- ▶ Der Vergleich mit Literaturwerten führt für das spezifische Gasbildungspotenzial in m³/Mg FM beim Vergleich mit den unter Ansatz der NIR-Werte berechneten Werten zu folgenden Ergebnissen:
 - Organik (Food waste) 76 – 168* (NIR: 168)
 - Garten- und Parkabfälle (Garden) 74 – 128** (NIR: 187)
 - Papier und Pappe (Paper) 95 - 201 (NIR: 374)
 - Holz und Stroh (Wood and straw) 21 – 57 (NIR: 402)
 - Textilien + Windeln *** NIR: 224
 - Klärschlamm (Sewage sludge) 30 (NIR: 47)
 - Verbundmaterialien **** NIR: 93
 - Hausmüll mit Bezugsjahr 1993 70 – 186 (NIR: 231)

*: Nach KTBL, 2013: Speisereste: 95 / Bioabfall: 123

** : Rasenschnitt hat ein höheres Gasbildungspotenzial, spielt im Rahmen der Deponierung jedoch nur eine untergeordnete Rolle

***: Keine einheitlichen Werte, das Gasbildungspotenzial ist stark beeinflusst vom Wassergehalt und der Zusammensetzung der Textilien

****: Keine aussagekräftigen Werte zu finden; zudem ist noch höhere Inhomogenität als bei Textilien anzunehmen
- ▶ Insbesondere bei den Fraktionen „Papier und Pappe“ sowie „Holz und Stroh“ ist das tatsächliche Gasbildungspotenzial niedriger als das berechnete.

Die biologischen Abbauprozesse auf Deponien werden außer von anaeroben auch von aeroben Abbauprozessen wie folgt geprägt:

- ▶ Unmittelbar nach der Ablagerung kommt es über die offene Deponiefläche zu aeroben Abbauprozessen.
- ▶ Bei nachlassender Gasproduktion, also mit zunehmendem Ablagerungsalter, kommt es zunehmend zu Außenluftzutritten über die Deponieoberfläche und/oder über Randbereiche. Dieser Effekt ist bei aktiver Gaserfassung in der Regel größer als ohne aktive Gaserfassung (Lufteintrag durch Übersaugungseffekt).

Bislang wird nur der aerobe Abbau bei Ablagerungsbeginn im MCF berücksichtigt, es könnten jedoch beide Sachverhalte, also auch der langfristige aerobe Abba über den MCF abgebildet werden:

- ▶ Für den MCF_{Ablagerungsbeginn} lässt sich nach der Literaturrecherche ein Wert zwischen 0,8 bei langsamem Aufbau der Deponie und 0,95 bei schnellem Aufbau ableiten.
- ▶ Für die Ableitung des MCF_{langfristig} ist Folgendes zu berücksichtigen:
 - Bei dem derzeit in Deutschland im Durchschnitt gegebenen Deponiealter würde unter anaeroben Milieubedingungen das Deponiegas nahezu ausschließlich aus den Hauptkomponenten Methan und Kohlenstoffdioxid etwa im Verhältnis 65 zu 35 % (1,86) bestehen.
 - Bei Außenluftzutritt wird Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt. In Folge davon sinkt das Methan- zu Kohlenstoffdioxid-Verhältnis und Stickstoff ist im Deponiegas- / Luftgemisch vorhanden.

- Aus einer Erhebung des Statistischen Bundesamts für das Jahr 2014 geht hervor, dass der durchschnittliche Methangehalt aller statistisch erfassten Deponien in der Betriebs- und Stilllegungsphase bei 47 % und bei den Deponien in der Nachsorge bei 38 % liegt. Der für diese Methankonzentrationen berechnete Anteil des aeroben Abbaus am Gesamtabbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs liegt bei den genannten Rahmenbedingungen bei 7,3 % bzw. bei 12,6%.
- Folglich lässt sich für den $MCF_{\text{langfristig}}$ ein aktueller Wert von 0,87 – 0,93 mit abnehmender Tendenz (aufgrund des anwachsenden Aerobisierungsgrads) ableiten.

Ergebnisse des Arbeitspaketes A

Für die Entwicklung von angepassten Parametern zur Anpassung des FOD Modelles an die Deponieverhältnisse in Deutschland wurden anknüpfend an das Sachverständigengutachten 2014 weitere Deponien ausgewählt, welche die Voraussetzung erfüllen, möglichst gut gekapselt zu sein und das gesamte Deponiegas zu fassen. Insgesamt wurden neben den fünf Deponien aus dem Sachverständigengutachten mehrere Dutzend weitere Deponiestandorte angefragt, um den Parametersatz zu konkretisieren. Nur etwa von einem Drittel der angefragten Deponien wurden die notwendigen Betriebsdaten, Abfallinventar- und Entgasungsdaten zur Verfügung gestellt. Und auch von diesen Deponien mussten einige Standorte aussortiert werden, da diese sich letztlich als doch zu ungeeignet herausgestellt haben. Zusätzlich wurde eine größere Anzahl an Deponiestandorten im Zuge der Erarbeitung von so genannten Potenzialanalysen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative „Einsatz geeigneter Technologien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“ ausgewertet. So ergab sich zudem die Möglichkeit, dem jeweiligen Deponiekörper Abfallfeststoffproben zu entnehmen und sie u.a. auf das noch vorhandene Gasbildungspotenzial zu untersuchen. Insgesamt ergab sich so ein Umfang von 38 ausgewerteten Deponiestandorten.

In einem ersten Ansatz wurde festgestellt, dass die Ansätze des Sachverständigengutachtens RUK 2014 die tatsächliche Gasbildung und die Ergebnisse zum Gasbildungspotenzial aus erbohrten Abfallproben gut widerspiegeln. Die Leistungen in Arbeitspaket A umfassen damit hauptsächlich:

- ▶ Überprüfen der Ansätze des Sachverständigengutachtens bei den zusätzlichen Deponiestandorten
- ▶ Weitere Recherchen zu den abgelagerten Abfallarten bei allen ausgewerteten Deponiestandorten und Verbesserung der Datenbasis.

Wesentliche Erkenntnisse des Arbeitspaketes A:

- ▶ Es wurden für manche Deponien für den Erfassungsgrad Werte über 100 % errechnet. Mit der Gasprognose aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) ist also offensichtlich noch nicht jene Gasprognose abgeleitet, welche die reale Gasbildung widerspiegelt.
- ▶ Bei Deponien mit Bedingungen für eine optimale Entgasung ergaben sich im Durchschnitt etwa doppelt so hohe Erfassungsgrade wie für die Deponien ohne Bedingungen für eine optimale Entgasung, wobei innerhalb dieser beiden Gruppen große Unterschiede festzustellen sind. Diese sind abhängig von:
 - Deponiegröße: Bei kleineren Deponien ohne Oberflächenabdichtung nach Deponieverordnung oder gleichwertig ist es teilweise kaum möglich, hohe Erfassungsgrade zu erzielen.
 - Zustand der vorhandenen Entgasungseinrichtungen (ausreichender Umfang an Wartung / Instandhaltung/ Instandsetzung). Höhere Erfassungsgrade werden von Deponien erzielt, bei denen bedarfsorientiert neue Gasbrunnen installiert werden z. B. als Ersatz für nicht mehr funktionierende Gasbrunnen und / oder bedarfsorientiert Regelinstrumente und Förder Einrichtungen an die abnehmende Gasbildung angepasst werden.
 - Deponiegasverwertung: Je flexibler die eingesetzte Technik auf veränderliche Methankonzentrationen und Volumenströme reagieren kann, desto besser wird entgast.
- ▶ Die v. g. Einflussfaktoren und weitere standortspezifische Faktoren haben einen solch erheblichen Einfluss, dass der eine Unterscheidung nach den in der Aufgabenstellung genannten Deponietypen nicht zielführend war.
- ▶ Der Vergleich einer Gasprognose mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) mit den Ergebnissen zur verbliebenen anaerob abbaubaren Organik in Bohrgut aus Bohrungen auf Deponien zeigt sehr geringe Abweichungen. Prognostiziert wurde eine Gasbildung teilweise geringfügig unter und teilweise geringfügig über den für das Bohrgut ermittelten Wert.

ten. Die Varianz bei der punktuellen Aufnahme des Zustandes des Deponiekörpers durch die Bohrungen war zu erwarten gewesen.

Die Gasprognose mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten RUK, 2014 führt in allen betrachteten Beispielen zu einer Gasbildung, die jener abgeleitet aus den Abfallfeststoffuntersuchungen sehr viel näher kommt als mit den Ansätzen aus dem NIR.

- Eine gewisse Unsicherheit ist bei nahezu allen Deponiestandorten dadurch gegeben, dass zu wenige belastbare Angaben zur Abfallzusammensetzung des Deponiekörpers vorliegen. Das betrifft teilweise die mengenmäßigen Anteile des Hausmülls im Vergleich zu den Gewerbeabfällen, Schlämmen, Baustellenabfällen, mineralischen Abfällen etc. und in fast allen Fällen die Zusammensetzung der einzelnen Abfallfraktionen.

Ergebnisse des Arbeitspaketes B, Positionen 1 und 2

Es erfolgten an insgesamt 7 Abfallproben, welche als Materialmischung aus Abfallprodukten synthetisch hergestellt worden sind, folgende Untersuchungen (Pos. 1):

- ▶ Gasbildung in 200 Tagen (GB200) bei einer Probe mit 500 g Probenmaterial
- ▶ Untersuchung der Abfallzusammensetzung und -qualität bei der nach Versuchsende verbliebenen Probenmasse und für den direkten Vergleich: Durchführung des gleichen Untersuchungsumfangs zur Abfallzusammensetzung und -qualität vor Ansatz des Versuches zur Gasbildung nach der Herstellung der synthetisch hergestellten Materialmischung.

Die Untersuchung der Proben erfolgte in zwei parallel laufenden UFOPLAN-Projekten, welche aber gemeinsam ausgewertet wurden, um so eine zielführende Auswertung zu erreichen. Angesetzt wurden jeweils 3 Parallelansätze für die 7 Proben:

- ▶ Im hier vorgestellten UFOPLAN-Vorhabens 3714 34 317 0 „Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien“ wurden folgende Proben untersucht:
 - Eine Probe mit 100 % Organik,
 - eine Probe mit 68 % Organik und 32 % Holz und
 - eine Probe mit 68 % Organik und 32 % PPK.
- ▶ Im parallel durchgeführten UFOPLAN-Vorhaben 3715 41 110 0 „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“ wurden folgende Proben untersucht:
 - Eine Probe deren Zusammensetzung der mittleren Abfallzusammensetzung von 17 zuvor ausgewählten repräsentativen Deponien entspricht,
 - zwei Proben entsprechend der Schwankungen bei den 17 zuvor ausgewählten repräsentativen Deponien, wobei die Zusammensetzung zum einen auf höhere und zum anderen auf geringere Anteile an Organik-Fraktion umgerechnet wurden und
 - eine Probe, deren Zusammensetzung ebenfalls der mittleren Abfallzusammensetzung von 17 zuvor ausgewählten repräsentativen Deponien entspricht, nur dass die Hälfte der Organik-Fraktion durch Klärschlamm ersetzt worden ist.

Zur Kontrolle wurden mit den gleichen Methoden zusätzlich Proben aus einer Greiferbohrung zum Gasbrunnenbau bei einer Altdeponie untersucht (Pos. 2).

Bei den Langzeitgärversuchen wurden Erkenntnisse zum DDOC_m und zu den Halbwertszeiten unterschiedlicher Abfallfraktionen im Labor gewonnen. Bei den Halbwertszeiten mit dem Vorbehalt, dass die Ergebnisse überlagert sind durch sich gegenseitig beeinflussende Fraktionen bei den in 6 von 7 Proben untersuchten Materialmischungen.

Die Sortieranalysen vor und nach den Langzeitgärversuchen wurden zwar ebenfalls ausgewertet, es zeigte sich hierbei jedoch, dass Vieles dabei nicht eindeutig auszuwerten war. Eine umfangreichere Auswertung als durchgeführt wäre daher zu spekulativ. Bereits bei der durchgeführten Auswertung waren nicht eindeutig belegbare Annahmen zu treffen. Insofern muss auf eine Verwendung der Ergebnisse zur Bewertung verzichtet werden.

Die Ergebnisse zeigten, dass das Abbauverhalten stark von der Zusammensetzung des Deponiegutes abhängt. Bereits bei der Betrachtung der Ergebnisse der vier Versuche mit den Mischproben fällt zudem auf, dass die gegenseitige Beeinflussung nicht nur den Abbau von langsam abbaubaren Abfallfraktionen betrifft, sondern auch jene der schnell abbaubaren Abfallfraktionen wie Organik oder PPK.

Bei der Auswertung der Langzeitgärversuche wurden folgende DDOC_m-Werte (= DOC x DOC_f) ermittelt:

- ▶ PPK-Fraktion: 203 kg/Mg FM
- ▶ Organik-Fraktion: 44 kg/Mg FM
- ▶ Holzfraktion: 16 kg/Mg FM

Bei den Langzeitgärversuchen wurde für alle Proben ein erheblich niedrigerer Wert für DDOC_m ermittelt, als sich bei den Ansätzen der IPCC rechnerisch ergeben würde.

- ▶ Die geringsten Abweichungen sind bei der PPK-Fraktion gegeben.
- ▶ Die größten Abweichungen treten bei der Holzfraktion auf.
- ▶ Bei der Organik-Fraktion wird mit den rechnerischen Ansätzen der C_{org}-Abbau ebenfalls deutlich überschätzt.

Zur Beurteilung der Werte ist auf Folgendes hinzuweisen:

- ▶ Bei der Organik-Fraktion handelt es sich um eine wesentlich inhomogenere Mischung als bei der PPK-Fraktion und bei der Holzfraktion.
- ▶ Insbesondere sind in der Organik-Fraktion Abfälle mit sehr unterschiedlichem Wassergehalt enthalten. Dies macht sich entsprechend bei dem auf die Feuchtmasse bezogenen DDOC_m bemerkbar.
- ▶ Durch die Inhomogenität werden die Versuchsergebnisse für die Organik-Fraktion sehr von der Auswahl der organikhaltigen Bestandteile für die Versuche beeinflusst.
- ▶ Für die Langzeitgärversuche mit der Holzfraktion wurde das Holz zuvor zerkleinert. Die bei der Zerkleinerung angefallenen Holzspäne und das angefallene Holzmehl wurden der Probe zugegeben. Die Betrachtung der Zeitreihe der Gasbildung lässt vermuten, dass ca. 60 % der Gasbildung aus Holzmehl stammen müsste. Wird dieses und zudem berücksichtigt, dass Holzmehl bei der realen Deponierung praktisch keine Rolle spielt, muss der hier abgeleitete Wert für den DDOC_m in einer realen Deponie theoretisch auf 40 % des so experimentell ermittelten Wertes reduziert werden.

Bei der Auswertung der Halbwertszeiten ist die relevante Erkenntnis das Verhalten der Halbwertszeiten relativ zueinander. Demnach ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Die Abbaugeschwindigkeit von PPK scheint gleich groß zu sein wie jene der Organik-Fraktion.
- ▶ Die Halbwertszeit der Holzfraktion müsste unter Berücksichtigung des Abbaus von Holzmehl mindestens um den Faktor 4 größer sein als jene von PPK und Organik.

Die Erkenntnis bei der PPK-Fraktion ist noch aufgrund der im Folgenden beschriebenen Effekte zu relativieren:

- ▶ Im Gegensatz zu den Bedingungen bei einer Deponierung von PPK-Fraktion wurde PPK vor dem Langzeitversuch als Ganzes zerkleinert und mit Organik und Impfschlamm vermischt ange-setzt. Dadurch waren mit Versuchsbeginn Bedingungen für einen vollständigen Abbau gegeben. Nicht berücksichtigt ist hierbei, dass in einer realen Deponie bei einem zu trocken depo-nierten Anteil der PPK-Fraktion nicht die Abbaugeschwindigkeit unter optimalen Abbaubedin-gungen, sondern das Erreichen des für einen Abbau erforderlichen Wassergehaltes der ge-schwindigkeitsbestimmende Schritt sein kann.
- ▶ Die DDOC_m-Konzentration war mit 44 kg/Mg zu Beginn des Langzeitgärversuchs nur mit Orga-nik weniger als halb so hoch wie die DDOC_m-Konzentration von 95 kg/Mg zu Beginn des Lang-zeitgärversuchs mit Organik und PPK. Es ist anzunehmen, dass durch die höhere Konzentration

an DDOC_m die Abbaubedingungen bei dem Langzeitgärversuch mit PPK und Organik besser waren.

Als Ergebnis der Position 2 ist festzuhalten, dass die dort ermittelten Analyseergebnisse durch die Gasprognose für die Deponie, aus der das untersuchte Bohrgut gewonnen worden ist, mit den Ansätzen des Sachverständigengutachtens RUK 2014 bestätigt werden. Die Untersuchungen nach dem Ende der Langzeitgärtests sowie die Art der Durchführung der Langzeitgärtests waren also vom Grundsatz zielführend.

Ergebnisse des Arbeitspaketes B, Position 3

Aus 18 Deponien (AI-QI) sind bis zum August 2017 insgesamt 505 Abfallproben entnommen worden, um deren Beschaffenheit und biologische Aktivität im Hinblick auf das noch vorhandene Gasbildungspotenzial zu quantifizieren. Für die beiden UFOPLAN-Vorhaben wurden 2015 – 2016 zusätzlich Untersuchungen an 79 Abfallproben durchgeführt.

Hinsichtlich des Wasserhaushalts wurden ausgeprägte Zonen der Porenwassersättigung bei mehreren der näher untersuchten Deponiestandorte AI–QI festgestellt. Der Wasserhaushalt bestimmt maßgeblich die biologischen Abbauprozesse und die Deponiegasbildung.

An sortierfähigen Abfallproben mit geringerem Wassergehalt (keine schlammige Konsistenz) wurden Sortieranalysen der Hauptfraktionen durchgeführt. Dabei wurde nach folgenden Fraktionen sortiert:

- ▶ Organische Anteile enthaltende, erdähnliche Hauptfraktion
- ▶ Papier / Pappe / Kartonagen
- ▶ Holz
- ▶ Textilien
- ▶ Verbundstoffe mit Kunststoffen
- ▶ Mineralische Stoffe

Die Ergebnisse zur Abfallbeschaffenheit eines exemplarisch dokumentierten Deponiestandorts (KI) weisen auf Folgendes hin:

- ▶ Den weitaus größten Massenanteil (%FM) mit 71 – 93 Masse-% bildet die erdähnliche Fraktion, die sowohl organische Anteile als auch mineralische Anteile aufweist. Nach allen vorliegenden Untersuchungen ist diese Fraktion für das verbliebene Deponiegaspotenzial und folglich die bestehende Gasbildung maßgeblich.
- ▶ Papier wurde bei keiner der sortierten Abfallproben mehr vorgefunden. Ggf. befinden sich noch faserige Reste der PPK-Fraktion in geringen Anteilen in der erdähnlichen Hauptfraktion.
- ▶ Der Holzanteil war mit 0,4 – 3,2 Masse-% ebenfalls sehr gering.
- ▶ Auch der Anteil an Textilien war mit 0 – 2,7 Masse-% sehr gering.
- ▶ Der Anteil an Verbundstoffen und Kunststoffen lag mit 0 – 19% höher, die Fraktion enthielt augenscheinlich jedoch wenig bioverfügbare Bestandteile.
- ▶ Die getrennt sortierbaren, gröberen mineralischen Anteile lagen bei 2 – 14%.

Aus den Ergebnissen des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses nach van Soest hinsichtlich Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Rohasche ist zu erkennen, dass je höher die biologische Aktivität, desto höher auch der Anteil der Fraktionen Hemicellulose, Cellulose und Lignin.

Beim Vergleich mit Literaturwerten, wonach in Frischabfall etwa 90 % der gesamten organischen Bestandteile den Fraktionen Hemicellulose, Cellulose und Lignin zuzuordnen sind, ergeben sich folgende Ergebnisse:

- ▶ Hemicellulose, welche in Frischabfall mit ca. 13 Masse-% vorliegt, wurde in der Ablagerungsphase auf der Deponie KI auf 0,2 Masse-% reduziert, was einem nahezu vollständigen Abbau von etwa 98 – 99 % entspricht.
- ▶ Bei vergleichbarer Auswertung wird für Cellulose ein Abbau von 90 – 91% und bei Lignin eine Abbau von 32 – 51 % festgestellt
- ▶ In der Summe der drei Fraktionen beträgt der Abbaugrad 82 %.

Ein direkter quantitativer Zusammenhang zwischen den Kohlenstoffanteilen der drei Fraktionen zu dem biologisch verfügbaren Anteil, wie er sich aus den Extrapolationen des Atmungsaktivitätstest AT_4 und des Gärtest GB21 ableitet, ist nicht herzustellen. Es zeichnet sich eher ab, dass aus dem leicht und mittel abbaubaren Anteil dieser Fraktion der Kohlenstoffanteil herrührt, der auch in den Biotests aerob und bedingt anaerob umgesetzt werden kann. Lignin ist dagegen anaerob schwer bis nicht verfügbar und trägt auch unter aeroben Milieu- bzw. Testbedingungen nur wenig zum Sauerstoffverbrauch bei.

Untersuchungen des Sauerstoffverbrauchs (Atmungsaktivität AT) wurden bei Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 20 Tagen = 480 Stunden mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

- ▶ Erwartungsgemäß ist der Sauerstoffverbrauch nach 96 Stunden bzw. 4 Tagen (AT_4 als Standardmesszeitraum) noch nicht abgeschlossen und setzt sich auch nach 480 Stunden = 20 Tagen (AT_{20}) noch weiter fort.
- ▶ Je nach Organikgehalt und biologisch verfügbarem Kohlenstoff bzw. Organikanteil liegen die Atmungsaktivitäten in einer großen Bandbreite nach 4 Tagen von 1 – 7 mgO_2/gTM und nach 20 Tagen von 3 – 28 mgO_2/gTM .
- ▶ Gegenüber frischen Siedlungsabfällen, die zum Zeitpunkt der Ablagerung im Bereich von $AT_4 = 50 mgO_2/gTM$ liegen können, haben sich die Atmungsaktivitäten bereits erheblich reduziert.
- ▶ Extrapolationsrechnungen an den Abfallfeststoffproben aller beprobten Deponien ermöglichen eine Abschätzung des langfristigen Gesamtsauerstoffbedarfs (Zeitraum „unendlich“ bzw. AT_∞) mit folgenden empirischen Faktoren:
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 0 - 5 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 8 * AT_4 [mgO_2/gTM]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 5 - 10 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 6 * AT_4 [mgO_2/gTM]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 10 - 20 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 4 * AT_4 [mgO_2/gTM]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich $> 20 mgO_2/gTM$: $AT_\infty = 3 * AT_4 [mgO_2/gTM]$
- ▶ Aus dem langfristigen Sauerstoffverbrauch kann der bioverfügbare Kohlenstoff analog zum Parameter $DDOC_m$ abgeleitet werden.
- ▶ Hierbei wird wie bisher im Nationalen Inventarbericht im ersten Schritt zur sicheren Seite abgeschätzt, dass der bioverfügbare Kohlenstoff unter ausschließlich anaeroben Milieubedingungen zu Deponiegas umgesetzt wird. Im nächsten Schritt kann berücksichtigt werden, inwieweit im Deponiekörper bereits ein Austausch mit Luftsauerstoff aus der Atmosphäre einen Teilabbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs unter aeroben Milieubedingungen hervorruft. Dazu können die Gaszusammensetzungen im Deponiekörper bzw. Gasabsaugbetrieb herangezogen werden (über die Berücksichtigung des Stickstoffanteils im abgesaugten Deponiegas, über den der Anteil des veratmeten Sauerstoffs im Deponiekörper berechnet werden kann).

Untersuchungen zur Gasbildung (Gasbildungspotenzial GB) wurden bei Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 60 Tagen mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

- ▶ Erwartungsgemäß ist der Gasbildungsprozess nach 21 Tagen (GB_{21}) noch nicht abgeschlossen und setzt sich in Analogie zum Verlauf der Atmungsaktivität auch nach 60 Tagen (GB_{60}) noch weiter fort.

- ▶ Je nach Organikgehalt und biologisch verfügbarem Kohlenstoff bzw. Organikanteil liegen die Gasbildungspotenziale in einer großen Bandbreite nach 20 Tagen bei 1 – 17 m³/MgTM und nach 60 Tagen bei 2 – 32 m³/MgTM.
- ▶ Gegenüber frischen Siedlungsabfällen, deren Gesamtgaspotenzial zum Zeitpunkt der Ablagerung im Bereich von 120 - 180 m³/MgTM liegen kann, haben sich die Gasbildungspotenziale bereits erheblich reduziert.
- ▶ Extrapolationsrechnungen anhand der Verläufe der Gasbildung sind i.d.R. unsicherer als jene auf der Grundlage der Atmungsaktivität. Daher wird zur Abschätzung des bioverfügbaren Kohlenstoffs bei dieser Auswertung i.d.R. die extrapolierte Gesamtsumme des Sauerstoffbedarfs bzw. der über die empirischen Werte und den AT₄ abgeschätzte Gesamtsauerstoffbedarf herangezogen.

Die Auswertung der Deponien CI, FI, II, KI, MI und NI führt zu folgenden Erkenntnissen:

- ▶ Einzelergebnisse insbesondere zum stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest sind teilweise widersprüchlich, so dass der Aussagewert dieser Methodik im Hinblick auf die übergeordnete Fragestellung zur Quantifizierung des Gasbildungspotenzials deutscher Deponien begrenzt ist.
- ▶ Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Biotests gemäß DepV die geeigneteren Verfahren sind, um das Gasbildungspotenzial in Deponien zu quantifizieren.

Ergebnisse des Arbeitspaketes C

Eine Verifizierung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B erfolgte aus methodischen Gründen bereits überwiegend in der Dokumentation des Arbeitspakets A. Die aus den Abfallfeststoffbeprobungen vorliegenden Ergebnisse zum Abbaugrad der biogenen Abfallbestandteile wurden dort mit den rechnerisch ermittelten Werten des nach Arbeitspaket A und B angepassten FOD Modells verglichen.

Die 2006 IPCC Guidelines lassen hinsichtlich der Anwendung länderspezifischer Werte Folgendes zu:

- ▶ Tier 2:
Ersetzen der „default values“ zu den in den Siedlungsabfalldeponien deponierten Abfällen durch länderspezifische Werte guter Qualität, die auf der Basis historischer Daten von 10 Jahren oder mehr ermittelt wurden.
- ▶ Tier 3:
Zusätzlich zu Tier 2:
 - Anwendung länderspezifischer Werte für die Schlüsselparameter DOC (oder L₀), DOC_f und Halbwertszeit bei Nutzung der FOD-Methode
 - oder
 - Anwendung von aus Messungen abgeleiteten länderspezifischen Parametern (bei Nutzung einer länderspezifischen Methode, die gleichwertig oder von höherer Qualität sein muss als die Tier 3-Stufe unter Anwendung der FOD-Methode.)

Ziel des Vorhabens war die Ermittlung des Anteils des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs DDOC_m am Deponiegut und des korrespondierenden Methanbildungspotenzial L₀. Mit dieser Auswertung wird nicht die FOD-Methodik als solche modifiziert, sondern es werden zur Abschätzung der aktuell noch von deutschen Siedlungsabfalldeponien ausgehenden Methanemissionen die Parameter angepasst.

Anhand der Analysenergebnisse von Abfallfeststoffproben wurden Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Deponien und hinsichtlich der Ablagerungsbedingungen und -zeiträume aufberei-

tet. Bei der Auswertung der Deponien AI bis QI abhängig von der jeweiligen Ablagerungsdauer zeigte sich hierbei Folgendes:

- ▶ Die Ergebnisse zeigen eine große Bandbreite zum verbleibende Gasbildungspotenzial bzw. Methanbildungspotenzial L_0 . Das arithmetische Mittel des Restgaspotenzials beträgt $16,6 \text{ m}^3/\text{MgTM}$, was einem Methanbildungspotenzial L_0 von $8,4 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgTM}$ entspricht. Der Median liegt bei $14,0 \text{ m}^3/\text{MgTM}$ (L_0 von $7,0 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgTM}$).
- ▶ Trotz Schwankungen ist die tendenzielle Abnahme der durchschnittlichen Restgaspotenziale in Abhängigkeit der Ablagerungsdauer zu erkennen.
- ▶ Betrachtet man das Restgaspotenzial differenziert nach Gruben- und Haldendeponien, so weisen die 16 hier ausgewerteten Deponiestandorte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Deponieformen auf.
- ▶ Insgesamt ist mit $6 - 25 \text{ m}^3/\text{MgFM}$ ein stark reduziertes Restgaspotenzial im Vergleich zu Frischmüll ($70 - 186 \text{ m}^3/\text{MgFM}$) zu erkennen.
- ▶ Insbesondere die AT_4 -Werte verdeutlichen, dass die abbaubare, organische Substanz in den Deponien bereits zu großen Teilen abgebaut wurde. Mehr als 90 % der Werte liegen unter $10 \text{ mgO}_2/\text{gTM}$ und fast 80 % liegen unterhalb von $5 \text{ mgO}_2/\text{gTM}$.
- ▶ Bei sechs mit Langzeit-Biotests näher betrachteten Deponiestandorten liegt das Methanbildungspotenzial L_0 bei $1 - 17 \text{ kgCH}_4/\text{MgTM}$, bzw. $1 - 24 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{MgTM}$. Die Langzeit-Biotests bestätigen damit weitgehend die Bandbreite der Ergebnisse, die bei den herkömmlichen Biotests gemäß Deponieverordnung erzielt werden.
- ▶ Zum Zeitpunkt der Abfallbeprobung und Untersuchung der Deponiestandorte lagen die mittleren Methankonzentrationen im Gaserfassungsbetrieb bei 25 – 60 Vol.-%, woraus sich für das gefasste Gas ein $\text{MCF}_{\text{langfristig}}$ -Anteil von 0,75 – 0,99 mit abnehmender Tendenz errechnen lässt. Dies entspricht einem aeroben Kohlenstoffumsatz von 1 – 25 %.
- ▶ Wenn von einem Deponiegasbildungspotenzial von $120 - 180 \text{ m}^3/\text{MgTM}$ zum Zeitpunkt der Ablagerung ausgegangen und die Ablagerungsdauer wie die verbliebenen Restgasbildungspotenziale betrachtet werden, so ergibt sich eine durchschnittliche Halbwertszeit über die Ablagerungsphase von 5 – 10 Jahren. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in den ersten Jahren der Ablagerung die leicht abbaubaren Organikbestandteile die Gasbildung dominiert haben, während zum Zeitpunkt der Abfallfeststoffprobenahme die mittel und schwer abbaubaren Organikbestandteile die Restgasbildung prägen. Daher wäre in erster Näherung von einer Halbwertszeit in der ersten Phase der Ablagerung von eher 3 – 7 Jahren auszugehen, während sie zum Zeitpunkt der Abfallfeststoffprobenahme, d.h. 11 bis 36 Jahre nach der Ablagerung, im Bereich von 8 – 12 Jahren mit anwachsender Tendenz angesiedelt werden kann.

Ergebnisse des Arbeitspaketes D

In Arbeitspaket D wurden folgende Leistungen durchgeführt

1. Es erfolgte zunächst eine vergleichende Zusammenfassung der im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens auf folgende Arten gewonnenen Erkenntnisse:
 - Literaturrecherche.
 - Laboruntersuchungen an synthetisch hergestellten Deponiegutproben.
 - Laboruntersuchungen an erbohrtem Abfall aus Altdeponien und
 - Anwendung der Erkenntnisse aus dem Sachverständigengutachten RUK 2014 auf weitere Deponiestandorte.
2. Ableitung der für eine Parameterstudie anzusetzenden Wertebereiche.
3. Anwendung von Wertekombinationen im Rahmen dieser Wertebereiche auf alle letztlich als am geeignetsten herausgefilterten Deponiestandorte (14 Standorte) in einer Parameterstudie.

4. Auf dieser Basis erfolgte die Auswahl jener Wertekombination, welche für die 14 betrachteten unterschiedlichen Deponiestandorte am besten die dort jeweils vorhandene Gasbildung wieder spiegelt. Die an den Deponiestandorten vorhandene Gasbildung wurde hierzu jeweils aus dem zeitlichen Verlauf der letzten Jahre zum gefassten Methanvolumenstrom unter Berücksichtigung der bestehenden standortspezifischen Besonderheiten abgeschätzt.
5. Im Anschluss erfolgte eine Überprüfung anhand der Daten von weiteren 7 Deponiestandorten.
6. Im Ergebnis dieser Arbeitsschritte hat sich Folgendes hinsichtlich der Anpassung der Berechnung der Gasbildung an nationale deutsche Verhältnisse gezeigt:

- Eine Anpassung ist erforderlich.

Die Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien ist sinnvoll, da die bisherigen Modellansätze die tatsächlichen Bedingungen auf deutschen Deponien nicht widerspiegeln, sondern das Methanbildungspotenzial deutlich überschätzen.

- Eine Änderung der angewendeten Berechnungsmethode ist nicht erforderlich.

Die Berechnung der Gasbildung nach der FOD-Methode der IPCC-Guidelines ist zielführend.

- Anzupassen sind für einzelne Parameter die für die Verhältnisse an deutschen Deponien anzusetzenden Werte, wie es die Tabelle Z1 zusammenfassend zeigt.

Zur Berücksichtigung der nationalen deutschen Verhältnisse sind die folgenden Anpassungen gegenüber den im deutschen NIR bisher verwendeten Default Values der IPCC Guidelines erforderlich:

- MCF-Wert für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990 [-]: 0,9 anstatt 1,0 als vereinfachter Pauschalansatz
- Fraktion Paper (Papier und Pappe):
k-Wert $[1/a] = 0,099$ (etwa 7 Jahre Halbwertszeit) anstatt 0,058 (etwa 12 Jahre Halbwertszeit)
- Fraktion Wood and straw (Holz und Stroh):
k-Wert $[1/a] = 0,014$ (etwa 50 Jahre Halbwertszeit) anstatt 0,030 (etwa 23 Jahre Halbwertszeit)
- Fraktion Wood and straw (Holz und Stroh):
DOC_F-Wert [-] = 0,1 anstatt 0,5

Nicht genannte Parameter wurden gegenüber den im deutschen NIR bislang verwendeten Default Values nicht verändert.

Dies betrifft auch den Ansatz für den DOC bei der Organik. Für diesen wird der Ansatz eines Wertes von 0,15 [Gg C / Gg Abfall] vorgeschlagen. Dies ist der Wert, welcher ab dem Jahr 2019 im deutschen NIR ohnehin vorgesehen ist (gegenüber dem bis zum Jahr 2018 angesetzten Wert von 0,18).

Tabelle Z1: Vergleich der bisher im deutschen NIR für die Halbwertszeit, den DOC und den DOC_F angesetzten Werte, Vorschlag zur Anpassung zur genaueren Abschätzung der Methanemissionen von Deponien

Abfall- fraktion	Ansatz im deutschen NIR				Vorschlag modifizierter Ansatz			
	DOC	DOC _F	Halb- werts- zeit	k-Wert	DOC	DOC _F	Halb- werts- zeit	k-Wert
	MgC/MgF M	-	Jahre	1/a	MgC/MgF M	-	Jahre	1/a
Organik (Food waste)	0,18 (ab NIR 2019:	0,5	4	0,173	0,15	0,5	4	0,173

Abfall- fraktion	Ansatz im deutschen NIR				Vorschlag modifizierter Ansatz			
	DOC	DOCf	Halb- werts- zeit	k-Wert	DOC	DOCf	Halb- werts- zeit	k-Wert
	MgC/MgF M	-	Jahre	1/a	MgC/MgF M	-	Jahre	1/a
	0,15)							
Garten- und Parkabfälle (Garden)	0,2	0,5	7	0,099	0,2	0,5	7	0,099
Papier und Pappe (Paper)	0,4	0,5	12	0,058	0,4	0,5	7	0,099
Holz und Stroh (Wood and straw)	0,43	0,5	23	0,030	0,43	0,1	50	0,014
Textilien (Textiles)	0,24	0,5	12	0,058	0,24	0,5	12	0,058
Windeln (Disposable nappies)	0,24	0,5	12	0,058	0,24	0,5	12	0,058
Klärschlamm (Sewage sludge)	0,15	0,5	4	0,173	0,15	0,5	4	0,173
Verbundma- terialien	0,1	0,5	12	0,058	0,1	0,5	12	0,058
MBA-Abfälle	0,023	0,5	12	0,058	0,023	0,5	12	0,058

Erläuterung zu den gewählten Anpassungen:

- ▶ **DOC_f-Wert:**
Der Ansatz im IPCC-Modell, wonach bei allen organikhaltigen Fraktionen einheitlich 50 % des abbaubaren organischen Kohlenstoffs unter Deponiebedingungen abbaubar sind, stellt aus den folgenden Gründen einen für deutsche Deponien unrealistischen Fall dar:
 - Bei leicht abbaubaren Abfällen ist der DOC_f-Wert an sich bereits wesentlich größer als bei schwer abbaubaren Abfällen.
 - Zudem wurden leicht abbaubare Abfälle häufig mit hohem Wassergehalt abgelagert, so dass eine Austrocknung unwahrscheinlich erscheint, während beispielsweise Holz in Sperrmüllablagerungen oft sehr trocken deponiert wurde und die Möglichkeit besteht, dass dieses Holz gar nicht mit Wasser in Kontakt kommt. Daher wurde für Holz der biologisch abbaubare Kohlenstoffanteil DOC_f angepasst.
 - Erkundungsbohrungen und Schürfe auf Deponien haben gezeigt, dass Holz unter anaeroben Bedingungen kaum abgebaut wurde, zumal wenn es sich um grobstückige Holzbestandteile handelt, die für die Mikroorganismen nicht zugänglich sind.
- ▶ **K-Werte bzw. Halbwertszeit:**
Eine Anpassung der Halbwertszeit bei den Fraktionen PPK (Paper) sowie Holz und Stroh (wood and straw) ist aus den folgenden Gründen erforderlich:

- Erfahrungswerte zeigen, dass in Phasen mit noch hohem Abbaupotenzial bei deutschen Deponien von Halbwertszeiten zwischen 4 (zu Beginn dieser Phase) und 7,5 Jahren auszugehen ist (Rettenberger, 2004). Demgegenüber ergibt sich bei Ansatz des IPCC-Modells bei allen Beispieldeponien bereits für das erste Jahr eine Halbwertszeit um oder über 7 Jahre.
- Die Restgaspotenziale, die bei umfangreichen Untersuchungen auf den Deponien bzw. anhand der Abfallfeststoffproben ermittelt wurden, liegen überwiegend deutlich unter denen, die sich für diese Deponiestandorte nach den Berechnungen gemäß den NIR/IPCC-Ansätzen ergeben. Das lässt darauf schließen, dass einige organikhaltige Abfallfraktionen wie das Papier, die nach den bisherigen Berechnungen aktuell und in naher Zukunft maßgeblich zur Deponiegasbildung beitragen, eine eher kürzere Halbwertszeit aufweisen.
- Papier, dem im Nationalen Inventarbericht derzeit noch ein erhebliches Methanbildungspotenzial zugeschrieben wird, wurde bei den Erkundungen auf Deponien kaum noch vorgefunden, da es bereits weitgehend abgebaut wurde. Daher wurde die Halbwertszeit von 12 auf 7 Jahre reduziert.
- Umgekehrt weist die Fraktion Holz (und Stroh) wie erläutert eine geringe biologische Verfügbarkeit unter anaeroben Milieubedingungen auf und ist, wenn überhaupt, nur unter sehr hohen Halbwertszeiten abbaubar. Daher wurde die Halbwertszeit von 23 auf 50 Jahre erhöht.

► **MCF-Wert:**

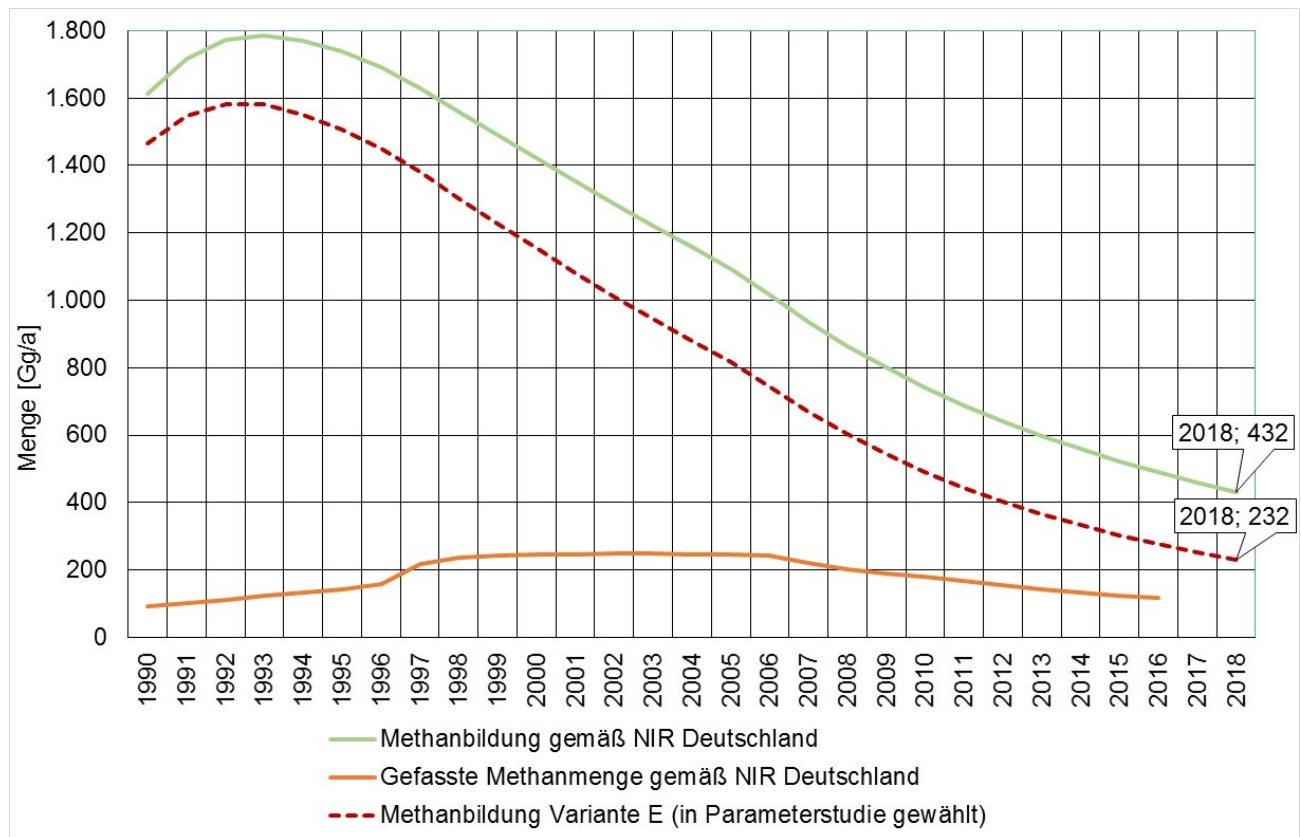
Es ist erforderlich, den aeroben Abbau von bioverfügbarem Kohlenstoff (DDOC_m) auf Deponien stärker zu berücksichtigen. Dazu kann der Methan-Korrektur-Faktor (MCF) erweitert und angepasst werden zu:

- **MCF_{Ablagerungsbeginn}** wie bisher aerober Abbau zu Beginn der Ablagerung. Dieser liegt nach den Berechnungen im UFOPLAN-Projekt für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990 bei 0,8 – 0,95.
- **MCF_{langfristig}** aerober Abbau mit zunehmendem Ablagerungsalter und nachlassender Gasbildung infolge anwachsender Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre. Dieser liegt nach der aktuellen Auswertung für größere Altdeponien in der Stilllegung und Nachsorge bei 0,87 – 0,93. Über die weitere Ablagerungsdauer ist mit einer Abnahme zu rechnen, da die Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre und die aeroben Abbauprozesse in der Regel zunehmen.

Als vereinfachte Anpassung wird vorgeschlagen, den im NIR bisher mit 1 für BRD-Deponien ab 1972 und für alle deutschen Deponien ab 1990 angesetzten Wert auf einen pauschalen Festwert von 0,9 abzusenken. Damit wird der Anteil des aeroben Abbaus an der Reduzierung der Methanbildung vom zeitlichen Verlauf und der Größe immer noch unterschätzt, aber realistischer abgebildet.

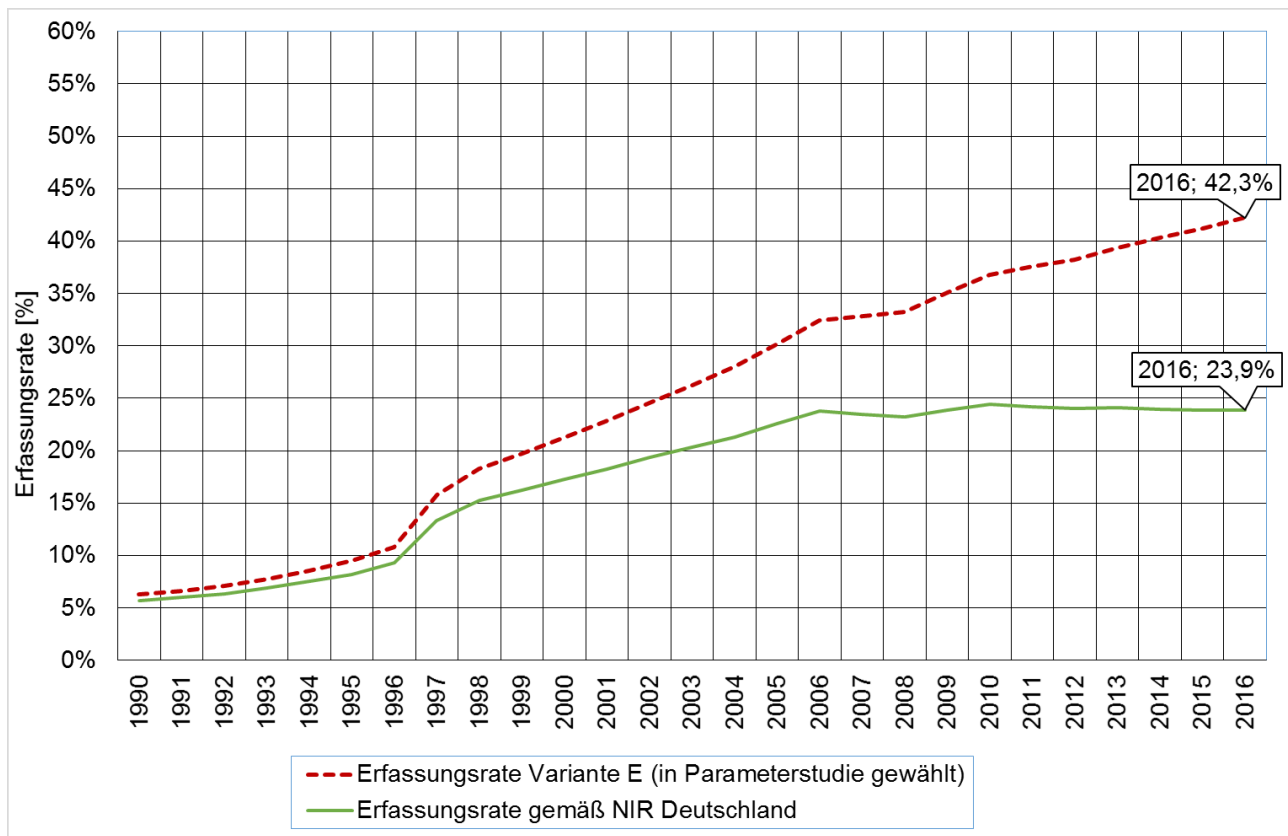
Werden die Werte der ausgewählten Variante E im NIR angewendet, so verringert sich die für das Jahr 2018 errechnete jährliche Methanbildung von zuvor 432 Gg/a auf 232 Gg/a (Abbildung Z1). Entsprechend erhöht sich im Abgleich mit den erfassten Methanvolumenströmen der Gaserfassungsgrad von 23,9% auf 42,3% (Abbildung Z2).

Abbildung Z1: Jährliche Methanbildung aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E ab 1990 im Vergleich zur jährlich gefassten Methanmenge



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung Z2: Entwicklung der Gaserfassungsgrade aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E ab 1990



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Die Berechnungsergebnisse decken sich gut mit den Untersuchungen und Auswertungen zum Gashaushalt und zum Gaserfassungsbetrieb der 38 Deponien, die im Rahmen dieses Vorhabens näher betrachtet wurden.

Neben den entgasten Deponiestandorten gibt es massenmäßig untergeordnet Deponien ohne Entgastung, wobei es sich dabei in der Regel um kleine und alte Ablagerungen geringer Ablagerungsmächtigkeit handelt, bei denen ohnehin nur noch bereichsweise bzw. im beschränkten Umfang Bedingungen für einen anaeroben Abbau gegeben sind.

Zur Überprüfung der Ansätze der gewählten Variante E wurde für alle 20 Deponien, an denen Abfallfeststoffproben aus Bohrgut zur Ermittlung des Gasbildungspotenzials untersucht wurden, das derart ermittelte Gasbildungspotenzial durch das berechnete Gasbildungspotenzial geteilt. Hierdurch ergaben sich im Vergleich zur gewählten Variante rechnerisch Faktoren zwischen etwa 0,45 und 1,3 mit einer Häufung zwischen 0,65 und 1,05 sowie ein Mittelwert von etwa 0,8. Dies ist wie folgt zu bewerten:

- ▶ Wegen der punktuellen Aufnahme der Verhältnisse im Deponiekörper bei den Untersuchungen von erbohrtem Abfall war die gefundene Bandbreite zu erwarten.
- ▶ Ein Mittelwert von 0,8 bedeutet, dass die Gasprognose unter Anwendung der gewählten Variante E die Gasbildung des Deponiegutes im erbohrten Abfall (im Sinne einer Abschätzung zur sicheren Seite) tendenziell eher noch überschätzt.
- ▶ Wegen der punktuellen Aufnahme der Verhältnisse im Deponiekörper sind die Ergebnisse der Untersuchungen von erbohrtem Abfall nur bedingt repräsentativ. Dennoch sind sie ein sinnvolles Verfahren, um die Bedingungen eines Deponiestandorts hinsichtlich des Wasserhaushalts

und der biologischen Abbauprozesse mit dem noch vorhandenen Gasbildungspotenzial konkret zu quantifizieren.

Ergebnisse des Arbeitspaketes E

Nach den IPCC-Guidelines sind zur Beurteilung der Unsicherheiten bei der Abschätzung von Methanemissionen hauptsächlich zwei Bereiche anzusprechen:

- ▶ die Methodik des FOD-Ansatzes
- ▶ die Eingangsdaten (Abfallmassen, Abfallbeschaffenheit und resultierende Emissionsparameter)

Wesentliche Unsicherheiten bei der Anwendung des FOD-Ansatzes auf die 37 Deponien, an denen die Überprüfung vorgenommen wurde, waren:

- ▶ Unsicherheiten bei der Datenerhebung, insbesondere bei den abgelagerten Abfallmengen und der Abfallzusammensetzung, die in der Regel von den Deponiebetreibern nur unzureichend dokumentiert wurden, insbesondere für Altabschnitte.
- ▶ Unsicherheiten bei der fraktionsspezifischen Zusammensetzung. Dies betrifft insbesondere die standortspezifischen Abfälle wie Gewerbeabfall und Sortierreste. Es betrifft aber auch z.B. Hausmüll, der jahreszeitlich, regional und über den Verlauf einer Deponieverfüllung erheblichen Änderungen und Schwankungen unterworfen sein kann. Für Hausmüll wurden daher in den meisten Fällen die Angaben zur Abfallzusammensetzung gemäß dem Nationalen Inventarreport herangezogen.

Weitere Aspekte zur Unsicherheit der FOD-Methodik stellen die mit dem FOD-Ansatz nur vereinfacht wiedergegebenen Abbauvorgänge im Deponiekörper dar:

- ▶ Es können sich z.B. Veränderungen des Wasserhaushalts oder auch Hemmungen durch Inhibitoren auf die Mikroorganismen und die Kinetik der biologischen Abbauprozesse auswirken.
- ▶ Weiterhin sind unterschiedliche Abbaubedingungen über die Deponiehöhe zu erwarten, weil es auflastbedingt zu einer zunehmenden Verdichtung im unteren Deponiebereich kommt.

Die größeren Unsicherheiten gegenüber der Grundmethodik ergeben sich folglich eher über die Auswahl der Eingangsparameter für deutsche Deponien.

In der Summe können die Unsicherheiten bezüglich der Gasbildung bei der gewählten Variante, d.h. nach Anpassung der Werte aufgrund der erfolgten länderspezifischen Auswertungen, wie folgt abgeschätzt werden:

- ▶ Unsicherheiten bezüglich Ablagerungsmassen:
± 10 % für jüngere Deponien, ± 30 % für ältere Deponien und Altablagerungen.
- ▶ Unsicherheiten bezüglich Abfallzusammensetzung:
± 10 % für jüngere Deponien, ± 30 % für ältere Deponien und Altablagerungen.
- ▶ Unsicherheiten bezüglich DOC:
± 20 % bei Default-Werten, ± 10 % nach Anpassung der Werte
- ▶ Unsicherheiten bezüglich Methanbildungspotenzial L_0 :
± 20 % bei Default-Werten, bis -40 % bei organikhaltigen Fraktionen wie z.B. Holz, in Abhängigkeit der Holzart.
Unsicherheiten bezüglich MCF = 1 für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990: - 15 %, + 0 %
Unsicherheiten bezüglich MCF = 0,6 für die BRD bis 1972 und für das gesamte Bundesgebiet bis 1989: ± 25 %
Unsicherheiten bezüglich Anteil Methan im Deponiegas $F = 0,5$: + 30 %, - 0 %

- ▶ Unsicherheiten bezüglich k-Wert:
 - Organik (food waste) sowie Klärschlamm (sewage sludge): + 25 %, - 0 %
 - Papier und Pappe (paper): + 45 %, - 0 %
 - Holz und Stroh (wood and straw): - 45 %, + 0 %
 - Textilien (textiles), Windeln (disposable nappies), Verbundmaterialien: + 40 %, - 0 %

Summary

Background

Since June 1st of 2005, the landfilling of biodegradable waste is no longer permitted in Germany. Nevertheless, methane emissions from landfills will remain a major source of greenhouse gas emissions in the waste sector for the foreseeable future.

The calculation of methane emissions from landfills is done in the National Inventory Report of the German Greenhouse Gas Inventory (NIR) using the First Order Decay Method (FOD method) according to the specifications of the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006 IPCC Guidelines). There is a modeling of the biodegradation over the deposition time. The basis are data and factors that are assigned to the waste at the time of deposition. National approaches in the approved range of the 2006 IPCC Guidelines are used.

From the amount of generated methane, the amount of collected methane must be subtracted. The corresponding data for all landfills are requested from the Federal Statistical Office of Germany. According to the latest inquiry, these results are in an average coverage rate of about 24 %. In international comparison, this is very little. Against this background, the question arose whether the amount of generated methane calculated by the FOD method was realistic. The task of the UFOPLAN project is to verify the calculation approach of landfill gas generation in the following service packages:

- ▶ Work package A: Development of adapted parameters for the calibration of the FOD model to landfill conditions in Germany
- ▶ Work package B: Laboratory tests
- ▶ Work package C: Verification of the results of work packages A and B
- ▶ Work package D: Preparation and justification of proposals for adjusted default values
- ▶ Work package E: Estimation of uncertainties

FOD model and heretofore used input values

The following formulas are relevant in the FOD model for methane generation and methane emissions

- ▶ 1) $Lo = W * DOC * DOC_f * MCF * F * 16/12$
 - Lo = Methane generation potential of the waste deposited [Gg CH₄]
 - W = Mass of waste deposited [Gg Waste]
 - DOC = Part of biodegradable organic carbon at landfilled waste in the year of deposition [Gg C/Gg Waste]. Different percentages of DOC for different waste groups are selected. It applies:
 - DOC_i = Percentage of biodegradable organic carbon in the waste-type i in relation to the moisture mass [Gg C/Gg Waste]
 - WI = Percentage of waste-type i of landfill mass in relation to the moisture mass [-]
 - DOC_f = Percentage of biodegradable organic carbon which is anaerobic decomposed under the conditions prevailing in the landfill [-]. Remaining carbon = carbon that remains in the landfill body for a long time without anaerobic degradation.

- $MCF =$ Methane correction factor [-];
- $1-MCF =$ Percentage of biodegradable organic carbon that is degraded aerobically during the year of disposal
- $F =$ Methane concentration in the generated landfill gas [-] (0.5)
- $16/12 =$ Molecular weight ratio CH_4/C [-]
- $DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$
 $=$ Carbon that is degraded under the conditions dominating in the landfill body [Gg]

2 $CH_4 \text{ generated}_T = DDOC_{m,T-1} * (1-e^{-k}) * F * 16/12$

- $CH_4 \text{ generated}_T =$ Methane quantity formed in year T from carbon decomposed under landfill conditions [Gg Methane]
- $T =$ Year for which the calculation is done
- $DDOC_{m,T-1} =$ In the landfill body existing $DDOC_m$ [Gg] at the end of year T-1
- $k =$ reaction constant [$1/a$] = $\ln(2)/t_{1/2}$
- $t_{1/2} =$ Half-life time [a]

3 $CH_4 \text{ emitted}_T = (CH_4 \text{ generated}_T - R_T) * (1 - OX_T)$

- $CH_4 \text{ emitted}_T =$ Quantity of emitted methane in year T [Gg Methane]
- $R_T =$ Amount of methane collected and burned in year T [Gg Methane]
- $OX_T =$ Percentage of methane oxidized in the landfill surface in year T [-]

Results of a literature review

The comparison with literature values leads to the following findings for the DOC and DOC_f values:

- ▶ In the Organic fraction, the DOC content of 0.15 and 0.18 on average determined in the NIR correspond approximately to the literature values. The same applies if a DOC content of 0.15 for the product of $DOC * DOC_f$ as the factor for the specific gas generation potential is taken.
- ▶ In the Garden and Park Waste fraction, the NIR-related DOC contents are a little smaller than the literature values. But the availability for anaerobic digestion (DOC_f) is, according to literature research smaller than in the NIR set.
- ▶ For the paper and paperboard fraction, according to the literature review, the DOC is more likely to be 0.28 - 0.34 instead of 0.4 determined in the NIR. The gas generation potential of paper depends to a large extent on the paper type and the lignin content. For example, newsprint has a rather low gas generation potential (high lignin content), while e.g. corrugated board shows a significantly higher gas generation potential (low lignin content).
- ▶ For the fraction wood (and straw), the DOC , according to the literature analysis, is rather smaller than the value of 0.43 stated in the NIR. The availability for anaerobic degradation (DOC_f), however, according to literature research, is significantly lower than in the NIR set (significantly smaller than 0.2 instead of 0.5).
- ▶ The DOC content of the textiles fraction is slightly higher than the NIR value of 0.24. The value in the NIR was also determined at higher water contents, which is probably due to the grand water storage capacity. Ultimately, the values will be comparable. Data for anaerobic degradability are not available in the literature. This will depend on the content of synthetic fiber.
- ▶ For the sewage sludge fraction, the DOC content depends on the water content of the deposit. The approaches of the NIR are plausible. According to literature values, fouled municipal sewage sludge, frequently deposited in the past, has a low anaerobic degradability below 0.5.

- ▶ For residual waste from 1998 to 2003, the DOC is 128 to 132 kgC / MgTM according to several studies. These values are still below the average carbon content of the nationwide household waste analysis of 1985.
- ▶ The comparison with literature values leads to the following finding for the specific gas generation potential in m³ / Mg FM when compared with the values calculated using the NIR values:
 - food waste 76 - 168 * (NIR: 168)
 - garden and park waste 74 - 128 ** (NIR: 187)
 - paper and cardboard (PPK) 95 - 201 (NIR: 374)
 - wood and straw 21 - 57 (NIR: 402)
 - textiles + diapers *** NIR: 224
 - sewage sludge 30 (NIR: 47)
 - composite materials **** NIR: 93
 - domestic waste with reference year 1993 70 - 186 (NIR: 231)

*: According to KTBL, 2013: leftovers: 95 / biowaste: 123
 **: Grass clippings have a higher potential for gas generation, but play only a minor role for landfilling
 ***: No uniform values, the gas formation potential is strongly influenced by the water content and the composition of the textiles
 ****: No values found; In addition, even greater inhomogeneity than in textiles is to be assumed
- ▶ Especially for the fraction "paper and cardboard" and "wood and straw", the actual gas generation potential is lower than the calculated one.

In addition to anaerobic processes, the biodegradation processes at landfills are also characterized by aerobic degradation processes as follows:

- ▶ Immediately after the deposition, aerobic degradation processes take place via the open landfill area.
- ▶ With decreasing gas production, thus with increasing age of landfilled material, it comes increasingly to atmospheric air entrances over the landfill surface and / or over edge areas. This effect is usually greater with active gas collecting than without active gas collecting (air intake by vacuum-effect).

So far, only the aerobic degradation at the onset of deposition is considered in the MCF, but both issues as well as the long-term aerobic degradation of the MCF could be mapped:

- ▶ According to the literature review, a value between 0.8 for a slow build-up of the landfill and 0.95 for a quick build-up as MCF for the begin of the deposit (MCF after deposition) can be deduced.
- ▶ For the derivation of the long-time MCF langfristig the following have to be considered:
 - In the landfill average ages in Germany, under anaerobic environmental conditions, landfill gas would consist almost exclusively of the main components methane and carbon dioxide in a ratio of 65 to 35% by volume (1.86).
 - When atmospheric air is introduced, oxygen is converted to carbon dioxide. As a result, the methane to carbon dioxide ratio decreases and nitrogen is present in the landfill gas / air mixture.
 - According to a survey carried out by the Federal Statistical Office of Germany in 2014, the average methane content of all statistically recorded landfills during the operation and decommissioning phase is 47% by volume and at the landfills in follow-up it's 38% by volume. The proportion of aerobic degradation in the total degradation of the bioavailable carbon, calculated for these methane concentrations, is 7.3% and 12.6%, respectively, in the aforementioned framework conditions.

- Consequently, a current value of 0.87 - 0.93 can be deduced for the long-time MCF with decreasing tendency (due to the increasing degree of aerobization).

Results of work package A

For the development of adjusted parameters for the calibration of the FOD model to the conditions at landfill sites in Germany, further landfills were selected following the expert report 2014, which fulfill the requirement to be well encapsulated and to collect the entire landfill gas. In addition to the five landfills from the expert report, several dozen other landfill sites were requested to substantiate the parameter set. Only about one third of the requested landfills were provided with the necessary operational data, waste inventory and degasification data. From these landfills, some locations had to be sorted out, as these turned out to be too unsuitable, too. In addition, a larger number of landfill sites were evaluated in the course of the development of so-called potential analysis within the framework of the National Climate Initiative "Use of suitable technologies to reduce greenhouse gas emissions from decommissioned municipal waste landfills". Thus, it was also possible to sample waste solids samples from the landfill body and to investigate the still existing gas generation potential of the samples. In total, an amount of 38 evaluated landfill sites resulted.

In a first step it was found that the approaches of the expert report RUK 2014 reflect the real gas generation and the results of the gas generation potential from drilled waste samples well. The services in work package A refer to the following services:

- ▶ Review of the approaches of the expert report for the additional landfill sites
- ▶ Further research on the types of waste deposited at all evaluated landfill sites and improvement of the database.

Essential findings of work package A are:

- ▶ For some landfills, coverage above 100 % has been calculated. The gas prognosis from the expert report (RUK 2014) obviously does not deduce the gas prognosis which reflects the real generation of gas yet.
- ▶ On landfills with optimal degassing conditions, result on average about twice as high levels of collection than for landfills without conditions for optimum degassing. Large differences were determined within these two groups, depending on:
 - Landfill size: In smaller landfills without surface coverage according to DepV or equivalent, it is sometimes hardly possible to achieve high levels of collection.
 - State of maintenance of the existing degassing devices (sufficient amount of maintenance / repair). Good collection levels are achieved by landfills, where new gas wells are installed according to demand, e.g. as a replacement for no longer working gas wells and / or demand-based control instruments and conveyors are adapted to the decreasing gas generation.
 - Utilization of landfill gas: The more flexible the technology used can react to varying methane concentrations and volume flows, the better the landfill size is degassed.
- ▶ The influencing factors mentioned above and other site-specific factors have such a significant influence that the attempt to differentiate between the types of landfill mentioned in the task had to be abandoned.
- ▶ A comparison of a gas prognosis using the results from the expert report (RUK 2014) with the results on the remaining anaerobically degradable organic matter in cuttings from landfills, where samples from drill holes have been investigated, shows very small deviations. Gas generation was partially prognosed to be slightly below and, in some cases, slightly above the values determined for the cuttings. The variance in the selective recording of the state of the landfill body through the holes had been expected.

The gas prognosis with the approaches from the expert report leads in all considered examples to a gas generation, which is more similar to those derived from the waste solids investigations than with the approaches from the NIR.

- ▶ A particular degree of uncertainty exists in almost all landfill sites due to the lack of reliable data on the waste composition of the landfill site. This concerns in part the amount of domestic waste compared to commercial waste, sludges, construction site waste, mineral waste, etc. and in almost all cases the composition of individual waste fractions.

Results of work package B, positions 1 and 2:

The following investigations were carried out on a total of 7 waste samples which have been synthetically produced as a mixture of waste products:

- ▶ Gas formation in 200 days (GB200) with a 500 g sample
- ▶ Examination of the composition and quality of waste in the sample mass remaining after the test and for the direct comparison: implementation of the same scope of study on waste composition and quality before the attempt to produce gas after the production of the synthetically produced mix of materials.

The examination of the samples was carried out in two parallel projects, which were to be evaluated together, as this was the only way to achieve a constructive evaluation. Three parallel approaches have been set up with seven samples that were distributed on the two following UFOPLAN-Projects:

- ▶ In the parallel UFOPLAN-Project 3714 34 317 0 "Review of methodological bases for the determination of methane formation in landfills" the following samples were examined:
 - A sample with 100 % organics,
 - a Sample with 68 % organics and 32 % wood and
 - a sample 68 % organics and 32 % paper / cardboard
- ▶ In the UFOPLAN-Project 3715 41 110 0 "Implementation of Cross-Checks for the German emission inventories: Validation of the modeled methane rates by examining waste samples from landfills" the following samples were examined:
 - one sample whose composition corresponds to the average waste composition of 17 previously selected representative landfills,
 - two samples in accordance with the variations in the 17 previously selected representative landfills, the composition of which was converted to higher and, on the other, to lower shares in organic group, and
 - one sample whose composition also corresponds to the average waste composition of 17 previously selected representative landfills, with half of the organic fraction has been replaced by sewage sludge.

As a control, additional samples from the execution of a gripper bore for gas well construction in an old landfill were investigated with the same methods.

In the long-time-fermentation-experiments, findings on the DDOC_m and the half-life of different waste fractions were obtained in the laboratory. In the case of half-lives with the proviso that the results are overlaid by mutually influencing fractions at the 6 of 7 samples of researched material mixtures.

The sorting analyses before and after the long-time-fermentation-experiments were also evaluated, however, it was shown that many things were not clearly analyzable. A more extensive evaluation than done would be speculative. Already at the done evaluation not-clearly provable assumptions

were done. In this respect, it is necessary to refrain from using the results of the sorting analyses for evaluation.

The results showed that the degradation behavior depends strongly on the composition of the landfill good. Even when examining the results of the 4 experiments with the mixed samples, it is also noticeable that the reciprocal influence not only concerns the degradation of slowly degradable waste fractions but also those of the rapidly degradable waste fractions like organics or paper / cardboard.

When evaluating the long-time-fermentation-experiments, the following DDOCm values were (= DOC x DOC_f) determined:

- ▶ Paper / Cardboard fraction: 203 kg/Mg FM
- ▶ Organics fraction: 44 kg/Mg FM
- ▶ Wood fraction: 16 kg/Mg FM

In the case of the long-time-fermentation-experiments, a significantly lower value for DDOCm was determined for all samples than would be computed in the IPCC approaches.

- ▶ The slightest deviations are given by the paper /cardboard group.
- ▶ The largest deviations occur in the wood fraction.
- ▶ With the organics group, the computational approaches of the C_{Org}-degradation also significantly overestimated.

For the assessment of the values, the following should be noted:

- ▶ The organics fraction is a much more inhomogeneous mixture than the PPK fraction and the wood fraction group.
- ▶ In particular, the organics fraction contains waste with very different water content. This is reflected in the DDOCm related to the moisture mass.
- ▶ Due to the inhomogeneity, the test results for the organics fraction are influenced by the subjective selection of the composition of the organics group in their composition for the experiments.
- ▶ For the long-time-fermentation-experiments with the wooden fraction the wood was previously crushed. The wood shavings that were made during the crushing and the wooden flour that was produced during the process were added to the sample. The consideration of the time series of the analysis suggests that approximately 60 % of the gas formation derives from the wooden flour. Taking this into account and also that wood flour does not play a role in the real landfill, the value derived here for the DDOCm in a real landfill must theoretically be reduced to 40 % of the so experimentally determined value.

In the evaluation of half-lives, the relevant knowledge is the behavior of half-lives relative to each other. According to this, the following must be noted:

- ▶ The degradation rate of PPK seems to be the same as that of the organics fraction.
- ▶ The half-life of the wood fraction should be in consideration of the degradation of wood flour increased by factor 4 compared to that of PPK and organics. Realistically, there would also be much higher factors.

The finding of the PPK fraction is still to be relativized because of the effects described below:

- ▶ In contrast to the conditions of a landfilling of PPK fraction, PPK was crushed before the long-term trial and mixed with organics and vaccination mud. As a result, conditions for a complete dismantling were given at the beginning of the experiment. It is not considered that in a real

landfill for the part of the PPK fraction, which is to dry, not the rate of degradation under optimal dismantling conditions, but the attainment of the water content required for degradation can be the speed-determining step.

- ▶ The DDOCm concentration of 44 kg/Mg at the beginning of the long-time-fermentation-experiment only with organics was less than half as high as the DDOCm concentration of 95 kg/Mg at the beginning of the long-time-fermentation-experiment with organics and PPK. It is to be supposed that due to the higher concentration of DDOCm, the degradation conditions in the long-time-fermentation-experiment with PPK and organics were better.

As a result of item 2, it should be noted that the analysis results there are confirmed by the gas prognosis for the landfill from which the examined cuttings were obtained, using the approaches of the expert report RUK 2014. The investigations after the end of the long-time fermentation tests as well as the way of the execution of the time-term fermentation-tests were aimed at the principle.

Results of working package B, position 3

By August 2017 a total of 505 waste samples were taken from 18 landfills (AI – QI) in order to quantify their quality and biological activity in view of their remaining gas formation potential. For the two UFOPLAN-Projects additional tests were carried out on 79 waste samples in 2015 – 2016.

Regarding the water balance, pronounced zones of pore water saturation were found at numerous of the more closely studied landfill sites AI – Qi. The water balance significantly determines the biological degradation processes and the landfill gas formation.

Sorting analyses of the main fractions were carried out on sortable waste samples with a lower water content (no muddy consistency). The following groups were sorted:

- ▶ soil-like main fraction containing organic components
- ▶ paper / cardboard (PPK)
- ▶ wood
- ▶ textiles
- ▶ composites with plastic
- ▶ mineral substances

The results of the composition of an exemplarily documented landfill site (KI) indicate the following:

- ▶ The largest mass percentage (% wet mass (WM)) is the soil-like fraction, which exhibits both organic and mineral components, with 71 – 93 mass-%. According to all available research, this fraction is significant for the remaining landfill gas potential and therefore the existing gas formation.
- ▶ Paper was no longer found in any of the sorted waste samples. Possibly, there are still fibrous remnants of the PPK-Group in small shares in the soil-like main faction.
- ▶ The percentage of wood was also very low with 0.4 – 3.2 mass-%.
- ▶ The percentage of textiles was also very low with 0 – 2.7 mass-%.
- ▶ The percentage of composites and plastics was higher than upper groups with 0 – 19 %, but the group apparently contained few bioavailable components.
- ▶ The separately sortable, coarse mineral components were 2 – 14 %.

From the results of the substance-group-specific digestion according to Van Soest with regard to hemicellulose, cellulose, lignin and crude ash, it can be seen: The higher the biological activity, the higher the percentage of the fractions hemicellulose, cellulose and lignin.

Comparing with literary values, according to that fresh waste about 90 % of the total organic components belong to the fractions hemicellulose, cellulose and lignin, results to the following:

- ▶ Hemicellulose which is in fresh waste with 13 mass-%, is in the phase of deposit at the landfill KI reduced to 0.2 mass-%. This is an almost complete decomposition of about 98 – 99 %.
- ▶ In a comparable evaluation for cellulose a reduction of 90 – 91 % and lignin a reduction of 32 – 51 % is found
- ▶ In the sum of the three groups, the degree of degradation is 82 %.

A direct quantitative link between the carbon components of the three groups to the bioavailable percentage, as reflected in the extrapolations of the respiratory activity test AT_4 and the fermentation test GB_{21} , is not to be established. It is more likely that the easy and medium-degradable part of this fraction is the result of the carbon content, which can also be converted in the biotests aerobically and to a certain extent anaerobically. On the other hand, Lignin is anaerobically only hardly or even not at all available and contributes little to oxygen consumption even under aerobic environment and test conditions.

Investigations of oxygen consumption (respiratory activity AT) were performed with solid waste samples of the landfill KI over a 20-day investigation period with the following results:

- ▶ As expected, the oxygen consumption after 96 hours or 4 days (AT_4 as a standard measurement period) isn't finished and continues to 480 hours = 20 days (AT_{20}) and more.
- ▶ Depending on the organic percentage and bioavailable carbon content, the respiratory activity is after 4 days in a wide range from 1 – 7 mgO_2/gDM and after 20 days from 3 – 28 mgO_2/gDM .
- ▶ Compared to fresh municipal waste, which are at the time of the disposal in an area of $AT_4 = 50 mgO_2/gDM$, respiratory activities have already been considerably reduced.
- ▶ Extrapolation calculations for the waste solid samples of all sampled landfills, allow an estimation of the long-term total oxygen demand (period "infinity" or AT_{∞}) with the following empirical factors:

○ Respiratory activity AT_4 in the range 0-5 mgO_2/gDM	$AT_{\infty} = 8 * AT_4 [mgO_2/gDM]$
○ Respiratory activity AT_4 in the range 5-10 mgO_2/gDM	$AT_{\infty} = 6 * AT_4 [mgO_2/gDM]$
○ Respiratory activity AT_4 in the range 10-20 mgO_2/gDM	$AT_{\infty} = 4 * AT_4 [mgO_2/gDM]$
○ Respiratory activity AT_4 in the range of > 20 mgO_2/gDM	$AT_{\infty} = 3 * AT_4 [mgO_2/gDM]$
- ▶ From the long-term oxygen consumption, the bioavailable carbon can be derived analogous to the parameter $DDOC_m$.
- ▶ As before in the national inventory report, in the first step it is estimated conservatively that the bioavailable carbon is converted to landfill gas under strict anaerobic conditions. In the next step, it can be considered to what extent in the landfill body an exchange with oxygen from the atmosphere causes a reduction of the bioavailable carbon under aerobic conditions. For this purpose, the gas compositions in the landfill body or gas exhaustion operation can be used (about the consideration of the nitrogen content in the extracted landfill gas, over which the proportion of the inhaled oxygen in the Landfill body can be calculated).

Research about formation of landfill gas (gas formation rate, GB) was done with waste solid samples of the landfill KI for an investigation period of 60 days with the following results:

- ▶ As expected, after 21 days (GB_{21}) the process of gas formation has not been completed and still continues, analogous to the respiratory activity, even after 60 days (GB_{60}).
- ▶ Depending on the part of organic and biologically available carbon content, the gas formation potentials are after 20 days in a wide range from 1 – 17 $m^3/MgDM$ and after 60 days from 2 – 32 $m^3/MgDM$.
- ▶ Compared to fresh municipal waste, whose gas potential at the time of disposal can be in the range of 120-180 $m^3/MgDM$, the gas formations have already been considerably reduced.

- ▶ Extrapolation calculations based on the processes of gas formation, are usually more uncertain than those based on respiratory activity. Therefore, for the estimation of the bioavailable carbon in this evaluation, the extrapolated total amount of the oxygen requirement or total oxygen demand estimated from the empirical values and the AT_4 , are used.

The evaluation of the Landfills CI, FI, JI, KI, MI and NI leads to the following findings:

- ▶ Individual results, in particular for substance-group-specific digestion according to Van Soest, are contradictory, so that the significance of this method is limited in terms of the overall question of quantifying the gas formation potential of German landfills.
- ▶ The results suggest that biotests according to DepV are the more appropriate methods for quantifying the gas formation potential in landfills.

Results of the work package C

For methodological reasons, the results of the work packages A and B were already documented predominantly in the documentation of work package A. The results from the waste solids sampling on the degree of degradation of the biogenic waste components were compared with the calculated values of the FOD model adapted according to work packages A and B.

The 2006 IPCC Guidelines allow the following regarding the application of country-specific values:

- ▶ Tier 2:
Replacement of the "default values" to the waste deposited in the municipal landfills by country-specific values of good quality, which were determined on the basis of historical data of 10 years or more.
- ▶ Tier 3:
Additionally to Tier 2:
 - Application of country-specific values for the key parameters DOC (or L_0), DOC_f and half-life when using the FOD methodor
 - Application of country-specific parameters derived from measurements (when using a country-specific method that must be equivalent or of higher quality than the Tier 3 level, using the FOD method.)

The aim of the project was the determination of the percentage of biodegradable carbon $DDOC_m$ of landfill mass and of corresponding methane formation potential L_0 . This evaluation does not modify the FOD methodology, but the parameters to estimate the methane emissions currently still being emitted by German municipal waste landfills are adjusted.

Based on the analysis results of waste solids samples, differences and similarities between the landfills and the deposition conditions and periods were prepared. In the evaluation of landfills AI to QI, depending on the respective deposit duration, the following was found:

- ▶ The results show a large bandwidth to the remaining gas generation potential or methane generation potential L_0 . The arithmetic mean of the max. residual gas potential is $16.6 \text{ m}^3 / \text{MgDM}$, which corresponds to a methane generation potential L_0 of $8.4 \text{ m}^3\text{CH}_4 / \text{MgDM}$. The median is $14.0 \text{ m}^3 / \text{MgDM}$ (L_0 of $7.0 \text{ m}^3 \text{CH}_4 / \text{MgDM}$).
- ▶ Despite fluctuations, the tendency of the average residual gas potentials to decrease as a function of the deposit duration is evident.
- ▶ If the residual gas potential is differentiated according to mine and landfill sites, the 16 landfill sites evaluated here show no significant differences between the landfill forms.

- ▶ Overall, with 6 – 25 m³ / MgWM, a greatly reduced residual gas potential can be recognized in comparison with fresh waste (70 and 186 m³ / MgWM).
- ▶ In particular, the AT₄ values make it clear that the degradable organic substance in the landfills has already been largely degraded. More than 90 % of the values are below 10 mgO₂ / gDM and almost 80 % are below 5 mgO₂ / gDM
- ▶ In six landfill sites, which are considered in more detail with long-term bioassays, the methane generation potential L₀ is 1 - 17 kgCH₄ / MgDM, or 1 - 24 m³CH₄ / MgDM. The long-term biotests thus widely verify the range of the results which are achieved in usual biotests according to DepV.
- ▶ At the time of the waste sampling and investigations of the landfill sites, the average methane concentrations in the gas capture operation were 25-60 % by volume, allowing for a calculated long-term MCF fraction of 0.75-0.99 with decreasing trend. This corresponds to an anaerobic metabolic rate of carbon from 1 – 25 %.
- ▶ Assuming a landfill gas generation potential of 120 – 180 m³ / MgDM at the time of deposition and considering the deposition time as the residual gas evolution potential, an average half-life over the deposition phase of 5-10 years will result. It should be noted, that in the first years of deposition, the easily degradable organic constituents dominated gas generation, while at the time of waste solids sampling, the medium and hardly degradable organic constituents shape the residual gas generation. Therefore, in the first approximation, a half-life in the first phase would be more likely to be aged 3 to 7 years, whereas at the time of waste solids sampling, means 11 to 36 years after the deposit, in the range of 8 - 12 years with rising tendency can be adopted.

Results of the work package D

In the work package D, the following achievements were performed:

1. Comparative summary of the findings of the UFOPLAN project, that were made on the following ways
 - literature review
 - laboratory tests on synthetically produced landfill material samples.
 - laboratory tests on drilled waste from old landfills and
 - application of the findings from the expert report RUK 2014 on further landfill sites.
2. Derivation of the value ranges to be used for a parameter study was carried out.
3. Value combinations within these ranges were applied to all in the parameter study eventually identified as most suitable landfill sites (14 locations).
4. On this basis, the selection of the value combination, which best reflects the respective gas generation existing there for the 14 considered different landfill sites, was made. For this purpose, the generation of gas at the landfill sites was estimated in each case from the time course of the last years to the recorded methane volume flow, considering the site-specific peculiarities given.
5. This was followed by a review on the basis of data of another 7 landfill sites.
6. As a result of these working steps the following has emerged regarding the adaptation of the calculation of gas generation to German national conditions:
 - An adjustment is required.
The review of the methodological basis for the determination of methane generation in landfills is reasonable, since the previous model approaches do not reflect the actual conditions in German landfills but clearly overestimate the methane generation potential.
 - It is not necessary to change the calculation method used.
The calculation of gas generation according to the FOD method of the IPCC Guidelines is expedient.

- For single parameters, the values to be set for the conditions at German landfills must be adapted. Table Z1 contains the adapted values.
In order to take account of the German national conditions, the following adaptations are required compared to the default values of the IPCC Guidelines previously used in the German NIR:
 - MCF value for the FRG from 1972 and for the entire federal territory from 1990 [-]: 0.9 instead of 1.0 as a simplified global approach
 - Fraction Paper (paper and cardboard):
k value [$1/a$] = 0.099 (about 7 years half-life) instead of 0.058 (about 12 years half-life)
 - Wood and straw fraction:
k value [$1/a$] = 0.014 (about 50 years half-life) instead of 0.030 (about 23 years half-life)
 - Wood and straw fraction:
DOC_f value [-] = 0.1 instead of 0.5

Not listed parameters were not changed compared with the default values used in the German NIR.

This also applies to the approach for the DOC for organic matter. For this a value of 0.15 [Gg C / Gg waste] is proposed. This is the value that is planned for 2019 in the German NIR anyway (compared to the value of 0.18 up to the year 2018).

Explanation of the selected adjustments:

- ▶ DOC_f value:
The approach in the IPCC model is that 50 % of the degradable organic carbon is degradable under landfill conditions uniformly in all organic fractions. This approach represents, for the following reasons, an unrealistic case for German landfills:
 - In the case of easily degradable waste, the DOC_f value per se is considerably greater than for waste which is difficult to decompose.
 - In addition, easily degradable wastes are often deposited with high water content, so that dehydration seems unlikely. In contrast wood in bulk waste deposits, for example, was often deposited very dry and there is the possibility that that wood never come into contact with water. Therefore, the biodegradable carbon content DOC_f has been adjusted for wood.
 - Exploratory drillings and pits on landfills have shown that wood has hardly been degraded under anaerobic conditions, especially if they are lumpy wood components that are not accessible to the microorganisms.

Table Z1: Comparison of the values previously used in the German NIR for the half-life, the DOC and the DOC_f, proposal for adaptation for a more accurate estimation of methane emissions from landfills

waste fraction	Approach according to German NIR				Proposal for modified approach			
	DOC	DOC _f	half life	k-value	DOC	DOC _f	half-life	k-value
	MgC/MgF M	-	years	1/a	MgC/MgF M	-	years	1/a
Food waste	0.18 (from NIR 2019: 0.15)	0.5	4	0.173	0.15	0.5	4	0.173
Garden	0.2	0.5	7	0.099	0.2	0.5	7	0.099

waste fraction	Approach according to German NIR				Proposal for modified approach			
	DOC	DOC _f	half life	k-value	DOC	DOC _f	half-life	k-value
	MgC/MgF M	-	years	1/a	MgC/MgF M	-	years	1/a
waste								
Paper and cardboard	0.4	0.5	12	0.058	0.4	0.5	7	0.099
Wood and straw	0.43	0.5	23	0.030	0.43	0.1	50	0.014
Textiles	0.24	0.5	12	0.058	0.24	0.5	12	0.058
Disposable nappies	0.24	0.5	12	0.058	0.24	0.5	12	0.058
Sewage sludge	0.15	0.5	4	0.173	0.15	0.5	4	0.173
Composite material	0.1	0.5	12	0.058	0.1	0.5	12	0.058
MBT waste	0.023	0.5	12	0.058	0.023	0.5	12	0.058

► K values respectively half-life:

An adjustment of the half-life for the fractions paper and cardboard (PPK) and wood and straw is necessary for the following reasons:

- Experience values show that half-lives between 4 (at the beginning of this phase) and 7.5 years can be expected in phases with still high degradation potential at German landfills (Rettenberger, 2004). By contrast, the IPCC model shows for all example landfills a half-life of around 7 years for the first year.
- The residual gas potentials, which were determined in extensive researches of the landfills or waste solids samplings, are predominantly well below those calculated for these landfill sites according to the NIR / IPCC calculations. This suggests that some waste fractions containing organic matter, such as paper, which contribute significantly to the current and near future landfill gas generation according to previous calculations, have a rather shorter half-life.
- Paper, which is still credited with significant methane generation potential in the National Inventory Report, was barely found in landfill exploration because it has already been largely degraded. Therefore, the half-life was reduced from 12 to 7 years.
- Conversely, as explained, the wood (and straw) fraction has low bioavailability under anaerobic environmental conditions. In case of degradability, it has a very high half-life. Therefore, the half-life was increased from 23 to 50 years.

► MCF value:

It is necessary to take greater account of the aerobic degradation of bioavailable carbon (DDOC_m) at landfills. For this purpose, the methane correction factor (MCF) can be extended and adapted to:

- MCF_{after deposition}: as before aerobic degradation at the beginning of the deposit. This is according to the calculations in the UFOPLAN project for FRG from 1972 and for the entire federal territory from 1990 at 0.8 - 0.95.
- MCF_{long-term}: aerobic degradation with increasing age of deposition and decreasing gas generation due to increasing gas exchange processes with the atmosphere.

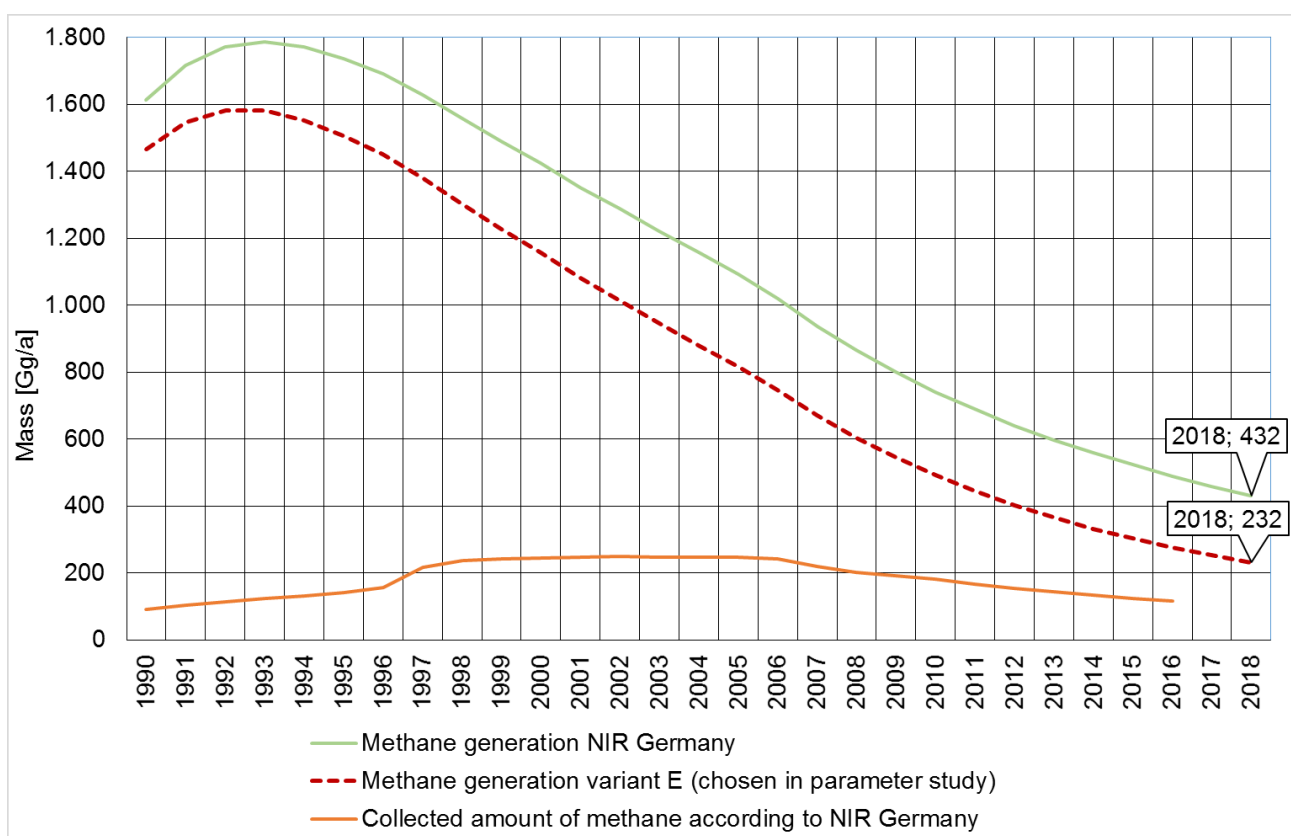
This is according to the current evaluation for larger old landfills in the phase of decommissioning and maintenance at 0.85 - 0.95. Decrease is expected over the further deposition period, as the gas exchange processes with the atmosphere and the aerobic degradation processes usually increase.

As a simplified adaptation, it is proposed to lower the value set in the NIR to 1 for Germany's landfill sites from 1972 and for all German landfills from 1990 to a global-rate fixed value of 0.9. Thus, the proportion of aerobic degradation in the reduction of methane formation is still underestimated, but more realistic, in terms of time and size.

If the values of the selected variant E are applied in the NIR, the annual methane production calculated for 2018 is reduced from 432 Gg / a to 232 Gg / a (Figure Z1). Accordingly, in comparison with the recorded methane volumes, the gas coverage increases from 23.9 % to 43.2 % (Figure Z2).

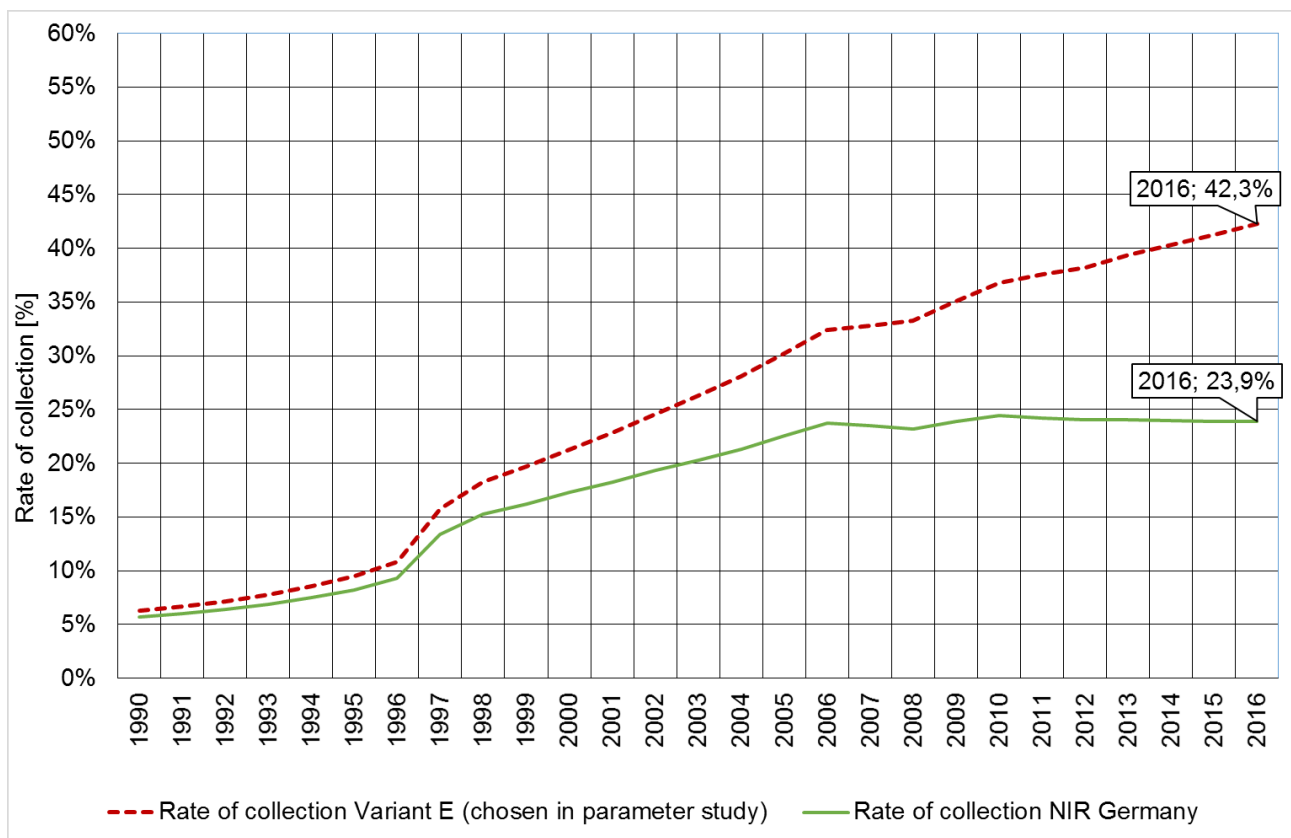
The results of the calculations are in a good agreement with the surveys and evaluations of the gas household and the gas detection operation of the 38 landfills, which were examined in more detail in this project.

Figure Z1: Annual methane generation of all German landfills according to the previous approach of NIR and with modified parameters of variant E from 1990, compared with the annual collected mass of methane



Source: own diagram, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Figure Z2: Evolution of the level of gas collection for all German landfills according to the previous approach of NIR and modified parameters of variant E, from 1990



Source: own diagram, Ingenieurgruppe RUK GmbH

In addition to the degassed landfill sites there are massively subordinated landfills without degassing and with usually small and old deposits with smaller depth of deposit, for which only partially or to a limited extent conditions for anaerobic degradation are given.

To verify the approaches of the selected variant E, for all 20 landfills on which solid waste samples from drilling were used to determine the gas generation potential, the gas generation potential determined in this way was divided by the calculated gas generation potential. This resulted in mathematical factors between about 0.45 and 1.3 with an accumulation between 0.65 and 1.05 and an average value of about 0.8 compared to the selected variant E. This is to be assessed as follows:

- ▶ Due to the selective recording of the conditions in the landfill body while the investigations of drilled waste, the bandwidth found was to be expected.
- ▶ A mean value of 0.8 means that the gas prognosis using the selected variant E tends to overestimate the generation of landfill gas in the drilled waste.
- ▶ Due to the selective recording of the conditions in the landfill body, the results of the investigations of drilled waste are just partially representative. However, it is a suitable investigation method in order to quantify site specific the conditions of a landfill in terms of the water table, the current biological degradation processes and the still existing gas formation potential.

Results of work package E

According to the IPCC Guidelines, two main areas to assess the uncertainties in the estimation of methane emissions are:

- ▶ the methodology of the FOD approach
- ▶ the input data (waste mass, waste quality and resulting emission parameters)

Significant uncertainties in the application of the FOD approach to the 37 landfills where the review was carried out were:

- ▶ Uncertainties in the collection of data, in particular with regard to the amount of waste deposited and the composition of the waste, which were generally insufficiently documented by the landfill operators, in particular for old sections.
- ▶ Uncertainties in the fraction specifically waste composition. This applies in particular to landfill site-specific waste such as commercial waste and sorting waste. It also affects e.g. household waste, which is subject to significant changes and fluctuations seasonally, regionally and over the course of a landfill filling. For household waste, therefore, in most cases the information on waste composition was used in accordance with the National Inventory Report.

Other aspects of the uncertainty of the FOD methodology are the degradation processes in the landfill body which are only reproduced in simplified form with the FOD approach:

- ▶ E.g. changes in the water balance or inhibitions by inhibitors can affect the microorganisms and the kinetics of biodegradation processes.
- ▶ Furthermore, different degradation conditions are to be expected over the landfill height, because of the increased compacting in the lower landfill area due to the surcharge.

The greater uncertainties compared to the basic methodology result therefore from the selection of the input parameters for German landfills.

In sum, the uncertainties regarding the generation of gas compared to the selected variant, means after an adaption of the values because of the country-specific evaluation, can be estimated as follows:

- ▶ Uncertainties regarding deposit masses:
± 10 % for younger landfills, ± 30 % for older landfills and old deposits.
- ▶ Uncertainties regarding waste composition:
± 10 % for younger landfills, ± 30 % for older landfills and old deposits.
- ▶ Uncertainties regarding DOC_r:
± 20 % for default values, ± 10 % after an adaption of the values
- ▶ Uncertainties regarding the methanogenesis potential L₀:
± 20 % for default values, up to -40 % for organics containing fractions, e.g. wood, depending on the type of wood.
- ▶ Uncertainties concerning MCF for the Federal Republic of Germany from 1972 and for the entire federal territory from 1990: - 15 %, + 0 %.
- ▶ Uncertainties concerning MCF for FRG until 1972 and for the whole of Germany until 1989: ± 25 %.
- ▶ Uncertainties regarding the proportion of methane in landfill gas F = 0.5: + 30 %, - 0 %
- ▶ Uncertainties regarding k-value:
 - food waste and sewage sludge: + 25 %, - 0 %
 - paper: + 45 %, - 0 %

- wood and straw: - 45 %, + 0 %
- textiles, disposable nappies, composite materials: + 40 %, - 0 %

1 Veranlassung

Seit dem 1.6.2005 ist die Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle in Deutschland nicht mehr zulässig. Zudem ist die Gasbildung älterer Ablagerungen mit voranschreitendem biologischem Abbau rückläufig. Trotz der dadurch gegebenen erheblichen Minderungen in den letzten Jahren sind Methanemissionen aus Deponien auf absehbare Zeit eine Hauptquellgruppe für Treibhausgasemissionen im Abfallbereich.

Die Deponiegasemission kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss wie folgt modelliert werden:

- ▶ Die Deponiegasbildung wird im Umweltbundesamt mit einem Multi-Phasen-Modell nach der First Order Decay-Methode gemäß den Vorgaben der IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories berechnet. Die Berechnung erfolgt auf Daten und Faktoren, die den Abfällen zum Zeitpunkt der Ablagerung zugeordnet wurden durch Modellierung des biologischen Abbaus über die Ablagerungsdauer. Für die Berechnung werden nationale Daten sowie Default-Faktoren (Standardwerte) des IPCC genutzt.
- ▶ Zur Ermittlung der Deponiegasemissionen ist von der gebildeten Deponiegasmenge die erfasste Deponiegasmenge abzuziehen. Im Jahr 2012 hat das Statistische Bundesamt erstmalig die erfassten Deponiegasmengen für den gesamten Deponiebestand veröffentlicht und für das Jahr 2015 aktualisiert. Nach diesen Daten liegen die durchschnittlichen Erfassungsraten bei etwa 24 %, was im internationalen Vergleich sehr wenig ist. Zuvor wurden in Klimaschutzbetrachtungen und der Emissionsberichterstattung im Rahmen verschiedener internationaler Verpflichtungen die Deponiegaserfassungsraten für Deutschland mit etwa 50 % angesetzt.

Die neuen Werte hatten zur Folge, dass die Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012 (NIR 2013) gegenüber früheren Berichten um über 3 Mio. Mg/Jahr CO₂-Äquivalente nach oben korrigiert werden mussten.

Bei der Berechnung der Deponiegasbildung bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Anteile an biologisch abbaubaren Stoffen im Deponiekörper und der tatsächlichen Abbaurate und Abbaugeschwindigkeit dieser Stoffe unter realen Deponiebedingungen. Plausibilitätsbetrachtungen legen den Schluss nahe, dass die Deponiegasbildung aufgrund dieser Unsicherheiten möglicherweise überschätzt wird und aus diesem Grunde die Methanemissionen aus Deponien zu hoch angesetzt werden.

Aufgabe des UFOPLAN-Projektes ist es, den Berechnungsansatz der Deponiegasbildung zu überprüfen und ggf. durch eine Modifikation der in die Berechnung eingehenden Faktoren an die tatsächlichen Gasmengen anzupassen.

Zur Vorbereitung und als Grundlage für das UFOPLAN-Projekt wurde im Auftrag des Umweltbundesamts durch die Ingenieurgruppe RUK GmbH ein Sachverständigengutachten (RUK, 2014) mit folgenden Aufgabenschwerpunkten erstellt:

- ▶ Prüfung der verfügbaren Daten zur Deponiegasbildung,
- ▶ Identifizierung von vorhandenen Daten- und Wissenslücken,
- ▶ Vorschlag zu einem methodischen Ansatz, wie die Datenlücken in einem Forschungsprojekt geschlossen und aus den verfügbaren Informationen ggf. angepasste Faktoren für die Emissionsberechnung nach den Anforderungen der IPCC Guidelines abgeleitet werden können.

2 Methodik

2.1 Projektstruktur

Übergeordnetes Ziel ist es, den Berechnungsansatz der Deponiegasbildung insbesondere für frühere Hausmülldeponien in Deutschland zu überprüfen und erforderlichenfalls durch eine Modifikation der in die Berechnung eingehenden Faktoren nach den Anforderungen der IPCC-Guidelines an die tatsächlichen Gasmengen anzupassen.

Zur Umsetzung dieser Zielstellung sollen im Forschungsprojekt folgende Leistungen erbracht werden:

- ▶ Arbeitspaket A: Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modelles an die Deponieverhältnisse in Deutschland
- ▶ Arbeitspaket B: Laborversuche
- ▶ Arbeitspaket C: Verifizierung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B
- ▶ Arbeitspaket D: Erarbeitung und Begründung von Vorschlägen für angepasste Default-Werte
- ▶ Arbeitspaket E: Schätzung der Unsicherheiten

Hierzu erfolgen im ersten Schritt und aufbauend auf das Sachverständigengutachten (RUK 2014) weitere Literatursauswertungen und Datenaufbereitungen, um die IFAS und RUK bereits zur Verfügung stehenden Daten und Ergebnisse aus Wissenschaft und Praxis zu aktualisieren und zu erweitern. Weiterhin fließen aktuelle Ergebnisse zu Methan- bzw. Deponiegasemissionen aus Altdeponien ein. Auf dieser Grundlage kann für die ermittelten Parameter die Unsicherheit in Form einer qualifizierten Schätzung dargestellt werden, wie es für die Qualitätsanforderungen des NIR erforderlich ist.

2.2 Leistungen im Arbeitspaket A

Arbeitspaket A dient der Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modells an die Deponieverhältnisse in Deutschland. Analog der Vorgehensweise im vorlaufenden Sachverständigengutachten (RUK 2014) soll mittels Abgleich einer theoretischen Modellierung und von Betriebsdaten für eine größere Anzahl an Deponien die Grundlage für eine Anpassung des FOD-Modells an deutsche Verhältnisse geschaffen werden. Hierbei sollen die Ansätze des Sachverständigengutachtens kritisch geprüft und weiterentwickelt, d. h. verifiziert oder korrigiert, in jedem Fall aber weiter angepasst und optimiert werden.

Es werden alle Parameter des FOD-Modells in die Betrachtung einbezogen. Sofern einzelne Parameter keiner Anpassung bedürfen, wird ausführlich begründet, warum diese ausgeschlossen werden. In gleicher Weise wird dargestellt, aus welchen Gründen, die für die weitere Betrachtung verbleibenden Parameter einer Anpassung bedürfen. Grundlage der Begründung werden jeweils eigene und aus der Literatur bekannte Erfahrungen sein. Die zu Grunde gelegten Erfahrungen werden, wo erforderlich, durch ergänzende zielgerichtete Literaturrecherchen vertieft und ausführlich dargestellt.

2.3 Leistungen im Arbeitspaket B

Folgende Laboruntersuchungen werden durchgeführt:

Position 1: Untersuchungen in der Qualität von GB₂₁-Untersuchungen gemäß Anhang 4 DepV bei einer Abfallprobe, die als Materialmischung aus Abfallprodukten synthetisch hergestellt wird:

- ▶ Untersuchung der Abfallzusammensetzung und -qualität bei der nach Versuchsende verbliebenen Probenmasse
- ▶ Für den direkten Vergleich: Durchführung des gleichen Untersuchungsumfangs zur Abfallzusammensetzung und -qualität vor Ansatz des Versuches zur Gasbildung nach der Herstellung der synthetisch hergestellten Materialmischung.

- ▶ GB₂₀₀ anstatt GB₂₁
- ▶ Aufgrund des begrenzten Volumens bei der GB₂₀₀-Untersuchung ist eine Zerkleinerung auf eine noch festzulegende Maximalkorngröße unerlässlich. Die für die Bestimmung des GB₂₁ vorgegebene Zerkleinerung des gesamten Probenmaterials auf < 10 mm findet jedoch nicht statt.
- ▶ Die untersuchte Probe ist wesentlich größer als die für die Bestimmung des GB₂₁ vorgegebene Probenmenge von 50 g. Es werden entsprechend modifizierte Laborgeräte sowie Impfschlamm- und Wassermengen eingesetzt.

Die Untersuchung der Abfallzusammensetzung und -qualität besteht aus Absiebung(en), Sortieranalysen, Wassergehaltbestimmungen sowie stoffgruppenspezifischen Aufschlüssen nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen.

Insgesamt werden 3 Abfallzusammensetzungen untersucht. Verwendet wird eine synthetische Mischung, wie sie sich als mittlere Mischung für alle Deponien in Deutschland ergäbe, sowie zwei davon abweichende Mischungen, um den Einfluss von Schwankungen in der Abfallzusammensetzung ergründen zu können.

Position 2: Zum Vergleich der Abfalleigenschaften am Ende des GB₂₀₀-Versuches mit jenen von realen Deponien werden Abfallfeststoffproben aus Deponien, von denen die Ausgangsbeschaffenheit möglichst gut bekannt ist, vergleichbaren Untersuchungen zur Ermittlung der Abfallzusammensetzung unterzogen.

Position 3: Es wird eine größere Anzahl an Abfallfeststoffproben aus Deponien unterschiedlichen Ablagerungsalters und unterschiedlicher Deponiemilieubedingungen mit stoffgruppenspezifischen Aufschlüssen nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen untersucht, und es werden zusätzlich GB₂₁-Tests durchgeführt.

2.4 Leistungen im Arbeitspaket C

Die Absicherung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B erfolgt durch einen Vergleich mit Untersuchungen aus realen Abfallbeprobungen aus mindestens 10 Deponien. Hierzu werden Ergebnisse von mehr als 500 Abfallfeststoffproben aus Bohrungen und Aufgrabungen im Deponiekörper von mindestens 20 Deponien auf deren Eignung untersucht.

Aus diesen Maßnahmen vorliegende Ergebnisse (z.B. biogene Kohlenstoffgehalte, organische Kohlenstoffgehalte, Gasbildungspotenzial GB₂₁ oder alternativ Sauerstoffverbrauchswerte AT₄, Wassergehalt, etc.) zum Abbaugrad der biogenen Abfallbestandteile werden mit den rechnerisch ermittelten Werten des nach Arbeitspaket A und B angepassten FOD Modells verglichen. Zu den organischen Anteilen und ihrer biologischen Abbaubarkeit werden insbesondere auch die zusätzlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket B, Position 3 genutzt.

2.5 Leistungen im Arbeitspaket D

Wie bei den Untersuchungen im Sachverständigengutachten (RUK, 2014) wird ein Parametersatz abgeleitet, der für alle betrachteten Deponien in gleicher Weise verwendet werden kann, außer es ergeben sich zu beachtende Unterschiede für spezifische Gegebenheiten der untersuchten Deponien. Ist Letzteres der Fall, wird durch eine gewichtete Mittelung der Verteilung dieser spezifischen Gegebenheiten im deutschen Deponiebestand Rechnung getragen. Grundlage wird dann eine Erhebung des Deponiebestandes. Bei der Erhebung des Deponiebestandes werden sowohl die noch betriebenen als auch die zu unterschiedlichen Zeitpunkten geschlossenen Deponien den relevanten Deponietypen zugeordnet, bei größeren Deponien ggf. getrennt für einzelne Deponieabschnitte. Wie bei den anderen Arbeitspaketen erfolgt eine nachvollziehbare Begründung und Dokumentation der Vorgehensweise und der Ergebnisse.

2.6 Leistungen im Arbeitspaket E

Es werden die Ergebnisse zusammenfassend in Einzelpunkten dargestellt und die Unsicherheiten für jeden einzelnen Schritt beschrieben. Auf Folgendes wird hier insbesondere geachtet:

- ▶ Die Unsicherheiten werden in Form einer qualifizierten Schätzung dargestellt.
- ▶ Die Dokumentation erfolgt in einer Form, auf deren Basis eine Veröffentlichung, beispielsweise auf der für Anpassungen im NIR speziell eingerichteten Veröffentlichungs-Plattform: „Green-house gas measurement and management“, möglich ist.

3 Grundlagen

3.1 Gasprognose gemäß FOD-Methode der IPCC

3.1.1 Prognosemodell

Nach der Gasprognose der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 „Waste“, Chapter 3 „Solid Waste Disposal“ (IPCC 2006a; in folgenden Verweisen als „2006 IPCC Guidelines“ abgekürzt) gilt für das gesamte Methanbildungspotenzial L_0 eines deponierten Abfalls folgende Formel:

$$L_0 = W * DOC * DOC_f * MCF * F * 16/12$$

wobei:

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

mit:

L_0 = Methanbildungspotenzial [Gg CH₄]

W = Masse des deponierten Abfalls [Gg Abfall]

DOC = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall im Jahr der Deponierung [Gg C / Gg Abfall]. Angesetzt werden unterschiedliche DOC-Anteile für verschiedene Abfallfraktionen. Damit gilt:

$$\sum_i (DOC_i * W_i)$$

mit:

DOC_i = Anteil an abbaubarem organischem Kohlenstoff in der Abfallfraktion i bezogen auf die Feuchtmasse [Gg C / Gg Abfall]

W_i = Anteil der Abfallfraktion i am Deponiegut bezogen auf die Feuchtmasse [-]

DOC_f = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen anaerob zersetzt wird [-]. Bei dem restlichen Kohlenstoff handelt es sich um Kohlenstoff, der über lange Zeit im Deponiekörper verbleibt, ohne anaerob abgebaut zu werden.

MCF = Methan-Korrektur-Faktor [-]; $1 - MCF$ = Anteil der abbaubaren organischen Kohlenstoffverbindungen, die im Ablagerungsjahr aerob abgebaut werden

$DDOC_m$ = Masse des deponierten abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen zersetzt wird [Gg]

F = Methankonzentration im gebildeten Deponiegas [-] (0,5 entspricht 50 %)

$16/12$ = Molekulargewichtsverhältnis CH₄/C [-]

Auf dieser Basis erfolgt die Berechnung nach einer Abbaukinetik erster Ordnung (First Order Decay-Model – FOD-Modell).

In den 2006 IPCC Guidelines wird für jedes Jahr die zu Jahresbeginn vorhandene Masse an anaerob abbaubarem Kohlenstoff und daraus die in diesem Jahr anaerob abgebaute Kohlenstoffmenge berechnet. Durch diese Vorgehensweise wird jedes Jahr als Jahr 1 betrachtet und die Berechnung kann mit den folgenden beiden einfachen Gleichungen erfolgen:

a) $DDOC_{m,T} = DDOC_{m,d,T} + (DDOC_{m,T-1} * e^{-k})$

b) $DDOC_{m,decomp,T} = DDOC_{m,T-1} * (1 - e^{-k})$

mit:

$T =$	Jahr, für das die Kalkulation durchgeführt wird
DDOC_{mat}	zum Ende des Jahres T im Deponiekörper vorhandenes DDOCm [Gg]
$\text{DDOC}_{\text{mat}-1}$	zum Ende des Jahres $T-1$ im Deponiekörper vorhandenes DDOCm [Gg]
DDOC_{md}	im Jahr T deponiertes DDOCm [Gg]
$\text{DDOC}_{\text{m decomp}}$	im Jahr T anaerob abgebautes DDOCm [Gg]
$k =$	Abbaukonstante [$1/a$] $= \ln(2) / t_{1/2}$
$t_{1/2} =$	Halbwertszeit [a]

Die Abbaureaktion beginnt bei Verwendung dieser Formel jeweils am 1. Januar des Jahres nach der Ablagerung. Im Fall einer gleichbleibenden Deponierungsmenge im Jahresverlauf entspricht dies einem mittleren Zeitversatz ab dem Zeitpunkt der Deponierung bis zum Beginn des anaeroben Abbaus (Verzögerungszeit / delay time) von 6 Monaten.

Aus dem abgebauten organischen Kohlenstoff ($\text{DDOC}_{\text{m decomp}}$) lässt sich die gebildete Methanmenge berechnen, dargestellt in nachfolgender Gleichung:

$$\text{CH}_4 \text{ generated}_T = \text{DDOC}_{\text{m decomp}} * F * 16/12$$

mit:

$\text{CH}_4 \text{ generated}_T =$	im Jahr T gebildete Methanmenge [Gg Methan]
$F =$	Methankonzentration im gebildeten Deponiegas [-]
$16/12 =$	Molekulargewichtsverhältnis CH_4 / C [-]

In den 2006 IPCC Guidelines sind Anpassungen der Berechnungen mit dem FOD-Modell möglich:

- Anpassung insofern, dass der Start der Berechnung nicht zum 1. Januar des Jahres nach der Ablagerung erfolgt, sondern früher.
- Erhöhung der Genauigkeit des Ergebnisses durch tagesgenaue Berechnung.

Da die Deponiegasbildung an Deponien sehr unterschiedlich einsetzt, ist dies nach Auffassung der Autoren eine Scheingenauigkeit.

Die im betrachteten Jahr emittierte Methanmenge ergibt sich bei Anwendung des FOD-Modells wie folgt:

$$\text{CH}_4 \text{ emitted}_T = (\text{CH}_4 \text{ generated}_T - R_T) * (1 - \text{OX}_T)$$

mit:

$\text{CH}_4 \text{ emitted}_T =$	im Jahr T emittierte Methanmenge [Gg Methan]
$R_T =$	gefasste und in einer Fackel oder in einer Verwertungsanlage verbrannte (recovered – zurückgewonnene) Methanmenge [Gg Methan]
$\text{OX}_T =$	Anteil an Methan, der in der Deponiedeckschicht oxidiert wird [-]

3.1.2 Parameter im FOD-Modell

3.1.2.1 Default values

Folgende Vorgaben sind in den 2006 IPCC Guidelines enthalten:

DOC_f:

Unter der Annahme, dass der abgelagerte organische Kohlenstoff Lignin enthält, wurde in den 2006 IPCC Guidelines als default value für DOC_f ein Wert von 0,5 festgelegt. Bei Verwendung anderer Werte müssen diese gut dokumentiert sein.

Der Wert von DOC_f hängt gemäß den 2006 IPCC Guidelines von vielen Faktoren, wie der Temperatur, der Feuchte, dem pH-Wert, der Zusammensetzung des Abfalls etc. ab, so dass Ausnahmen zugelassen werden.

Es können auch spezifische DOC_f-Werte für einzelne Abfallfraktionen definiert werden, wobei hier eine abschließende wissenschaftliche Bewertung dieser Vorgehensweise zum Zeitpunkt der Erstellung der Guidelines noch nicht möglich war. Auf Literaturstellen mit Angaben zu spezifischen DOC_f-Werten ist in den 2006 IPCC Guidelines verwiesen. Auf diese Literaturstellen wird in Kapitel 4 eingegangen.

Bei den gewählten Ansätzen wird angenommen, dass der mit dem Sickerwasser ausgespülte DOC unter 1 % des gesamten DOC liegt und damit vernachlässigbar ist. Allerdings ist in den 2006 IPCC Guidelines darauf verwiesen, dass für den Anteil des ausgespülten DOC am DOC-Inventar nach der Ablagerung in Japan bei hohen Niederschlagsmengen Werte bis über 10 % ermittelt worden sind¹.

MCF:

MCF ist wie folgt anzusetzen:

- ▶ 1,0 für anaerobe gelenkte Deponien = Deponien mit gesteuerter Ablagerung der Abfälle (d.h. Ablagerung in bestimmten Ablagerungsbereichen), einem gewissen Maß an Kontrolle bezüglich Plünderung und Deponiebränden und mindestens einem der folgenden Bedingungen: (i) Abdeckung, (ii) mechanische Verdichtung (iii) Nivellierung der Abfälle.
- ▶ 0,5 für semi-aerobe gelenkte Deponien mit gesteuerter Ablagerung der Abfälle und folgenden Strukturen zum Lufteintrag in die Abfallsschichten: (i) durchlässiges Abdeckmaterial, (ii) Sickerwasser Entwässerungssystem, (iii) Regulierung des Wassereinstaus und (iv) Entlüftungssystem.
- ▶ 0,8 für nichtgelenkte hohe Deponien mit einer Ablagerungshöhe ≥ 5 m und/oder mit hohem Wasserspiegel.
- ▶ 0,4 für nichtgelenkte flache Deponien mit einer Ablagerungshöhe < 5 m.

Mit dem MCF soll berücksichtigt werden, dass im Ablagerungsjahr oberflächennah ein Teil des in den deponierten Abfällen enthaltenen DOC aerob abgebaut wird, wobei in den 2006 IPCC Guidelines darauf verwiesen wird, dass mit dem MCF nur der Unterschied zwischen den angegebenen Kategorien erfasst werden soll.

¹: Anmerkung der Autoren: Ähnliche oder höhere Werte dürften in Deponien mit seitlichem Wasserzutritt für die durchströmten Bereiche gegeben sein. Da diese Art der Deponiebereiche jedoch die Ausnahme darstellt, kann der ausgespülte DOC tatsächlich vernachlässigt werden.

In den 2006 IPCC Guidelines wird vorgegeben, dass die Deponie in eine von 4 Kategorien einzuteilen ist. Einzige zugelassene Ausnahme ist die Zuteilung eines MCF von 0,6, wenn in dem entsprechenden Land keine Kategorisierung der Deponien möglich ist.

F:

Da gemäß den 2006 IPCC Guidelines in den meisten Deponien ein Gas mit 50 % Methankonzentration gebildet wird, wird ein Wert von 0,5 angesetzt. Bei diesem Ansatz ist bereits berücksichtigt, dass ein Teil des gebildeten CO₂ im Sickerwasser absorbiert und zu Hydrogencarbonat umgewandelt wird.

Halbwertszeiten:

Diese hängen von der Abfallzusammensetzung und den Bedingungen am Deponiestandort ab. Um dem gerecht zu werden, erfolgt die Einteilung in den 2006 IPCC Guidelines entsprechend den beiden folgenden Tabellen. In der Tabelle 1 sind die Halbwertszeiten und in der Tabelle 2 die daraus berechneten Abbaukoeffizienten, k-Werte, angegeben. Folgende Abkürzungen werden in der Tabelle verwendet:

- ▶ MAT = mean annual temperature = mittlere Jahrestemperatur
- ▶ MAP = mean annual precipitation = mittlere Jahresniederschlagsmenge in m
- ▶ PET = potential evapotranspiration = jährliche Verdunstung (potentielle Evapotranspiration) in m

In den 2006 IPCC Guidelines wird diskutiert, ob der Ansatz einer Halbwertszeit für das Abfallgemisch oder der Ansatz separater Halbwertszeiten für die Abfallbestandteile zu realistischeren Ergebnissen führt. Hierbei wäre bei der Kalkulation anzusetzen, dass sich der Abbau der Abfälle gegenseitig beeinflusst, beispielsweise der Abbau von Holzprodukten durch die Anwesenheit von Lebensmittelabfällen beschleunigt wird und umgekehrt Holzprodukte zu einer Verlangsamung des Abbaus der Lebensmittelabfälle führen werden. Letztlich wird festgestellt, dass die Wahrheit in der Mitte zwischen diesen beiden Fällen liegen muss, so dass beide Arten der Berechnung zugelassen sind.

Mit der Einteilung in Klimazonen nach Feuchtigkeit soll der unterschiedliche Wassergehalt des Deponiegutes erfasst werden und mit der Einteilung der Klimazonen nach Temperatur soll der Einfluss der Außentemperatur erfasst werden.

Der Ansatz länderspezifischer Halbwertszeiten ist möglich, sofern diese passender und gut begründet sind.

Tabelle 1: Default values für die Halbwertszeit in den 2006 IPCC Guidelines

Type of Waste		Climate Zone							
		Boreal and Temperate (MAT ≤ 20 °C)				Tropical (MAT > 20 °C)			
		Dry (MAP/PET < 1)		Wet (MAP/PET > 1)		Dry (MAP < 1000 mm)		Moist and Wet (MAP ≥ 1000 mm)	
		De-fault	Range	De-fault	Range	De-fault	Range	Default	Range
slowly degrading waste	Paper / textiles waste	17	14-23	12	10-14	15	12-17	10	8-12
	Wood / straw waste	35	23-69	23	17-35	28	17-35	20	14-23
Moderately degrading waste	Other (non-food) organic putrescible / Garden and park waste	14	12-17	7	6-9	11	9-14	4	3-5
Rapidly degrading waste	Food waste / sewage sludge	12	9-14	4	3-6	8	6-10	2	1-4
Bulk waste ¹ or industrial waste		14	12-17	7	6-9	11	9-14	4	3-5

¹ Gemäß 2006 IPCC Guidelines: bulk waste = MSW (Siedlungs- / Kommunalabfälle)

Tabelle 2: Default values für die k-Werte in den 2006 IPCC Guidelines

Type of Waste		Climate Zone							
		Boreal and Temperate (MAT ≤ 20 °C)				Tropical (MAT > 20 °C)			
		Dry (MAP/PET < 1)		Wet (MAP/PET > 1)		Dry (MAP < 1000 mm)		Moist and Wet (MAP ≥ 1000 mm)	
		De-fault	Range	De-fault	Range	De-fault	Range	Default	Range
slowly degrading waste	Paper / textiles waste	0.04	0.03-0.05	0.06	0.05-0.07	0.045	0.04-0.06	0.07	0.06-0.085
	Wood / straw waste	0.02	0.01-0.03	0.03	0.02-0.04	0.025	0.02-0.04	0.035	0.03-0.05
Moderately degrading waste	Other (non-food) organic putrescible / Garden and park waste	0.05	0.04-0.06	0.1	0.06-0.1	0.065	0.05-0.08	0.17	0.15-0.2

Type of Waste		Climate Zone							
		Boreal and Temperate (MAT ≤ 20 °C)				Tropical (MAT > 20 °C)			
		Dry (MAP/PET < 1)		Wet (MAP/PET > 1)		Dry (MAP < 1000 mm)		Moist and Wet (MAP ≥ 1000 mm)	
		De- fault	Range	De- fault	Range	De- fault	Range	Default	Range
Rapidly de- grading waste	Food waste / sewage sludge	0.06	0.05- 0.08	0.185	0.1- 0.2	0.085	0.07- 0.1	0.4	0.17- 0.70
Bulk waste or industrial waste		0.05	0.04- 0.06	0.09	0.08- 0.1	0.065	0.05- 0.08	0.17	0.15- 0.2

Delay time:

Gemäß den 2006 IPCC Guidelines folgt nach der Ablagerung ein mehrwöchiger aerober Abbau, bis der Sauerstoff verbraucht ist, gefolgt von einer Versäuerungsphase mit der Bildung von Wasserstoff, welche bezüglich der Dauer oft als 7-monatig beschrieben wird. Danach beginnt die Methanbildung. Die Länge der delay time hängt von der Abfallzusammensetzung und den klimatischen Bedingungen am Standort ab. Zeiträume bis 1 Jahr sind in der Literatur angegeben.

Das IPCC-Waste-Modell erlaubt die Änderung des üblichen Ansatzes für die delay time von 6 Monaten auf einen Wert zwischen 0 und 6 Monaten. Sollen davon abweichende Wert verwendet werden, muss dies durch Nachweise belegt sein.

DOC:

Default values für den DOC sind zwar in den 2006 IPCC Guidelines selbst nicht angegeben, jedoch in der dazugehörenden Kalkulationstabelle („IPCC-Waste-Modell“; IPCC 2006b: siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Default values für den DOC im IPCC-Waste-Modell

Type of Waste	DOC (Degradable organic carbon), weight fraction, wet basis)	
	Range	Default
Food waste	0.08-0.20	0.15
Garden	0.18-0.22	0.2
Paper	0.36-0.45	0.4
Wood and straw	0.39-0.46	0.43
Textiles	0.20-0.40	0.24
Disposable nappies	0.18-0.32	0.24
Sewage sludge	0.04-0.05	0.05
Industrial waste	0-0.54	0.15

3.1.2.2 Möglichkeiten zum Ansatz von Werten, die von den „default values“ abweichen

Die in den 2006 IPCC Guidelines angegebenen „default values“ sind jeweils anzuwenden, soweit länderspezifisch keine genaueren Daten vorliegen. „Die Verwendung länderspezifischer Werte wird unterstützt, soweit solche verfügbar sind“. Voraussetzung für die Verwendung länderspezifischer Werte ist:

- ▶ Um ein akzeptabel genaues Ergebnis zu erzielen, erfordert die FOD-Methode Daten, welche für bestehende Deponien über einen Zeitraum von 3 bis 5 Halbwertszeiten gesammelt bzw. abgeschätzt wurden. Good practice ist die Verwendung von Ablagerungsdaten von wenigstens 50 Jahren.
- ▶ Falls kürzere Zeiträume gewählt werden, muss nachgewiesen werden, dass dadurch die Emissionen nicht unterschätzt werden.

Drei Stufen („tiers“) zur Abschätzung der Methanemissionen von Siedlungsabfalldeponien sind möglich:

- ▶ Tier 1:
Hauptsächlich Verwendung von „default values“.
- ▶ Tier 2:
Ersetzen der „default values“ zu den in den Siedlungsabfalldeponien deponierten Abfällen durch länderspezifische Werte guter Qualität, die auf der Basis historischer Daten von 10 Jahren oder mehr ermittelt wurden.
- ▶ Tier 3:
Zusätzlich zu Tier 2:
 - Anwendung länderspezifische Werte für die Schlüsselparameter DOC (oder L_0), DOC_f und Halbwertszeit bei Nutzung der FOD-Methode oder
 - Anwendung von aus Messungen abgeleiteten länderspezifischen Parametern bei Nutzung einer länderspezifischen Methode, die gleichwertig oder von höherer Qualität sein muss als die Tier 3-Stufe unter Anwendung der FOD-Methode.

Die Durchführung direkter Messungen zur Abschätzung der Modellparameter des FOD-Modells ist eine Option für eine good practice-Fortschreibung länderspezifischer Werte. Für die Durchführung der Messungen sind in den 2006 IPCC Guidelines Vorgaben wie folgt formuliert:

Gemessen werden können die Menge des gefassten Gases oder die Menge des diffus emittierenden Gases oder beides. Die Messungen sollten mit statistischen Methoden ausgewertet werden.

Messungen sind an einem repräsentativen Satz von Siedlungsabfalldeponien durchzuführen. Hierfür muss Folgendes erfüllt sein:

- ▶ Menge, Zusammensetzung und Alter der abgelagerten Abfälle muss bekannt sein.
- ▶ Die enthaltenen Abfallfraktionen müssen für Deponien landesweit repräsentativ sein.
- ▶ Der Satz muss eine Auswahl unterschiedlicher Deponiegrößen, Abfallalter und geografischer Regionen beinhalten. Letzteres nur dann, falls klimatische Unterschiede mit betrachtet werden.
- ▶ Die erfasste Gasmenge und -zusammensetzung muss den jahreszeitlichen Verlauf mindestens eines Jahres enthalten.
- ▶ In die Bewertung können der Jahresniederschlag und weitere standortspezifische Faktoren einfließen. Die technischen Bedingungen am Standort, z. B. der Abdeckzustand, der Einfluss auf die Erfassungsrate hat, sind zu erfassen und in die Bewertung einzubeziehen.
- ▶ Der Hauptfehler, nämlich die Fehleinschätzung der Effizienz des Entgasungssystems sollte dadurch ausgeschlossen werden, dass nur Deponien betrachtet werden, von denen bekannt ist, dass dort das Gaserfassungssystem und die Deponieabdeckung effizient und gut erhalten sind.

- ▶ Die Messung von diffusen Emissionen kann in die Bewertung einbezogen werden, wenn die Grenzen der hierfür angewendeten Messmethoden bei der Bewertung berücksichtigt wird. Nähere Angaben zu den Methoden und der Bewertung finden sich in den 2006 IPCC Guidelines.

Unsicherheiten der Methode gemäß 2006 IPCC Guidelines:

Bei der Beschreibung der Unsicherheiten der Methode in den 2006 IPCC Guidelines wird grundsätzlich ausgeführt, dass

- ▶ die FOD-Methode eine simple Methode für die Beschreibung sehr komplexer Vorgänge darstellt und daher Fehler nicht auszuschließen sind und
- ▶ die FOD-Methode insbesondere dann zu einem relevanten Fehler führen kann, wenn es zu signifikanten Änderungen in der Menge und/oder Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle kommt.

Eine Sensitivitätsanalyse mit Variation der k-Werte innerhalb der vorgegebenen Grenzen (ranges) oder die Durchführung einer Monte Carlo Analyse wird empfohlen.

Als Quellen für Unsicherheiten werden in den 2006 IPCC Guidelines beispielsweise angegeben, dass an den Abbauprozessen auch Reaktionen höherer Ordnung beteiligt sein können und dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit abhängig von den spezifischen Bedingungen im Deponiebereich z. B. hinsichtlich der Wasserverteilung unterscheiden kann.

Letztlich wird in den 2006 IPCC Guidelines jedoch festgestellt, dass der Fehler durch die Auswahl der in die Formel eingesetzten Werte größer ist als durch die Methode des Modells selbst.

Unsicherheiten bei den verwendeten Parametern gemäß 2006 IPCC Guidelines:

Die in den 2006 IPCC Guidelines beschriebenen Unsicherheiten werden im Weiteren nur für jene Parameter beschrieben, die für die vorliegende Ausarbeitung relevant sind.

MCF: Der Ansatz für MCF beruht auf nur einer Studie und nicht auf gemessenen Daten.

DOC: Der DOC-Gehalt kann innerhalb einer Abfallfraktion große Schwankungen aufweisen und ist vom Wassergehalt bei der Ablagerung abhängig. Der DOC-Gehalt von „industrial waste“ ist kaum untersucht.

DOC_r: Hier gibt es sehr hohe Unsicherheiten, da der Ansatz zum einen auf wenigen Studien beruht und zum anderen die im Deponiekörper herrschenden Bedingungen bei experimentellen Studien schwer nachzubilden sind.

Halbwertszeit: Hier gibt es hohe Unsicherheiten, da es schwierig ist, die Abbauraten unter Bedingungen wie in einem Deponiekörper zu messen. Zudem gibt es viele Einflussfaktoren auf die Halbwertszeit, wie die Abfallzusammensetzung sowie die klimatischen und technischen Rahmenbedingungen am Standort, so dass eine Vereinheitlichung für das gesamte Land schwierig ist.

3.1.3 Ansätze NIR

Entsprechend den zum Zeitpunkt der Erstellung gültigen Vorgaben wird im deutschen NIR des Jahres 2017 (Umweltbundesamt 2017; S. 657 ff.), welcher die Emissionen bis zum Jahr 2015 beschreibt, als Berechnungsformel noch jene aus den IPCC-Guidelines des Jahres 2000, chapter 5 „Waste“ (IPCC 2000) verwendet. Es wurde ein Multi-Phasen-Modell verwendet, das für die einzelnen Abfallfraktionen mit verschiedenen Halbwertszeiten rechnet und anschließend summiert.

Die Verwendung der Berechnungsformel aus den 2000 IPCC Guidelines führt zum gleichen Ergebnis wie bei der Verwendung der Berechnungsformel aus den 2006 IPCC Guidelines. Zudem werden für

die Berechnung die identischen Parameter verwendet mit der Ausnahme, dass die Abkürzung L_0 in den 2000 IPCC Guidelines anders verwendet wird: $L_0(2000) = L_0(2006)/W$.

Folgende Werte wurden für die Berechnungen im deutschen NIR des Jahres 2017 verwendet:

- F Methankonzentration im gebildeten Deponiegas
 = 0,5 (entspricht IPCC-default)
- DOC_f Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen anaerob zersetzt wird
 = 0,5 (entspricht IPCC-default)
- MCF = Methan-Korrektur-Faktor
 = 0,6 für das Gebiet der ehemaligen DDR und für die BRD vor 1972
 = 1,0 für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990

Abfallzusammensetzung für die jeweiligen Ablagerungsjahre:

Die Ansätze beruhen auf einer umfassenden Literaturrecherche.

DOC Siehe Tabelle 4

k Siehe Tabelle 5

Tabelle 4: Im deutschen NIR für den DOC angesetzte Werte einschließlich Begründung im NIR für die gewählten Ansätze im Vergleich zu dem gemäß IPCC-Waste-Modell zugelassenen Wertebereich

Abfallfraktion	Begründung für den Ansatz im deutschen NIR	DOC-Gewichtsanteil bezogen auf die Feuchtmasse		
		Ansatz im deutschen NIR	IPCC-Waste-Model Default	IPCC-Waste-Model Range
Organik (Food waste)	Verschiedene nationale Studien weisen höhere DOC-Gehalte als der IPCC-Default aus	0.18	0.15	0.08-0.20
Garten- und Parkabfälle (Garden)	Nationaler Wert	0.2	0.2	0.18-0.22
Papier und Pappe (Paper)	IPCC-Default	0.4	0.4	0.36-0.45
Holz und Stroh (Wood and straw)	Nationaler Wert liegt etwas höher als IPCC-Default	0.43	0.43	0.39-0.46
Textilien (Textiles)	Nationaler Wert	0.24	0.24	0.20-0.40
Windeln (Disposable nappies)	Nationaler Wert	0.24	0.24	0.18-0.32
Klärschlamm (Sewage sludge)	IPCC-Default (50 % bezogen auf die Trockenmasse)	0.15	0.05	0.04-0.05
Verbundmaterialien	Nationaler Wert	0.1	-	-
MBA-Abfälle	Nationaler Wert	0.023	-	-

Tabelle 5: Im deutschen NIR für den k-Wert und die Halbwertszeit angesetzte Werte im Vergleich zu dem in den 2006 IPCC Guidelines zugelassenen Wertebereich

Abfallfraktion	Ansatz im deutschen NIR		2006 IPCC Guidelines: MAT ≤ 20 °C / MAP/PET > 1			
	Halbwertszeit (Jahre)	k-Wert	Halbwertszeit (Jahre)		k-Wert	
			Default	Range	Default	Range
Organik (Food waste)	4	0.173	4	3-6	0.185	0.1-0.2
Garten- und Parkabfälle (Garden)	7	0.099	7	6-9	0.1	0.06-0.1
Papier und Pappe (Paper)	12	0.058	12	10-14	0.06	0.05-0.07
Holz und Stroh (Wood and straw)	23	0.03	23	17-35	0.03	0.02-0.04
Textilien (Textiles)	12	0.058	12	10-14	0.06	0.05-0.07
Windeln (Disposable nappies)	12	0.058				

Abfallfraktion	Ansatz im deutschen NIR		2006 IPCC Guidelines: MAT ≤ 20 °C / MAP/PET > 1			
	Halb- wertszeit (Jahre)	k-Wert	Halbwertszeit (Jahre)		k-Wert	
			Default	Range	Default	Range
Klärschlamm (Sewage sludge)	4	0.173	4	3-6	0.185	0.1-0.2
Verbundmaterialien	12	0.058				
MBA-Abfälle	12	0.058				

3.2 Sachverständigengutachten RUK 2014

3.2.1 Kurzbeschreibung der Vorgehensweise

Im Sachverständigengutachten erfolgte eine Gasprognose mit dem FOD-Modell der 2006 IPCC Guidelines bei fünf Beispieldeponien AR – ER unter Ansatz standortspezifischer Daten z. B. zur Abfallmenge und -zusammensetzung. In einem ersten Ansatz wurden ansonsten die Standardwerte aus dem deutschen NIR 2014 verwendet. In weiteren Ansätzen wurden für einzelne Parameter von den Standardwerten abweichende Werte begründet angesetzt. Für die auf dieser Basis am besten geeigneten Parameter wurden für alle Beispieldeponien die gleichen Werte so ausgewählt, dass der jeweils prognostizierte Zeitverlauf den Zeitverlauf der Mengenänderung bei dem tatsächlich gefassten Deponiegas (abgeleitet aus den Betriebsergebnissen) am genauesten widerspiegelt (RUK, 2014).

3.2.2 Kurzdarstellung des ausgewählten Parametersatzes

In Tabelle 6 sind die im Sachverständigengutachten angesetzten Werte für die Halbwertszeit sowie für den DOC_f dargestellt. Im Vergleich dazu sind die bisher verwendeten Werte im deutschen NIR aufgelistet.

Tabelle 6: Vergleich der im deutschen NIR und im Sachverständigengutachten für die Halbwertszeit und den DOC_f angesetzten Werte (RUK, 2014)

Abfallfraktion	Ansatz im deutschen NIR		Ansatz im Sachverständigengutachten RUK 2014	
	Halbwertszeit (Jahre)	DOC_f	Halbwertszeit (Jahre)	DOC_f
Organik (Food waste)	4	0,5	3	0,8
Garten- und Parkabfälle (Garden)	7	0,5	4	0,4
Papier und Pappe (Paper)	12	0,5	7	0,4
Holz und Stroh (Wood and straw)	23	0,5	50	0,1
Textilien (Textiles)	12	0,5	7	0,4
Windeln (Disposable nappies)	12	0,5	7	0,4
Klärschlamm (Sewage sludge)	4	0,5	3	0,8
Verbundmaterialien	12	0,5	7	0,4
MBA-Abfälle	12	0,5	12	0,5

Begründung der Anpassung:

- DOC_f -Wert: Der Ansatz im IPCC-Modell, wonach einheitlich 50 % des abbaubaren organischen Abfalls unter Deponiebedingungen abbaubar sind, stellt einen unrealistischen Fall dar. Bei

leicht abbaubaren Abfällen ist der Anteil an sich bereits wesentlich größer als bei schwer abbaubaren Abfällen. Zudem wurden leicht abbaubare Abfälle häufig mit hohem Wassergehalt abgelagert, so dass eine Austrocknung unwahrscheinlich erscheint, während beispielsweise Holz in Sperrmüllablagerungen oft sehr trocken deponiert wird und die Gefahr besteht, dass dieses Holz gar nicht mit Wasser in Kontakt kommt. Daher wurde der biologisch abbaubare Kohlenstoff DOC_f wie auch bei der Fraktion Papier und Pappe angepasst.

- Halbwertszeit: Erfahrungswerte zeigen, dass in Phasen mit noch hohem Abbaupotenzial bei deutschen Deponien von Halbwertszeiten zwischen 4 (zu Beginn dieser Phase) und 7,5 Jahren auszugehen ist (Rettenberger 2004; S. 59). Demgegenüber ergibt sich bei Ansatz des IPCC-Modells bei allen Beispieldeponien bereits für das erste Jahr eine Halbwertszeit um oder über 7 Jahre.

Die Ergebnisse des Sachverständigengutachtens wurden weiter an die Berechnungen des Nationalen Inventarberichts angepasst. Die Anpassungen und die notwendigen Begründungen werden in Kapitel 5.2 ff. erläutert.

4 Literatúrauswertungen und Datenaufbereitungen, Grundlagen und Erkenntnisse zu den Arbeitspaketen A, C und D

4.1 Stand des Wissens und Literatúrauswertung zur Absicherung und Anpassung der Werte zur Methanentstehung auf Siedlungsabfalldenponien in Deutschland

Im Kapitel 3 wurde erläutert, welche Werte im deutschen NIR zur Ermittlung der Methanentstehung bisher angesetzt werden. Im Folgenden werden Untersuchungsergebnisse, Ergebnisse von Deponieüberwachungsmaßnahmen und Literaturangaben herangezogen, um diese Werte zu evaluieren und Vorschläge für eine eventuelle Anpassung zu erarbeiten. Dazu wird an die Ergebnisse der Ingenieurgruppe RUK GmbH im Gutachten vom Januar 2014 und die Ausführungen in Kapitel 3 angeknüpft (Tabellen 4 - 6). Im Sachverständigengutachten wurden im ersten Schritt die Halbwertszeiten und DOC_f -Werte an die deutschen Deponiebedingungen angepasst.

Für die Parameter DOC_f und MCF ist im deutschen NIR bisher ein für alle Abfallfraktionen jeweils gleich geltender Wert vorgegeben. Für DOC_f ist dies ein Wert von 0,5. Für MCF ist in Deutschland für BRD-Deponien ab 1972 ein Wert von 1 angesetzt, für alle deutschen Deponien ab 1990 ebenfalls der Wert von 1.

Im Folgenden werden Ergebnisse zur Evaluierung der Parameter DOC, DOC_f , der daraus resultierenden Gasbildungspotenziale und des MCF für ausgewählte Abfallfraktionen und Abfallgemische vorgestellt.

4.1.1 Auswertungen zu den Parametern DOC und DOC_f

Der DOC wird im Folgenden in Verbindung mit dem DOC_f -Wert und dem theoretisch resultierenden Methanbildungspotenzial näher betrachtet und mit Referenzwerten aus der Fachliteratur und wissenschaftlichen Untersuchungsergebnissen verglichen.

Die Übersicht in der Tabelle 7 weist auf Folgendes hin:

- ▶ Gegenüber zahlreichen Angaben aus der Fachliteratur sind die im NIR-Bericht eingesetzten Werte relativ hoch.
- ▶ Bei der Fraktion Organik sind die DOC-Gehalte tendenziell vergleichbar, während die biologische Verfügbarkeit (DOC_f) bei zahlreichen Untersuchungen zur anaeroben Abbaubarkeit deutlich geringer ermittelt wurde.
- ▶ Rasenschnitt führt zwar zu vergleichbaren Ergebnissen, er spielt im Rahmen der Deponierung jedoch nur eine untergeordnete Rolle (Eigenkompostierung, getrennte Erfassung von Grünabfällen).
- ▶ Laub (und holzartiger Strauchschnitt) weist nur eine geringe biologische Verfügbarkeit bzw. anaerobe Abbaubarkeit (DOC_f) auf, die eher im Bereich von 25% des NIR-Werts liegt.
- ▶ Für den DOC der Fraktion Papier und Pappe wird in der Fachliteratur unter Berücksichtigung des Wassergehalts eher ein Wertebereich von 0,28 – 0,34 statt des NIR-Werts von 0,4 genannt. Das Gasbildungspotenzial von Papier hängt in hohem Maße von der Papierart und dem Ligningehalt ab. So weist Zeitungspapier ein eher geringes Gasbildungspotenzial auf (hoher Ligningehalt), während z.B. Wellpappe ein deutlich höheres Gasbildungspotenzial zeigt (geringer Ligningehalt).
- ▶ Die Fraktion Holz und Stroh weist zwar relativ hohe Kohlenstoffgehalte auf, die anaerobe Abbaubarkeit selbst von Holzspänen, d.h. Holz in bereits zerkleinerter, gut aufgeschlossener Struktur, ist allerdings sehr gering. Beim Stroh ist die biologische Verfügbarkeit zwar höher als

beim Holz, es spielt mengenmäßig bei der Deponierung jedoch nur eine untergeordnete, nahezu vernachlässigbare Rolle.

- ▶ Bei der Fraktion Textilien liegen die DOC-Gehalte aus der Literatur etwas höher, allerdings bezogen auf Wassergehalte von 15 – 25%. In der bundesweiten Hausmüllanalyse von 1985 wurden für diese Fraktion Wassergehalte bis 79% ermittelt, was vermutlich auf die hohe Wasserspeicherkapazität zurückzuführen ist. Angaben zur anaeroben Abbaubarkeit sind für diese Einzelfraktion nicht verfügbar. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sie deutlich unter 50% ($\text{DOC}_f = 0,5$) liegt, da ein nennenswerter Kohlenstoffanteil aus Kunststofffasern gebildet wird.
- ▶ Die in der Vergangenheit häufig abgelagerten ausgefaulten kommunalen Klärschlämme weisen ebenfalls eine sehr geringe anaerobe Abbaubarkeit auf, die sich eher im Bereich von 10 – 15% bezogen auf den NIR-Wert von 0,5 bewegt.
- ▶ Die mittleren DOC-Gehalte von drei Resthausmüllsortierungen in Bayern und Österreich aus dem Zeitraum 1998 - 2003 liegen in einem relativ engen Bereich von 128 bis 132 kgC/MgTM. Sie liegen damit noch unter dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt der bundesweiten Hausmüllanalyse von 1985 (BHMA 1985, Barghoorn et al., 1986). Sowohl in Österreich wie auch in Deutschland wurde seit den 60er Jahren bis zur Einstellung der Deponierung unvorbehandelter Siedlungsabfälle eine tendenzielle Abnahme des Kohlenstoffgehalts im Resthausmüll, abgeleitet aus den unterschiedlichen aufgeführten Organikfraktionen, jedoch ohne Kunststoff, ermittelt.

Tabelle 7: Im deutschen NIR angesetzte Default-Werte, Referenzergebnisse Fachliteratur und Untersuchungen

Abfallfraktion	Ansatz NIR DOC (Mg C/MgFM)	Ansatz NIR DOC _f	Referenzergebnisse Fachliteratur, Untersuchungen etc.		
			DOC (Mg C/MgFM)	DOC _f	Bemerkungen, Quelle
Organik (Food waste)	0,18 (ab NIR 2019: 0,15)	0,5	0,09		Biogene Abfälle, Wassergehalt 50%, Baumeler et al., 1998
			0,141	0,571	Speisereste DOC 0,471 bezogen auf TM, bei ca. 70% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,141, Ramke, 2010
			0,167	0,255	Bioabfall, DOC 0,334 bezogen auf TM, bei 50% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,167, DOC _f geringer, Ramke, 2010
			0,172		Organik, Wassergehalt 60%, BLfU, 2003
			0,229		Organik Küche, Wassergehalt 50%, Nelles et al., 1998

Abfallfraktion	Ansatz NIR DOC (Mg C/MgFM)	Ansatz NIR DOC _f	Referenzergebnisse Fachliteratur, Untersuchungen etc.		
			DOC (Mg C/MgFM)	DOC _f	Bemerkungen, Quelle
Garten- und Parkabfälle (Garden)	0,20	0,5	0,218	0,43	Rasenschnitt, DOC 0,436 bezogen auf TM, bei 50% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,218, DOC _f mit NIR-Ansatz in etwa passend, Ramke, 2010
			0,230	0,123	Laub, DOC 0,460 bezogen auf TM, bei 50% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,230, DOC _f sehr gering, Ramke, 2010
Papier und Pappe (Paper)	0,40	0,5	0,159 – 0,222	0,277 – 0,815	Magazinpapier 0,212 – 0,296 bezogen auf TM, bei 25% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,159 – 0,222, Wang et al., 2015
			0,239 – 0,241	0,926 – 0,957	Wellpappe 0,319 – 0,321 bezogen auf TM, bei 25% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,239 – 0,241, hoher DOC _f bei geringem Ligningehalt Wang et al., 2015
			0,283		Druckerzeugnisse, Wassergehalt 25%, Nelles et al., 1998
			0,297		Pappe, Packpapier, Wassergehalt 25%, Nelles et al., 1998
			0,296		PPK, Wassergehalt 20%, BLfU, 2003
			0,30		0,4 bezogen auf TM, bei 25% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,3, Ramke, 2008
			0,312 – 0,314	0,249 – 0,262	Zeitungspapier 0,416 – 0,419 bezogen auf TM, bei 25% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,312 – 0,314, geringer DOC _f bei hohem Ligningehalt, Wang et al., 2015
			0,343		PPK, Wassergehalt 22%, Baumeler et al., 1998
Holz und Stroh (Wood and straw)	0,43	0,5	0,327	0,268	Stroh, abgeleitet aus 467 kgC/MgTM und Wassergehalt von 30%, DOC _f gering, Ramke, 2010
			0,33	0,268	Stroh, abgeleitet aus 467 kgC/MgTM und Wassergehalt von 30%, DOC _f gering, Ramke, 2010
			0,326	0,171	Hartholz, abgeleitet aus 434 -

Abfallfraktion	Ansatz NIR DOC (Mg C/MgFM)	Ansatz NIR DOC _f	Referenzergebnisse Fachliteratur, Untersuchungen etc.		
			DOC (Mg C/MgFM)	DOC _f	Bemerkungen, Quelle
			– 0,340	– 0,285	453 kgC/MgTM und Wassergehalt von 25% bei der Deponierung, Wang et al., 2016
			0,351	0,139	Durchschnittswert über alle Holzarten, abgeleitet aus 468 kgC/MgTM und Wassergehalt von 25% bei der Deponierung, Eleazer et al., 1997
			0,349 – 0,383	0 – 0,095	Weichholz, abgeleitet aus 465 - 510 kgC/MgTM und Wassergehalt von 25% bei der Deponierung, Wang et al., 2016
			0,38	0,014	Holzspäne, abgeleitet aus 508 kgC/MgTM und Wassergehalt von 25%, DOC _f sehr gering, Ramke, 2010
			0,426		Wassergehalt 16%, schwer abbaubar, Baumeler et al., 1998
Textilien (Textiles)	0,24	0,5	0,275		Wassergehalt 15%, Nelles et al., 1998
			0,275		Wassergehalt 15%, BLfU, 2003
			0,413		Wassergehalt 25%, Baumeler et al., 1998
Windeln (Disposable nappies)	0,24	0,5	0,167		Hygieneprodukte, Wassergehalt 60%, BLfU, 2003
			0,195		Windeln, Hygieneartikel, Wassergehalt 50%, Nelles et al., 1998
Klärschlamm (Sewage sludge)	0,15	0,5	0,095	0,057	0,272 bezogen auf TM, bei 65% Wassergehalt bei der Deponierung ergibt sich 0,095, DOC _f lediglich 0,057, Ramke, 2010
Verbundmaterialien	0,10	0,5	0,22		Wassergehalt 20%, Nelles et al., 1998
			0,229		Wassergehalt 20%, BLfU, 2003
MBA-Abfälle	0,023	0,5			
Hausmüll / Restmüll			0,128		Restmüll mit Fein- und Restfraktion, Wassergehalt 25%, Nelles et al., 1998
			0,130		Resthausmüll Bayern, Wassergehalt 37%, BLfU, 2003
			0,137		Resthausmüll Österreich 1998, Wassergehalt 27,2%, Schwankungsbereich 114 –

Abfallfraktion	Ansatz NIR	Ansatz NIR	Referenzergebnisse Fachliteratur, Untersuchungen etc.		
	DOC (Mg C/MgFM)	DOC _f	DOC (Mg C/MgFM)	DOC _f	Bemerkungen, Quelle
					152 kg C/MgFM (mit Holz, ohne Kunststoffe), Baumeler et al., 1998
			0,20		Hausmüll, Wassergehalt 33,8%, Barghoorn et al., 1986

4.1.2 Auswertungen zum Gaspotenzial

Zur weiteren Einschätzung der Plausibilität der NIR-Werte soll das Gaspotenzial, das aus diesen NIR-Werten für die organikhaltigen Einzelfractionen wie für den Durchschnittswert der Gesamtorganik abgeleitet werden kann, näher betrachtet werden.

Unter Berücksichtigung der DOC-Werte im NIR und dem DOC_f von 0,5 ergibt sich als Beispiel für das Jahr 1993 und die damaligen abgelagerten organikhaltigen Fraktionen ein durchschnittliches Gasbildungspotenzial von 231 m³/Mg FM (Tabelle 8).

Tabelle 8: Ableitung des gesamtdeutschen und des spezifischen Gaspotenzials mit den Ansätzen aus dem NIR am Beispiel des Jahres 1993

Abfallfraktion	Ablage- rungsmasse Gg FM	Ansatz NIR		Gaspotenzial	
		DOC MgC/MgFM	DOC _f -	Mio. m ³	m ³ /MgFM
Organik (Food waste)	9.732	0,18	0,5	1.636	168
Garten- und Parkabfälle (Garden)	0	0,20	0,5	0	(187)
Papier und Pappe (Paper)	5.577	0,40	0,5	2.084	374
Holz und Stroh (Wood and straw)	2.283	0,43	0,5	917	402
Textilien + Windeln	2.515	0,24	0,5	564	224
Klärschlamm (Sewage sludge)	0	0,15	0,5	0	(47)
Verbundmaterialien	4.059	0,10	0,5	379	93
MBA-Abfälle	0	0,023	0,5	0	(21)
Summe 1993	24.165			5.579	
Ø Gaspotenzial (m ³ / Mg FM)					231

Das durchschnittliche Gaspotenzial aller organikhaltigen Abfälle im Jahr 1993 von 231 m³/Mg FM kann nun mit Untersuchungsergebnissen zum Gasbildungspotenzial aus den 80er und 90er Jahren sowie aktuellen Literaturangaben verglichen werden (Tabelle 9).

Auch dieser Vergleich mit den Literaturangaben zum Deponiegaspotenzial weist darauf hin, dass das Deponiegaspotenzial, das sich aus den Default- bzw. Eingabewerten für die NIR-Berechnung ergibt, tendenziell zu hoch angesetzt ist und die tatsächlichen Bedingungen der Deponiegasbildung auf deutschen Deponien nicht angemessen quantifiziert:

- ▶ So liegen die meisten Angaben für die Fraktionen Organik (Food waste) und Garten- und Parkabfälle unter den Gasbildungspotenzialen abgeleitet aus den NIR-Werten. Wenige deutlich höhere Werte waren in der Deponiepraxis ohne größere Auswirkung, da z.B. Rasenschnitt kaum in nennenswerten Mengen deponiert wurde.
- ▶ Besonders deutlich ist die Differenz bei der Fraktion Papier und Pappe, wo die Gasbildungspotenziale nur bei 25 – 53% des NIR-Werts liegen. Diese hohen Annahmen im NIR sind für die Ermittlung der Methanemissionen von erheblicher Bedeutung, da sie in Verbindung mit den Ablagerungsmassen und der Halbwertszeit zwischenzeitlich theoretisch die Methanbildung auf deutschen Deponien dominieren würden. Wie die weiteren Ausführungen in Kapitel 4 und 6 zeigen werden, ist dies in der Größenordnung, wie sie im NIR-Bericht bisher ausgewiesen wurde, nicht der Fall. Bezogen auf einen durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt von 300 kgC/MgFM (DOC = 0,3) weisen die Gasbildungspotenziale für die Papierfraktionen auf einen anaerob abbaubaren Anteil von 28% (DOCf = 0,28, Schwankungsbereich 0,17 – 0,36) hin.
- ▶ Noch größer ist die Diskrepanz der Gasbildungspotenziale für die Fraktion Holz und Stroh, wo insbesondere für die Fraktion Holz nur Gasbildungspotenziale von 5 – 14% und nur in wenigen Ausnahmefällen (langfristige Methanemission aus Hartholzabbau unter optimalen Laborbedingungen) von 28% - 74% bezogen auf das NIR-Gasbildungspotenzial ermittelt wurden. Stroh mit einem deutlich höheren Gasbildungspotenzial bildet gegenüber dem Holz (z. B. bestehen 60 – 80% des Sperrmülls aus Holz) bei der Deponierung nur einen vernachlässigbaren Massenanteil.
- ▶ Auch bei dem Vergleich der durchschnittlichen Gaspotenziale aller organikhaltigen Einzelfraktionen (NIR-Wert 231 m³/MgFM) mit früheren Untersuchungen an Hausmüll und gemischten Abfällen bestätigt sich diese Grundtendenz. Die in zahlreichen Untersuchungen ermittelten Gasbildungspotenziale, die in der Regel unter günstigeren Milieubedingungen ermittelt wurden als in einer Deponie (z.B. hinsichtlich des Wasserhaushalts, kein aerober Abbau vorab etc.), liegen nur in einer Größenordnung von 30 – 81% (Durchschnittswert 60%) bezogen auf das durchschnittliche Gasbildungspotenzial gemäß NIR für das Jahr 1993.

Diese Ergebnisse sprechen für eine weitere Anpassung der Eingangswerte zur Ermittlung der Methanemissionen deutscher Deponien, worauf in Kapitel 6 ff. näher eingegangen wird.

Tabelle 9: Deponiegaspotenziale der organikhaltigen deponierten Abfälle (durchschnittliches Gaspotenzial der Gesamtorganik im Bezugsjahr 1993), Abgleich mit Referenzergebnissen

Abfallfraktion	NIR (m ³ /MgFM)	Gaspotenzial Referenzergebnisse	
		(m ³ /MgFM)	Quelle / Anmerkungen
Organik (Food waste)	168	110	abgeleitet aus 78 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 30%, Kruse, 1994
		126	Biotonne, abgeleitet aus 252 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 50%, Ramke, 2010

Abfallfraktion	NIR (m ³ /MgFM)	Gaspotenzial Referenzergebnisse	
		(m ³ /MgFM)	Quelle / Anmerkungen
Garten- und Parkabfälle (Garden)	187	76 - 168	abgeleitet aus 52 – 120 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 30%, Spendlin, 1991
		74 - 120	abgeleitet aus 53 – 86 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 30% (Strauchanteile), Kruse, 1994
		95	Gartenabfälle, Tallner, 1993
		105	Laub, abgeleitet aus 210 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 50%, Ramke, 2010
		128	Laub, Tallner, 1993
Papier und Pappe (Paper)	374	293	Rasenschnitt, abgeleitet aus 587 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 50%, Ramke, 2010
		95 - 159	Illustrierte, abgeleitet aus 63 - 106 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Kruse, 1994
		123 - 144	Papiermischung, abgeleitet aus 82-96 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Kruse, 1994
		168	Zeitungspapier, Tallner, 1993
		158 - 182	Zeitung, abgeleitet aus 105 - 121 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Kruse, 1994
Holz und Stroh (Wood and straw)	402	201	Papiermischung, Tallner, 1993
		34 - 204	Zeitungspapier, abgeleitet aus 40 - 110 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalten von 7,2 – 14%, zit. in Krause et al., 2016
		21	Holzspäne, abgeleitet aus 27,4 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Ramke, 2010
		44	Sägespäne, Tallner, 1993
		37,5 - 57	abgeleitet aus 25 - 38 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Kruse, 1994
Textilien + Windeln	224	27,3- 64,4	Weichholz, abgeleitet aus Laborversuchen in 8 l –Reaktoren, 19,5 – 46,0 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Wang et al., 2016
		94	Durchschnittswert für Holz, abgeleitet aus 62,6 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25% bei der Deponierung, Eleazer et al., 1997
		114 - 254	Hartholz, abgeleitet aus Laborversuchen in 8 l –Reaktoren, 76,6 – 118,9 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 25%, Wang et al., 2016
		297	Stroh, abgeleitet aus 424,4 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 30%, Ramke, 2010
		110 – 118	Windeln, abgeleitet aus BMP-Tests, 110 – 158 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 50 - 62%, zit. in Krause et al., 2016

Abfallfraktion	NIR (m ³ /MgFM)	Gaspotenzial Referenzergebnisse	
		(m ³ /MgFM)	Quelle / Anmerkungen
		378 - 432	Textilien, abgeleitet aus BMP-Tests, 189 – 216 m ³ CH ₄ /MgFM, zit. in Krause et al., 2016
Klärschlamm (Sewage sludge)	47	30	Faulschlamm, abgeleitet aus 43 m ³ CH ₄ /MgTM und Wassergehalt von 65%, Kruse, 1994
Verbundmaterialien	93		
MBA-Abfälle	43	11 – 42	abgeleitet aus 15 – 60 m ³ /MgTM und Wassergehalt von 30%, Heyer et al., 2012
		10 – 48	abgeleitet aus BMP-Tests, 5,2 – 24 m ³ CH ₄ /MgFM, MBA Output aus europäischen MBA-Anlagen, zit. in Krause et al., 2016
Ø Gaspotenzial Gesamtorganik, Bezugsjahr 1993	231		
Hausmüll		70 - 126	Kommunaler Mischmüll, Lechner, 2004
		137	abgeleitet aus 98 m ³ CH ₄ /MgTM (Hausmüll) und Wassergehalt von 30%, Kruse, 1994
		85 - 140	bezogen auf 30% Wassergehalt, Ehrig et al., 1995
		120–150	zerkleinerter Hausmüll / Stegmann, 1982, zit. in Rettenberger & Mezger, 1992
		105 - 165	bezogen auf 30% Wassergehalt, Jessberger 1992
		162	Hausmüll „Graue Tonne“, Bassum, De Baere, 2000
		172	Tallner, 1993
		186	zerkleinerter Hausmüll / Pfeffer, 1974, zit. in Rettenberger & Mezger, 1992

4.1.3 Vergleich der Methanbildungspotenziale in Nationalen Inventarberichten

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der Methanbildungspotenziale, wie sie sich als Durchschnittswert in den Nationalen Inventarberichten europäischer Länder und weiterer Industriestaaten ableiten lassen (IPCC, 2014). Auch dieser Vergleich zeigt, dass das durchschnittliche Methanbildungspotenzial, das im deutschen Nationalen Inventarbericht bisher herangezogen wird, deutlich über allen Werten der anderen Staaten liegt und damit die Bedingungen auf deutschen Deponien nicht realistisch abbildet.

Tabelle 10: Defaultwerte zum Methanbildungspotenzial L_0 und abgeleitetes Gaspotenzial verschiedener Länder zum Nationalen Inventarbericht (Angaben von 2014, UNFCC, 2014, zit. in Krause et al., 2016)

Land	DOC kgC/MgFM	DOC _f -	MCF -	F -	L_0 m ³ CH ₄ /MgFM	Gaspotenzial m ³ /MgFM
Australien	134	variiert	1	0,5	78	156
Bulgarien	110	0,5	1	0,5	51	102
Canada	172	0,6	1	0,5	96	192
Dänemark	113	0,5	1	0,41	45	110
Deutschland	261	0,5	1	0,5	122	244
England	133	0,5	1	0,5	62	124
Finnland	177	0,5	1	0,5	82	164
Griechenland	148	0,6	1	0,5	83	166
Irland	175	0,6	1	0,5	98	196
Italien	189	0,5	1	0,5	88	176
Kroatien	157	0,55	0,89	0,5	72	144
Luxemburg	180	0,5	1	0,5	84	168
Österreich	160	0,55	1	0,55	90	164
Polen	123	0,5	1	0,5	57	114
Portugal	148	0,6	1	0,5	83	166
Rumänien	118	0,55	1	0,5	61	122
Slowakei	120	0,6	1	0,5	67	134
Spanien	134	0,5	1	0,5	62	124
Tschechien	193	0,5	1	0,55	99	180
Türkei	150	0,77	1	0,5	108	216
Ungarn	160	0,5	1	0,5	74	148
USA	203	0,5	1	0,5	100	200

4.1.4 Auswertungen zum aeroben Kohlenstoffabbau auf Deponien

Die biologischen Abbauprozesse auf Deponien werden neben anaeroben Abbauvorgängen unter Sauerstoffausschluss auch von aeroben Abbauprozessen geprägt. Diese aeroben Abbauprozesse können sich hauptsächlich in folgenden Betriebszuständen auswirken:

- ▶ Unmittelbar nach der Ablagerung, solange über die offene Deponiefläche noch Kontakt zur Atmosphäre besteht und damit eine gewisse Sauerstoffversorgung für aerobe Mikroorganismen besteht. Dieser Sachverhalt wird mit dem bisherigen MCF (= $MCF_{\text{Ablagerungsbeginn}}$) bereits berücksichtigt.
- ▶ Mit zunehmendem Ablagerungsalter und nachlassender Gasbildung infolge anwachsender Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre, insbesondere auch in Verbindung mit einer aktiven Gasfassung, die in der Regel zu einem Übersaugungseffekt und damit Lufteintrag in den Deponiekörper führt. Dieser Sachverhalt sollte für die Berechnungen der aktuellen Methanbildung von deutschen Deponien mit einem weiteren Faktor ($MCF_{\text{langfristig}}$) berücksichtigt werden.

D.h. beide Sachverhalte können über den Methan-Korrektur-Faktor (MCF – Methane Correction Factor) bei der Berechnung der jährlichen Methanbildung im Nationalen Inventarbericht berücksichtigt werden, indem der Berechnungsalgorithmus um den langfristig auftretenden aeroben Kohlenstoffabbau erweitert wird.

Anpassungsmöglichkeiten zum $MCF_{\text{Ablagerungsbeginn}}$

Für den Parameter MCF ist im deutschen NIR, wie eingangs erläutert, bisher ein für alle Abfallfraktionen jeweils gleich geltender Wert vorgegeben. Es wird für BRD-Deponien bis 1972 ein Wert von 0,6, ab 1972 ein Wert von 1 angesetzt und für alle deutschen Deponien ab 1990 ebenfalls der Wert von 1.

Im Folgenden wird der Stand des Wissens zu aeroben Abbauprozessen auf Deponien zusammenfassend aufgegriffen und daraus Vorschläge zur Anpassung des MCF-Werts abgeleitet.

Aerobe Abbauprozesse unmittelbar nach der Ablagerung

Zu den aeroben Abbauprozessen und den Auswirkungen auf die Reduzierung des Methanbildungspotenzials liegen verschiedene Erkenntnisse und Erfahrungen vor.

So wurde bei Gasprognosemodellen aufgrund von Untersuchungen auf Deponien ein Anfangszeitfaktor angesetzt (Weber, 1990). Er berücksichtigt die Reduzierung des Gasbildungspotenzials vornehmlich im ersten halben Jahr nach erfolgter Ablagerung durch aerobe Umsetzung. So wurde von Weber vorgeschlagen:

- ▶ 0,95 [-] für Kippkantenbetrieb und schnellen Aufbau (d.h. 5% Reduzierung des Gasbildungspotenzials bzw. $MCF_{\text{Ablagerungsbeginn}} = 0,95$)
- ▶ 0,8 [-] für Dünnschichteinbau und langsamen Aufbau ($MCF_{\text{Ablagerungsbeginn}} = 0,80$)

Von Spillmann (1989) wurden folgende Untersuchungsergebnisse erläutert: „Wurde der Abfall so gelagert, dass er vor der Verdichtung 1 Jahr lang störungsfrei aerob abgebaut werden konnte, wurde die abbaubare Trockensubstanz um ca. 50 Gew.-% verringert. Das entsprach ca. 10 bis 15 Gew.-% der untersuchten Müll-Klärschlamm-Gemische. Etwa der gleiche Abbau organischer Substanz ist aus der Kompostierung bekannt.“

Auch im Leitfaden Deponiegas Baden Württemberg (LfU, 1992) werden ähnliche Aussagen getroffen: „Die oberste Müllschicht zeigt durch Eindiffundieren von Luftsauerstoff auch nach Jahren noch aerobes Milieu.“

Eine ergänzende Plausibilitätsbetrachtung soll aufzeigen, wie lange ein aerober Abbau über die offene Ablagerungsfläche im früheren Ablagerungsbetrieb möglich gewesen ist:

Im Jahr 1993 wurden 30,6 Mio. Mg organikhaltige sowie Industrie- und Gewerbeabfälle deponiert (Angabe UBA, NIR, 2014). Vom Umweltbundesamt wurden für das Jahr 1993 in einer Veröffentlichung 543 Deponien aufgeführt, die über eine Gesamtfläche von 8.800 ha verfügten (UBA, 1993). Wenn nur 50% dieser Fläche zur Ablagerung genutzt wurden bzw. offene Ablagerungsflächen vorlagen und unterstellt wird, dass auf den übrigen 50% der Deponieflächen kein Luftzutritt möglich gewesen wäre, ergibt sich bei einer Feuchtdichte von 1 Mg/m³ folgende Aufbaugeschwindigkeit für das Jahr 1993:

$$V = \frac{30.600.000 \text{ MgFM}}{1 \text{ MgFM/m}^3 \cdot 44.000.000 \text{ m}^2} = 0,69 \frac{\text{m}}{\text{a}} \text{ oder ca. } 6 \frac{\text{cm}}{\text{Monat}}$$

In den ersten 1 – 2 Monaten bzw. den oberen Dezimetern wird demnach ein intensiver aerober Abbau insbesondere der leicht abbaubaren organischen Bestandteile erfolgt sein. Ein Sauerstoffeintrag ist zumindest in eingeschränktem Umfang bis in 0,5 – 1 m der obersten Ablagerungsschicht möglich, so dass im Durchschnitt ein mehrmonatiger aerober Abbau auf den deutschen Deponien postuliert werden kann. Dieses gilt auch für die Zeiträume wie 1993, wo sehr große Massen an organikhaltigen Abfällen deponiert wurden. Zudem wurde der Einfluss von Deponiebränden auf die Reduzierung der biologisch abbaubaren Organik nicht berücksichtigt.

In der Zusammenführung dieser Ergebnisse und ergänzenden Betrachtungen sind die o.g. Werte für den MCF Ablagerungsbeginn von 0,8 – 0,95 sicherlich nicht zu hoch angesetzt und sollten bei der Abschätzung des Methanbildungspotenzials berücksichtigt werden.

Anpassungsmöglichkeiten zum MCF_{langfristig} bei jüngeren Altdeponien

Mittel- und langfristige aerobe Abbauprozesse im Deponiekörper führen zu einem weiteren Kohlenstoffabbau ohne Methanbildung, der über folgenden Zusammenhang quantifiziert werden kann:

Unter streng anaeroben Milieubedingungen würde das Deponiegas ausschließlich aus den Hauptkomponenten Methan und Kohlenstoffdioxid etwa im Verhältnis 65 zu 35 Vol.-% bestehen (Abbildung 1). In dem Maße, in dem Luft in den Deponiekörper eindringen kann, z.B. über die Deponieoberfläche durch Luftdruckschwankungen und insbesondere durch den Übersaugungseffekt bei der Deponiegaserfassung, wird der Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt, der Methangehalt reduziert sich und Stickstoff ist im Deponiegas-/Luftgemisch vorhanden, da dieser keinen Umwandlungsprozessen unterliegt. Die Abbildung 1 zeigt diesen Zusammenhang und die Veränderung der Gaszusammensetzung bei zunehmender Aerobisierung, solange der Sauerstoff nahezu vollständig umgesetzt wird. Unterhalb der roten Linie kann der anteilige Kohlenstoffabbau unter anaeroben Bedingungen mit der resultierenden Methan- und Kohlenstoffdioxidbildung quantifiziert werden. Oberhalb der roten Linie kann dagegen der Kohlenstoffabbau unter aeroben Bedingungen mit der resultierenden Kohlenstoffdioxidbildung abgeleitet werden.

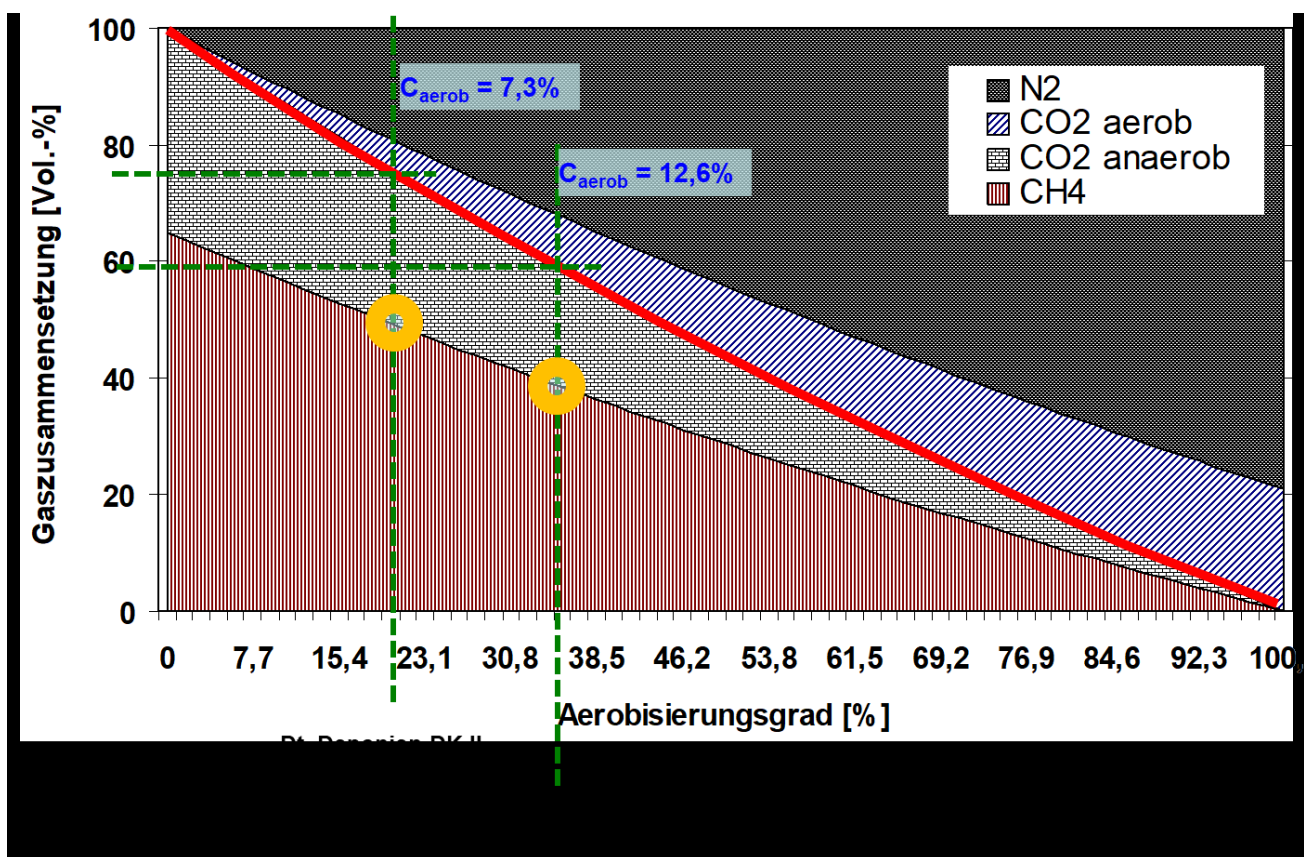
Aus einer Erhebung des Statistischen Bundesamts für das Jahr 2014 geht hervor, dass der durchschnittliche Methangehalt aller statistisch erfassten Deponien in der Betriebs- und Stilllegungsphase bei 47 Vol.-% und bei den Deponien in der Nachsorge bei 38 Vol.-% liegt (DESTATIS, 2016). Damit werden die (hauptsächlich jüngeren) Altdeponien in der Stilllegung und Nachsorge erfasst (Anzahl 430 im Jahr 2015), für die noch eine Berichts- und Meldepflicht gilt.

Aus diesen durchschnittlichen Methankonzentrationen lässt sich über stöchiometrische Berechnungen ableiten, dass der Aerobisierungsgrad im Bereich von 20 – 35% liegt. Der derart in den Deponiekörper eindringende Luftsauerstoff führt bei vollständiger Veratmung dazu, dass in den jüngeren Deponien in der Betriebs- und Stilllegungsphase durchschnittlich 7,3% des bioverfügbaren Kohlen-

stoffs aerob abgebaut werden, während es bei den älteren Deponien in der Nachsorge bereits 12,6% sind. Die Tendenz des aeroben Abbaus ist bei beiden Deponiekategorien steigend. Sie bestätigt zudem, dass die meisten Siedlungsabfalldeponien nicht so vollständig mit einer gasundurchlässigen Oberflächenabdichtung gekapselt sind, dass keine Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre mehr auftreten.

Aus dieser Betrachtung geht folglich hervor, dass die Reduzierung des noch vorhandenen anaerob verfügbaren Kohlenstoffpotenzials bzw. Gasbildungspotenzials mindestens 7,3 – 12,6% beträgt. Der aktuelle Wert für den $MCF_{\text{langfristig}}$ lässt sich damit für **jüngere Altdeponien zu $MCF_{\text{langfristig}} = 0,87 - 0,93$** mit abnehmender Tendenz (aufgrund des anwachsenden Aerobisierungsgrads) ableiten.

Abbildung 1: Durchschnittlicher Methangehalt, Aerobisierungsgrad und Anteil des aeroben Kohlenstoffumsatzes (C_{aerob}) auf deutschen Siedlungsabfalldeponien, Bezugsjahr 2014



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Theoretisch könnte der MCF-Wert noch für die einzelnen Organikfraktionen differenziert werden, da insbesondere die leicht abbaubaren Fraktionen zu Ablagerungsbeginn intensiv aerob abgebaut werden, während sich der aerobe Abbau der mittel und schwer abbaubaren Anteile wie z.B. Holz oder Textilien in dieser Phase nur geringfügig auswirkt und sich erst langfristig stärker ausprägt.

Der Anteil der Ablagerungsmasse dieser Gruppe von Altdeponien, die über die Erhebung des Statistischen Bundesamts erfasst werden (Ablagerungszeitraum ca. 1980 – 2005), beträgt etwa 44% der gesamten im Inventarbericht zur Ermittlung der Methanemissionen angesetzten Ablagerungsmassen (1950 – 2005: ca. 1.175 Mio. Mg FM).

Anpassungsmöglichkeiten zum $MCF_{\text{langfristig}}$ bei Altablagerungen

Für die große Anzahl an insbesondere kleineren Altablagerungen, die in Deutschland ab 1950 betrieben wurden und deren Ablagerungsmassen im Nationalen Inventarbericht zur Quantifizierung der

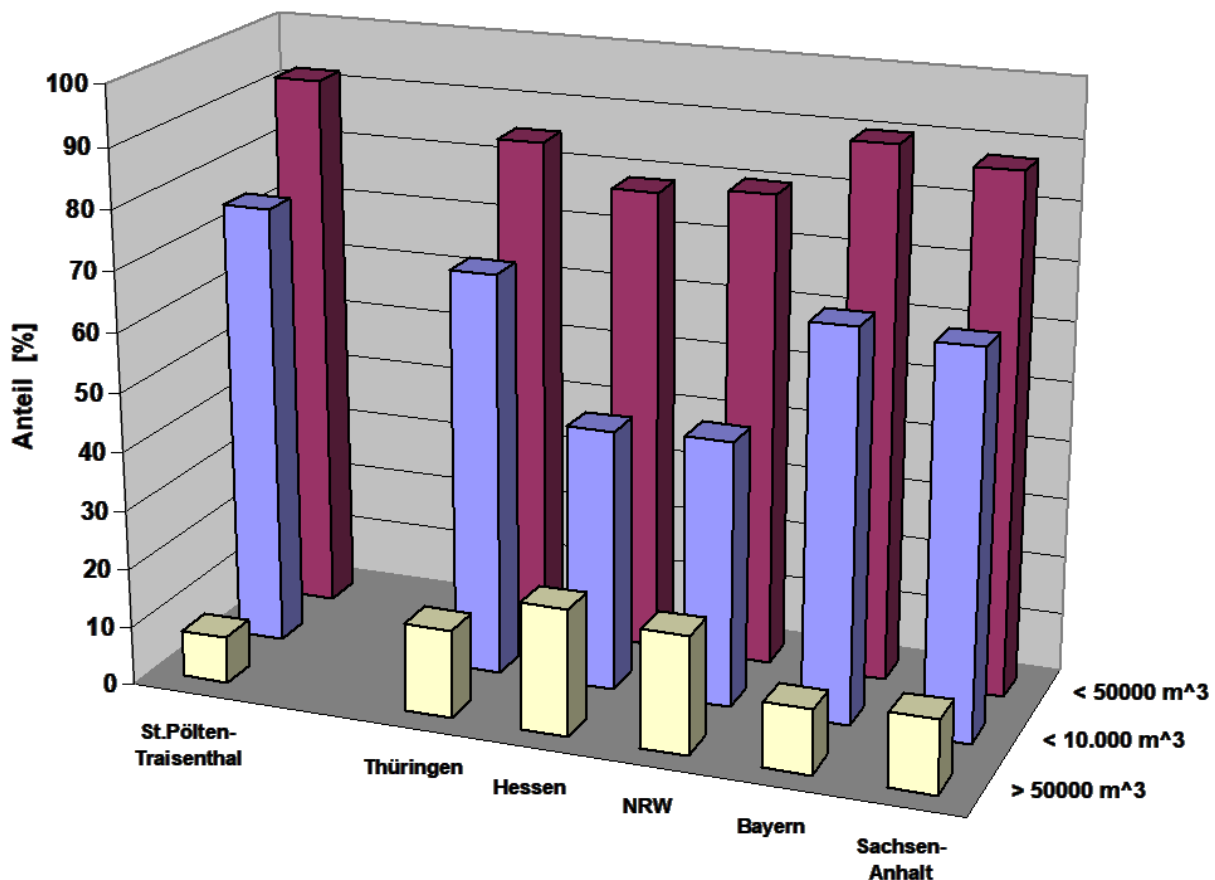
Methanbildung mit berücksichtigt werden, können folgende Erfahrungen und Ergebnisse herangezogen werden.

Die weitaus größte Anzahl der Altablagerungen weist Ablagerungsvolumina unter 50.000 m³ auf, die meisten davon sogar weniger als 10.000 m³ (Abbildung 2). Im EU-Life Vorhaben EVAPASSOLD, das in Deutschland und Österreich durchgeführt wurde (Niederösterreichische Landesakademie, 2005), wurden 24 dieser Altablagerungen, die bis in die siebziger, teilweise noch achtziger Jahre hinein betrieben wurden, u.a. auf die Deponiegasbeschaffenheit und einige auch auf ihr Restgaspotenzial untersucht:

- ▶ 10 Altablagerungen wiesen keine Methankonzentrationen bzw. keine Gasbildung mehr auf ($\text{CH}_4 = 0$).
- ▶ 4 Altablagerungen wiesen Methankonzentrationen im Bereich von 0 – 10 Vol.-% CH_4 auf.
- ▶ 3 Altablagerungen wiesen Methankonzentrationen im Bereich von 10 – 20 Vol.-% CH_4 auf.
- ▶ 3 Altablagerungen wiesen Methankonzentrationen im Bereich von 20 – 30 Vol.-% CH_4 auf.
- ▶ 4 Altablagerungen wiesen maximale Methankonzentrationen über 30 Vol.-% CH_4 auf.

Der durchschnittliche Methangehalt aller Deponiegasproben betrug nur noch 4 Vol.-% CH_4 . Der durchschnittliche Kohlendioxidgehalt lag bei 8,5 Vol.-% CO_2 , was auf sehr geringe anaerobe biologische Abbauprozesse und geringe, aber relativ gesehen intensivere aerobe Abbauprozesse hinweist. Während beim bisherigen NIR-Berechnungsansatz davon ausgegangen wird, dass auch bei diesen Altablagerungen aktuell 50% des umgesetzten Kohlenstoffs zu Methan abgebaut wird ($\text{MCF} = 0$), sind es nach dieser Auswertung eher 32%. D. h. der Anteil des aktuellen aeroben Abbaus liegt bei durchschnittlich 36% ($\text{MCF}_{\text{langfristig}} = 0,64$). D.h. bei dieser Gruppe der **Altablagerungen** sollte nicht nur der $\text{MCF}_{\text{Ablagerungsbeginn}}$ (0,6 für das Gebiet der ehemaligen DDR und für die BRD vor 1972), sondern für die aktuelle Restgasbildung auch der Faktor **$\text{MCF}_{\text{langfristig}} = 0,64$** mit ebenfalls abnehmender Tendenz berücksichtigt werden.

Abbildung 2: Ablagerungsvolumina von Altablagerungen mehrerer deutscher Bundesländer und einer österreichischen Region



Quelle: Niederösterreichische Landesakademie, 2005

Der Anteil der Ablagerungsmasse dieser mehrere zehntausend Einzelstandorte umfassenden Gruppe von Altablagerungen (Ablagerungszeitraum 1950 – ca. 1972, teilweise bis 1980) beträgt etwa 56% der gesamten im Inventarbericht zur Ermittlung der Methanemissionen angesetzten Ablagerungsmassen.

Optionen zur weitergehenden Berücksichtigung aerober Abbauprozesse im Nationalen Inventarbericht

Aus den Auswertungen zum Einfluss aerober Abbauprozesse auf die Methanbildung in Deponien geht hervor, dass sie stärker im Nationalen Inventarbericht berücksichtigt werden sollten. Dieses wäre mit folgenden Optionen möglich:

Anpassungsmöglichkeiten zum MCF_{Ablagerungsbeginn}

Statt des MCF = 1 für BRD-Deponien ab 1972 und für alle deutschen Deponien ab 1990 nun ein Wert im Bereich von 0,8 – 0,95.

Anpassungsmöglichkeiten zum MCF_{langfristig}

Bei jüngeren Altdeponien (statt 1, d.h. gänzlich unberücksichtigt) derzeit im Bereich von 0,87 – 0,93 mit abnehmender Tendenz (aufgrund des anwachsenden Aerobisierungsgrads). Der aerob umgesetzte Kohlenstoffanteil kann wie erläutert aus den durchschnittlichen Methankonzentrationswerten deutscher Deponien, die vom Statistischen Bundesamt erhoben werden, abgeleitet werden. Bei älteren Altdeponien und der großen Zahl von kleinen Altablagerungen (Ablagerungszeitraum ca. 1950 –

1972) könnte der aktuelle aerobe Abbau mit einem Festwert $MCF_{\text{langfristig}}$ von ca. 0,64 angesetzt werden.

Vereinfachte Anpassung zum MCF

Als vereinfachte Anpassung des MCF sollte zumindest der MCF, der in der bisherigen Berechnungsmethodik im NIR mit 1 für BRD-Deponien ab 1972 und für alle deutschen Deponien ab 1990 angesetzt wird, auf einen Festwert von maximal 0,9 abgesenkt werden. Damit wird der Anteil des aeroben Abbaus an der Reduzierung der Methanbildung zwar vom zeitlichen Verlauf und der Größe immer noch nicht realistisch abgebildet, aber es wird zumindest eine „pragmatische“ Annäherung an die Verhältnisse der Abbauprozesse auf deutschen Deponien erreicht.

5 Arbeitspaket A: Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modells an die Deponieverhältnisse in Deutschland

5.1 Vorgehensweise und Anpassungen bei der Projektdurchführung

Anpassungen der Vorgehensweise gegenüber der zu Projektbeginn definierten Vorgehensweise waren wie folgt erforderlich:

a) Ziel zu Projektbeginn:

Betrachtung von mindestens 30 Deponien, deren Gashaushalt sich aufgrund der vorhandenen technischen Einrichtungen (z.B. Gaserfassungssystem, Oberflächenabdichtungen oder -abdeckungen) gut bilanzieren lässt und für die aus der Anlagenüberwachung und Dokumentationspflichten belastbare Daten zum Abfallinventar und Gashaushalt vorliegen.

Grund für die Anpassung der Vorgehensweise:

Bei der Recherche im Projektverlauf hat sich ergeben, dass die gewünschte Zahl an geeigneten Deponiestandorten nicht in diesem Umfang zur Verfügung steht. Die Zahl der geeigneten Deponien schränkte sich zunächst bereits dadurch ein, dass von einigen Standorten die erforderlichen Daten nicht zur Verfügung standen. Bei Deponien, von welchen ausreichend Daten für eine Bewertung verfügbar sind, sind nur wenige Standorte so gut gekapselt und so gut entgast, dass von einer Erfassung des gesamten gebildeten Deponiegases auszugehen ist.

Art der Anpassung:

Es werden weniger Deponien so ausgewertet, dass bei diesen eine vollständige Erfassung des Deponiegases angenommen wird. Es wurden dafür weitere Deponien ausgewertet, bei denen davon auszugehen ist, dass keine vollständige Erfassung des Deponiegases gegeben ist, um an diesen Deponien zu prüfen, ob die dort ermittelten Abweichungen zwischen tatsächlich gefasster Deponiegasmenge und prognostizierter Gasbildung sich mit den Abweichungen zu einer gut gekapselten und gut entgasten Deponie hinreichend genau erklären lassen. Insgesamt wurden dabei deutlich mehr als die angestrebten 30 Deponiestandorte betrachtet.

b) Ziel zu Projektbeginn:

Bei der Auswahl der für die Auswertung verwendeten Deponien wird angestrebt, jeweils eine ausreichende Anzahl von Standorten für verschiedene Deponietypen zu betrachten.

Grund für die Anpassung der Vorgehensweise:

Aufgrund der begrenzten Anzahl an geeigneten Deponien war eine Differenzierung nach Deponietypen nicht möglich. Für die zusätzlich betrachteten Deponien, bei denen nicht das gesamte gebildete Deponiegas erfasst wird, zeigte sich, dass andere Faktoren wesentlich mehr Einfluss haben als die Unterscheidung nach Deponietypen. Sofern ein Unterschied zwischen einzelnen Deponietypen gegeben sein sollte, konnte dieser Unterschied aufgrund der Überlagerung durch andere Einflussfaktoren für diese Deponien nicht dahingehend ermittelt werden, dass belastbare Rückschlüsse auf das Methanbildungspotenzial gezogen werden konnten. Sofern dennoch Unterschiede zwischen Deponietypen oder Deponiemerkmalen erkennbar waren, wird darauf im Folgenden ergänzend eingegangen. Insofern wird in den folgenden Kapiteln dieser Sachverhalt zwar weiter betrachtet. Die dabei abgeleiteten Erkenntnisse gelten aber unter dem Vorbehalt, dass diese für einige Deponietypen nur auf wenigen Beispielen beruhen.

5.2 Bewertung der Parameter des FOD-Modells für eine Anpassung

Bei der Gasprognose nach dem FOD-Modell der 2006 IPCC Guidelines werden bei der Berechnung unterschiedliche Parameter hinsichtlich des verfügbaren Kohlenstoffs und der Abbaubarkeit der Ab-

fallfraktionen angesetzt. Im Folgenden soll auf die einzelnen Parametern des FOD-Modells eingegangen werden und eine Bewertung in Bezug auf eine Anpassung abgegeben werden.

DOC

Die im NIR verwendeten Werte für den DOC wurden im Sachverständigengutachten von 2014 übernommen, da die hier gewählten Werte auf nationalen Studien begründet sind. Aufgrund der zwischenzeitlich vorliegenden Ergebnisse der Literaturrecherche (s. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) wird nun geprüft, inwieweit es zielführend ist, bei einzelnen Fraktionen eine Anpassung, außer beim DOC_f zusätzlich beim DOC, anzustreben. So wäre bei manchen Fraktionen die Anpassung beider Parameter besser zu untersetzen, als wenn die in der Literatur zu findenden Ergebnisse aus Laborversuchen zur Anpassung nur eines der beiden genannten Parameter führen würde.

Für Organik (food waste) ist keine Anpassung des im NIR verwendeten DOC erforderlich. Dies kann anhand der nachfolgenden Plausibilitätsprüfung aufgezeigt werden:

Es kann angenommen werden, dass dieser zu nahezu 100 % abbaubar ist. Im Abfall enthalten sind Bestandteile mit folgendem C-Anteil:

- ▶ Kohlenhydrat (Glucose: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$): C-Anteil in der Trockenmasse = 40 %
- ▶ Protein ($\text{C}_{140}\text{H}_{225}\text{O}_{48}\text{N}_{37}\text{S}$): C-Anteil in der Trockenmasse = 52 %
- ▶ Fett (Tristearin $\text{C}_{57}\text{H}_{110}\text{O}_6$): C-Anteil in der Trockenmasse = 77 %

Im Mittel liegt der C-Anteil also bei etwa 50 %. Bei 50 % C-Anteil bedeutet 15 % DOC etwa 30 % Trockenmasse, also 70 % Wassergehalt bei einem 100 %-igen Abbau.

DOC_f

Eine Anpassung der DOC_f -Werte wurde im Sachverständigengutachten vorgenommen und wird weiterhin als zielführend erachtet.

Halbwertszeit

Eine Anpassung der Halbwertszeit bzw. des k-Werts wurde im Sachverständigengutachten vorgenommen und wird weiterhin als zielführend erachtet.

MCF

Verschiedene Ansätze bei der Berechnung der Gasprognose in Bezug auf den MCF-Wert im Sachverständigengutachten 2014 führten dazu, dass ursprünglich eine Anpassung nicht vorgenommen wurde.

Begründet wurde dies damit, dass hauptsächlich die leicht abbaubaren Abfälle vom anfänglichen aeroben Abbau am ehesten betroffen sind. Da bei zunehmendem Deponiealter die leicht abbaubaren Abfälle eine immer geringere Rolle spielen, nimmt der Einfluss dieses Parameters mit zunehmendem Deponiealter ab. Da unbehandelte Siedlungsabfälle in Deutschland nur bis ins Jahr 2005 abgelagert werden durften, existieren in Deutschland nur ältere Deponien.

Der anfängliche Luftzutritt schien also auf die im deutschen NIR angegebene aktuelle Methanemission nur einen begrenzten Einfluss zu haben. Gleichwohl wurde dieser Einfluss des aeroben Abbaus nunmehr im Kapitel 4.1.3 nach einer vertieften Literaturlauswertung quantifiziert und gefolgert, dass er bei der Berechnung der Methanemissionen stärkere Berücksichtigung finden sollte.

Ebenso sollte der Einfluss durch den Luftzutritt bei älteren Deponien stärkere bzw. überhaupt Berücksichtigung finden. Aufgrund des zunehmenden Deponiealters spielt dieser Effekt bei den deutschen Deponien eine immer größere Rolle.

Gemäß der Erläuterungen im Kapitel 4 kann der langfristig auftretende Effekt des Luftzutritts in den Deponiekörper, der in den dadurch betroffenen Bereichen des Deponiekörper zu einer Aerobisierung und zu einem entsprechenden aeroben Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs führt, zukünftig noch näher quantifiziert und berücksichtigt werden. Der aerob abgebaute Kohlenstoff steht für einen an-

aeroben Abbau entsprechend nicht mehr zur Verfügung. Für die differenzierte Berücksichtigung des aeroben Abbaus wäre daher der Parameter MCF mit einer Erweiterung um den Anteil „MCF_{langfristig}“ geeignet.

5.3 Auswahl der Deponiestandorte

Anknüpfend an das Sachverständigengutachten 2014 wurden weitere Deponien ausgewählt, welche die Voraussetzung erfüllen, möglichst gut gekapselt zu sein und das gesamte Deponiegas zu fassen.

Insgesamt wurden neben den fünf Deponien aus dem Sachverständigengutachten weitere Deponiestandorte angefragt, um den Parametersatz zu konkretisieren. Nur etwa von einem Drittel der angefragten Deponien wurden die notwendigen Betriebsdaten, Abfallinventar- und Entgasungsdaten zur Verfügung gestellt. Und auch von diesen Deponien mussten einige Standorte aussortiert werden, da diese sich letztlich als doch zu ungeeignet herausgestellt haben. Letztlich sind die im Weiteren vorgestellten Standorte zur Auswertung verblieben.

Eine größere Anzahl an Deponiestandorten wurden im Zuge der Erarbeitung von so genannten Potenzialanalysen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative „Einsatz geeigneter Technologien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“ ausgewertet. So ergab sich zudem die Möglichkeit, dem jeweiligen Deponiekörper Abfallfeststoffproben zu entnehmen und sie u.a. auf das noch vorhandene Gasbildungspotenzial zu untersuchen.

Den Deponien wurden zur Anonymisierung Großbuchstabenkombinationen zugewiesen. Hierbei wurden die Deponien mit dem Zweitbuchstaben danach unterschieden, welcher ARGE-Partner RUK (Zweitbuchstabe „R“) oder IFAS (Zweitbuchstabe „I“) deren Stamm- und Betriebsdaten ausgewertet bzw. deren Gashaushalt und Deponiekörper näher untersucht hat:

- ▶ AR Deponie hauptsächlich ausgewertet von RUK Stuttgart
- ▶ AI Deponie hauptsächlich untersucht und ausgewertet von IFAS Hamburg

Bei den Deponien AR und AI handelt es sich folglich nicht um dieselbe Deponie.

Deponie AR ist beispielsweise die erste Deponie, welche vom ARGE-Partner RUK ausgewertet wurde. Die weiteren vom ARGE-Partner RUK ausgewerteten Deponien sind je nach dem Zeitpunkt, zu welchem die ersten Daten für die Auswertung zur Verfügung standen, als Deponie BR bis UR bezeichnet. Bei den von IFAS ausgewerteten Deponien wurde entsprechend vorgegangen.

5.4 Ergebnisse mit dem Parametersatz aus dem Sachverständigengutachten für die betrachteten Deponiestandorte

5.4.1 Allgemeine Erläuterungen

Im Weiteren sind für jede betrachtete Deponie folgende Gasprognosen angegeben:

- ▶ „berechnete Methanbildung IPCC Default Values“:
Zum Vergleich angegebenes Prognoseergebnis einer Berechnung mit den „default values“ (Standardwerten) der IPCC, wie sie für die Berechnung der THG-Emissionen im deutschen NIR bisher angewendet werden.
- ▶ „berechnete Methanbildung RUK 2014“:
Zum Vergleich angegebenes Prognoseergebnis einer Berechnung mit dem im Sachverständigengutachten (RUK, 2014) vorläufig angewandten Parametersatz sowie mit den sonstigen Ansätzen des Sachverständigengutachtens. Sonstige Abweichungen im Sachverständigengutachten gegenüber dem NIR wurden in Kapitel 3 beschrieben.
Die Berechnungen im Sachverständigengutachten erfolgten nur bei den Deponien AR-ER.
- ▶ „berechnete Methanbildung detaillierter“:
Ansätze analog dem Sachverständigengutachten bei Ansatz der Ergebnisse einer detaillierteren Recherche zur Zusammensetzung der abgelagerten Gewerbeabfälle.
Da die Zusammensetzung des Gewerbeabfalls von den ansässigen Gewerbebetrieben im Einzugsgebiet der Deponie abhängig ist, ist ein allgemeiner Ansatz hierfür häufig zu ungenau. Es wurde versucht, möglichst viele Informationen zu ansässigen Gewerbebetrieben zu bekommen und auf Basis der so gewonnenen Informationen die Zusammensetzung des Gewerbeabfalls deponiespezifisch anzupassen.
Sofern zu den ausgewerteten Deponiestandorten AI – QI detaillierte Angaben zur Abfallzusammensetzung vorlagen, was jedoch nur in wenigen Fällen gegeben war, werden diese zur Gasprognoserechnung herangezogen. Ansonsten werden die Ansätze im NIR zur Abfallzusammensetzung des Hausmülls, Sperrmülls und hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls, die auf der Auswertung des Ökoinstitutes von Literaturwerten beruhen, herangezogen.
- ▶ „berechnete Methanbildung aus Abfallbeprobung“ = Methanbildung abgeleitet aus standortbezogenen Abfallfeststoffuntersuchungen:
Bei den ausgewerteten Deponiestandorten AI – QI wurden im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen (insbesondere Voruntersuchungen zur Deponiebelüftung, NKI-Potenzialanalysen zu klimarelevanten Methanemissionen) dem Deponiekörper jeweils eine größere Anzahl an Abfallfeststoffproben entnommen. Sie entstammen i.d.R. unterschiedlichen Ablagerungsbereichen und Ablagerungstiefen, so dass sowohl für einzelne Deponiebereiche als auch für die Gesamtdeponie Ergebnisse zu folgenden emissionsrelevanten Parametern gewonnen wurden:
 - Gesamter organischer Kohlenstoffgehalt TOC
 - Biologisch abbaubarer/verfügbarer Anteil, abgeleitet aus standardisierten Tests zur biologischen Abbaubarkeit wie der Atmungsaktivität (AT_4) oder dem Gärttest (GB_{21})
 - Für eine Teilmenge aktueller Feststoffprobenahmen (2015 – 2016) im Rahmen des Arbeitspakets B weitergehende Untersuchungen zum biologisch abbaubaren/verfügbaren Anteil, abgeleitet aus standardisierten Tests zur biologischen Abbaubarkeit wie der Atmungsaktivität, jedoch über 20 (AT_{20}) statt lediglich 4 Tage oder dem Gärttest (GB_{60}) über 60 statt lediglich 21 Tage. Ferner wurden für die Abfallfeststoffproben stoffgruppenspezifische Aufschlüsse zu den leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen mit dem van Soest Test durchgeführt.

Daraus kann unmittelbar das noch vorhandene Deponiegas- bzw. Methanbildungspotenzial der abgelagerten Abfälle bestimmt werden, ohne dass auf allgemeine Default-Werte zurückgegriffen

werden müsste (analog dem L_0 -Wert = Methanbildungspotenzial im Gasprognosemodell nach 2006 IPCC Guidelines, hier nun jedoch deponiespezifisch).

Mit diesem deponiespezifischen Deponiegas- bzw. Methanbildungspotenzial kann unter Einbezug der Halbwertszeit die „tatsächliche“ aktuelle Deponiegasbildung quantifiziert und deren voraussichtliche weitere Entwicklung prognostiziert werden.

Gerade mit dieser ergänzenden Auswertung kann im Abgleich mit dem Gasfassungsbetrieb eine belastbare Einschätzung des Gaserfassungsgrads vorgenommen werden, die eine weitere Anpassung der Default-Werte bzw. Eingangswerte für die Berechnung der Methanemissionen im NIR-Bericht ermöglicht.

Im Sachverständigengutachten waren zunächst die gefassten Methanmengen den prognostizierten Methanmengen gegenübergestellt. Dies war der Tatsache geschuldet, dass von den meisten Deponien in der Regel keine Daten zur Gaszusammensetzung und erst recht keine Zeitreihen zu diesen Daten zu bekommen waren. Sofern Deponien betrachtet werden, bei denen eine gute Kapselung und damit kein nennenswerter Außenluftzutritt gegeben sind, ist diese Vorgehensweise ausreichend genau. Da nun aber auch weniger geeignete Deponien hinsichtlich der technischen Randbedingungen und der Datenlage betrachtet wurden, wurde der Außenluftanteil mit seinen Auswirkungen auf den Kohlenstoffumsatz quantifiziert. Hierzu ist bei den Deponien AR-PR, bei denen ausreichende Daten zur Gaszusammensetzung zur Verfügung standen, jeweils eine zusätzliche Grafik mit einer Gegenüberstellung des jährlich gefassten an dem für dieses Jahr prognostizierten Kohlenstoffmassenstrom enthalten.

In den nachfolgenden Kapiteln sind sowohl die aus dem Sachverständigengutachten 2014 als auch die im Rahmen der weiteren Bearbeitung betrachteten Deponien aufgeführt. Die Einteilung der Deponien erfolgt nach der Möglichkeit der Gaserfassung bzw. der Gasundurchlässigkeiten der Oberflächenabdichtung am Standort. Einige Deponiestandorte werden beispielhaft näher vorgestellt. Die detaillierten Auswertungen zu allen näher untersuchten Deponien sind dem Bericht als Anlage 1 angefügt.

5.4.2 Deponien mit Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung

Es wird beispielhaft eine von sieben Deponien mit Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung vorgestellt. Alle Deponien mit Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung (Deponien CR, ER, IR, LR, OR, TR und UR) sind in der Anlage 1 dargestellt.

Für die Deponien erfolgt hier und in Anlage 1 eine vorläufige Betrachtung mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014). Eine genauere Bewertung erfolgt dann für ausgewählte Deponiestandorte in der Parameterstudie sowie für alle Deponien AR bis UR durch Darstellung der Ergebnisse bei Ansatz des ausgewählten Parametersatzes in Kapitel 8 und in der Anlage 2.

5.4.2.1 Deponie ER

Deponie ER ist aufgrund des Alters zwar nur mineralisch abgedichtet, jedoch wurde die Abdichtung bei Bedarf nach deren Aufbringen nachträglich verbessert. Deponie ER besitzt ein System zur getrennten Gut- und Schwachgaserfassung, was bereits seit mehr als 10 Jahren genutzt wird, zunächst für eine getrennte Schwachgasentsorgung und zwischenzeitlich für eine gemischte Verwertung von Schwachgas. Zudem ist das vorhandene Entgasungssystem für eine flexible Nutzung ausgelegt und wird so betrieben, dass auf geänderte Rahmenbedingungen reagiert wird.

Die wesentlichen Rahmendaten zur Beschreibung der Deponie ER sind in der Tabelle 11 und deren Deponieinventar in der Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 11: Deponiebeschreibung der Deponie ER

Deponieabschnitt(e)	DA 1
Deponieform	Grube/Halde
Ablagerungsbeginn	1960
Ablagerungsende	1991
Fläche [ha]	40,0
Verfüllvolumen [m³]	15,0 Mio.
Ablagerungsmasse [Mg]	13,0 Mio.
Oberflächenabdichtung / -abdeckung (Jahr des Aufbringens)	Endgültig (1988-1995) Mineralische Oberflächenabdichtung
Basisabdichtung	Keine Regelbasisabdichtung, Dichtwand um den Deponiekörper
Entgasungssystem (Jahr Beginn Absaugung)	95 vertikale Gasbrunnen und 42 horizontale Gaskollektoren (1992)
Gasbrunnen (GB) je Hektar	3,4 GB/ha

Tabelle 12: Deponieinventar der Deponie ER in Mg

Ablage- rungs- jahr	Haus- müll	Gewer- beabfall	Baustel- lenab- fall	Garten- abfall	Keh- richt und Markt- abfall	Klär- schlam m	Kanal- reini- gungs- abfall	Bau- schutt, Erdaus- hub	Sons- tiger Abfall
1979	174.47	180.86	237.39	28.037	16.043	3.771	2.096	277.02	2.803
1980	137.18	162.78	328.57	35.401	16.377	16.960	3.104	377.96	1.792
1981	183.93	181.48	324.18	35.839	17.554	36.033	4.955	454.72	1.732
1982	209.32	112.87	69.026	19.334	15.664	26.872	4.509	386.41	3.178
1983	227.19	149.07	55.426	16.280	6.301	17.641	3.870	469.96	12.72
1984	378.09	236.77	71.469	20.891	12.492	8.221	5.832	785.46	18.91
1985	311.14	287.90	76.213	22.282	17.083	11.325	6.009	627.55	10.94
1986	219.12	214.83	91.196	24.608	24.662	19.568	6.565	621.67	84.31
1987	99.486	212.18	105.36	22.439	18.095	29.620	6.482	653.09	42.34
1988	49.803	206.59	125.99	23.149	12.749	34.153	6.208	656.89	31.74
1989	82.078	199.18	122.75	29.111	11.720	21.174	7.266	472.14	93.74
1990	16.126	71.697	46.700	6.651	1.302	8.715	3.113	51.290	160.7

Rahmenbedingungen:

- Die vor dem Jahr 1979 abgelagerten Abfälle werden nicht berücksichtigt, da sie unterhalb des Grundwasserspiegels liegen und somit für die Deponiegasbildung aufgrund der vermutlich unzureichenden Milieubedingungen für die Mikroorganismen keinen Beitrag leisten.

Ansätze zur Abfallzusammensetzung:

- ▶ Ansatz „Sonstiger Abfall“: Es wird eine Zusammensetzung wie hausmüllähnlicher Gewerbeabfall angenommen.
- ▶ Ansatz „Kehricht und Marktabfall“: Es wird eine Zusammensetzung wie Kehricht angenommen, keine separate Betrachtung von Marktabfall.
- ▶ Der Anteil des deponierten Gewerbeabfalls macht circa 17 % am Deponieinventar aus. Die ermittelte Zusammensetzung ist in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Gewerbeabfallzusammensetzung der Deponie ER

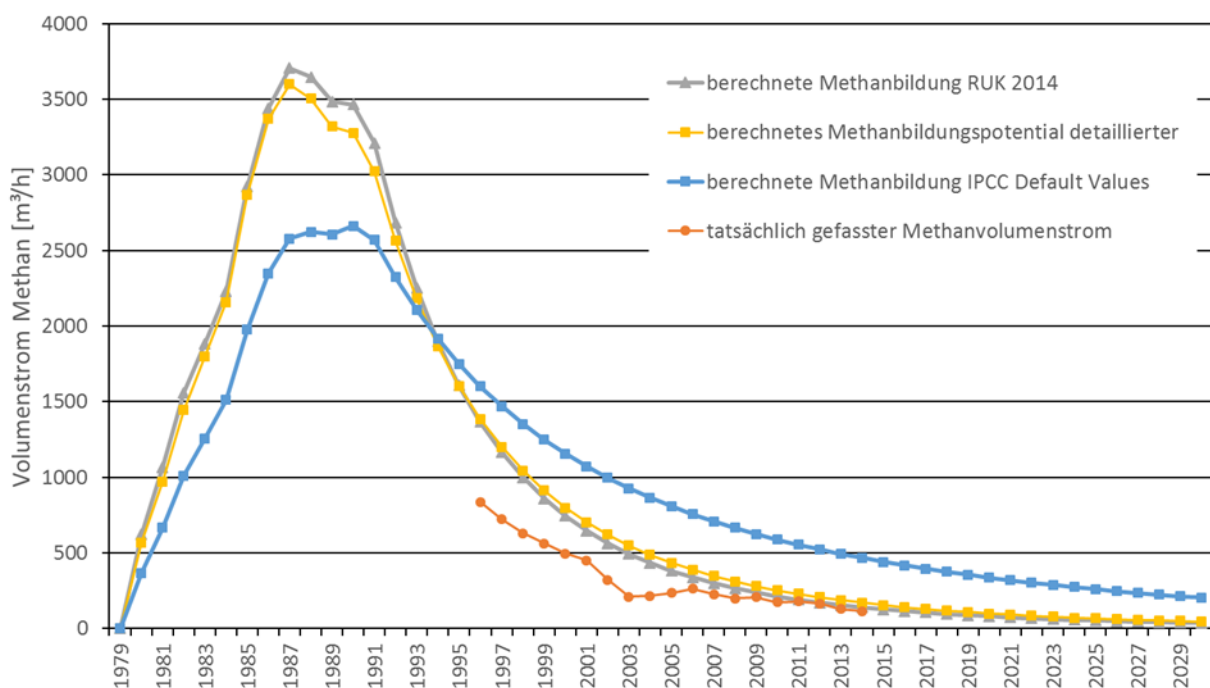
Gewerbeabfall Zusammensetzung	Sachverständigengutachten 2014	Detaillierterer Ansatz
Hausmüll	Annahme:	24 %
PPK	33 % Hausmüll	18 %
Holz	33 % Sperrmüll	7 %
Textilien		8 %

Zur Gegenüberstellung der Methanbildung bei unterschiedlichen Ansätzen sind in der Abbildung 3 die Methanbildung für die Jahre ab Ablagerungsbeginn und in der Abbildung 4 die Methanbildung für die Jahre ab 2010 dargestellt. Zudem ist der tatsächlich gefasste Methanvolumenstrom gegenübergestellt.

In der Abbildung 5 ist die mit dem angepassten Prognosemodell (Ansatz: „detaillierter“) berechnete Methanbildung dem tatsächlich gefassten Methanvolumenstrom und der Methanbildung bei Ansatz der IPCC default values gegenübergestellt.

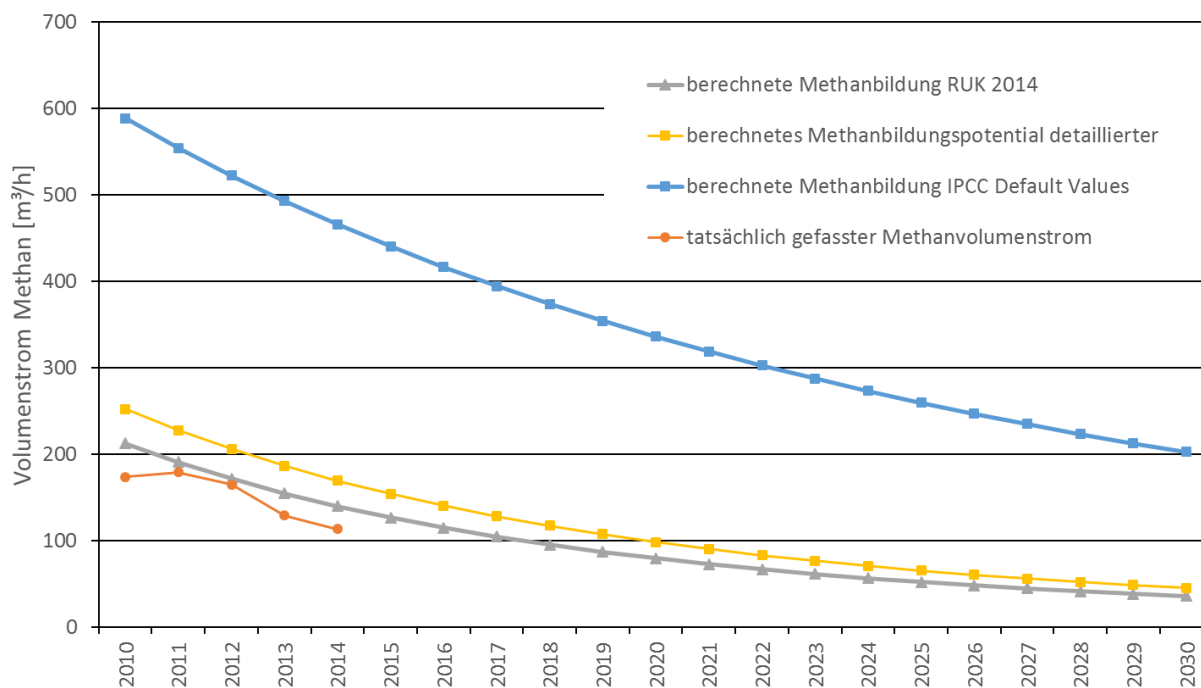
Die Balken im Diagramm zeigen den Anteil des tatsächlich gefassten Methanvolumenstroms an dem mit dem angepassten Prognosemodell prognostizierten Methanvolumenstrom.

Abbildung 3: Methanbildung bei Deponie ER seit Ablagerungsbeginn



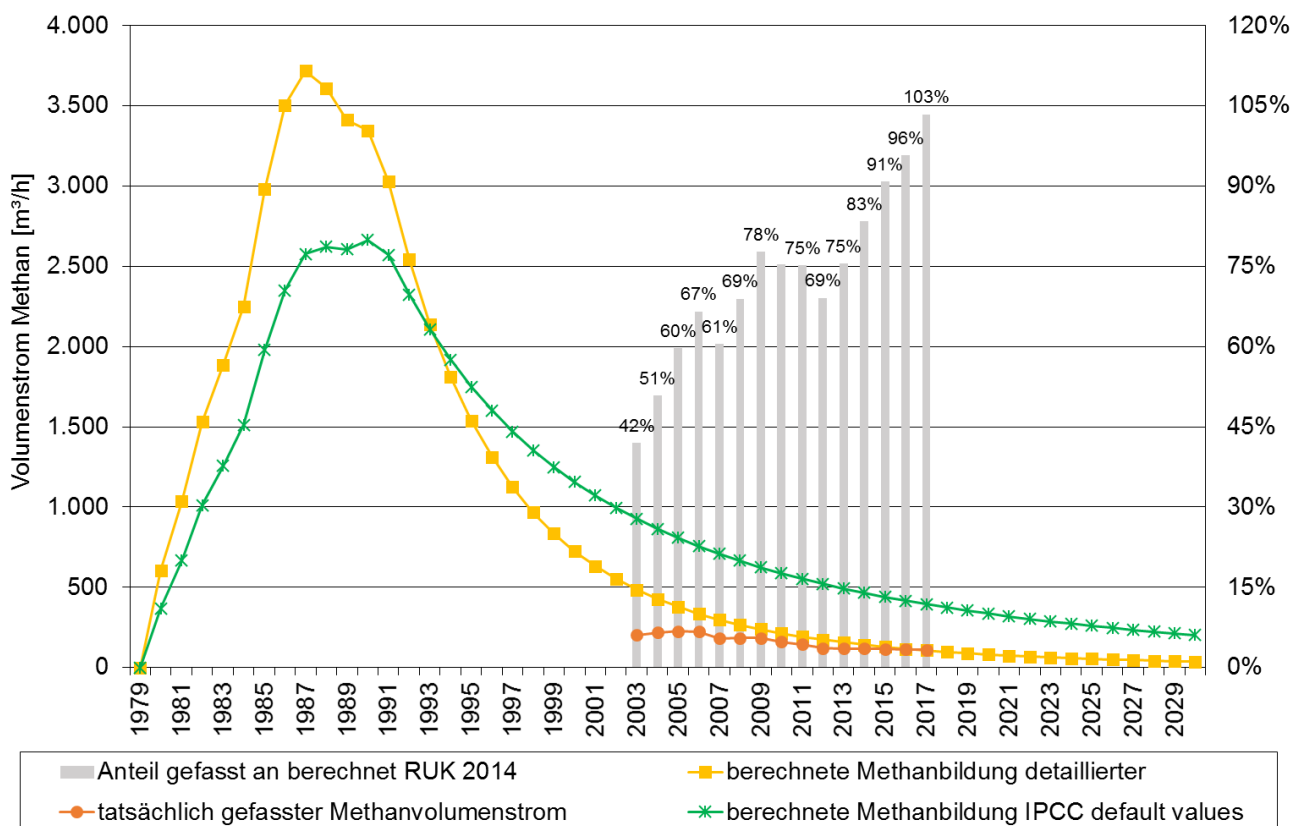
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 4: Methanbildung bei Deponie ER seit dem Jahr 2010



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

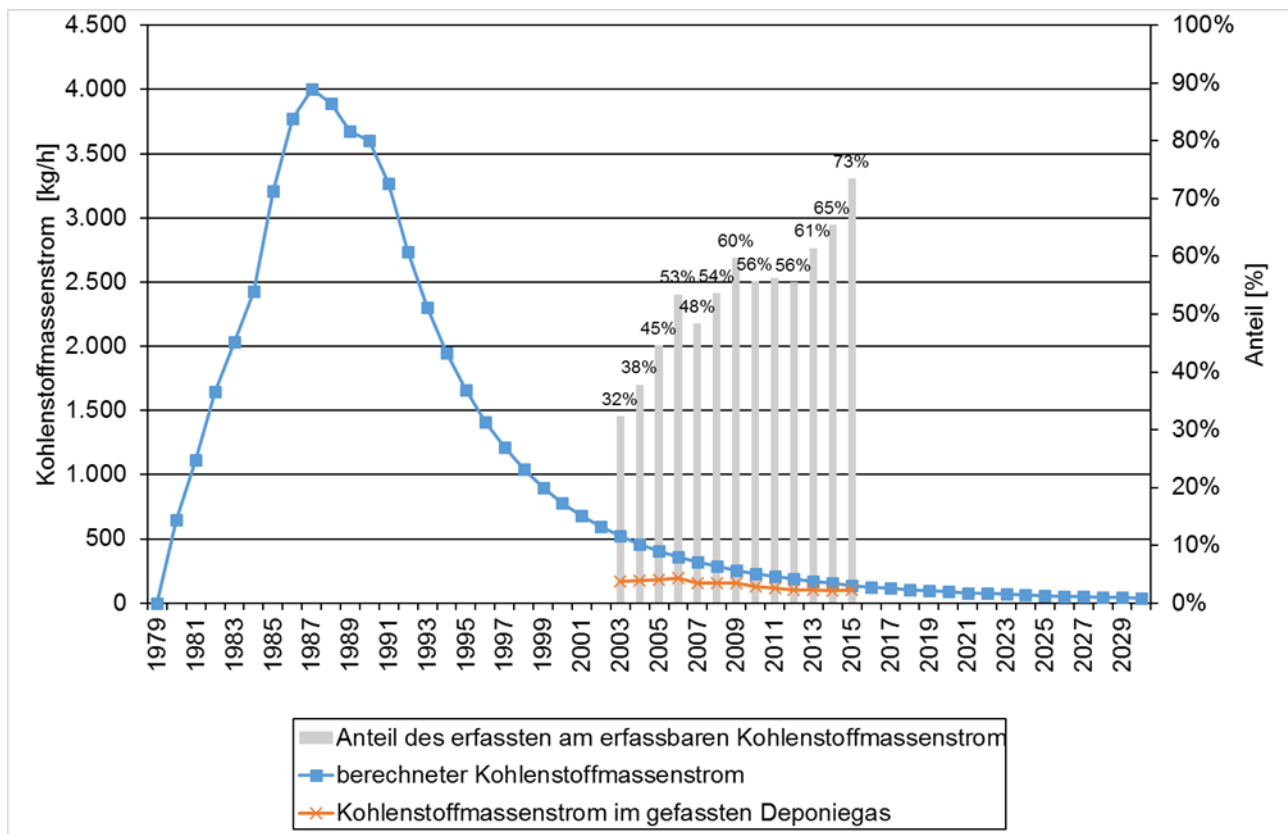
Abbildung 5: Gegenüberstellung des prognostizierten und des gefassten Methanvolumenstroms bei Deponie ER



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Die Abbildung 6 zeigt den mit dem angepassten Prognosemodell (Ansatz: „detaillierter“) berechneten Jahresmittelwert für den mit dem Deponiegas stündlich ausgetragenen Kohlenstoffmassenstrom. Gegenübergestellt ist der mit dem Entgasungssystem tatsächlich gefasste Kohlenstoffmassenstrom. Die Balken im Diagramm zeigen den Anteil des tatsächlich gefassten am prognostizierten Kohlenstoffmassenstrom.

Abbildung 6: Mit dem Deponiegas ausgetragener Kohlenstoffmassenstrom bei Deponie ER



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

5.4.3 Deponien mit Einschränkungen der Gaserfassung

Es werden beispielhaft drei von einunddreißig Deponien ohne Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung vorgestellt. Alle Deponien ohne Bedingungen zur vollständigen Gaserfassung sind in der Anlage 1 dargestellt.

Für die Deponien erfolgt hier und in Anlage 1 eine vorläufige Betrachtung mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten (RUK, 2014). Eine genauere Bewertung erfolgt dann für ausgewählte Deponiestandorte in der Parameterstudie sowie für alle Deponien AR bis UR durch Darstellung der Ergebnisse bei Ansatz des ausgewählten Parametersatzes in Kapitel 8 und in der Anlage 2.

Die Einschränkungen der Gaserfassung haben hauptsächlich folgende Gründe:

- ▶ Bei den Deponien AR, BR, FR, HR, JR, KR, MR, PR, QR, RR und SR sind bezüglich dem vorhandenen Entgasungssystem und der vorhandenen Art der Oberflächenabdichtung eigentlich Bedingungen zur nahezu vollständigen Gaserfassung gegeben. Wesentlicher Grund, dass dennoch keine vollständige Gasfaserfassung erfolgt, ist dort die Auslegung der Gasverwertung, welche

entweder durch eine vorgegebene Mindestmethankonzentration und / oder durch einen begrenzten Durchsatz das limitierende Element darstellt.

- ▶ Bei den Deponien DR, GR und MR sowie den Deponien AI – QI² erlaubt das technische System der Gaserfassung keine vollständige Erfassung des gesamten produzierten Deponiegases. Dies liegt teilweise an einer zu geringen Anzahl an Gasbrunnen bezogen auf die Fläche und das Volumen des Deponiekörpers, teilweise an deren technischem Zustand und der damit verbundenen beschränkten Funktion (z.B. Alterung des Materials, Zerstörung durch Abscherung, Inkrustationen etc.).
- ▶ Qualifiziert erstellte Oberflächenabdichtungen sollten praktisch gasdicht sein. Jedoch sind insbesondere nach längerer Standzeit teilweise Störstellen insbesondere an Durchdringungen und / oder am Deponierand vorhanden. Ferner sind zahlreiche qualifiziert an der Oberfläche abgedichtete Deponien nicht komplett mit einem System nach Deponieverordnung oder gleichwertig abgedichtet, beispielsweise weil zum Zeitpunkt des Aufbringens der qualifiziert erstellten Oberflächenabdichtung Böschungsbereich bereits seit längerer Zeit rekultiviert waren und eine Vegetation bestand, für welche ein Bestandsschutz festgelegt worden ist. Aus diesem Grund weisen die meisten deutschen Deponien, insbesondere wenn diese bei entsprechend hohem Saugdruck entgast werden, eine gewisse Gasdurchlässigkeit auf. Im Fall der aktiven Entgasung führt dies zu einem Lufteintrag in den Deponiekörper. In nicht aktiv entgasten Deponiebereichen kann dies auch unkontrollierte Emissionen über die Deponieoberfläche zur Folge haben, z.B. infolge von Gasaustauschprozessen aufgrund von Luftdruckschwankungen. Der Gasabsaugbetrieb mit einer Übersaugung einerseits, einer Nichtabsaugung größerer Deponiebereiche andererseits kann diese Effekte noch verstärken.

5.4.3.1 Deponie AR

Bei Deponie AR erfolgt eine motorische Verwertung mit Begrenzung des mindestens im Deponiegas für die Verwertung erforderlichen Methangehalts. Dies führt dazu, dass trotz Bemühungen für eine Optimierung der Gaserfassung immer nur in etwa der gleiche Anteil des prognostizierten Gases erfasst werden kann.

Die wesentlichen Rahmendaten zur Beschreibung der Deponie AR sind in der Tabelle 14 und deren Deponieinventar in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 14: Deponiebeschreibung der Deponie AR

Deponieabschnitt(e)	Altteil	Neuteil
Deponieform	Grube/Halde	Halde
Ablagerungsbeginn	1965	n. b.
Ablagerungsende	1992	2005
Fläche [ha]	23,6	10,5
Verfüllvolumen [m ³]	6,4 Mio.	2,7 Mio.
Ablagerungsmasse [Mg]	5,0 Mio.(ohne die Jahre vor 1972)	
Oberflächenabdichtung /	Endgültig (1996):	Temporär (1999):

² Bei allen anonymisierten Deponiestandorten, die mit einem „I“ als 2. Buchstaben versehen wurden, wurden Abfallfeststoffproben entnommen, von denen in Laboruntersuchungen der biologisch abbaubare Kohlenstoffanteil und das daraus ableitbare Deponiegaspotenzial ermittelt wurden.

Deponieabschnitt(e)	Altteil	Neuteil
-abdeckung (Jahr des Aufbringens)	mineralische Dichtungsschicht aus Lehm	OAD aus verschweißter PEHD- Folie
Basisabdichtung	Keine Basisabdichtung, aber hoher Grundwasserspiegel	
Entgasungssystem (Jahr Beginn Absaugung)	84 vertikale und sechs horizon- tale Gaskollektoren (1996)	14 horizontale Gaskollektoren (1996)
Gasbrunnen (GB) je Hektar	3,8 GB/ha	1,3 GB/ha

Tabelle 15: Deponieinventar der Deponie AR in Mg

Ablagerungsjahr	Hausmüll	Gewerbe- abfall	Sperrmüll, Klärschlamm, Rechengut	Garten- abfälle	Deponie- baumaterial
1972	65.000	17.000	4.500		
1973	65.000	17.000	4.500		
1974	65.000	17.000	4.500		
1975	65.000	17.000	4.500		
1976	65.000	17.000	4.500		
1977	65.000	17.000	4.500		
1978	65.000	17.000	4.500		
1979	66.183	17.100	4.660	3.750	119.560
1980	63.362	25.632	4.164	3.585	120.568
1981	63.102	20.600	3.800	3.600	112.700
1982	63.141	24.800	4.120	3.600	103.740
1983	65.572	28.360	4.885	7.860	63.420
1984	62.634	38.740	20.840	3.615	186.200
1985	67.548	42.640	13.865	3.630	146.580
1986	67.834	50.780	22.745	4.155	139.860
1987	68.302	55.460	19.410	4.395	171.500
1988	74.425	70.400	26.325	4.800	203.000
1989	69.758	72.740	22.250	5.760	214.480
1990	70.233	72.962	24.455	5.618	162.764
1991	63.183	61.742	28.388	7.343	148.225
1992	66.545	53.241	24.679	1.569	59.962
1993	62.064	44.691	37.279	0	38.488
1994	29.112	19.824	7.859	841	29.986
1995	1	11.206	2.159	5.367	22.896
1996	16.326	2.871	3.281	301	16.042
1997	4.930	1.978	970	310	20.274
1998	1.357	2.181	121	0	33.382
1999	1.754	747	1.521	0	46.563
2000	0	607	96	0	23.144
2001	0	1.419	0	0	20.314
2002	782	1.117	68	0	44.442
2003	754	1.562	85	0	29.421

Ablagerungsjahr	Hausmüll	Gewerbeabfall	Sperrmüll, Klärschlamm, Rechengut	Gartenabfälle	Deponiebaumaterial
2004	0	1.321	32	0	19.826
2005	1.771	1.633	357	0	41.633

Rahmenbedingungen:

- ▶ Ab dem Jahr 1979 erfolgte eine Verwiegung der angelieferten Abfälle, die vorher aufgelisteten Mengen sind Schätzwerte, die aus dem Volumenzuwachs der Deponie abgeleitet wurden. Die vor dem Jahr 1972 abgelagerten Mengen sind in die Werte ab 1972 eingerechnet bzw. tragen durch die Lage unter dem Grundwasserspiegel nicht zur Gasbildung bei.
- ▶ Der Rückgang ab dem Jahr 1994 beruht auf der Inbetriebnahme einer thermischen Verwertungsanlage für die Abfälle.

Ansätze zur Abfallzusammensetzung:

- ▶ Bei der Abfallfraktion „Sperrmüll, Klärschlamm, Rechengut“ ist angesetzt, dass jeweils ein Drittel der Menge aus Sperrmüll, ein Drittel der Menge aus Klärschlamm und ein Drittel der Menge aus Rechengut besteht.
- ▶ Für „Deponiebaumaterial“ ist angesetzt, dass dieses zu 100 % aus Inertmaterial besteht.
- ▶ Der Anteil des deponierten Gewerbeabfalls macht circa 17 % am Deponieinventar aus und ist in der Tabelle 16 zu sehen.

Tabelle 16: Gewerbeabfallzusammensetzung der Deponie AR

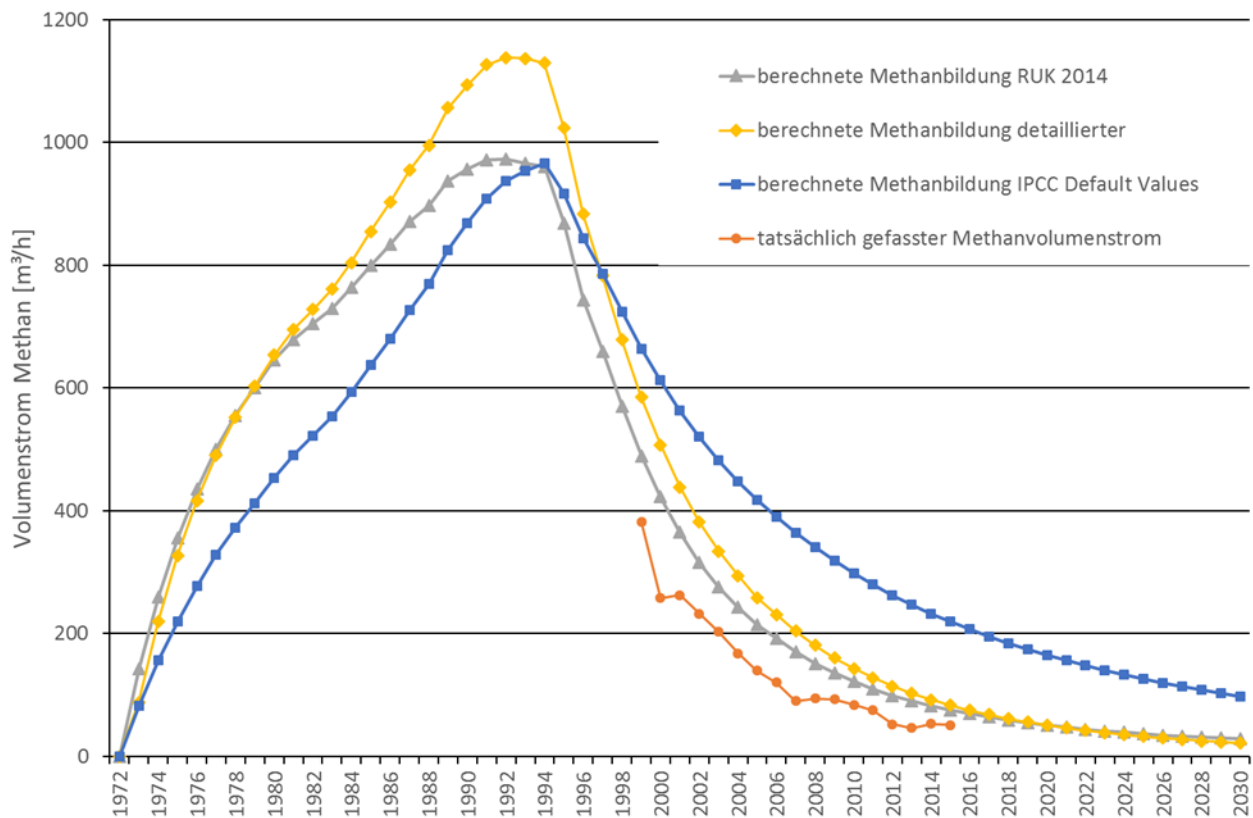
Gewerbeabfall Zusammensetzung	Sachverständigengutachten 2014	Detaillierterer Ansatz
Hausmüll	Annahme: Zusammensetzung wie Sperrmüll	11 %
PPK		16 %
Holz		9 %
Textilien		bis 1977: 22 % ab 1978: 17 % ab 1985: 11 %

Zur Gegenüberstellung der Methanbildung bei unterschiedlichen Ansätzen sind in der Abbildung 7 die Methanbildung für die Jahre ab Ablagerungsbeginn und in der Abbildung 8 die Methanbildung für die Jahre ab 2010 dargestellt. Zudem ist der tatsächlich gefasste Methanvolumenstrom gegenübergestellt.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Daten zum gefassten Methanvolumenstrom ist in der Abbildung 9 die mit dem angepassten Prognosemodell (Ansatz: „detaillierter“) berechnete Methanbildung dem tatsächlich gefassten Methanvolumenstrom und der Methanbildung bei Ansatz der IPCC default values gegenübergestellt.

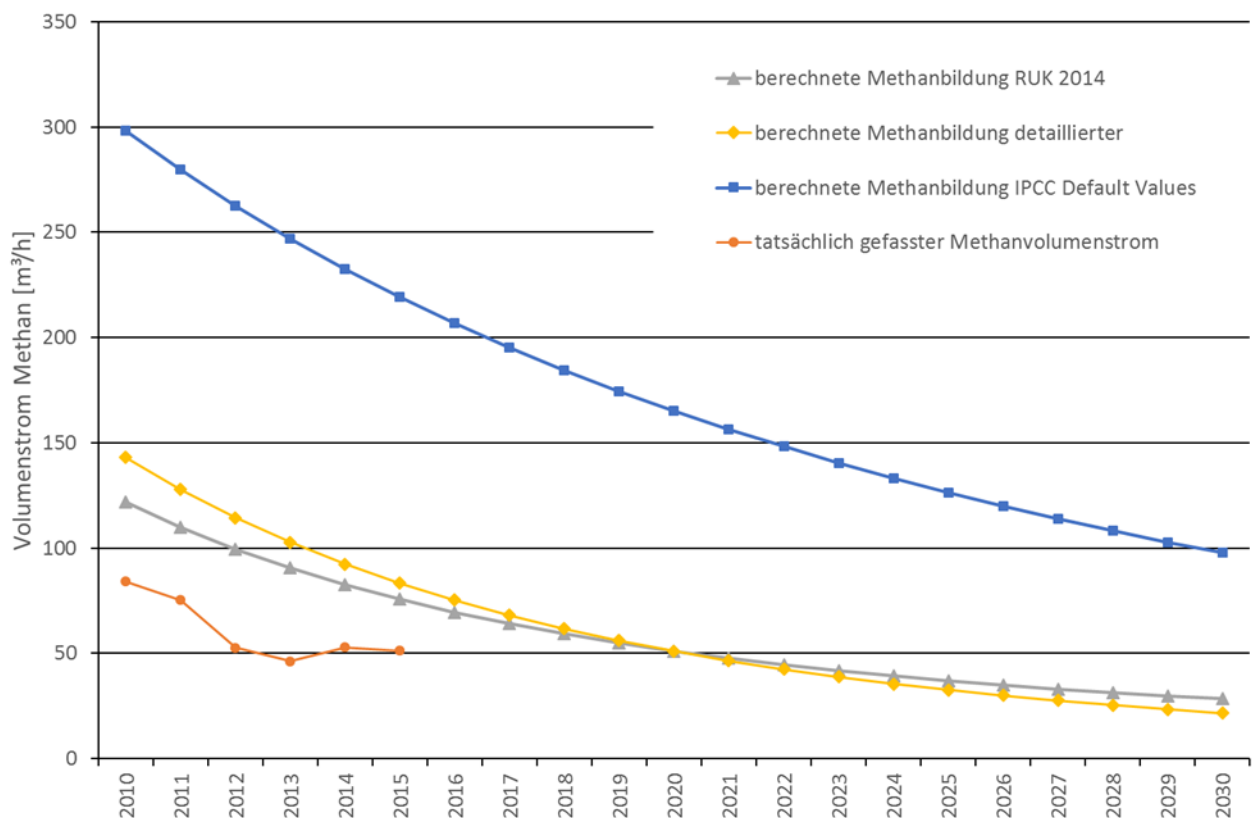
Die Balken im Diagramm zeigen den Anteil des tatsächlich gefassten Methanvolumenstroms an dem mit dem angepassten Prognosemodell prognostizierten Methanvolumenstrom.

Abbildung 7: Methanbildung bei Deponie AR seit Ablagerungsbeginn



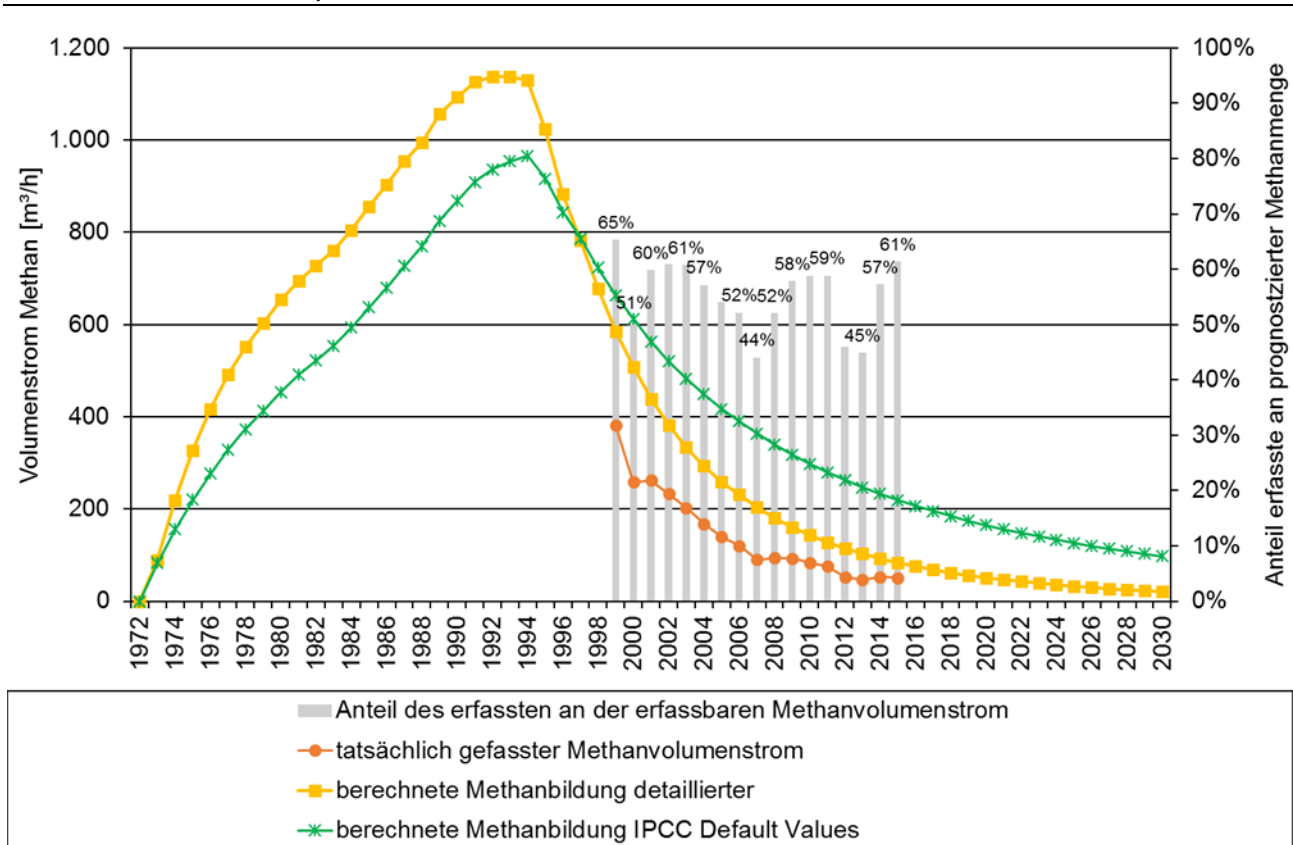
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 8: Methanbildung bei Deponie AR seit dem Jahr 2010



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 9: Gegenüberstellung des prognostizierten und des gefassten Methanvolumenstroms bei Deponie AR



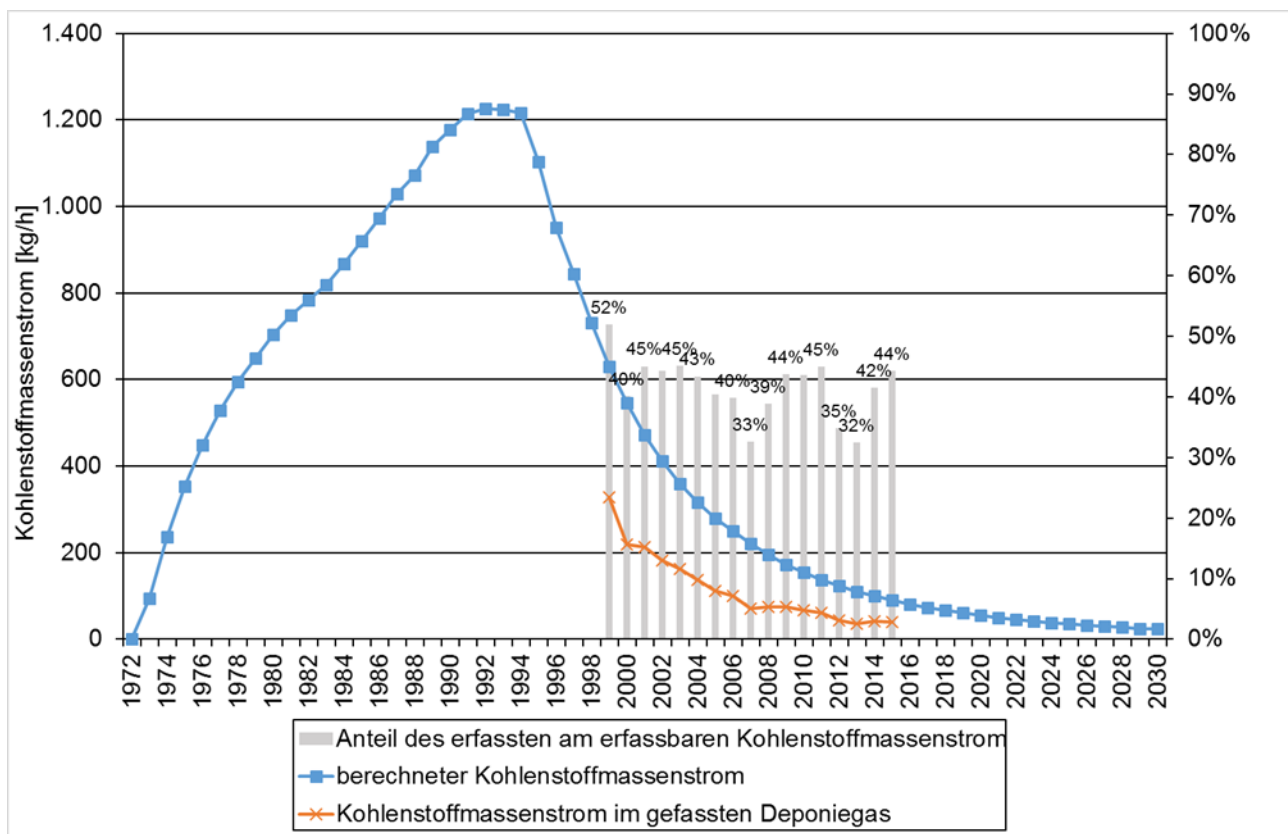
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Die Abbildung 10 zeigt den mit dem angepassten Prognosemodell (Ansatz: „detaillierter“) berechneten Jahresmittelwert für den mit dem Deponiegas stündlich ausgetragenen Kohlenstoffmassenstrom. Gegenübergestellt ist der mit dem Entgasungssystem tatsächlich gefasste Kohlenstoffmassenstrom. Die Balken im Diagramm zeigen den Anteil des tatsächlich gefassten am prognostizierten Kohlenstoffmassenstrom.

Der Anteil des tatsächlich gefassten am prognostizierten Kohlenstoffmassenstrom (Abbildung 10) ist in allen Jahren geringer als der Anteil des tatsächlich gefassten Methanvolumenstroms an dem mit dem angepassten Prognosemodell prognostizierten Methanvolumenstrom (Abbildung 9).

Ursache hierfür ist der in der Prognose der Methanbildung unverändert von IPCC übernommene Ansatz einer Methankonzentration im Deponiegas von 50 Vol.-%. Im tatsächlich gefassten Gas ist nach Abzug der Außenluftanteile die Methankonzentration höher.

Abbildung 10: Mit dem Deponiegas ausgetragener Kohlenstoff bei Deponie AR



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

5.4.3.2 Deponie LI

Die Deponie LI wird seit 1971 betrieben. Im Juni 2004 endete die Ablagerung von Siedlungsabfällen mit biogenen Anteilen. Seitdem werden nur noch mineralische Abfälle abgelagert bzw. zur Herstellung der Endkubatur verwertet. Die beiden Hauptverfüllabschnitte sind 2003 mit einer temporären Abdeckung versehen und zum Teil begrünt worden und befinden sich in der Stilllegungsphase. Die Ablagerungsfläche umfasst 17,1 ha, wovon bis auf einen Altbereich alle Bauabschnitte mit einer Basisabdichtung ausgestattet sind.

Die erfasste Deponiegasbildung ist in den letzten Jahren insgesamt rückläufig. Derzeit erfolgt noch eine Gasverwertung über ein BHKW.

Die Entsorgungsregion ist hauptsächlich ländlich geprägt, zudem wurden die Abfälle von einigen Städten kleinerer und mittlerer Größe abgelagert.

Ansätze zur Abfallzusammensetzung:

- Über die Ausgangszusammensetzung der abgelagerten Abfallfraktionen liegen seit 1994 relativ gesicherte Angaben vor. Für den Zeitraum 1971 – 1993 gibt es nur abgeschätzte Gesamtsummen der abgelagerten Abfallfraktionen.
- Es wurden nicht alle Abfallfraktionen dokumentiert, so musste der Anteil der Sperrmüllablagerungen aus den abgelagerten Hausmüll- und hausmüllähnlichen Gewerbeabfallmassen abgeleitet werden, um den Anteil an Holz gegenüber leicht abbaubarer Organik im Hausmüll nicht zu verfälschen.
- Nach 2005 wurden nur noch mineralische Abfälle zum Wegebau und zur Profilierung abgelagert.

- ▶ Bei den Abfallfraktionen „Hausmüll“ und „Gewerbeabfälle“ wurden auch hier die NIR-Ansätze zur Abfallzusammensetzung des Hausmülls, Sperrmülls und hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls gemäß der Auswertung des Ökoinstituts herangezogen.
- ▶ Der Anteil an Abfallfraktionen mit biologisch abbaubaren Bestandteilen beträgt bei der Deponie LI etwa 44% der deponierten Gesamtmasse.

Tabelle 17: Deponiebeschreibung der Deponie LI

Deponieabschnitt(e)	
Deponieform	Halde
Ablagerungsbeginn	1971
Ablagerungsende	2004, danach nur noch mineralische Abfälle zur Profilierung
Fläche [ha]	17,1
Verfüllvolumen [m ³]	2,5 Mio.
Ablagerungsmasse [Mg]	2,6 Mio.
Oberflächenabdichtung / -abdeckung (Jahr des Aufbringens)	- temporäre Bodenabdeckung im Plateaubereich und Teilen des Böschungsbereichs - älterer Deponiebereich: Verbundmatte aus PP-Trägervlies mit 0,3 mm PE-Beschichtung im Plateaubereich und Teilen des Böschungsbereichs seit 2003
Basisabdichtung	- im Altbereich ohne Basisabdichtung - im jüngeren Bereich mit 2 mm Kunststoffdichtungsbahn - im jüngsten Bereich mineralische Abdichtung + KDB
Entgasungssystem (Jahr Beginn Absaugung)	56 Gasbrunnen, davon einige nur eingeschränkt funktionstüchtig (1990)
Gasbrunnen (GB) je Hektar	3,3 GB/ha
Anzahl Abfallfeststoffproben (Jahr der Beprobung)	27 (2014)

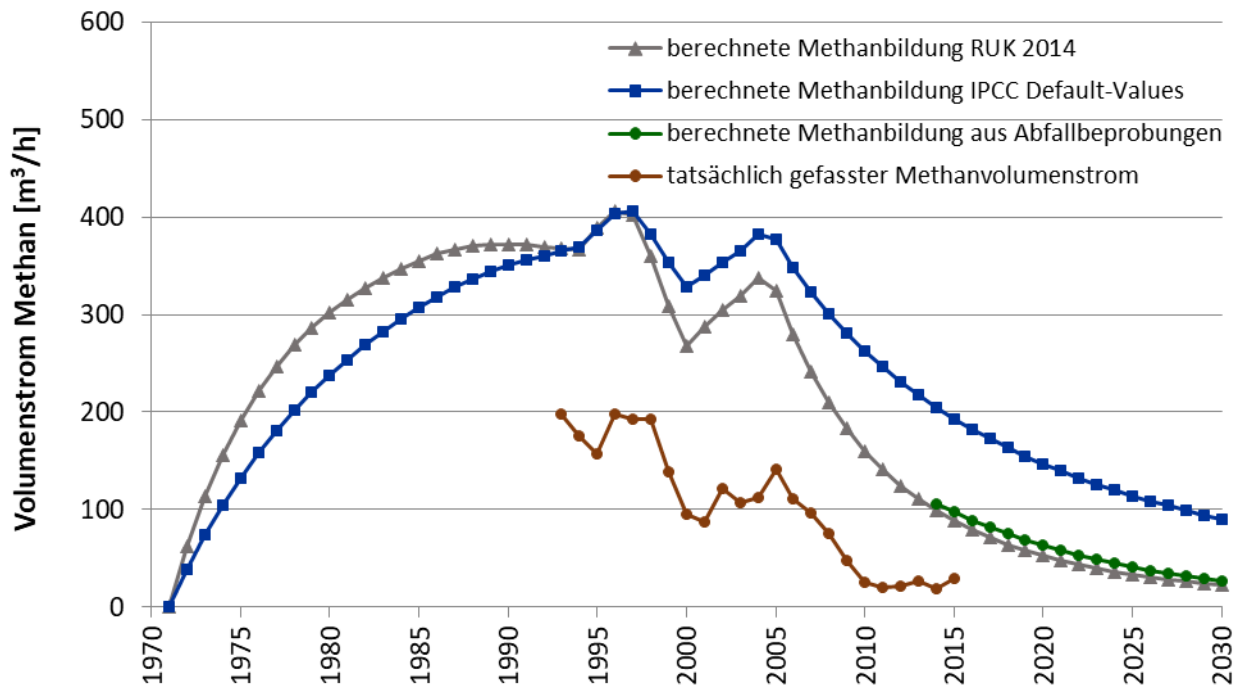
Gegenüberstellung der Methanbildung bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen:

- ▶ Die Berechnung der Methanbildung mit den NIR/IPCC-Default-Werten ergibt für das Jahr 2014, in dem die Abfallfeststoffproben aus der Deponie entnommen wurden, die höchste verbleibende Methanbildung von 205 m³ CH₄/h.
- ▶ Mit den angepassten Parameterwerten des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014) erfolgt eine Berechnung der Methanbildung im Jahr 2014 zu 99 m³ CH₄/h.
- ▶ Aus den Abfallfeststoffuntersuchungen von 2014 ergibt sich ein durchschnittliches Methanbildungspotenzial von 6,2 m³ CH₄/Mg TM, was bei einer durchschnittlichen Halbwertszeit über alle organikhaltigen Fraktionen in diesem Zeitraum von ca. 8 Jahren im Jahr 2014 eine Methanbildung von 106 m³ CH₄/h zur Folge hat. Größenordnung und Verlauf der Methanbildung sind bei diesem Deponiestandort wie bei vielen der derart untersuchten Deponiestandorte sehr ähnlich zur Methanprognose mit den Parameteransätzen des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014).
- ▶ Der Gaserfassungsgrad im aktuellen Zeitraum 2014 – 2015 ist bei Methanabsaugraten von 20 – 30 m³ CH₄/h offensichtlich gering.

Tabelle 18: Deponieinventar der Deponie LI in Mg

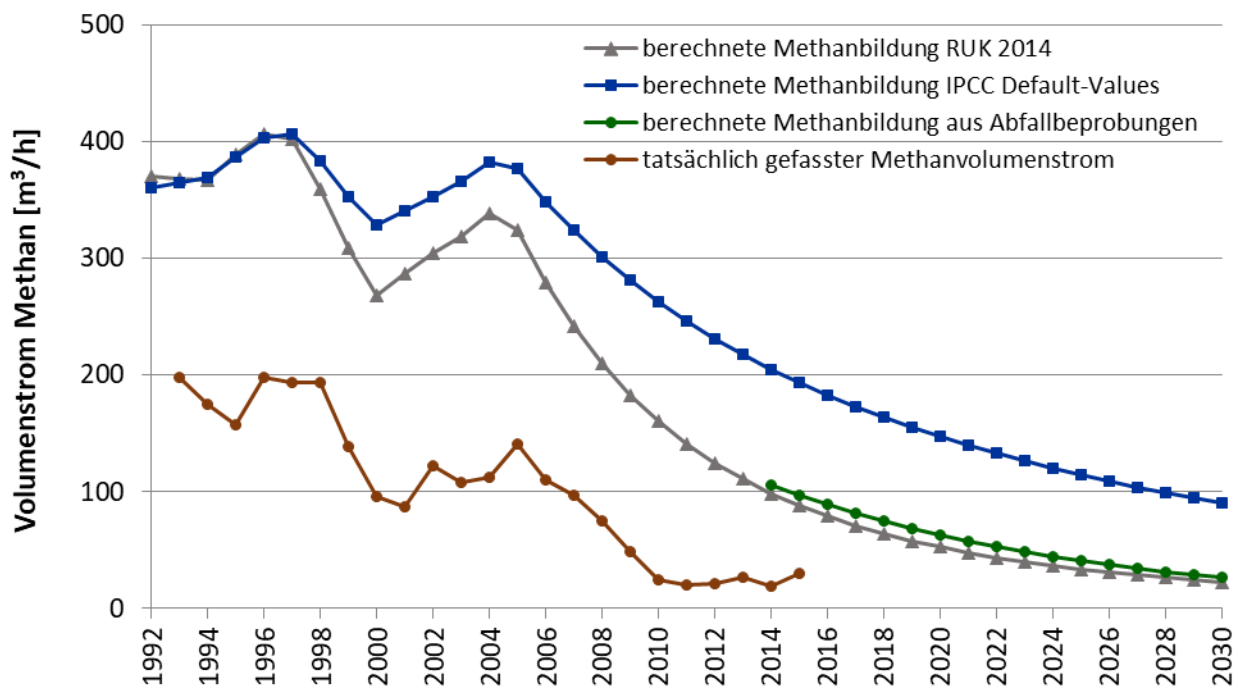
Ablagerungs- jahr	Hausmüll	Sperrmüll	Gewerbe- abfall	Schlämme	Straßen- kehrricht	Min. Abfälle
1971 - 1993	474.784	146.385	354.729	29.236		694.868
1994	31.999	8.782	17.765	1.898		15.930
1995	31.375	9.150	20.474	1.114		32.273
1996	25.082	6.694	12.853	1.421		10.783
1997	9.950	1.914	895	57		4.541
1998	0	167	944	10		1.113
1999	671	466	1.970	290		3.977
2000	25.354	7.248	15.718	1.000		17.577
2001	22.763	8.092	23.091	801		48.479
2002	23.167	8.250	23.584	1.868		64.432
2003	24.709	9.381	28.448	3.553		86.385
2004	15.310	5.124	13.726	339		66.187
2005				98		29.943
2006				65		30.761
2007				63		20.016
2008				7		4.466
2009						2.800
2010						2.243
2011						2.095
2012						248

Abbildung 11: Methanbildung der Deponie LI seit Ablagerungsbeginn



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Abbildung 12: Ausschnitt zur Methanbildung der Deponie LI seit dem Jahr 1992



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

5.4.3.3 Deponie MI

Die Deponie MI ist eine Großdeponie für einen großstädtischen Ballungsraum, die seit 1970 betrieben und seit 2005 nur noch mit mineralischen Abfällen der Deponieklasse II verfüllt wird. Der ältere Deponiebereich wurde überwiegend mit organikhaltigen und relativ geringen Anteilen mineralischer Abfälle verfüllt und temporär abgedeckt. Der jüngere Deponiebereich wurde ebenfalls bis 1998 mit Hausmüll und anderen organikhaltigen Fraktionen verfüllt und danach mit unterschiedlichen Reststoffen mit reduziertem Organikgehalt. Seit 2005 erfolgt im Neubereich die Überlagerung der organikhaltigen Abfälle mit ausschließlich mineralischen Abfällen. Aufgrund der Größe des Deponiestandorts, der bereichsweise getrennten Deponiegaserfassung und des Umstands, dass aus beiden Deponiebereichen eine größere Anzahl an Abfallfeststoffproben entnommen werden konnte, werden der ältere (MI Altbereich) und der jüngere Deponiebereich (MI Neubereich) getrennt ausgewertet.

Tabelle 19: Deponiebeschreibung der Deponie MI

Deponieabschnitt(e)	Altbereich	Neubereich
Deponieform	Grube	Grube
Ablagerungsbeginn	1970	1995
Ablagerungsende	1998	-
Fläche [ha]	52	46
Verfüllvolumen [m ³]	13,9 Mio.	13,1 Mio.
Ablagerungsmasse [Mg]	20,9 Mio.	16,2 Mio.
Oberflächenabdichtung / -abdeckung (Jahr des Aufbringens)	Temporäre Oberflächenabdeckung mit Kunststoffdichtungsfolie seit 1995	Offene Ablagerungsfläche, z.T. Bodenabdeckung im Böschungsbereich
Basisabdichtung	Keine Basisabdichtung, aber Dränschicht und mächtige Ton-schicht	
Entgasungssystem (Jahr Beginn Absaugung)	133 vertikale Gasbrunnen und drei horizontale Randdrainagen (1996)	141 vertikale Gasbrunnen und vier horizontale Randdrainagen (1996)
Gasbrunnen (GB) je Hektar	2,6 GB/ha	3,1 GB/ha
Anzahl Abfallfeststoffproben (Jahr der Beprobung)	20 + 35 (2014 + 2015)	39 (2016)

Ansätze zur Abfallzusammensetzung für den Alt- und Neubereich:

- Über die Mengen und die Ausgangszusammensetzung der abgelagerten Abfallfraktionen liegen von 1971 – 1976 Schätzungen vor, danach werden die Mengen genauer dokumentiert.
- Seit 1980 gibt es differenziertere Angaben, es wurden jedoch nicht alle Abfallfraktionen dokumentiert, so musste der Anteil der Sperrmüllablagerungen aus der als „Siedlungsabfall“ bezeichneten Fraktion anteilig abgeschätzt werden.
- Seit 2005 werden nur noch mineralische Abfälle abgelagert.
- Bei den Abfallfraktionen „Hausmüll“ und „Gewerbeabfälle“ wurden auch hier die NIR-Ansätze zur Abfallzusammensetzung des Hausmülls, Sperrmülls und hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls gemäß der Auswertung des Ökoinstituts herangezogen.
- Der Anteil an Abfallfraktionen mit biologisch abbaubaren Bestandteilen beträgt bei der Deponie MI im Altbereich etwa 70% der deponierten Gesamtmasse, während dieser Anteil im Neubereich nur noch bei 37% liegt.

Tabelle 20: Deponieinventar der Deponie MI in Mg

Ablage- rungs- jahr	Hausmüll	Sperrmüll	Gewerbe- abfall	Baustel- lenabfall	Schlämme	Straßen- kehrricht	Min. Abfälle
1971	160.000	60.000	100.000				80.000
1972	160.000	60.000	100.000				80.000
1973	160.000	60.000	100.000				80.000
1974	200.000	75.000	125.000				100.000
1975	240.000	90.000	150.000				120.000
1976	280.000	105.000	175.000				140.000
1977	322.376	120.891	201.485				161.188
1978	340.000	127.500	212.500				170.000
1979	357.828	134.186	223.643				178.914
1980	374.409	140.403	234.006		104.003		187.205
1981	401.998	150.749	251.249		111.666		200.999
1982	410.856	154.071	256.785		114.127		205.428
1983	599.342	149.836	249.726		110.989		98.839
1984	601.808	150.452	250.754		111.446		54.566
1985	612.677	153.169	255.282		113.459		39.702
1986	561.958	140.489	234.149		104.066		115.723
1987	527.525	131.881	219.802		97.690		154.067
1988	488.570	122.143	203.571		90.476		144.358
1989	482.662	120.665	201.109		89.382		178.515
1990	487.226	121.807	203.011		90.227		146.500
1991	387.707	96.927	242.317		80.772		175.701
1992	366.472	91.618	229.045		76.348		167.501
1993	325.855	81.464	203.659		67.886		185.782
1994	284.486	71.122	237.072				117.204
1995	169.823	42.456	192.062				43.739
1996	189.108	47.277	213.872				69.498
1997	116.829	29.207	132.128				70.304
1998	174.424	43.606	266.481				177.648
1999	284.926	71.231	435.303				701.985
2000	256.333	64.083	391.620				249.608
2001	238.824	59.706	497.550				286.594
2002	246.106	61.526	512.720				227.945
2003	266.977	66.744	556.201				279.531
2004	284.462	71.115	829.681				298.777
2005	146.555	36.639	427.453				210.228
2006							614.472
2007							644.351
2008							634.670
2009							366.977
2010							612.177

Ablage- rungs- jahr	Hausmüll	Sperrmüll	Gewerbe- abfall	Baustel- lenabfall	Schlämme	Straßen- kehrricht	Min. Abfälle
2011							528.523
2012							678.739

Gegenüberstellung der Methanbildung bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen.

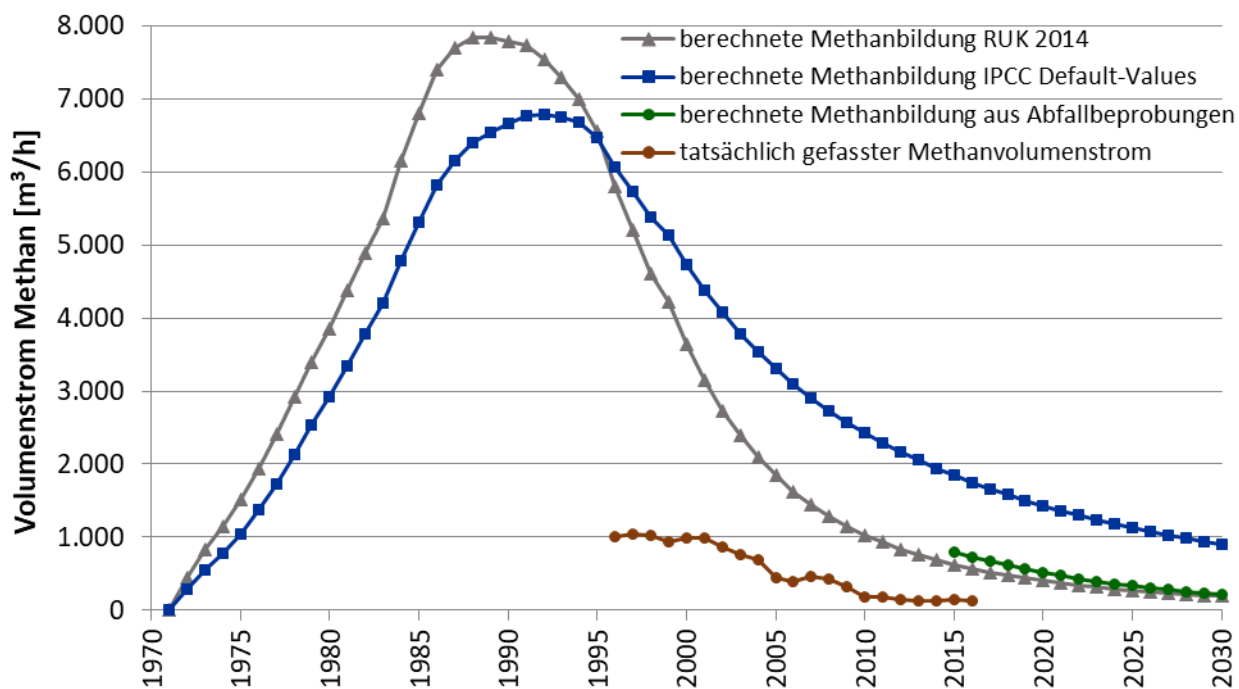
MI Altbereich:

- ▶ Die Berechnung der Methanbildung mit den NIR/IPCC-Default-Werten ergibt für den Zeitraum 2014 - 2015, in dem die Abfallfeststoffproben aus dem Altbereich der Deponie entnommen wurden, erneut die höchste verbleibende Methanbildung im Bereich von 1.800 – 2.000 m³ CH₄/h.
- ▶ Mit den angepassten Parameterwerten des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014) erfolgt eine Berechnung der Methanbildung für diesen Zeitraum zu 600 - 750 m³ CH₄/h.
- ▶ Aus den Abfallfeststoffuntersuchungen von 2014 - 2015 ergibt sich ein durchschnittliches Methanbildungspotenzial von 5,4 m³ CH₄/Mg TM, was bei einer durchschnittlichen Halbwertszeit in diesem Zeitraum von ca. 8 Jahren im Zeitraum 2014 - 2015 eine Methanbildung von 700 - 800 m³ CH₄/h zur Folge hat. Größenordnung und Verlauf der Methanbildung liegen damit etwas oberhalb der Methanprognoserechnung mit den Parameteransätzen des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014).
- ▶ Die Methanabsaugraten liegen 2014 – 2015 bei 130 – 150 m³ CH₄/h, was einen geringen Gaserfassungsgrad anzeigt. Dies kann auf zahlreiche nicht mehr funktionstüchtige Gasbrunnen im älteren Deponiebereich zurückgeführt werden. 2015 – 2017 erfolgen daher Ertüchtigungsmaßnahmen am Gasfassungssystem zur Steigerung des Gasfassungsgrads.

MI Neubereich:

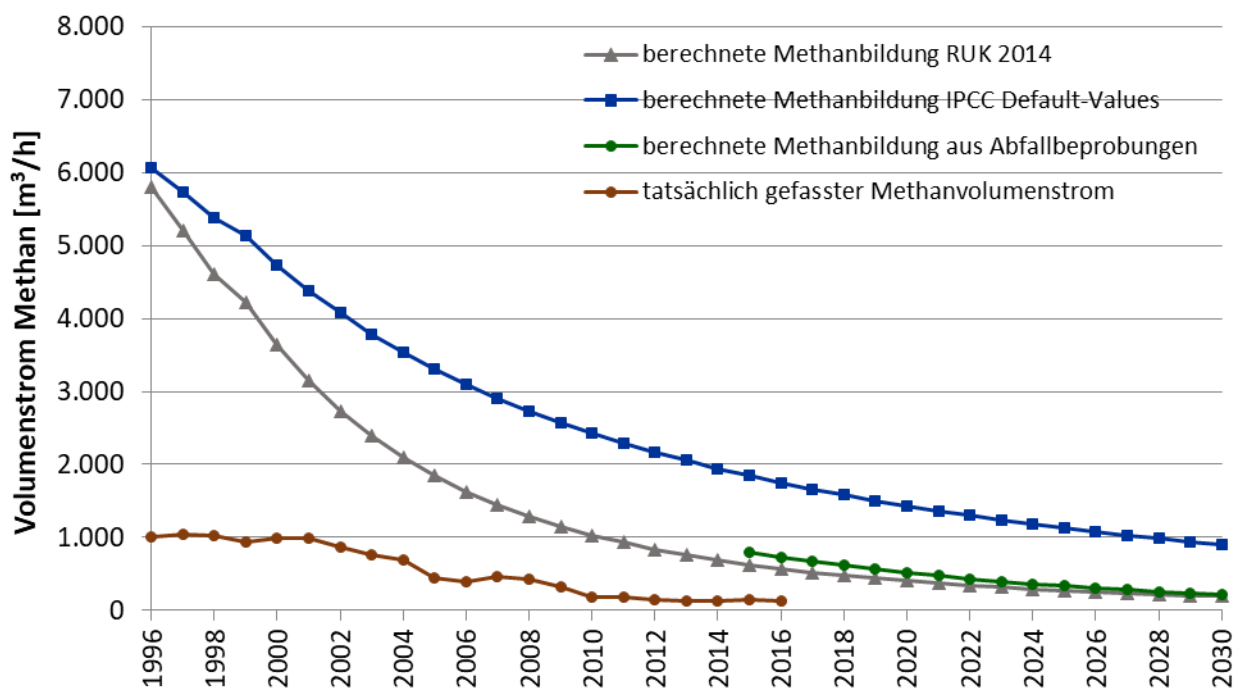
- ▶ Die Berechnung der Methanbildung mit den NIR/IPCC-Default-Werten ergibt für das Jahr 2016, in dem die Abfallfeststoffproben aus dem Neubereich der Deponie entnommen wurden, eine verbleibende Methanbildung von ca. 1.700 m³ CH₄/h.
- ▶ Mit den angepassten Parameterwerten des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014) erfolgt eine Berechnung der Methanbildung für 2016 zu 1.060 m³ CH₄/h.
- ▶ Aus den Abfallfeststoffuntersuchungen von 2016 ergibt sich ein durchschnittliches Methanbildungspotenzial von 10,3 m³ CH₄/Mg TM, was bei einer durchschnittlichen Halbwertszeit in diesem Zeitraum von ca. 6 Jahren für 2016 eine Methanbildung von ca. 810 m³ CH₄/h zur Folge hat. Größenordnung und Verlauf der Methanbildung liegen damit um ca. 20 % unterhalb der Methanprognoserechnung mit den Parameteransätzen des Sachverständigengutachtens (RUK, 2014).
- ▶ Die Methanabsaugrate liegt im Neubereich bei ca. 510 m³ CH₄/h, was im Vergleich zum Altbereich auf einen höheren Gaserfassungsgrad hinweist. Hier wirkt sich vermutlich aus, dass 2014 – 2016 bereits Maßnahmen zur Ertüchtigung des Gasfassungssystems umgesetzt wurden, die im Altbereich noch ausstehen.
- ▶ Der altersbedingte Unterschied des Gashaushalts wird anhand der Abfallfeststoffuntersuchungen in Verbindung mit dem Absaugbetrieb und den Gasprognoserechnungen deutlich:
 - Das durchschnittliche verbliebene Methanbildungspotenzial ist im Neubereich etwa doppelt so hoch wie im Altbereich.
 - Die Reaktionsgeschwindigkeit ist im Neubereich noch etwas höher, da die Abbaukinetik noch stärker von organikhaltigen Fraktionen, die eine kürzere Halbwertszeit aufweisen, geprägt wird.

Abbildung 13: Methanbildung der Deponie MI Altbereich seit Ablagerungsbeginn 1970



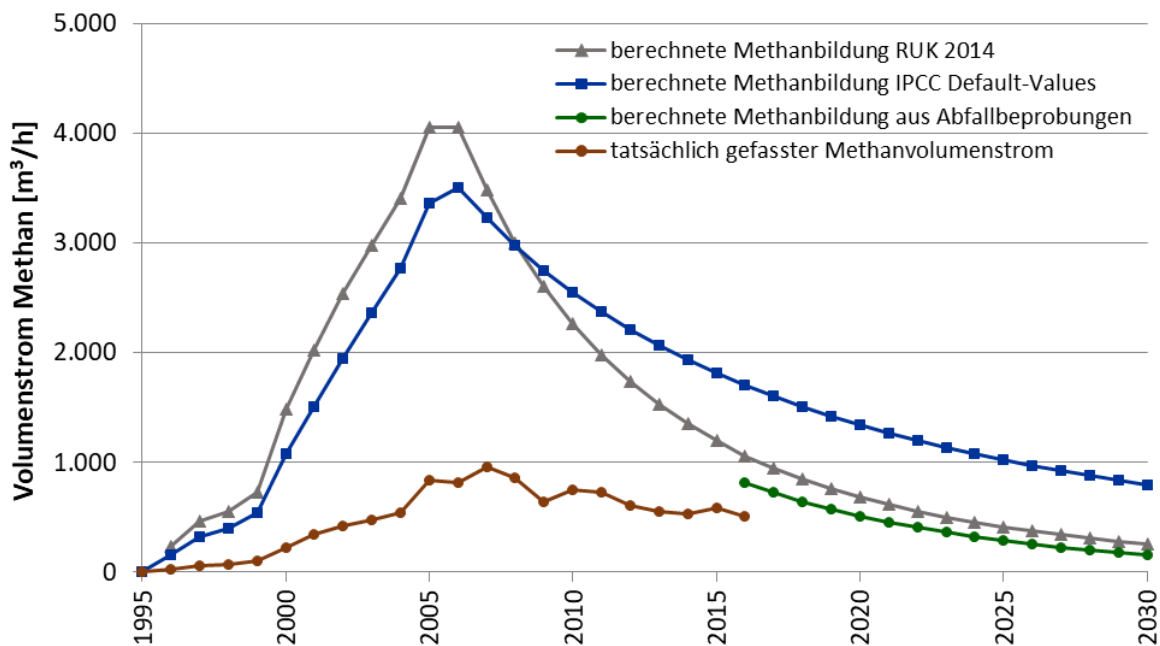
Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Abbildung 14: Ausschnitt zur Methanbildung der Deponie MI Altbereich seit dem Jahr 1996



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Abbildung 15: Methanbildung der Deponie MI Neubereich seit Ablagerungsbeginn 1995



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

5.4.4 Zusammenfassender Vergleich der Methanbildung und -erfassung bei Deponien mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdichtung

Insgesamt wurden 38 Deponien untersucht. In den folgenden beiden Tabellen sind zunächst die von RUK und anschließend die von IFAS untersuchten Deponien hinsichtlich Deponietyp, Methanvolumenstrom und Gaserfassungsgrad dargestellt.

In der Tabelle 21 ist der prozentuale Anteil des tatsächlich gefassten am prognostizierten Methanvolumenstrom (Gaserfassungsgrad) für die Deponien AR-UR getrennt für Deponien mit und ohne Bedingungen für eine vollständige Gaserfassung jeweils als Mittelwert der Jahre ab 2015 dargestellt. Die Berechnung erfolgte zum einen mit den Vorgabenwerten des IPCC-Modells ohne die Anpassung des DOC_f und der Halbwertszeiten und zum anderen mit der Anpassung des DOC_f und der Halbwertszeiten entsprechend dem Sachverständigengutachten (RUK 2014). Für Deponien, bei denen Abfalluntersuchungen durchgeführt wurden, wird in einer weiteren Zeile jeweils zusätzlich das Jahr betrachtet, in dem die Abfalluntersuchungen stattgefunden haben. Bezüglich der Menge an erfasstem Methanvolumenstrom wurden alle Daten, welche in den Anlagen 1 und 2 dargestellt sind, für die Angaben in der Tabelle ausgewertet.

Es zeigen sich für die Deponien AR bis UR die folgenden wesentlichen Erkenntnisse:

- Bei Deponien mit Bedingungen für eine optimale Entgasung ergeben sich bei Ansatz der Werte gemäß NIR und damit von Werten in dem von der IPCC vorgegebenen Wertebereich Erfassungsgrade von im Durchschnitt 35 % und im Maximum 46 %.

Zu erwarten wären Werte zwischen 80 und 90 %, je nachdem, wie weit die Deponieentgasung bereits optimiert ist.

Erfassungsgrade bis 100 % wären möglich, falls eine Deponie vollständig gekapselt, mit einer ausreichenden Brunnendichte ausgerüstet, mit ausreichendem Saugdruck besaugt und bei der erforderlichen Absaugung mit hohem Unterdruck an keiner Stelle Außenluftzutritt möglich wäre. In diesem Fall müsste im Zeitverlauf zunehmend reines Deponiegas ohne Anteile von Außenluft erfasst werden. Dies war bei keiner der untersuchten Deponien der Fall, auch nicht bei jenen De-

ponien, bei denen aufgrund der technischen Ausstattung von einer vollständigen Kapselung ausgegangen wird. Es scheint auch bei solchen Deponien noch Wegsamkeiten für Außenluftzutritte zu geben.

Tabelle 21: Anteil des gefassten am prognostizierten Methanvolumenstrom bei Verwendung unterschiedlicher Parametersätze

Deponie / Deponie- typ ³ Hang, Hal- de oder Klinge	Ohne Anpassung DOC _f und Halbwertszeit im FOD-Modell der IPCC		Mit Anpassung DOC _f und Halbwertszeit im FOD-Modell der IPCC (RUK, 2014)		Methanbildung und Halbwertszeit aus Abfallbeprobungen, FOD-Modell		tatsäch- lich er- fasster Methanvo- lumen- strom [m³CH ₄ /h]
	Methan- volumen- strom [m³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methan- volumen- strom [m³CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methan- volumen- strom [m³CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	
Deponien mit Bedingungen für eine vollständige Gaserfassung							
CR / Halde	34	36%	12,4	98%			12,2
ER / Halde	417	27%	117	97%			113
IR / Halde	31,4	32%	12,2	84%			10,2
LR / Halde	132	35%	42	110%			46
LR 2012	169	31%	66	80%	82	65%	53
OR / Hang	516	46%	271	87%			236
TR / Hang	481	41%	199	98%			196
TR 2017	454	39%	177	99%	127	138%	175
UR / Klin- ge	10,8	31%	2,3	143%			3,3
Bandbreite		27 bis 46%		80 bis 143%			
Mittelwert		35%		102%			
Deponien ohne Bedingungen für eine vollständige Gaserfassung							
AR / Halde	207	24%	75	65%			49
BR / Halde	305	32%	140	70%			98
DR / Hang	28	9%	9,1	29%			2,6
FR / Hang	134	24%	65	49%			32
GR / Hang	122	16%	39	50%			19,5
GR 2015	125	16%	41	49%	40	50%	20
HR / Klin-	288	29%	160	53%			84

³ Haldendeponien haben in wenigen Fällen zusätzlich einen Grubenanteil, wobei dieser dann so alt ist, dass der dort gelagerte Abfall nicht mehr nennenswert zur Gasbildung beiträgt. Hangdeponien und Klingendeponien haben immer einen gewissen Haldenanteil als Überschüttung der Plateaufläche im letzten Deponieabschnitt.

Deponie / Deponie- typ ³ Hang, Hal- de oder Klinge	Ohne Anpassung DOC _r und Halbwertszeit im FOD-Modell der IPCC		Mit Anpassung DOC _r und Halbwertszeit im FOD-Modell der IPCC (RUK, 2014)		Methanbildung und Halbwertszeit aus Abfallbeprobungen, FOD-Modell		tatsäch- lich er- fasster Methanvo- lumen- strom [m ³ CH ₄ /h]
	Methan- volumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methan- volumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methan- volumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	
ge							
JR / Halde	290	19%	129	42%			54
KR / Klinge	31,4	21%	11,7	57%			6,7
MR / Klin- ge	215	11%	108	21%			23
NR / Halde	140	17%	36	67%			24
PR / Klinge	112	19%	61	34%			21
QR / Halde	77	14%	28	38%			10,7
RR / Halde	75	21%	35	46%			16
SR / Klinge	133	30%	71	56%			40
Bandbreite		9 bis 32%		29 bis 70%			
Mittelwert		20%		48%			

- Aus der Auswertung ist zu erkennen, dass mit der Gasprognose aus dem Sachverständigen-
gutachten (RUK 2014) offensichtlich noch nicht jene Gasprognose abgeleitet ist, welche die re-
ale Gasbildung widerspiegelt, zumal mit der Gasprognose (RUK 2014) bei manchen Deponien
Werte über 100 % errechnet werden. Ein Erfassungsgrad von über 100 % tritt dabei insbeson-
dere bei kleinen Deponien auf, also bei Deponien, bei denen sich Abweichungen besonders
stark auswirken.

Bei Deponien mit Bedingungen für eine optimale Entgasung ergeben sich bei Ansatz der Werte
aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) Erfassungsgrade von im Durchschnitt 102 %
und im Maximum 143 %.

- Bei den untersuchten Deponien AR bis UR ergeben sich für die Deponien mit Bedingungen für
eine optimale Entgasung im Durchschnitt etwa doppelt so hohe Erfassungsgrade wie für die
Deponien ohne Bedingungen für eine optimale Entgasung.
Hierbei ist aber auch festzustellen, dass es innerhalb dieser beiden Deponietypen jeweils star-
ke Unterschiede zueinander gibt. Standortsspezifische Faktoren spielen offensichtlich eine gro-
ße Rolle.

Wesentlichste Faktoren hierbei sind:

- Deponiegröße: Bei kleineren Deponien ohne Oberflächenabdichtung nach DepV oder
gleichwertig ist es teilweise kaum möglich, hohe Erfassungsgrade zu erzielen.
- Zustand der Entgasungseinrichtungen (ausreichender Umfang an Wartung/ Instandhal-
tung/ Instandsetzung).
- Gute Erfassungsgrade werden von Deponien erzielt, bei denen bedarfsorientiert neue
Gasbrunnen installiert werden, z. B. als Ersatz für nicht mehr funktionierende Gasbrunnen

und / oder bedarfsorientiert Regelinstrumente und Fördereinrichtungen an die abnehmende Gasbildung angepasst werden.

- Deponiegasverwertung: Je flexibler die eingesetzte Technik auf veränderliche Methankonzentrationen und Volumenströme reagieren kann, desto besser wird entgast.
 - Die v. g. Einflussfaktoren und weitere standortspezifische Faktoren haben einen solch erheblichen Einfluss, dass der ursprüngliche Ansatz der Unterscheidung nach den in der Aufgabenstellung genannten Deponietypen nicht zielführend ist und daher nicht weiter verfolgt wurde. Die Ergebnisse bei der Unterscheidung z. B. zwischen Halden- und Grubendeponien ist von so vielen anderen Einflussfaktoren überlagert, dass kein einheitliches Ergebnis erzielt wird. Auf eine Ergebnisdarstellung wird verzichtet.
- Weiter Einflussfaktoren diesbezüglich außer den genannten sind:
- Die Deponien unterscheiden sich sehr stark durch Deponiealter und Deponieinventar.
 - Erschwerend hinzu kommt die unterschiedliche Datenlage zum Deponieinventar. In allen Fällen musste mit Annahmen gearbeitet werden, wobei das Inventar für manche Deponien gut und für manche Deponien schlechter dokumentiert war.
 - Der Fassungsgrad wird an einigen Deponien durch Baumaßnahmen, welche aufgrund des Deponiealters anstehen (Oberflächenabdichtung, Umbau der Entgasung, Umbau der Gasverwertung), beeinflusst.
- Die Ergebnisse zur verbliebenen anaerob abbaubaren Organik in Bohrgut zeigen für die drei Deponien GR, LR und TR, an denen auch von RUK Abfallfeststoffuntersuchungen vorgenommen wurden, Ergebnisse, mit denen sich eine Gasbildung im Bereich der Gasprognoseergebnisse bei Ansatz der Werte aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) bestätigen. Teilweise liegen die Ergebnisse aus dem Bohrgut unter und teilweise über dieser Gasprognose. Bei der Untersuchung von Bohrgut war wegen der dadurch vorgenommenen punktuellen Aufnahme des Zustandes des Deponiekörpers diese Varianz zu erwarten gewesen.

In der Tabelle 22 ist zusammenfassend der prozentuale Anteil des tatsächlich gefassten am prognostizierten Methanvolumenstrom (Gaserfassungsgrad) für die Deponien AI – QI im Vergleich dargestellt zu:

- der Gasprognoserechnung mit den Vorgabenwerten des IPCC-Modells, wie es bisher im NIR eingesetzt wird,
- der Gasprognoserechnung mit den angepassten Vorgabenwerten des DOC_r und der Halbwertszeit aus dem Sachverständigengutachten (RUK, 2014),
- der Gasprognoserechnung mit dem Gasbildungspotenzial L_0 , das sich aus dem bioverfügbaren Kohlenstoffanteil, der im Rahmen umfangreicher Abfallfeststoffbeprobungen im Zeitraum 2002 – 2017 für jeden Deponiestandort ermittelt wurde, und einer mittleren Halbwertszeit im Bereich von 6 – 10, überwiegend 8 Jahren für den gesamten Deponiekörper ergibt.

Der prozentuale Anteil ist je nach Deponiestandort für möglichst aktuelle Zeitpunkte angegeben, zu denen sowohl die Ergebnisse der Abfallfeststoffuntersuchungen als auch Gasabsaugraten vorlagen. Damit werden die aktuellen Bedingungen auf den Deponien zur angestrebten Anpassung der Parameter zur Quantifizierung des Methanbildungspotenzials erfasst und frühere, nicht mehr bestehende Zustände (z.B. ohne Oberflächenabdichtung, vor Ertüchtigung eines Gasfassungssystems) nicht mehr berücksichtigt.

Erläuterung zu den Ergebnissen:

- An den 18 näher betrachteten Deponien bzw. Deponieabschnitten AI – QI mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdeckung/-abdichtung wurden mehr als 500 Abfallfeststoffuntersuchungen durchgeführt, um den Anteil an bioverfügbarem Kohlenstoff und das resultieren-

de Methanbildungspotenzial L_0 zu ermitteln. In Verbindung mit durchschnittlichen Annahmewerten zur Halbwertszeit zum Zeitpunkt der Probenahme und der weiteren Ablagerungsphase ergeben sich damit belastbare Einschätzungen zur aktuellen Deponiegasbildung, zumal Einflüsse wie z. B. Austrocknungseffekte aufgrund der Untersuchungen am bzw. im Deponiekörper mit erfasst und entsprechend berücksichtigt werden können. Die Ermittlung der aktuellen Methanbildungsrate auf dieser Grundlage wird daher als sehr „realitätsnah“ eingestuft.⁴

- ▶ Der Vergleich dieser auf konkreten, standortspezifischen Untersuchungen basierenden Methanbildungsraten mit den Gasprognosen gemäß der IPCC- bzw. NIR-Annahmewerte insbesondere zum DOC und DOC_r bestätigen, dass letztere zu eindeutig überhöhten Einschätzungen der derzeit noch vorhandenen Methanbildungsraten führen. Sie liegen im Durchschnitt etwa doppelt so hoch, so dass sich ein durchschnittlicher Gaserfassungsgrad von lediglich 20% im Vergleich zu 45%, abgeleitet aus den Abfallfeststoffuntersuchungen, ergibt (beide bezogen auf das tatsächlich erfasste Methanvolumen).
- ▶ Die Anpassung der DOC_r -Werte und Halbwertszeiten (Ansätze Sachverständigengutachten RUK, 2014) führt bei vielen Standorten zu einer Gasprognose, die jener abgeleitet aus den Abfallfeststoffuntersuchungen sehr viel näher kommt. Mit diesen Anpassungen wird der durchschnittliche Gaserfassungsgrad mit 43% nahezu gleich quantifiziert, wobei allerdings die Schwankungsbreite des Erfassungsgrades größer ist. Bei 10 Standorten wird die Methanbildungsrate höher und bei 8 Standorten niedriger prognostiziert im Vergleich der Prognose auf der Grundlage der Abfalluntersuchungen. In einem Fall (Deponie HI) liegt die tatsächliche Methanerfassungsrate über der auf diese Weise prognostizierten Methanbildung.
- ▶ Bei nahezu allen Deponiestandorten AI – QI hat sich ebenfalls als größte Unsicherheit der Gasprognoserechnung gezeigt, dass kaum belastbare Angaben zur Abfallzusammensetzung des Deponiekörpers vorliegen. Das betrifft sowohl die mengenmäßigen Anteile des Hausmülls im Vergleich zu den Gewerbeabfällen, Schlämmen, Baustellenabfällen, mineralischen Abfällen etc. als auch die Zusammensetzung der einzelnen Abfallfraktionen. Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert ist zu vermuten, dass insbesondere der Anteil an „Papier, Pappe, Kartonagen“ und auch Holz sowohl mengenmäßig als auch vom Methanbildungspotenzial deutlich geringer einzustufen wäre als bisher in den IPCC-Vorgabewerten bzw. der auf Jahresbasis abgeschätzten oder aus statistischen Auswertungen abgeleiteten Massen der Abfallfraktionen.
- ▶ Eine weitere rechnerische Steigerung des Gaserfassungsgrads würde sich ergeben, wenn der Anteil des aeroben Abbaus sowohl zu Beginn der Ablagerung (MCF_{Beginn}) als auch mit zunehmendem Ablagerungsalter ($MCF_{\text{langfristig}}$) stärker bzw. gegenüber der bisherigen Ermittlung der Methanbildungspotenziale im FOD Modell mit den IPCC –Vorgabewerten überhaupt berücksichtigt werden würde. Unter Einbeziehung eines durchschnittlichen MCF-Werts ($MCF_{\text{langfristig}}$) von 0,9 statt 1 würde sich eine Steigerung des Gaserfassungsgrads von ca. 11% ergeben, wie es in der letzten Zeile von Tabelle 22 ausgewiesen ist.

Aus diesen Gründen wird diese Methode zur Ermittlung der aktuellen Methanbildungsrate vom Projektpartner IFAS in der Regel zur so genannten Potenzialanalyse zur Abschätzung klimarelevanter Methanemissionen im Rahmen der Entwicklung von Deponiebelüftungsvorhaben der Nationalen Klimaschutzinitiative eingesetzt.

Tabelle 22: Vergleich der Gaserfassungsgrade bei Verwendung unterschiedlicher Parametersätze und der Ergebnisse von Abfallfeststoffuntersuchungen für die Deponien AI – QI mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdichtung

Deponie / Deponie- typ	Ohne Anpassung DOC _f und Halbwerts- zeit im FOD-Modell der IPCC		Mit Anpassung DOC _f und Halbwertszeit im FOD-Modell der IPCC (RUK, 2014)		Methanbildung und Halbwertszeit aus Abfallbeprobungen, FOD-Modell		tatsächlich erfasster Methanvo- lumen- strom [m ³ CH ₄ /h]
	Methan- volumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methanvo- lumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	Methan- volumen- strom [m ³ CH ₄ /h]	Erfas- sungs- grad [%]	
AI / Halde	186	16	84	36	47	64	30
BI / Grube	185	19	96	38	75	48	36
CI / Grube	131	23	46	65	69	43	30
DI / Halde	145	17	101	25	57	44	25
EI / Hang	131	10	64	20	50	26	13
FI / Halde	202	27	114	48	83	66	55
GI / Hang	200	14	60	45	86	31	27
HI / Grube	669	57	343	111	450	84	380
II / Halde	196	36	89	79	112	63	70
JI / Halde	255	16	104	38	94	43	40
KI / Halde	208	14	102	29	95	32	30
LI / Halde	205	15	99	30	106	28	30
MI / Grube Altbereich	1.845	8	625	24	796	19	148
MI / Grube Neube- reich	1.703	30	1.063	48	813	63	511
NI / Grube	47	11	27	19	29	17	5
OI / Halde	137	15	65	31	53	38	20
PI / Hang	339	19	157	41	139	47	65
QI / Halde	169	19	53	60	59	54	32
Bandbrei- te		8 – 57		19 – (111)		19 - 84	
Mittelwert		20		43		45	
Mittelwert bei MCF = 0,9		22		48		50	

6 Ergebnisse Arbeitspaket B: Gaspotenzialbestimmungen und Abfallfeststoffanalysen

6.1 Arbeitsprogramm und Einbindung eines weiteren UFOPLAN-Vorhabens zu Methanbildungsraten

Folgende Laboruntersuchungen wurden im Rahmen des Arbeitspakets B seit 2016 durchgeführt:

Position 1: Untersuchungen in der Qualität von GB₂₁-Untersuchungen gemäß Anhang 4 DepV und unter Beachtung der Vorgaben der VDI 4630 bei mehreren Abfallproben, welche als Materialmischung aus Abfallprodukten synthetisch hergestellt worden sind:

- ▶ Untersuchung der Abfallzusammensetzung und -qualität bei der nach Versuchsende verbliebenen Probenmasse.
- ▶ Für den direkten Vergleich: Durchführung des gleichen Untersuchungsumfangs zur Abfallzusammensetzung und -qualität vor Ansatz des Versuches zur Gasbildung nach der Herstellung der synthetisch hergestellten Materialmischung.
- ▶ GB200 anstatt GB21
- ▶ Aufgrund des begrenzten Volumens bei der GB200-Untersuchung war eine Zerkleinerung auf eine Maximal Korngröße von 80 mm unerlässlich. Die für die Bestimmung des GB21 vorgegebene Zerkleinerung des gesamten Probenmaterials auf < 10 mm fand also nicht statt.
- ▶ Die untersuchten Proben sind mit jeweils 500 g Probenmaterial wesentlich größer als die für die Bestimmung des GB21 vorgegebene Probenmenge von 50 g. Es werden entsprechend modifizierte Laborgeräte sowie Impfschlamm- und Wassermengen eingesetzt.

Die Untersuchung der Abfallzusammensetzung und -qualität bestand aus Absiebung(en), Sortieranalysen, Wassergehaltbestimmungen sowie stoffgruppenspezifischen Aufschlüssen nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen. Bei der Sortieranalyse erfolgt eine Fraktionierung anhand der Unterteilung der Abfälle nach den IPCC Guidelines, jedoch unter näherer Betrachtung des Inertanteils. Sinnvoll ist die nähere Betrachtung des Inertanteils zur Plausibilitätsprüfung beim Vergleich der Zusammensetzung jeweils vor und nach dem GB₂₀₀-Versuch. Durchgeführt wurde eine Sortieranalyse in die folgenden Fraktionen:

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1) Organik | 2) PPK |
| 3) Holz (+ Stroh) | 4) Textilien |
| 5) Tetrapack | 6) Kunststoffe |
| 7) Mineralik | 8) Rest < 10 mm |

Insgesamt wurden im Rahmen des Vorhabens 3 Abfallzusammensetzungen untersucht. Untersucht wurde eine Probe mit 100 % Organik und jeweils eine Probe mit 68 % Organik und 32 % Holz bzw. 32 % PPK. Daneben wurden in einem parallelen Vorhaben, in dem am Ende dieses Abschnittes erwähnten UFOPLAN-Projekt „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“ eine synthetische Mischung, wie sie sich als mittlere Mischung für alle Deponien in Deutschland ergäbe, sowie drei davon definiert abweichende Mischungen untersucht.

Position 2: Zum Vergleich der Abfalleigenschaften am Ende des GB₂₀₀-Versuchs mit jenen von realen Deponien werden Abfallfeststoffproben aus Deponien, von denen die Ausgangsbeschaffenheit möglichst gut bekannt ist, vergleichbaren Untersuchungen zur Ermittlung der Abfallzusammensetzung unterzogen.

Position 3: Aus der Gruppe der Deponien AI – QI wird eine größere Anzahl an Abfallfeststoffproben unterschiedlichen Ablagerungsalters und unterschiedlicher Deponiemilieubedingungen mit stoffgruppenspezifischen Aufschlüssen nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen untersucht. Zusätzlich werden Biotests über unterschiedlich lange Untersuchungszeiträume (Atmungsaktivität AT_4 und AT_{20} sowie Gasbildungstests GB_{21} und GB_{60}) durchgeführt.

Bei allen drei Positionen fließen Ergebnisse zusätzlicher Untersuchungen ein, die im Rahmen des UFOPLAN-Projekts „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“ (UFOPLAN-Projekt: 3715 41 110 0, Az.: 50 477/4) seit 2016 gewonnen wurden. Da Arbeitspaket B und die ergänzend beauftragten Untersuchungen über das weitere UFOPLAN-Vorhaben inhaltlich eng miteinander verknüpft sind, wurde die vertiefte Bearbeitung von Arbeitspaket B für mehrere Untersuchungen erst nach der Beauftragung des Weiteren UFOPLAN-Vorhabens aufgenommen. Weite Bereiche der nachfolgenden Ergebnisdarstellung sind in beiden Abschlussberichten enthalten.

6.2 Bearbeitungsschritte und Untersuchungsmethoden

Mit den Untersuchungsmethoden wird das Ziel verfolgt, an Abfallproben aus Deponien und synthetisch hergestellten Abfallgemischen die Emissionsfaktoren und Methanbildungsraten in Deponien zu überprüfen.

- ▶ Untersuchungsmethoden - Standard:
 - Probenaufbereitung, Zerkleinerung, Trocknung etc.
 - Trockenrückstand 105°C DIN EN 12880 (S2)
 - Glühverlust 550°C DIN EN 15169
 - TOC DIN EN 13137
 - Stickstoff, gesamt DIN EN 11261
- ▶ **Stoffgruppenspezifischer Aufschluss (van-Soest-Test):** Bestimmung der Anteile an leicht-, mittel- und schwer abbaubaren Abfallbestandteilen (gemäß VDLUFA Methodenbuch, Band 3)

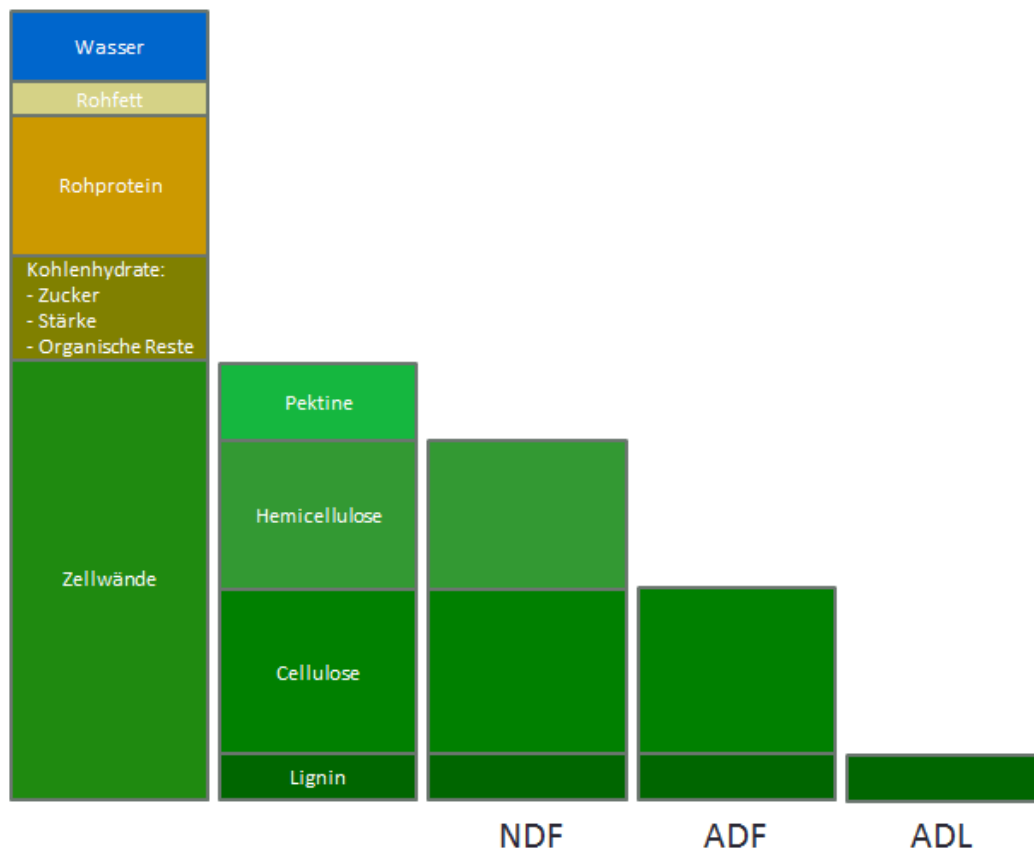
Die Van Soest Analyse stellt eine Erweiterung einer Futtermittelanalyse dar (van Soest, 1994). Dazu erfolgt eine Aufteilung von Zellinhaltsstoffen und Gerüstsubstanzen in Neutral- und Säure-Detergenzien-Faser (NDF, ADF), sowie Lignin (ADL), wodurch die Bestimmung der Hauptkomponenten der Zellwandsubstanzen (Hemicellulose, Cellulose, Lignin) ermöglicht wird. In Abbildung 16 ist die Zusammensetzung von organischen, biologisch (bedingt) abbaubaren Abfallstoffen (analog zu Futtermitteln) unter Berücksichtigung der Faserfraktionen dargestellt.

Neutral-Detergenzien-Faser (NDF): Unter dem Begriff „Neutral-Detergenzien-Faser“ (NDF) wird die Gesamtheit der Gerüstsubstanz verstanden, die nach dem Kochen in neutraler-Detergenzien Lösung verbleibt. Durch die Behandlung mit dem neutralen Detergens werden die Zellinhaltsstoffe wie Protein und Stärke gelöst, während die unlöslichen Bestandteile wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin im Rückstand verbleiben.

Säure-Detergenzien-Faser (ADF): Die Abkürzung steht für „acid-detergent-fiber“. Bei saurem oder basischem pH-Wert gehen Hemicellulosen leicht in Lösung. Durch die Differenz von NDF und ADF kann der Gehalt an Hemicellulose rechnerisch ermittelt werden. Hemicellulose geht in Lösung, während im Rückstand das säureunlösliche Lignin und Cellulose verbleiben.

Säure-Detergenzien-Lignin (ADL): Lignin ist der unlösliche Rückstand, der weder durch die neutrale Detergenzien-Lösung noch durch die saure Detergenzien-Lösung gelöst werden kann. Bei der ADL-Methode wird in zwei Schritten verfahren. Durch die saure Detergenzien-Lösung werden die Zellinhaltsstoffe sowie Hemicellulose durch die Säure eliminiert. Der Rückstand wird dann mit 72%iger Schwefelsäure behandelt, um die Zellulose zu lösen.

Abbildung 16: Chemische Zusammensetzung von organischen, biologisch verfügbaren Abfallfraktionen unter besonderer Berücksichtigung der Faserfraktionen



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, in Anlehnung an KRAGTEN, 2008

► Biotests:

- Atmungsaktivität AT_4 gemäß den Vorgaben zur Beprobung in der DepV, 2009, Anhang 4, wobei die Versuchsdauer an ausgewählten Abfallproben von 4 auf 20 Tage ausgedehnt wird, um den langfristigen Kohlenstoffabbau unter aeroben Bedingungen noch genauer quantifizieren zu können.
- Gasbildungsrate GB_{21} gemäß den Vorgaben zur Beprobung in der DepV, 2009, Anhang 4 wobei die Versuchsdauer an ausgewählten Abfallproben von 21 auf 60 Tage ausgedehnt wird, um den langfristigen Kohlenstoffabbau und das damit verbundene Gasbildungspotenzial unter anaeroben Bedingungen noch genauer quantifizieren zu können.

Die Untersuchungen wurden sowohl mit wissenschaftlich anerkannten Forschungseinrichtungen u.a. der Universität Stuttgart (Pos. 1 und 2) als auch mit akkreditierten Prüflaboratorien (durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005) (Pos. 3) durchgeführt.

Umsetzung der Bearbeitungsschritte, Erläuterungen zur Vorgehensweise

Zu Pos. 1:

Durchgeführt wird ein Vergleich des Anfangs- und des Endzustandes der Zusammensetzung bei langdauernden Laborgäruntersuchungen einschließlich der Ermittlung der Gasmengenentwicklung für die in der Tabelle 23 angegebenen Mischproben. Die Festlegung der Zusammensetzung der zu untersuchenden Mischproben erfolgte mit dem Ziel folgende Parameter zu ermitteln:

- ▶ Anteil des potentiell abbaubaren organischen Kohlenstoffs, welcher unter anaeroben Bedingungen abbaubar ist, und
- ▶ Halbwertszeit des anaeroben Abbaus der einzelnen Abfallfraktionen im Verhältnis zu den anderen Abfallfraktionen.

Tabelle 23: Zusammensetzung der für die GB₂₀₀-Untersuchungen eingesetzten synthetischen Abfallmischproben

Probe	Organik	Schlamm	PPK	Holz	Textilien	Tetra-pack	Kunststoffe	Mineralien
1	30 %		14 %	7 %	6 %	5 %	30 %	8 %
2	20 %		16 %	8 %	7 %	6 %	34 %	9 %
3	40 %		12 %	6 %	5 %	4 %	26 %	7 %
4	68 %		32 %					
5	68 %			32 %				
6	20 %	20 %	12 %	6 %	5 %	4 %	26 %	7 %
7	100 %							

Die Probe 1 spiegelt eine mittlere Abfallzusammensetzung der Deponien AR bis PR wieder.

Folgende weitere Vorgaben wurden für die Probenherstellung gemacht:

- ▶ Holz besteht zu 40 % aus Schrankholz, zu 40 % aus Bauholz und zu 20 % aus Palettenholz.
- ▶ Als Schlamm wurde ausgefauter Klärschlamm mit einer TM von 35 % eingesetzt.

Angesetzt wurden jeweils 3 Parallelansätze:

- ▶ Die Proben 4, 5 und 7 sind Bestandteil des hier vorgestellten UFOPLAN-Vorhabens 3714 34 317 0 „Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien“.
- ▶ Die Proben 1 bis 3 und 6 betreffen das mit dem hier vorgestellten UFOPLAN-Vorhaben verbundene UFOPLAN-Projekt 3715 41 110 0 „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“.

Die Untersuchung des Anfangs- und des Endzustands erfolgt mit folgenden Methoden:

- ▶ Wassergehalt bei Trocknung des gesamten Ansatzes (nachher) bzw. bei einer Parallelprobe gleicher Zusammensetzung und Masse wie die Probe (vorher)
- ▶ Bestimmung des Glühverlustes der Gesamtprobe vorher
- ▶ Absiebung > 10 / < 10 mm bei der getrockneten Probe des gesamten Ansatzes (nachher) und Sortieranalysen der Fraktionen > 10 in die Teilfraktionen Organik / PPK / Holz / Textilien / Windeln / Tetrapack / Kunststoffe / Mineralien / Rest < 10 mm
- ▶ Untersuchung der Fraktionen < 10 mm des gesamten Ansatzes (nachher) bzw. bei einer Parallelprobe gleicher Zusammensetzung und Masse wie die Probe (vorher) auf Glühverlust
- ▶ Untersuchung der Fraktion < 10 mm des gesamten Ansatzes (nachher) auf TOC und stoffgruppenspezifischen Aufschluss (van Soest)

Zu Pos. 2:

Durchgeführt wurden an drei Proben aus Bohrgut einer Bohrung an einer Altdeponie die gleichen Untersuchungen wie bei Pos. 1, also:

- ▶ Wassergehaltsbestimmung
- ▶ Absiebung > 10 / < 10 mm bei der getrockneten Probe
- ▶ Sortieranalysen der Fraktionen > 10 in die neun Teilfraktionen
- ▶ Untersuchung der Fraktion < 10 mm auf Glühverlust
- ▶ Untersuchung der Fraktion < 10 mm auf TOC und stoffgruppenspezifischen Aufschluss (van Soest).

Zu Pos. 3:

Ab 2016 wurden gemäß Beauftragung Untersuchungen und Analysen an mehr als 30 Abfallfeststoffproben aus mindestens 8 Deponien u.a. mit dem stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest vorgenommen, um ein möglichst breites Spektrum an Deponien bzgl. Abfallalter, Deponietypen, Lagerungsbedingungen etc. abzubilden:

- ▶ Dazu erfolgte die Abfallfeststoffprobenahme im Rahmen von Erkundungsbohrungen zur so genannten NKI-Potenzialanalyse.
- ▶ Im Zuge der Probenahme erfolgt bei ausgewählten Deponiestandorten eine Grobquantifizierung der Bohrgutbestandteile, insbesondere der Organik-Fraktion mit potenziell bioverfügbaren Bestandteilen, z.B.
 - „erdiges“ organikhaltiges Material, das in der Regel einen hohen Masseanteil im Deponiekörper bzw. in der Abfallfeststoffprobe ausmacht
 - Holz (Stückigkeit, Abbaugrad)
 - Papier (Feuchtegehalt, Bioverfügbarkeit, Abbaugrad)

Insbesondere diese drei Fraktionen scheinen in der Anwendung des FOD-Modells für die deutschen Deponien hinsichtlich der aktuell noch entstehenden Deponiegasbildung und Restgaspotenziale mit nicht „realistischen“ Annahme- bzw. Defaultwerten belegt worden zu sein.

- ▶ Standarduntersuchungen (s.o.)
- ▶ Laboruntersuchungen der Anteile an leicht-, mittel- und schwer abbaubaren Abfallbestandteilen (van-Soest-Test)
- ▶ Biotests: Atmungsaktivität AT_4 und/oder Gasbildungsrate GB_{21} gemäß den Vorgaben zur Beprobung in der DepV, 2009, Anhang 4
- ▶ Erweiterung ausgewählter Biotestansätze zu Langzeituntersuchungen (Ausführung über das UFOPLAN-Projekt „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“):
 - Fortführung der Untersuchungen zur Atmungsaktivität AT_4 , d.h. aerober Abbau, Umsatz bioverfügbaren Kohlenstoffs über 20 Tage
 - Fortführung der Untersuchungen zur Gasbildungsrate GB_{21} , d.h. anaerober Abbau, Umsatz bioverfügbaren Kohlenstoffs über 60 Tage

Ziel ist u.a., eine Korrelation zwischen Kurzzeit- und Langzeituntersuchungsergebnissen sowie zwischen den Anteilen der Organik hinsichtlich ihrer Abbaubarkeit und dem Gaspotenzial abzuleiten.

6.3 Ergebnisse zu Pos. 1 und 2: Langzeitgärversuche mit synthetischem Abfall

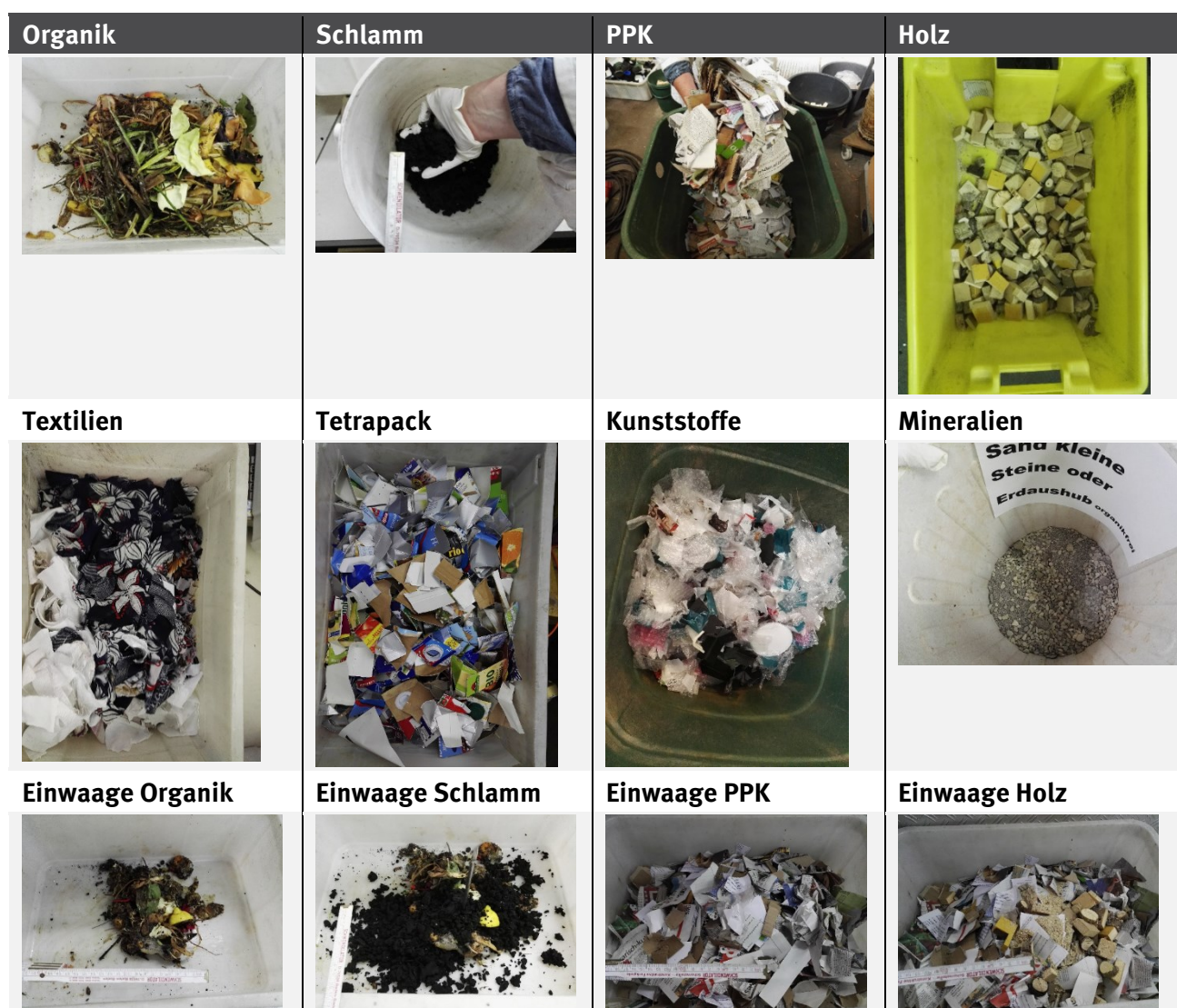
6.3.1 Versuchsablauf der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik

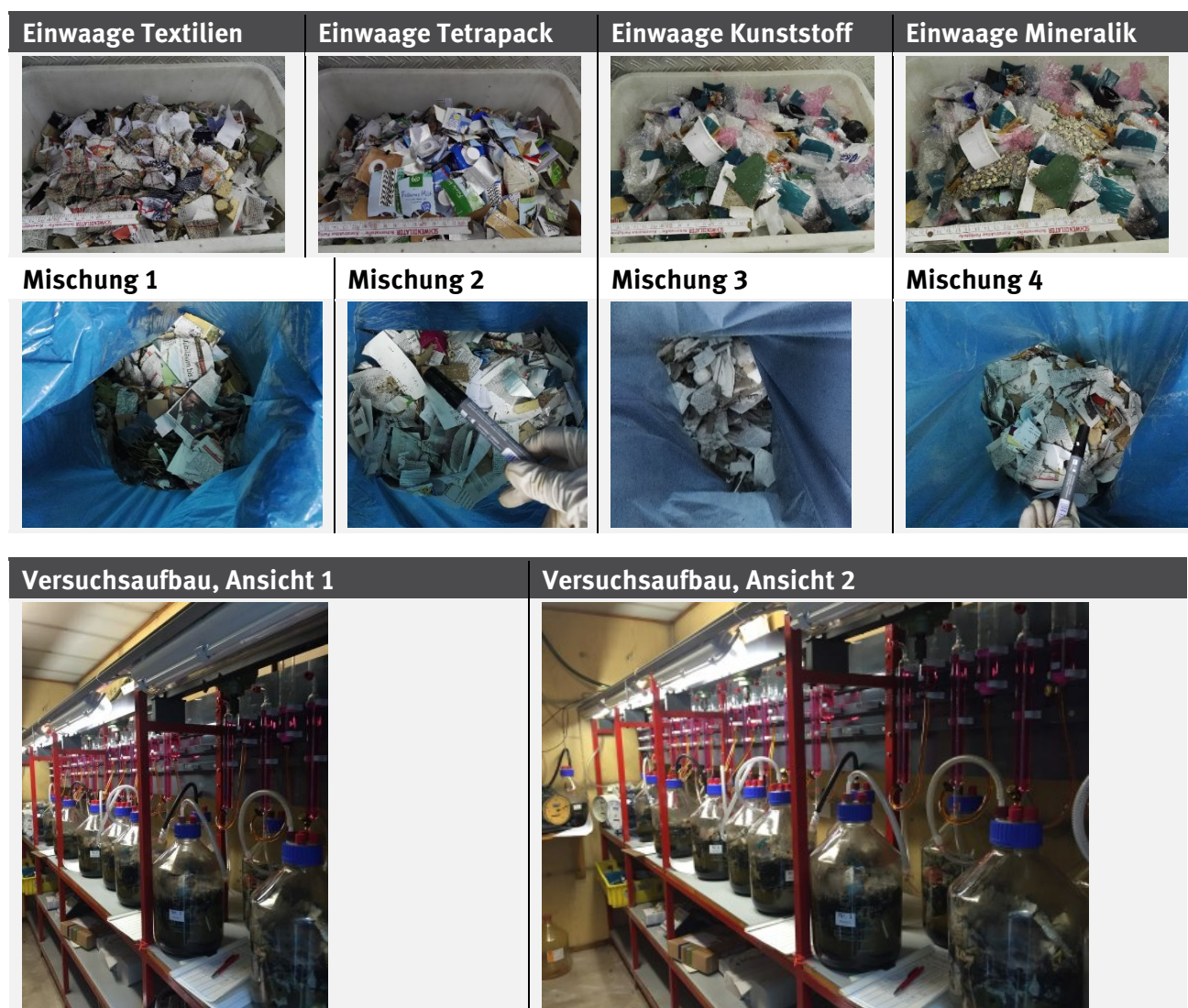
Die Langzeitgärversuche wurden für die in der Tabelle 23 angegebenen Mischproben wie folgt durchgeführt:

- ▶ Ansatz der Versuche Ende Mai/Anfang Juni 2016
- ▶ Abbruch der Versuche nach Feststellung, dass die Versuchsanlage an einer Stelle undicht ist, wovon alle Versuche betroffen waren.
- ▶ Neuer Ansatz der Proben Anfang August 2016 und Start der Langzeitgärversuche zum 08.08.2016
- ▶ Abschluss der Langzeitgärversuche GB200 Anfang Februar 2017 nach 185 Tagen
- ▶ Abschluss der anschließenden Analytik Ende August 2017

In der Abbildung 17 sind beispielhaft die Proben (Mischungen) 1 bis 4 und das für die Probenherstellung eingesetzte Material sowie die Versuchsanlage dokumentiert.

Abbildung 17: Fotos der Probenherstellung und des hierzu verwendeten Materials





Quelle: eigene Fotos, Ingenieurgruppe RUK GmbH

6.3.2 Ergebnisse vom Ansatz der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik

In der Tabelle 24 ist das Ergebnis der Untersuchungen jeweils der Gesamtprobe auf den Wassergehalt in der Feuchtmasse und auf den Glühverlust in der Trockenmasse für die Proben zu Beginn der GB₂₀₀-Versuche angegeben. Angegeben sind die Ergebnisse als Wassergehalt (WG), Trockenmassegehalt (TM) und organischer Trockenmassegehalt (oTM).

Zum Animpfen der GB₂₀₀ Versuche wurde ein Primärschlamm mit folgender Charakteristik eingesetzt:

- ▶ WG [Masse% bezogen auf FM]: 97,6
- ▶ TM [Masse% bezogen auf FM]: 2,4
- ▶ oTM [Masse% bezogen auf TM]: 62,3

Tabelle 24: Wassergehalt (WG), Trockenmassegehalt (TM) und organischer Trockenmassegehalt (oTM) für die Proben zu Beginn der GB₂₀₀-Versuche

Probe	WG [Masse% bezogen auf die FM]	TM [Masse% bezogen auf die FM]	oTM [Masse% bezogen auf die TM]
1	40,1	59,9	91,6
2	29,9	70,1	91,7

Probe	WG [Masse% bezogen auf die FM]	TM [Masse% bezogen auf die FM]	oTM [Masse% bezogen auf die TM]
3	41,5	58,5	78,8
4	55,7	44,3	87,3
5	60,3	39,7	88,3
6	28,7	71,3	81,1
7	79,8	20,2	83,9

6.3.3 Auswertung der Laborversuche zur Untersuchung der Abbaukinetik

Die Auswertung erfolgt in mehreren Schritten. Die einzelnen Schritte sind im Weiteren dargestellt.

6.3.3.1 Prüfung, ob der Abbau in den Langzeitgärversuchen einem anaeroben Abbau unter Deponiebedingungen entspricht

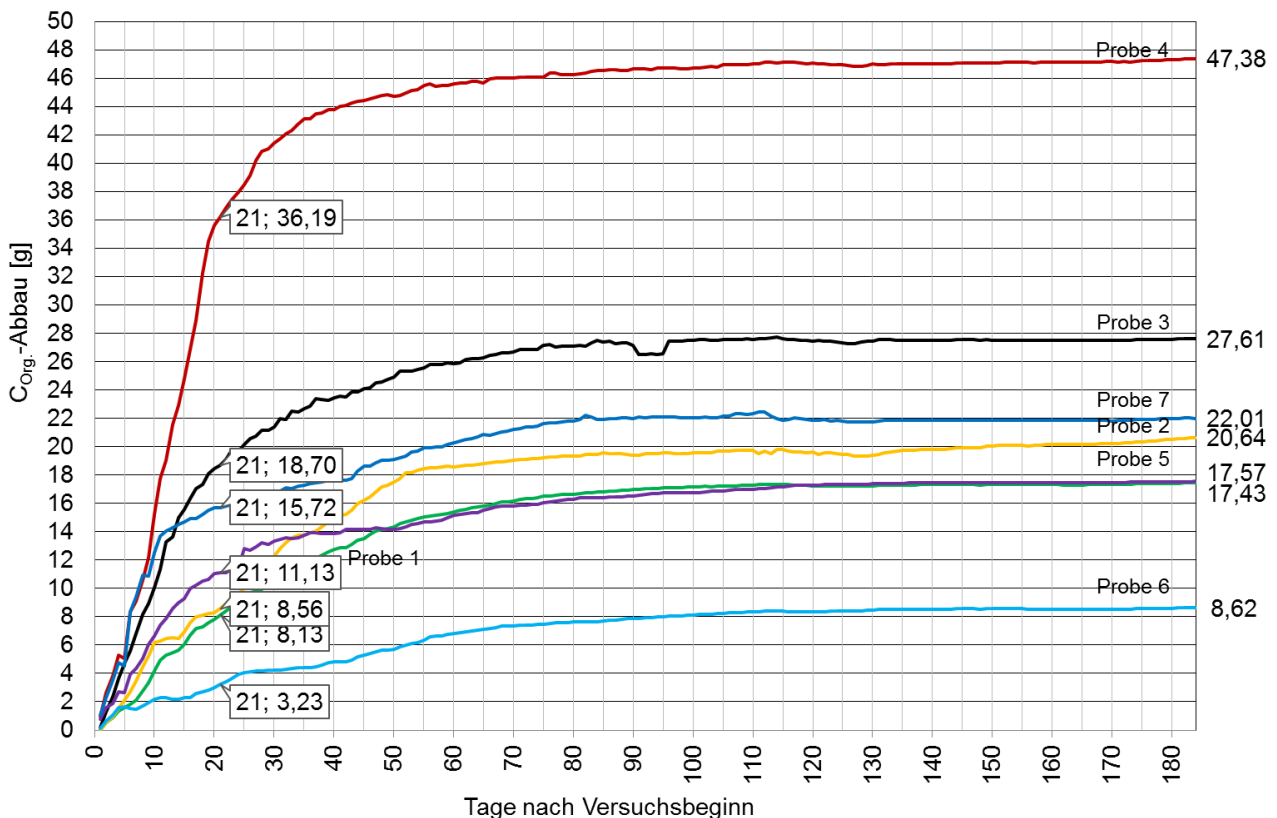
In Untersuchungen von Scheelhaase 2002 und von Soye et al. 2000 wurde die Korrelation zwischen den Stabilitätsparametern und dem tatsächlichen Gaspotenzial eines Verfüllkörpers in Deponiesimulationsreaktoren (DSR) ermittelt. Hierbei wurde neben anderen Untersuchungen das Verhältnis von langzeitiger Gasentwicklung zu der nach 21 bzw. 28 Tagen produzierten Gasmenge ermittelt. Nach Scheelhaase kann für frische Siedlungsabfallgemische folgendes Verhältnis abgeleitet werden:

$$GB_{\infty} = 1,728 \cdot GB_{21} - 2,41$$

Zur Prüfung der Ergebnisse aus den sieben Langzeitgärversuchen sind

- ▶ in der Abbildung 18 jeweils der bei den Langzeitgärtests ermittelte zeitliche Verlauf der Gasbildung in Form des Abbaus an organischem Kohlenstoff dargestellt und
- ▶ in der Tabelle 25 für den langfristig abgebauten organischen Kohlenstoff jeweils der am Ende des Versuches erreichte Wert dem aus dem Wert nach 21 Tagen Versuchsdauer mit der Formel von Scheelhaase berechneten Wert gegenübergestellt.

Abbildung 18: Langzeitgärversuche - zeitlicher Verlauf der Gasbildung in Form des Abbaus an organischem Kohlenstoff für alle 7 Proben



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Tabelle 25: Langzeitgärversuche – Vergleich des beim Versuch erreichten Kohlenstoffabbaus mit den rechnerisch aus dem GB₂₁ bestimmten Werten

Probe	C _{org.} -Abbau nach 21 Tagen, Versuchsergebnisse	C _{org.} Abbau gesamt, rechnerisch (Scheelhaase)	C _{org.} -Abbau gesamt, Versuchsergebnisse
Probe 1	8,13	11,65	17,43
Probe 2	8,56	12,37	20,64
Probe 3	18,70	29,91	27,61
Probe 4	36,19	60,13	47,38
Probe 5	11,13	16,82	17,57
Probe 6	3,23	3,17	8,62
Probe 7	15,72	24,75	22,01
Mittelwert		22,69	23,04

Es zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse im Mittel den rechnerischen Werten entsprechen. Bei den Langzeitgärversuchen scheinen demnach nahezu Bedingungen wie beim anaeroben Abbau in einem Deponiesimulationsreaktor gegeben zu sein.

6.3.3.2 Unter Laborbedingungen anaerob abbaubarer DOC

Nach der Definition in chapter 3 in Verbindung mit chapter 2 des volume 5 der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories und in Verbindung mit Vorläuferversionen dieses Dokumentes

- ▶ gibt der DOC den Anteil des biologisch abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall an, wobei nicht zwischen anaerober und aerober Abbaubarkeit unterschieden wird und
- ▶ gibt das Produkt aus $DOC \times DOC_f$ und damit der DDOCm den Anteil des biologisch abbaubaren organischen Kohlenstoffs am deponierten Abfall an, der unter den in der Deponie herrschenden Bedingungen anaerob zersetzt wird.

Der Faktor DOC_f hat hierbei 2 Komponenten,

- ▶ zum einen die Komponente des Anteils des biologisch abbaubaren organischen Kohlenstoffs, welche zwar unter anaeroben, aber nicht unter aeroben Bedingungen abgebaut wird und
- ▶ zum anderen die Komponente des Anteils des biologisch abbaubaren organischen Kohlenstoffs, welche zwar unter anaeroben Bedingungen abgebaut würde, aber nicht unter den Bedingungen der Deponie. Ursache dafür ist, dass an manchen Stellen des Deponiekörpers die Rahmenbedingungen für einen anaeroben Abbau nicht gegeben sind, beispielsweise, da der Abfall in einem Bereich abgelagert wurde, bei dem keine ausreichende Wassermenge und / oder keine ausreichende Temperatur vorhanden ist.

Bei den Laborversuchen wurde nur die erste der beiden genannten Komponenten des DOC_f erfasst, denn Deponiebedingungen können mit Laborversuchen der durchgeführten Größe nicht simuliert werden. Es wird zur Vereinfachung dennoch angenommen, dass in den Laborversuchen der DDOCm erfasst worden wäre und es wird an den entsprechenden Stellen darauf hingewiesen, wenn im DDOCm die nicht erfasste Komponente des DOC_f zusätzlich bei der Auswertung zu berücksichtigen ist.

Bei den Langzeitgärversuchen wurden jeweils 500 g Feuchtmasse eingesetzt. Zur Ermittlung des DDOCm als Produkt von DOC und DOC_f muss daher die abgebaute gesamte $C_{org.}$ -Menge (s. Abbildung 18) jeweils durch die eingesetzte Menge Feuchtmasse von jeweils 500 g geteilt werden. Das Ergebnis ist in der Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Langzeitgärversuche – Aus den Versuchen errechneter DDOCm

Probe	DDOCm
Probe 1	0,035
Probe 2	0,041
Probe 3	0,055
Probe 4	0,095
Probe 5	0,035
Probe 6	0,017
Probe 7	0,044

In der

Tabelle 27 erfolgt für den DDOC_m der Vergleich zwischen den in den Langzeitgärtests ermittelten Werten und den rechnerischen Werten bei Ansatz der Standardwerte der IPCC.

Tabelle 27: DDOCm – Vergleich zwischen den Ergebnissen der Langzeitgärversuche und den rechnerischen Werten

Fraktion	DDOCm der Einzelfraktionen gem. NIR/IPCC	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7
Anteile in der FM								
Schlamm							20,0%	
Organik		30,0%	20,0%	40,0%	68,0%	68,0%	20,0%	100,0%
PPK		14,0%	16,0%	12,0%	32,0%	0,0%	12,0%	0,0%
Holz		7,0%	8,0%	6,0%	0,0%	32,0%	6,0%	0,0%
Textilien		6,0%	7,0%	5,0%	0,0%	0,0%	5,0%	0,0%
Tetrapack		5,0%	6,0%	4,0%	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%
Kunststoffe		30,0%	34,0%	26,0%	0,0%	0,0%	26,0%	0,0%
Mineralien		8,0%	9,0%	7,0%	0,0%	0,0%	7,0%	0,0%
DDOCm bei Ansatz der Standardwerte $DOC * DOC_f$ der IPCC								
Schlamm	0,15 * 0,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000
Organik	0,18 * 0,5	0,027	0,018	0,036	0,061	0,061	0,018	0,090
PPK	0,4 * 0,5	0,028	0,032	0,024	0,064	0,000	0,024	0,000
Holz	0,43 * 0,5	0,015	0,017	0,013	0,000	0,067	0,013	0,000
Textilien	0,24 * 0,5	0,007	0,009	0,006	0,000	0,000	0,006	0,000
Tetrapack	0,1 * 0,5	0,003	0,003	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000
Kunststoffe		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mineralien		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Gesamt		0,080	0,078	0,081	0,125	0,130	0,078	0,090
zum Vergleich: DDOCm gemäß der Langzeitgärversuche								
Wert Langzeitgärtests		0,035	0,041	0,055	0,095	0,035	0,017	0,044
in % des Wertes der IPCC		43,8%	52,6%	68,2%	75,6%	26,9%	21,8%	48,9%

Bei den Langzeitgärversuchen wurde für alle Proben ein erheblich niedrigerer Wert für DDOCm ermittelt als er sich bei den Ansätzen der IPCC rechnerisch ergeben würde. Im Detail (Verhältnis „Wert Langzeitgärtest“ zu „Gesamt“) zeigt sich Folgendes:

- ▶ Die geringsten Abweichungen sind bei der PPK-Fraktion gegeben (s. Probe 4).
- ▶ Die größten Abweichungen treten bei der Holzfraktion (s. Probe 5) sowie bei der Probe mit zugemischtem Klärschlamm (s. Probe 6) auf.
- ▶ Bei der Probe mit zugemischtem Klärschlamm tritt ein vergleichsweise geringer DDOCm bzw. C_{Org} -Abbau auf. Dort ist der geringe C_{Org} -Abbau vermutlich auf hemmende Faktoren zurückzuführen.

Eine Ableitung der DDOCm-Werte für die Einzelfraktionen aus den Ergebnissen der Langzeitgärversuche ist dadurch möglich, dass für die Organik-Fraktion der DDOCm direkt aus der Tabelle 26 abgelesen werden kann. Es handelt sich um den für Probe 7 ermittelten DDOCm von 0,044.

Mit dieser Kenntnis und der Kenntnis der Zusammensetzung der Proben 4 und 5 können die DDOCm-Werte für die PPK-Fraktion und für die Holzfraktion durch Abzug des DDOCm der Organik-Fraktion von dem in der Probe 4 bzw. 5 insgesamt gegebenen DDOCm abgeleitet werden. Dies ist in der Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Ermittlung des DDOCm aus dem bei den Langzeitgärversuchen ermittelten Kohlenstoffabbau – Holz- und PPK-Fraktion

Probe		Mittelwert gem. Gas- bildung	DOC x DOC _f in kg/Mg FM		
			Organik	PPK	Holz
7	100 % Organik	44	44	-	-
4	68 % Organik, 32 % PPK	95	44	203 = (95- 44*0,68)/0,32	-
5	68 % Organik, 32 % Holz	35	44	-	16 = (35-44*0,68)/0,32

Theoretisch kann in gleicher Weise auch der mittlere DDOCm für die restlichen Fraktionen bestimmt werden. Dies führt aber zu keinem verwertbaren Ergebnis, wie die Tabelle 29 zeigt. Hierbei ist angesetzt, dass neben der Organik-Fraktion, der PPK-Fraktion und der Holzfraktion nur die Fraktionen Textilien (Text.) und Verbundstoffe bzw. Tetrapack (Verb.) zur Gasbildung beitragen und die Fraktionen Kunststoffe und Mineralien nicht.

Tabelle 29: Ermittlung des DDOCm aus dem bei den Langzeitgärversuchen ermittelten Kohlenstoffabbau – Textilien und Verbundstoffe

Probe		Mittelwert gem. Gas- bildung	DOC x DOCf in kg/Mg FM			
			Organik	PPK	Holz	Textilien + Verbund- stoffe
1	Mittlere deutsche Deponie: Org./ Holz/ PPK/ Text./ Verb. = 30 %/ 7 %/ 14 %/ 6 %/ 5 %	35	44	203	16	Minus 70 = (35-44*0,3-16*0,07-203*0,14)/(0,06+0,05)
2	wie 1 mit weniger Organik: Org./ Holz/ PPK/ Text./ Verb. = 20 %/ 8 %/ 16 %/ 7 %/ 6 %	41	44	203	16	Minus 2 = (41-44*0,2-16*0,08-203*0,16)/(0,07+0,06)
3	wie 1 mit mehr Organik: Org./ Holz/ PPK/ Text./ Verb. = 40 %/ 6 %/ 12 %/ 5 %/ 4 %	55	44	203	16	Plus 134 = (55-44*0,4-16*0,06-203*0,12)/(0,05+0,04)

Um den Abbau genauer zu beschreiben ist in den folgenden Abbildungen (Abbildung 19 bis Abbildung 32) Folgendes angegeben:

- ▶ die Ergebnisse der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärttest sowie
- ▶ die Ergebnisse zur Untersuchung der Fraktion < 10 mm.

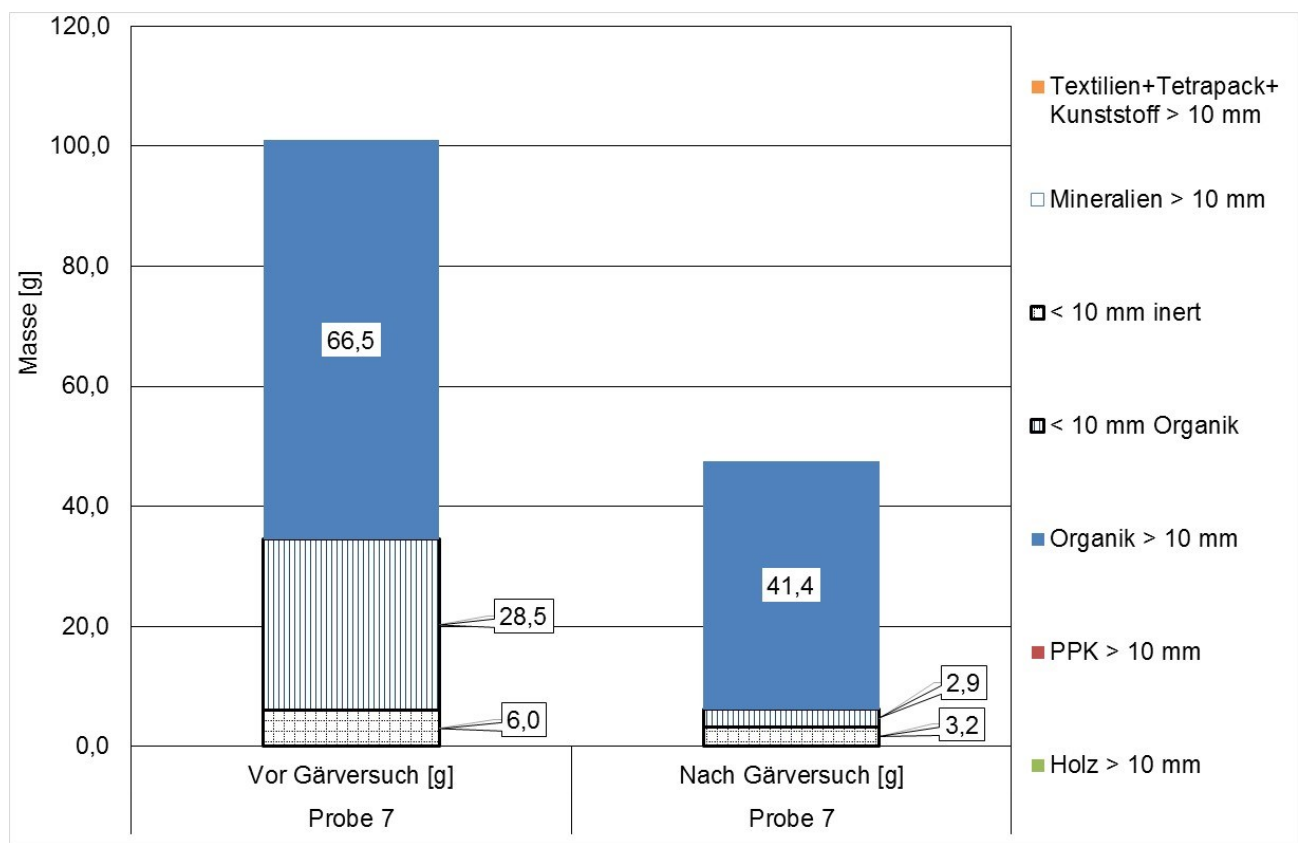
Da die Sortierung jeweils nach einer Trocknung stattgefunden hat, ist jeweils nur die Masse nach Trocknung angegeben. Bei der Probe vor Gärversuch kann das enthaltene Wasser somit als Differenz von 500 g abzüglich der gesamten Trockenmasse errechnet werden. Auf der Ordinatenachse ist bei allen Proben der gleiche Höchstwert angegeben.

Grundsätzlich ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Im Fall einer Massenzunahme bei einer der Fraktionen > 10 mm wird dies in der Regel auf Anhaftungen zurückzuführen sein.
- ▶ Für die Fraktion < 10 mm erfolgte keine Sortieranalyse. Stichhaltige Anhaltspunkte dafür, aus welchen Anteilen der Fraktion > 10 mm die Fraktion < 10 mm zusammengesetzt ist, sind nur bezüglich der Unterscheidung nach Inertanteil und abbaubarem Anteil gegeben. Eine Ableitung der Zusammensetzung ist damit allenfalls grob und mit vielen Annahmen möglich.
- ▶ Aus den ermittelten TOC-Werten und van-Soest-Analysen, welche jeweils nur in den Fraktionen < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärtest durchgeführt worden waren, könnten theoretisch die Änderungen in der Feinfraktion festgestellt werden. Es ist allerdings festzustellen, dass bei allen Langzeitgärversuchen durch den umfassenden Abbau in der Feinfraktion die Feinfraktion nach dem Gärversuch nur wenig gemein hat mit der Feinfraktion vor dem Gärversuch. Nach dem Gärversuch sind in der Feinfraktion die während des Gärversuches abgebauten Bestandteile < 10 mm durch Zwischenprodukte aus Abbauprozessen sowie bei der mechanischen Aufbereitung der Probe entstandene Bestandteile, welche vor den Langzeitgärversuchen den Fraktionen > 10 mm zuzurechnen waren, ersetzt.

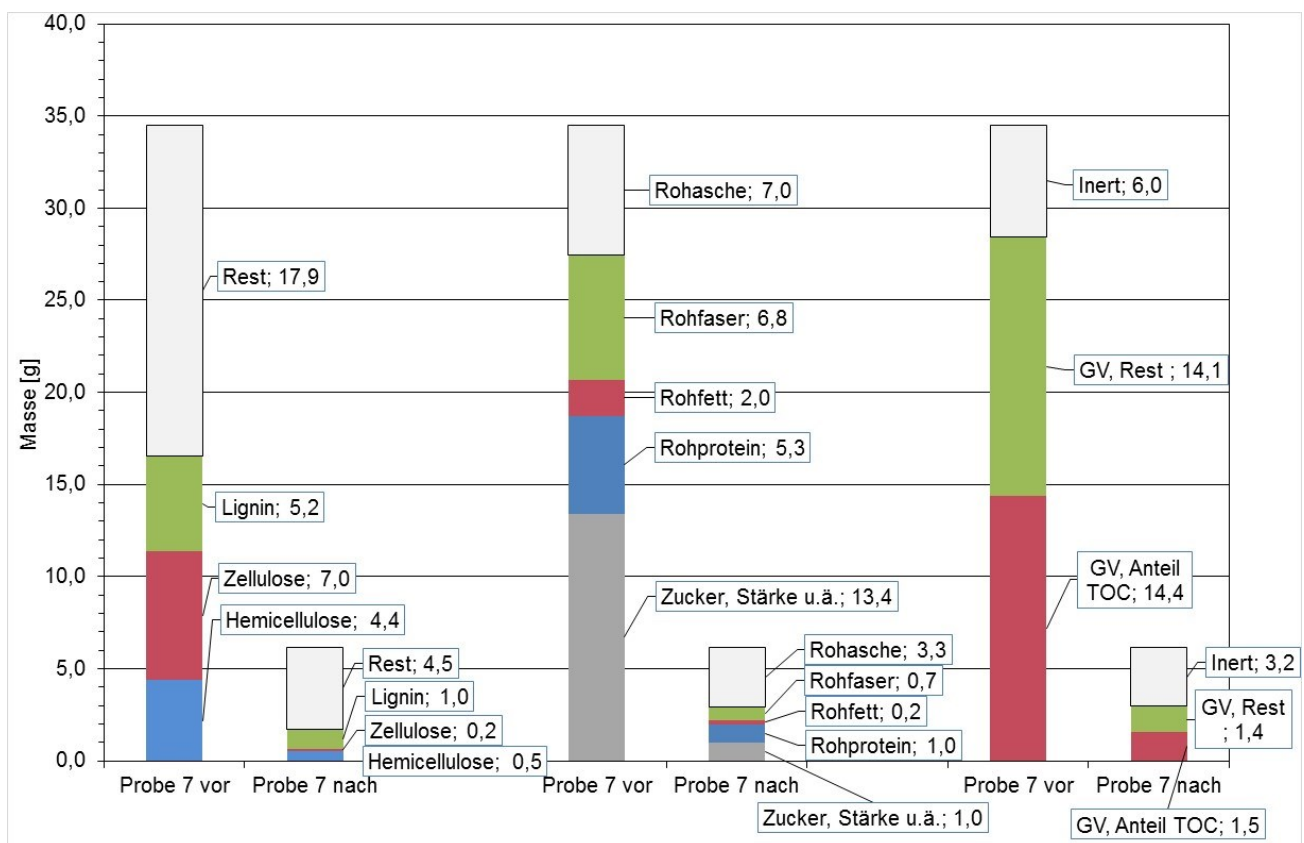
Bei Probe 7 zeigt sich wenig überraschend, dass die in der Feinfraktion < 10 mm vorhandene Organik bei den Langzeitgärversuchen nahezu vollständig abgebaut wird, während in der Fraktion > 10 mm noch erhebliche Mengen an DOC verblieben sind (Abbildung 19 und Abbildung 20). Bei dem Langzeitgärversuch sind etwa 53 % der eingesetzten Trockenmasse abgebaut worden.

Abbildung 19: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 7



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 20: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 7



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Bei der Probe 5, welche in der Feuchtmasse aus 68 % Organik und 32 % Holz zusammengesetzt ist, zeigt sich Folgendes:

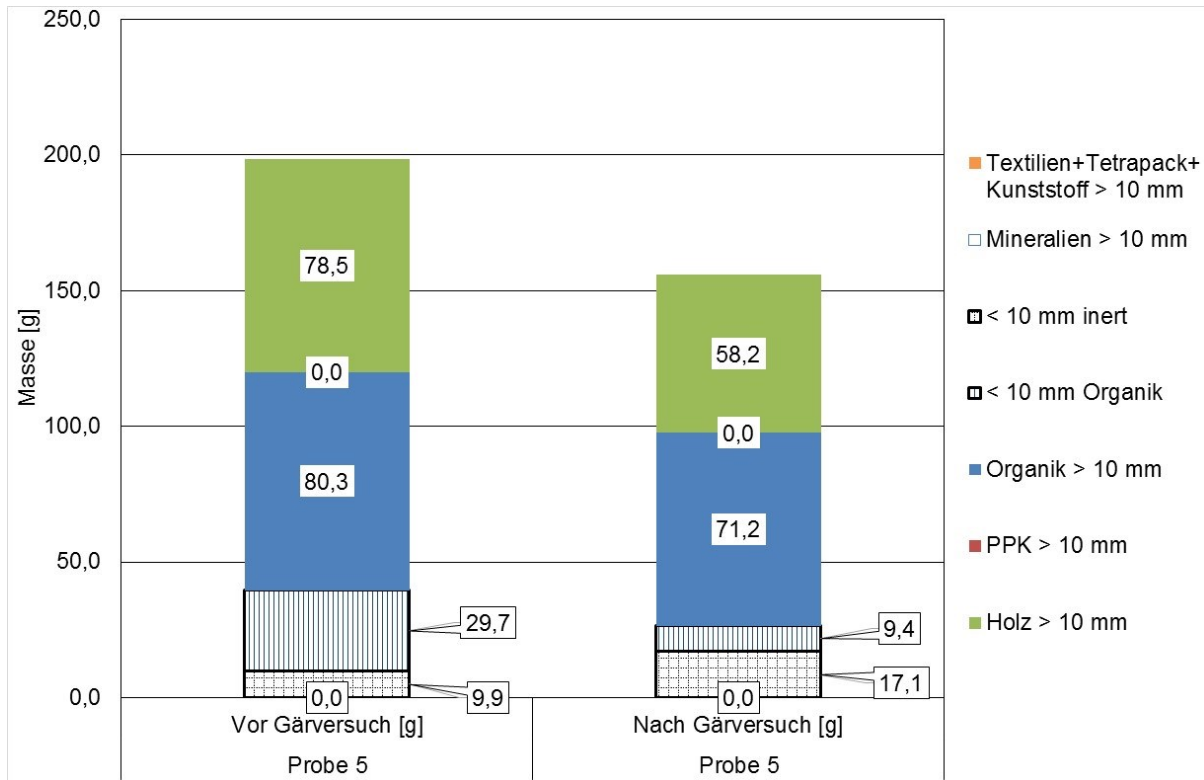
- Obwohl bei der Probe 5 nur 68 % der Feuchtmasse an Organik eingesetzt worden ist, wurde bei der Sortieranalyse gegenüber der zu 100 % aus Organik bestehenden Probe 7 eine größere Trockenmasse an Organik aussortiert: 80,3 g gegenüber 66,5 g.
Wahrscheinlichste Ursache ist, dass von der zuvor zerkleinerten Holzfraktion die bei der Zerkleinerung angefallenen Holzspäne und Holzmehl der Probe zugegeben wurden. Holzspäne der Korngröße > 10 mm sind dann sehr wahrscheinlich teilweise mit der Organikfraktion aussortiert worden. Kleinere Holzspäne und Holzmehl waren der Korngröße > 10 mm zuzurechnen.
- Der Glührückstand ist bei der Probe 5 höher als bei der Probe 7.
In der Probe vor dem Gärtest ist das plausibel. Die Mehrmenge entspricht in etwa dem erwarteten Ascheanteil aus dem Holz.
Überraschend ist der hohe Inertanteil in der Probe nach dem Gärtest. Letztlich kann der Inertanteil nur aus der Organikfraktion kommen, da der Ascheanteil aus dem Holz nicht zunehmen kann.

Würde bei der Probe 5 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 68 % der Masse der Probe 7 abgezogen, verbliebe für die Holzfraktion folgende Trockenmasse:

- Vor dem Langzeitgärversuch: 129,7 g, davon 10,3 g in der Fraktion < 10 mm
- Nach dem Langzeitgärversuch: 109,3 g, davon 7,4 g in der Fraktion < 10 mm

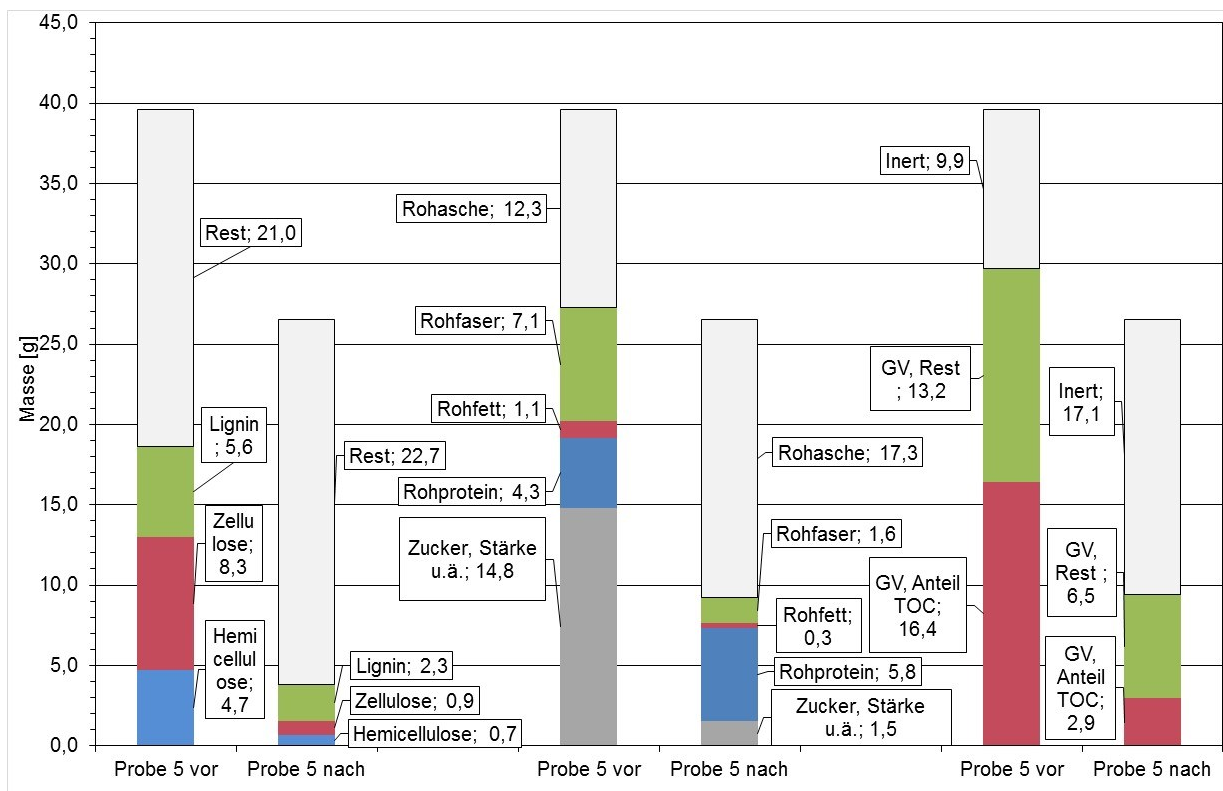
Letztlich lässt sich für die Holzfraktion ein Abbau feststellen. Bei dem Langzeitgärversuch wurde bezogen auf die Holzfraktion etwa 16 % der eingesetzten Trockenmasse abgebaut.

Abbildung 21: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 5



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 22: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 5



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Bei der Probe 4, welche in der Feuchtmasse aus 68 % Organik und 32 % PPK zusammengesetzt ist, zeigt sich Folgendes:

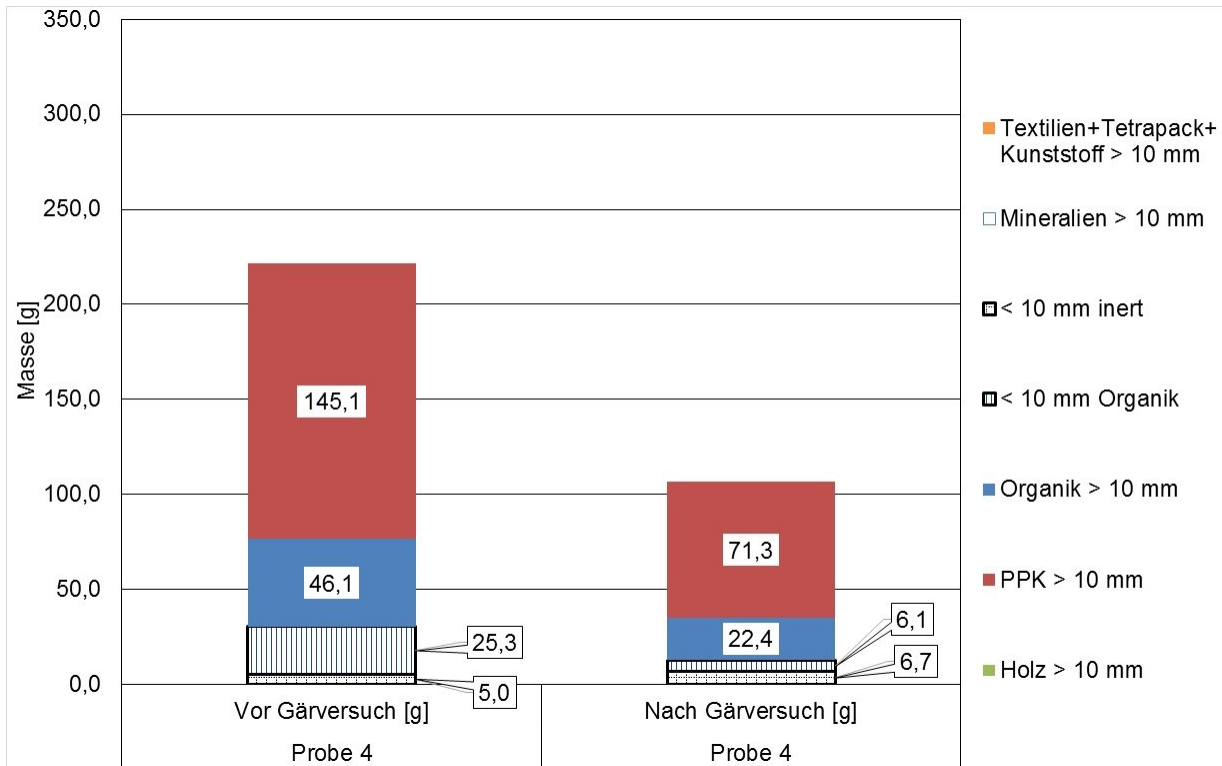
- Vor dem Langzeitgärversuch wurden bei der Sortieranalyse 46,1 g Trockenmasse für die Organik-Fraktion und 25,3 g Trockenmasse für die Fraktion < 10 mm aussortiert. Demgegenüber wären 68 % von Probe 7 in etwa 45,2 g Trockenmasse für die Organik-Fraktion und 19,4 g Trockenmasse für die Fraktion < 10 mm. Ein Teil der PPK-Fraktion könnte in diesen Fraktionen bei der Sortieranalyse enthalten gewesen sein.
- Nach dem Langzeitgärversuch: In der Summe der Trockenmasse für die Organik-Fraktion und die Fraktion < 10 mm ergibt sich für 68 % der Probe 7 ein Abbau während des Langzeitgärversuches von etwa 64,6 g auf etwa 30,2 g. Bei Probe 4 wurde ein Abbau von 71,4 g auf etwa 28,5 g, also ein stärkerer Abbau festgestellt. Dies wird sicher daran liegen, dass PPK sehr gut abbaubar ist. Durch den höheren Anteil an abbaubarer Substanz und die phasenweise besseren Milieubedingungen für die Mikroorganismen in dem Ansatz mit der Probe 4 gegenüber dem Ansatz mit der Probe 7 ist zudem nicht auszuschließen, dass bei Probe 4 auch ein beschleunigender Effekt für den Abbau der Organik-Fraktion gegeben war.

Würde bei der Probe 4 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 68 % der Masse der Probe 7 abgezogen verbliebe für die PPK-Fraktion folgende Trockenmasse:

- Vor dem Langzeitgärversuch: 152,5 g
- Nach dem Langzeitgärversuch: 59 g

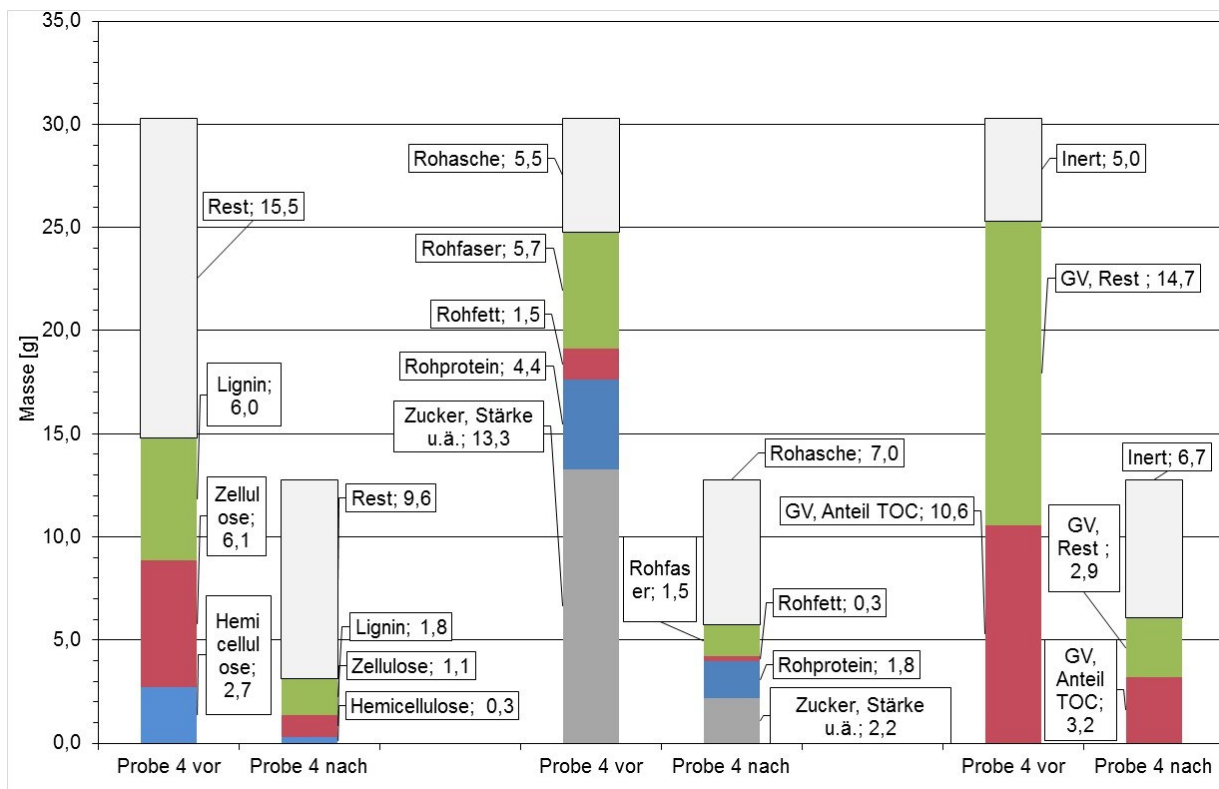
Bei dem Langzeitgärversuch wurde bezogen auf die PPK-Fraktion somit etwa 61 % der eingesetzten Trockenmasse abgebaut.

Abbildung 23: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 4



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 24: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 4



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

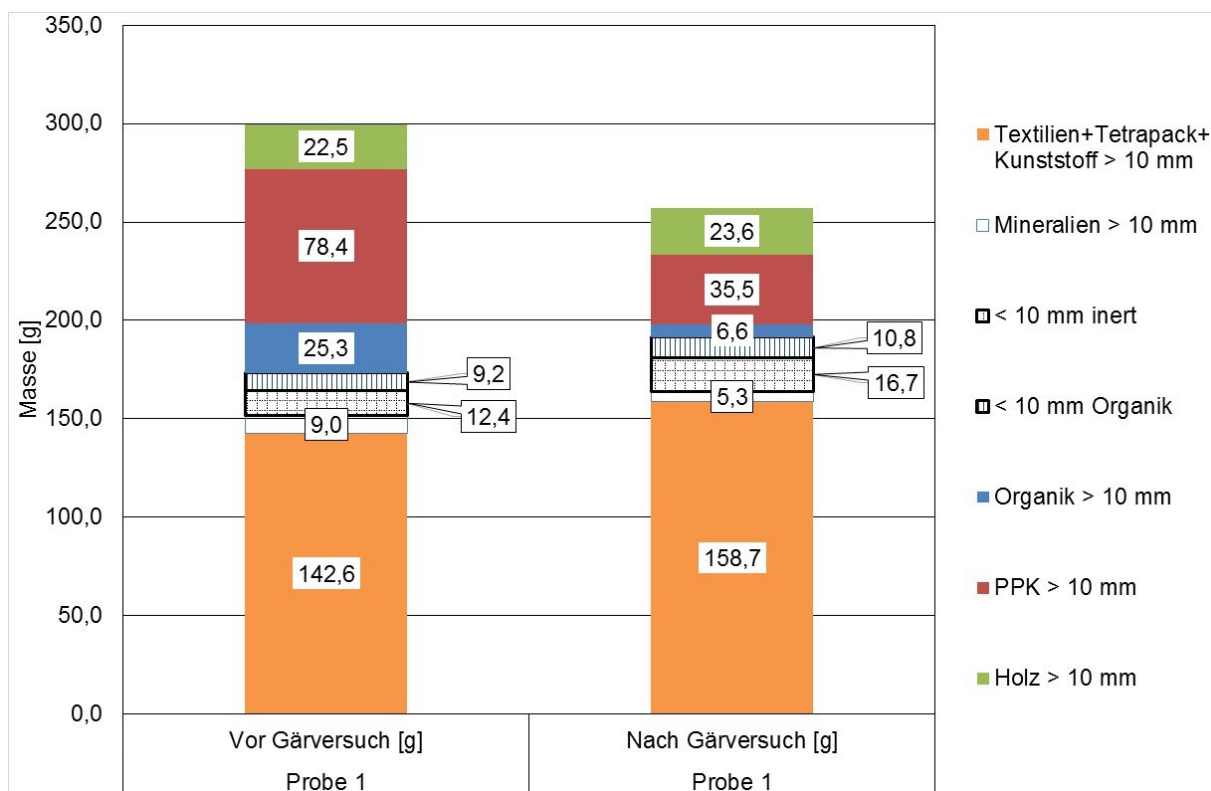
Würde bei der Probe 1 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 30 % der Masse der Probe 7, 14 % der Masse der PPK-Fraktion (ermittelt aus Probe 4) und 7 % der Masse der Holzfraktion (ermittelt aus Probe 5) abgezogen, so verbliebe für die restliche Fraktionen der Probe 1 folgende Trockenmasse:

- ▶ Vor dem Langzeitgärversuch: 174 g
- ▶ Nach dem Langzeitgärversuch: 193 g

Die theoretisch abzuleitende Massenmehrung kann nur dadurch verursacht sein, dass aufgrund des gegenüber den Proben 7 und 4 geringeren abbaubaren Anteils in der Mischung der Probe 1 der Abbau für die Fraktionen Organik und PPK langsamer abläuft als bei den Proben 4 und 7. Wie stark der Gesamtabbau gestört war und in welchem Umfang bei den neben Organik, Holz und PPK vorhandenen Fraktionen ein Abbau stattgefunden hat, lässt sich nicht ableiten.

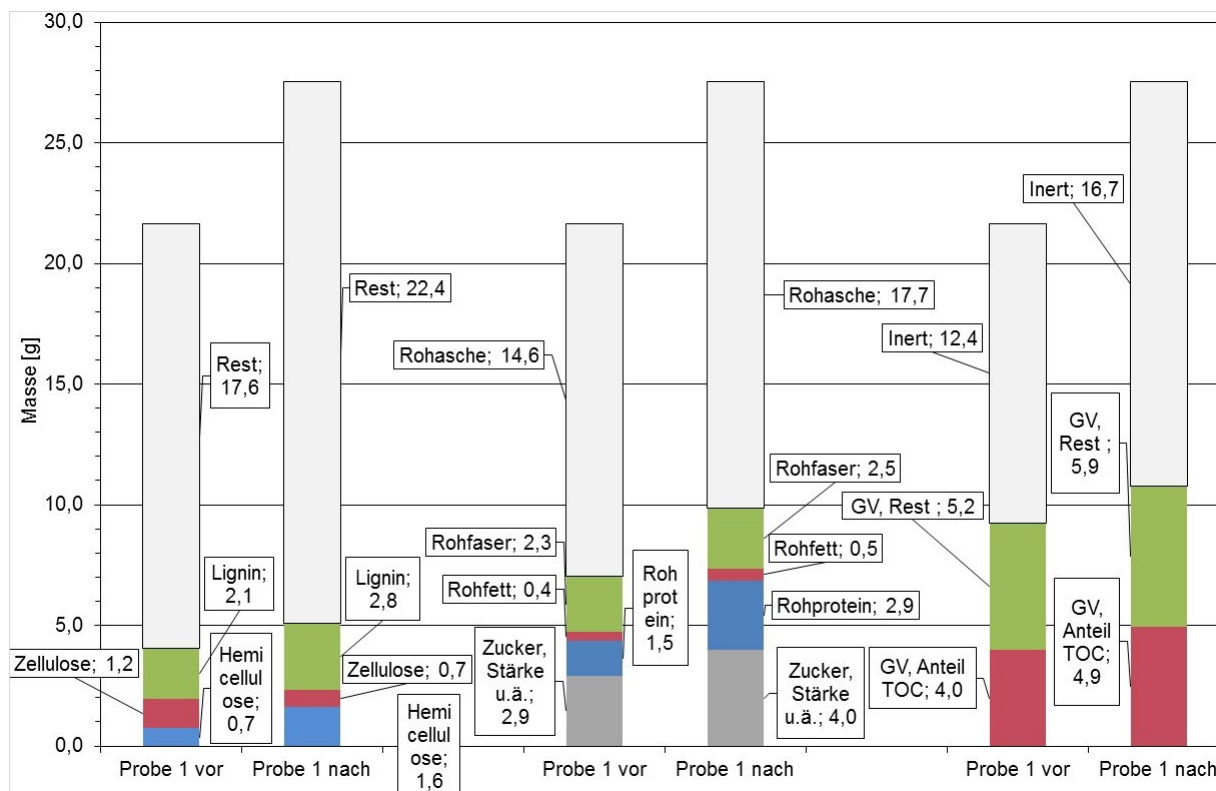
Die Massenmehrung in der Fraktion „Textilien + Tetrapack + Kunststoff > 10 mm“ während der Versuche wird v. a. darauf zurückzuführen sein, dass bei der Sortierung vor dem Gärversuch ein Teil dieser Fraktion der PPK-Fraktion (eingesetzt wurden nur 70 g Feuchtmasse an PPK) und vermutlich auch der Organik-Fraktion zugeordnet worden sind. Zudem ist bei allen Proben die eindeutige Zuordnung bei der Sortieranalyse nach dem Langzeitgärversuch noch schwerer möglich als vor dem Langzeitgärversuch, was auch dort zu teilweise nicht korrekten Zuordnungen geführt haben wird.

Abbildung 25: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 1



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 26: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 1



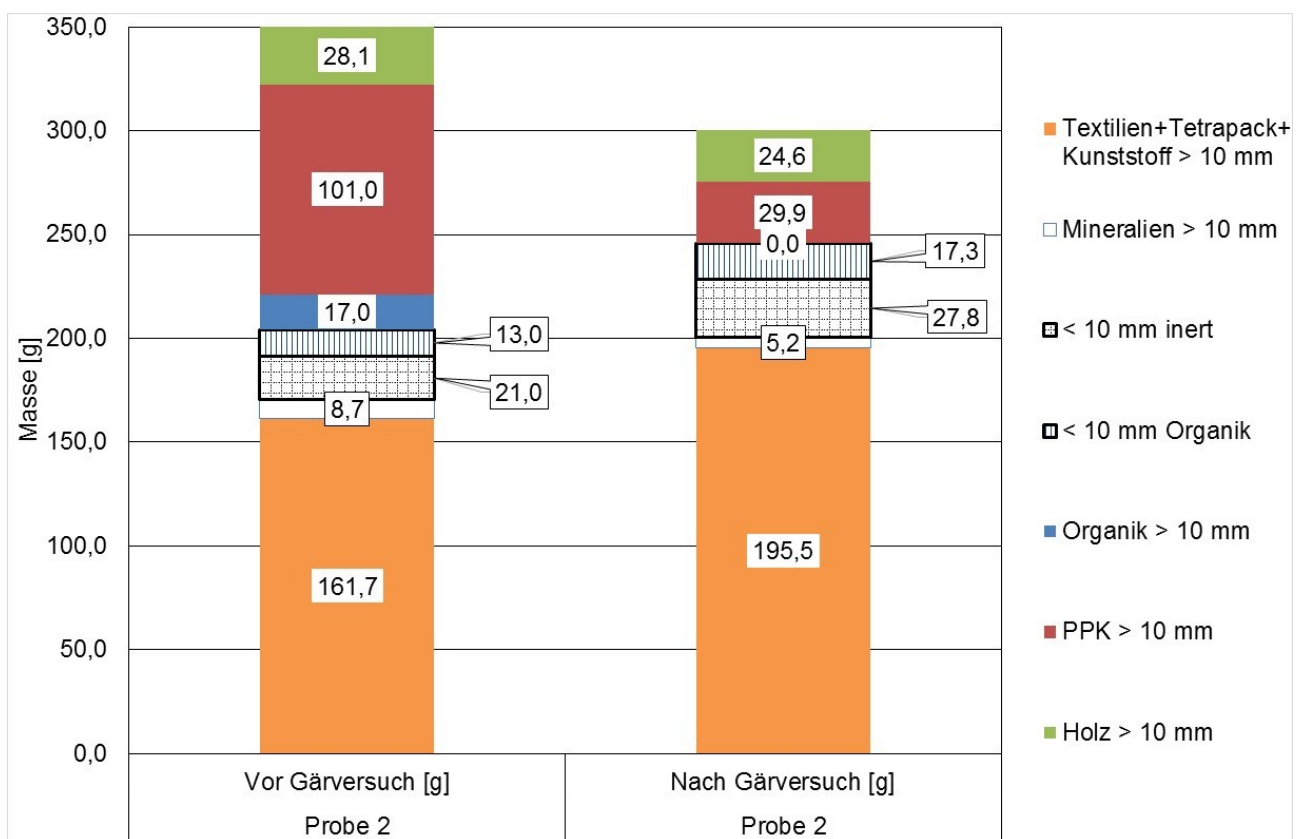
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Würde bei der Probe 2 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 20 % der Masse der Probe 7, 16 % der Masse der PPK-Fraktion (ermittelt aus Probe 4) und 8 % der Masse der Holzfraktion (ermittelt aus Probe 5) abgezogen, so verbliebe für die restliche Fraktionen der Probe 2 folgende Trockenmasse:

- ▶ Vor dem Langzeitgärversuch: 222 g
- ▶ Nach dem Langzeitgärversuch: 234 g

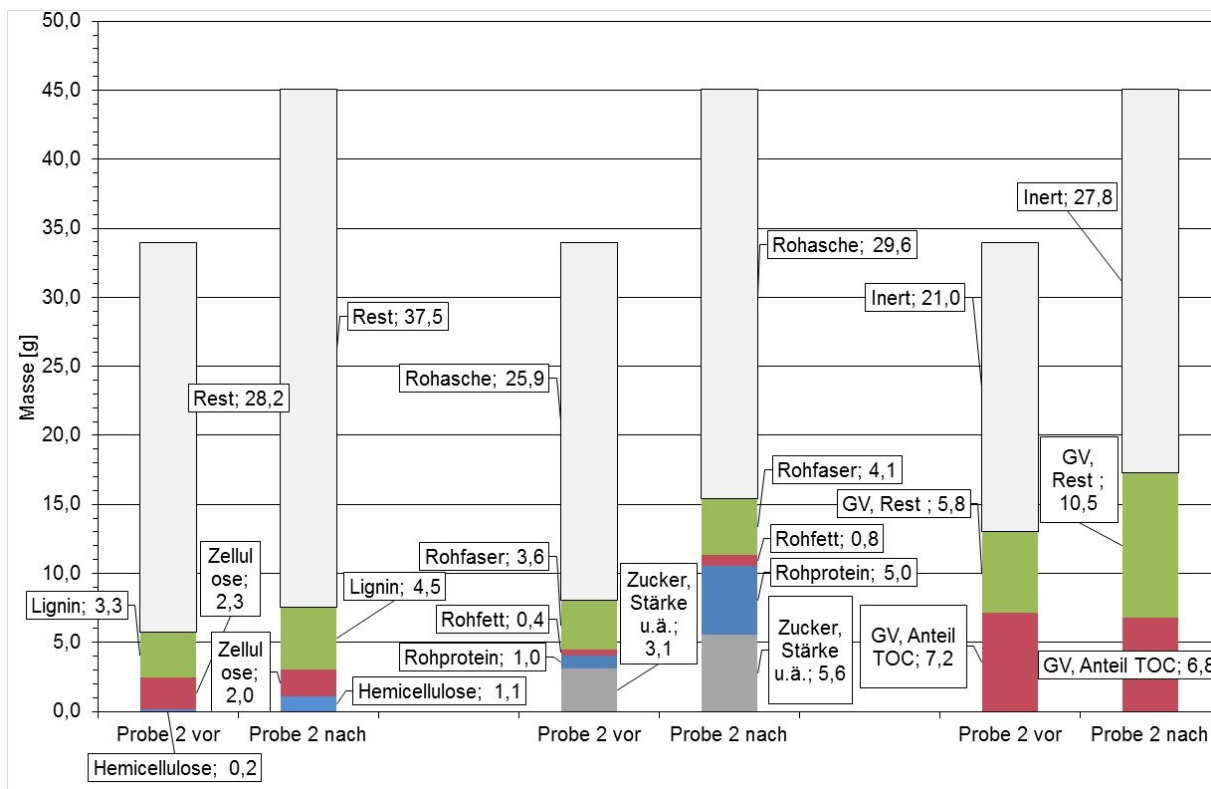
Hier gilt das Gleiche wie bei Probe 1. Es ist u. a. darauf hinzuweisen, dass bei Ausgangprobe nur 80 g Feuchtmasse an PPK-Fraktion eingesetzt worden sind.

Abbildung 27: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 2



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 28: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 2



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Würde bei der Probe 3 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 40 % der Masse der Probe 7, 12 % der Masse der PPK-Fraktion (ermittelt aus Probe 4) und 6 % der Masse der Holzfraktion (ermittelt aus Probe 5) abgezogen, so verbliebe für die restliche Fraktionen der Probe 3 folgende Trockenmasse:

- ▶ Vor dem Langzeitgärversuch: 171 g
- ▶ Nach dem Langzeitgärversuch: 164 g

Auch im Fall der Probe 3 ist auf Verfälschungen durch falsche Zuordnung bei der Sortieranalyse hinzuweisen. Eingesetzt wurden 60 g Feuchtmasse PPK-Fraktion.

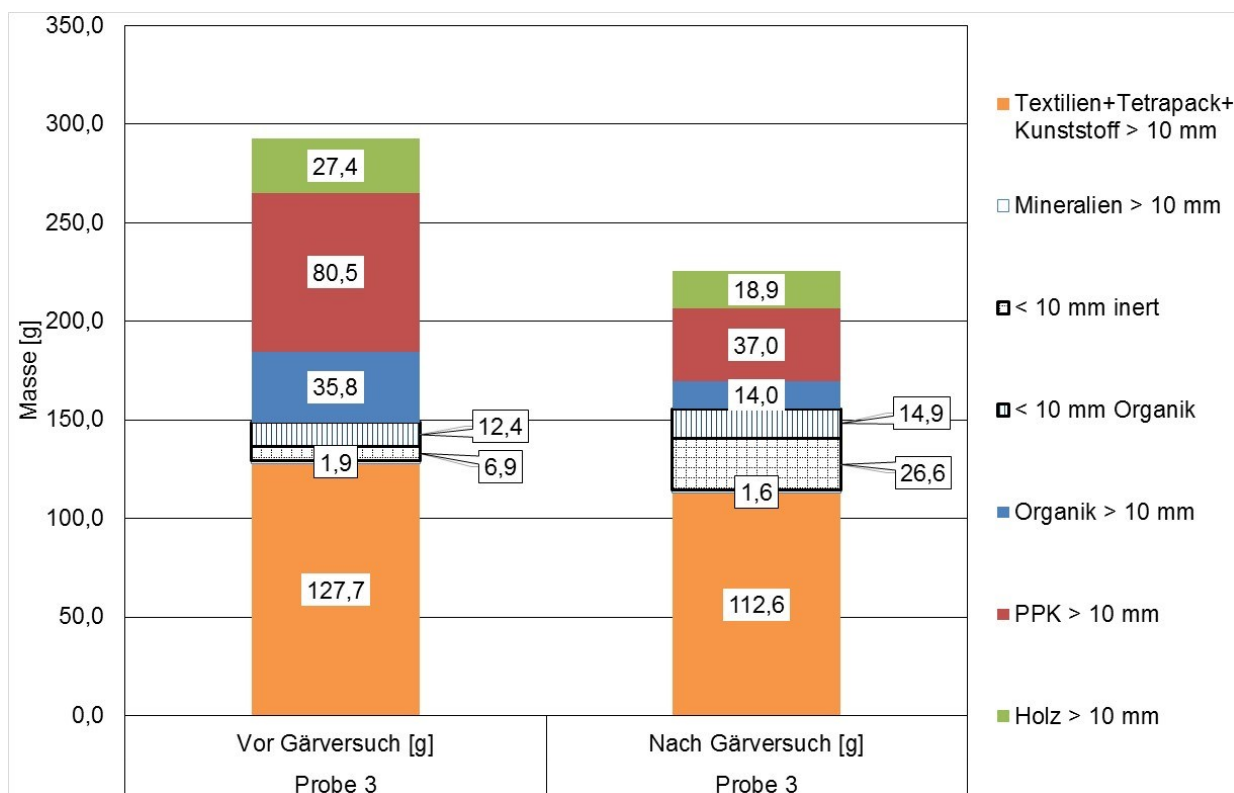
Bei Probe 3 scheint der hemmende Faktor weniger stark ausgeprägt zu sein. Da dennoch von einem hemmenden Faktor auf den Abbau insbesondere für die Organik- und die PPK-Fraktion auszugehen ist, bietet der verbleibende Abbau keinen Anhaltspunkt für den Umfang des Abbaus bei den restlichen Fraktionen der Probe 3.

Würde bei der Probe 6 von der Trockenmasse vor und nach dem Gärversuch jeweils 20 % der Masse der Probe 7, 12 % der Masse der PPK-Fraktion (ermittelt aus Probe 4) und 6 % der Masse der Holzfraktion (ermittelt aus Probe 5) abgezogen, verbliebe für die restliche Fraktionen der Probe 6 folgende Trockenmasse:

- ▶ Vor dem Langzeitgärversuch: 255 g
- ▶ Nach dem Langzeitgärversuch: 283 g

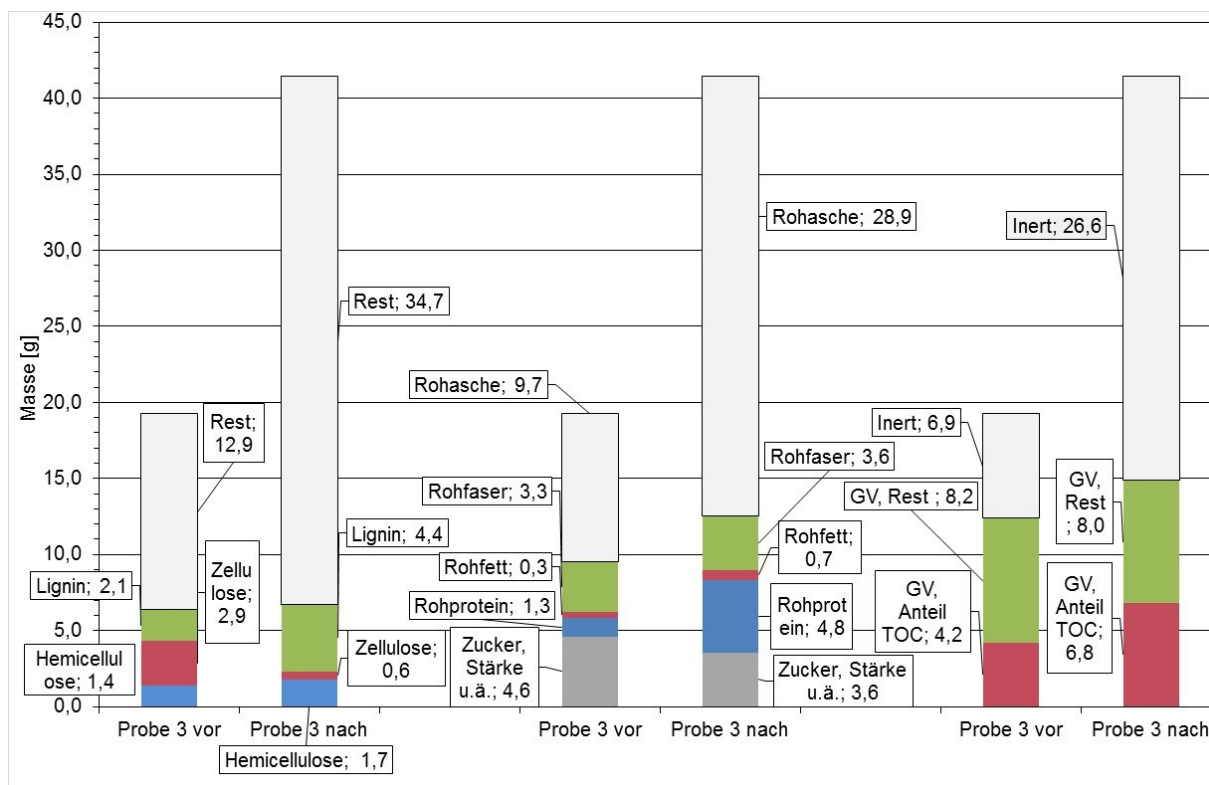
Bei Probe 6 scheint ein ähnlich großer hemmender Faktor gegeben gewesen zu sein, wie bei Probe 1.

Abbildung 29: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 3



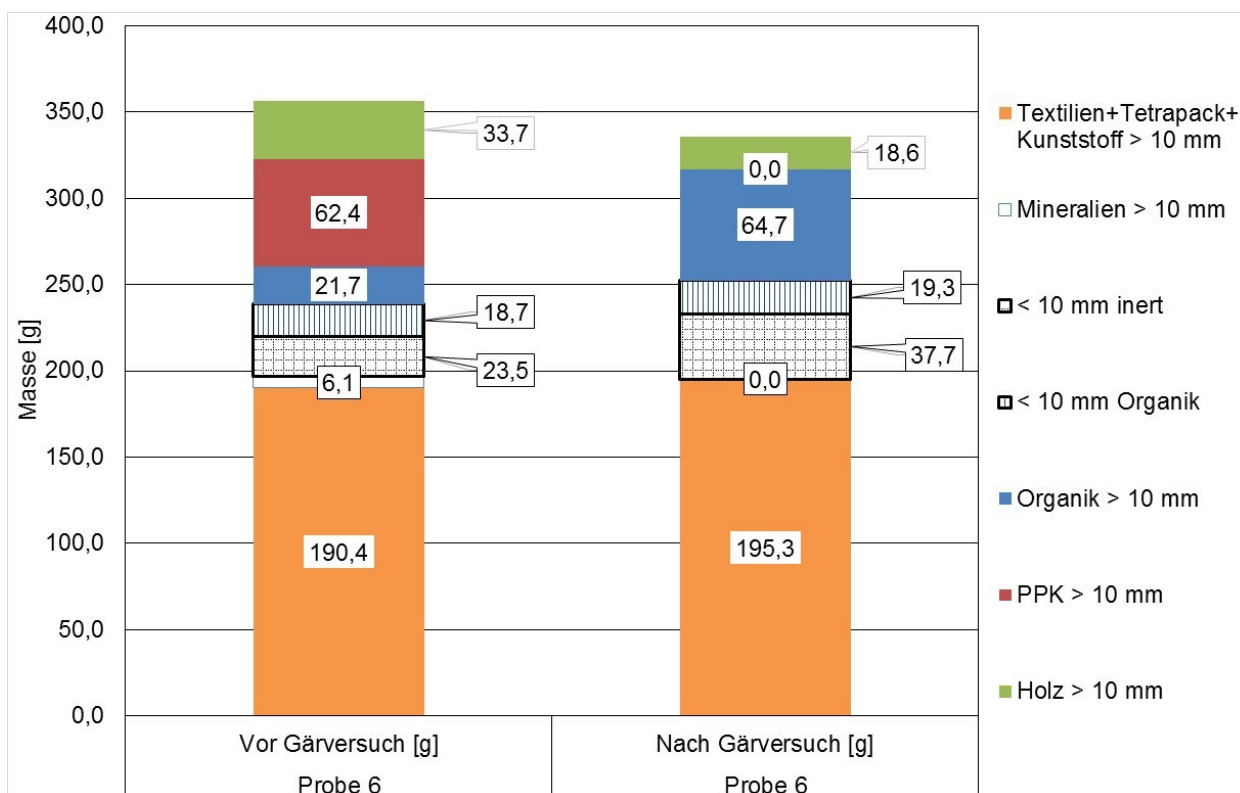
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 30: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 3



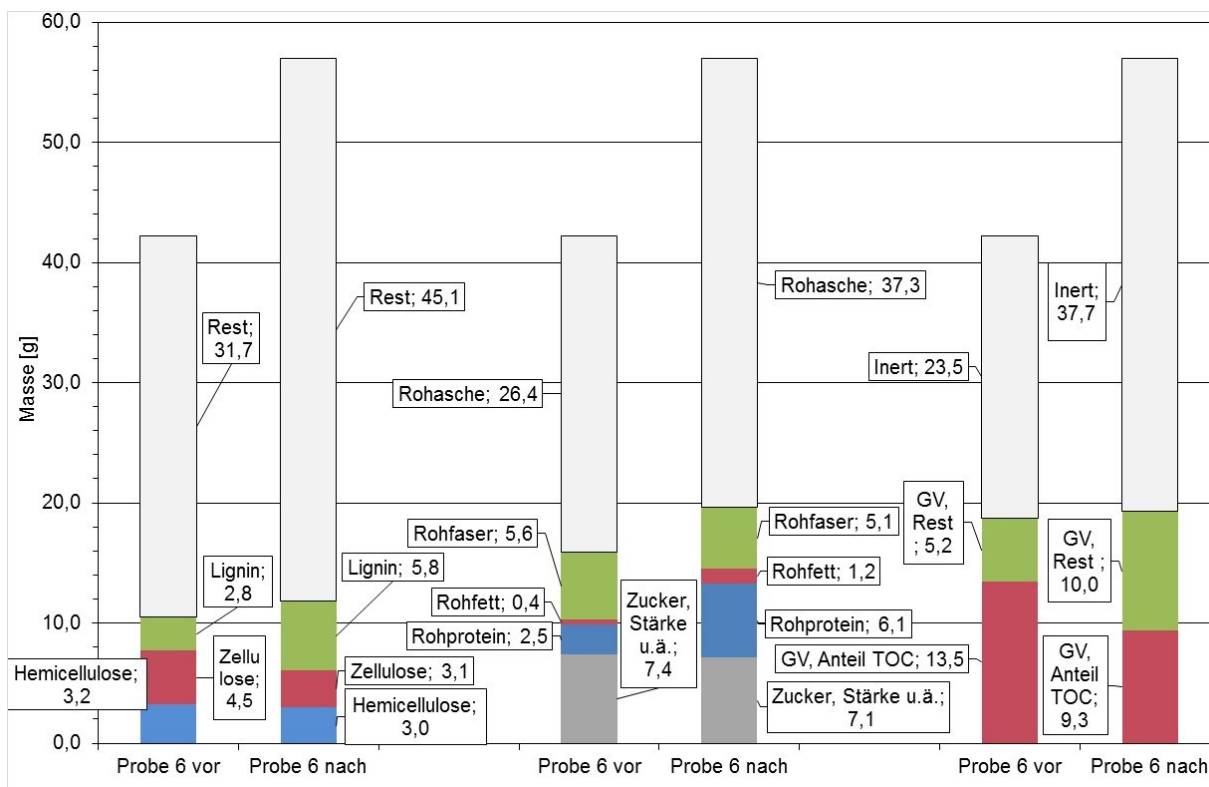
Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 31: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Sortierung vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 6



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 32: Langzeitgärversuche – Ergebnis der Untersuchung der Fraktion < 10 mm vor und nach dem Langzeitgärversuch für Probe 6



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

6.3.3.3 Halbwertszeiten beim Abbau unter Laborbedingungen

Vorab ist für alle Versuche anzumerken, dass in den Laborversuchen optimale Abbaubedingungen gegeben waren. Dies betrifft die Temperatur, den Wassergehalt und die anaeroben Bedingungen.

Bei einer realen Deponie sind solche Bedingungen allenfalls bereichsweise gegeben. Auffällig ist dies z. B. dadurch, dass bei der Beprobung älterer Deponiekörper in trockenen Deponiekörperbereichen oder bei der Ablagerung von Papierbündeln, in welche Wasser nicht vordringen konnte, lesbare Zeitungsteile gefunden werden, während bei optimalen Abbaubedingungen dieses Papier soweit zersetzt sein müsste, dass es nicht mehr als Papier erkannt werden kann.

Aufgrund der besseren Bedingungen sind die Absolutwerte für die ermittelten Halbwertszeiten wesentlich kleiner als jene für die Halbwertszeiten einer realen Deponie. Da bei allen Versuchen die gleichen optimalen Bedingungen gegeben sind, wird in einem ersten Ansatz jedoch davon ausgegangen, dass dennoch die bei den Einzelproben ermittelten Halbwertszeiten relativ zueinander ausgewertet werden können.

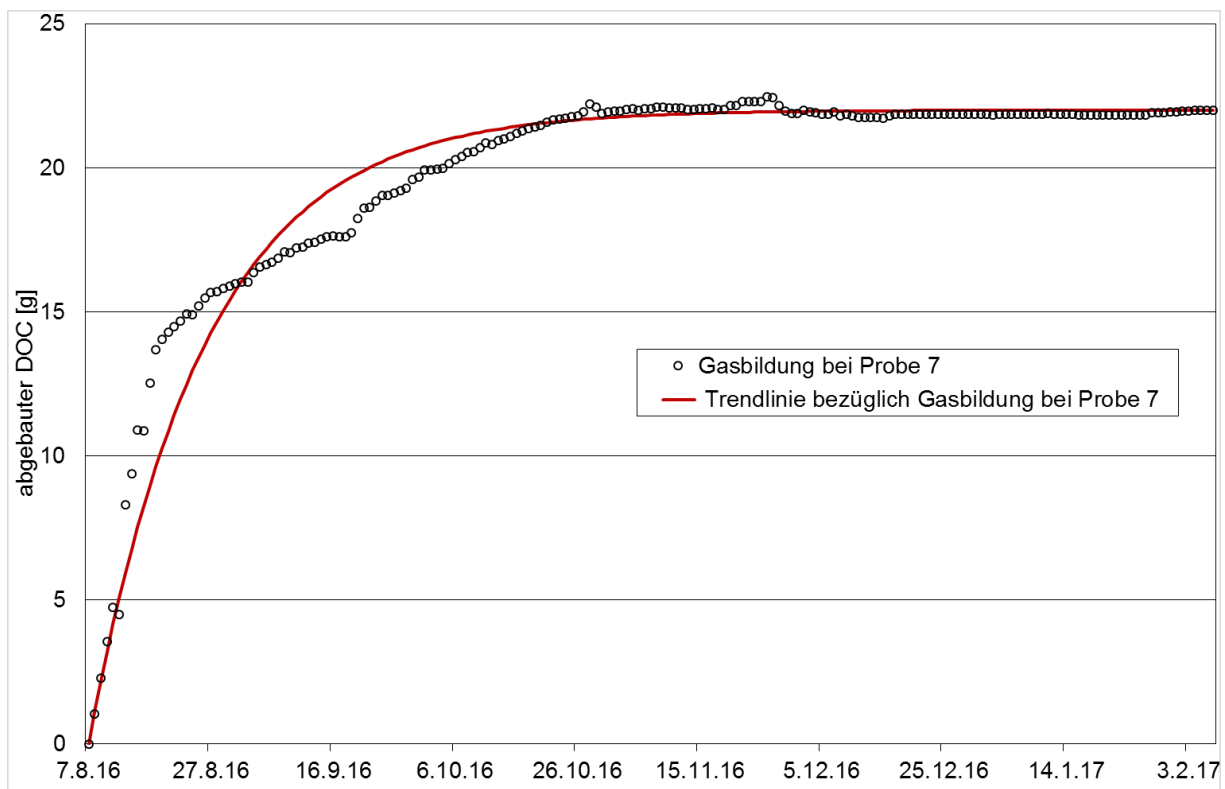
Wie die Detailauswertungen im Weiteren zeigen werden, ist auch dies allenfalls bedingt möglich.

Die Halbwertszeit für den Abbau der Organik-Fraktion kann aus der Probe 7 bestimmt werden. Hierzu wird durch die Summenkurve der Gasbildung eine Trendlinie als Exponentialfunktion so gelegt, dass zum einen Abweichungen nach unten und nach oben in der Summe gleich sind und zum anderen insgesamt möglichst geringe Abweichungen auftreten. Aus dieser Trendkurve kann die Halbwertszeit abgelesen werden. Die Messwerte und die daraus abgeleitete Trendkurve sind in der Abbildung 33 dargestellt. Als Summenkurve der Gasbildung wurde die Summe des abgebauten DOC verwendet.

Es zeigt sich wegen der unterschiedlichen Inhaltsstoffe der Organik-Fraktion eine Überlagerung verschiedener Abbaukurven. Nur deren gemeinsame Auswertung als Trendlinie ist zielführend.

Für die Trendkurve ergibt sich eine Halbwertszeit von 13,3 Tagen.

Abbildung 33: Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die Organik-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 7



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Um die Halbwertszeit für die PPK- und die Holzfraktion zu ermitteln, muss bei Probe 4 (PPK + Organik) und 5 (Holz + Organik) vom Gesamtabbau der Abbau durch die in diesen Proben enthaltene Organik jeweils anteilmäßig abgezogen und auf die jeweilige Fraktion normiert werden. Hierzu sind in den folgenden Abbildungen folgende Summenkurven der Gasbildung dargestellt:

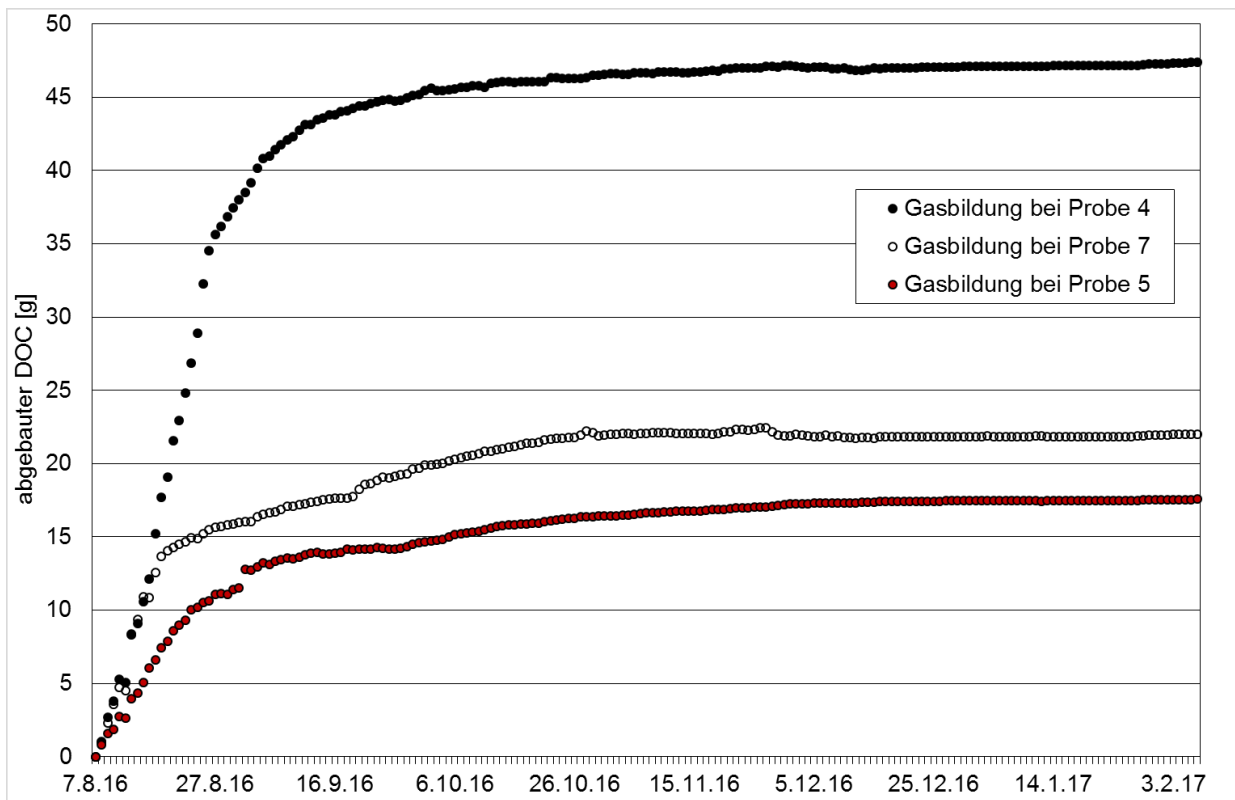
- ▶ In der Abbildung 34 sind die Summenkurven der Gasbildung für die Proben 4, 5 und 7 gemeinsam dargestellt.
- ▶ In der Abbildung 35 ist die Summenkurve der Gasbildung, wie sie sich für die PPK-Fraktion nach Abzug der Organik-Fraktion aus der Probe 4 berechnen lässt, dargestellt.
- ▶ In der Abbildung 36 ist die Summenkurve der Gasbildung, wie sie sich für die Holzfraktion nach Abzug der Organik-Fraktion aus der Probe 5 berechnen lässt, dargestellt.

Bei der PPK-Fraktion zeigt sich ein verzögerter Beginn des Abbaus. Dies wird im Anschluss dadurch ausgeglichen, dass ein schnellerer Abbau stattfindet. Dies kann verschiedene Ursachen haben:

- ▶ Zum einen könnte diese Besonderheit auf Inhomogenitäten in der Organikfraktion zurückzuführen sein, die abgezogene Organik-Fraktion macht immerhin 68 % des Probenmaterials aus.
- ▶ Zum zweiten könnte dies darauf zurückzuführen sein, dass sich Organikfraktion und PPK-Fraktion gegenseitig beeinflussen.
- ▶ Zum dritten könnte der Verlauf darin begründet sein, dass nicht gleich nach dem Start des Versuches optimale Bedingungen für den Abbau der PPK-Fraktion vorhanden waren.

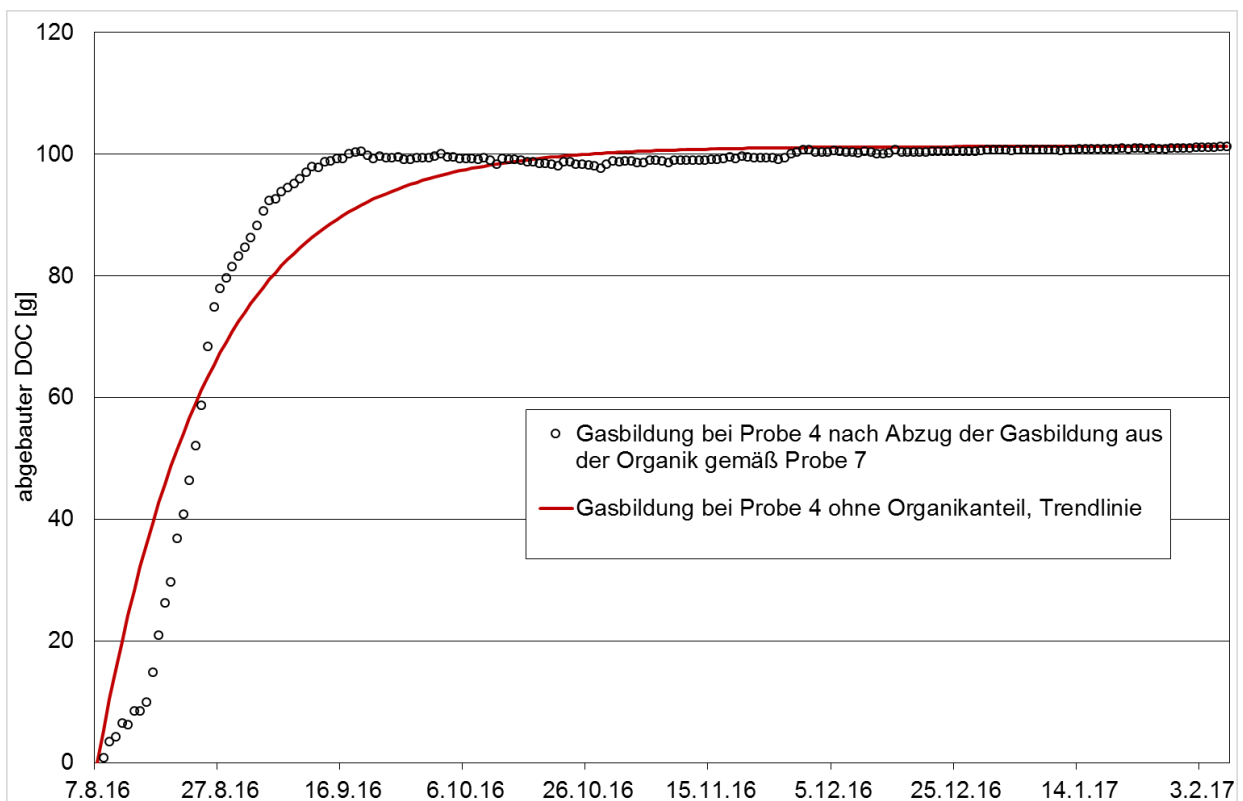
Letztlich sind die genannten Effekte analog dem Effekt aufgrund unterschiedlicher Bestandteile in der Organik-Fraktion zu bewerten: Nur die gemeinsame Auswertung als Hüllkurve ist zielführend.

Abbildung 34: Langzeitgärversuche – Summe der Gasbildung bei den Proben 4, 5 und 7



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 35: Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die PPK-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 4 nach Abzug der Organik-Fraktion

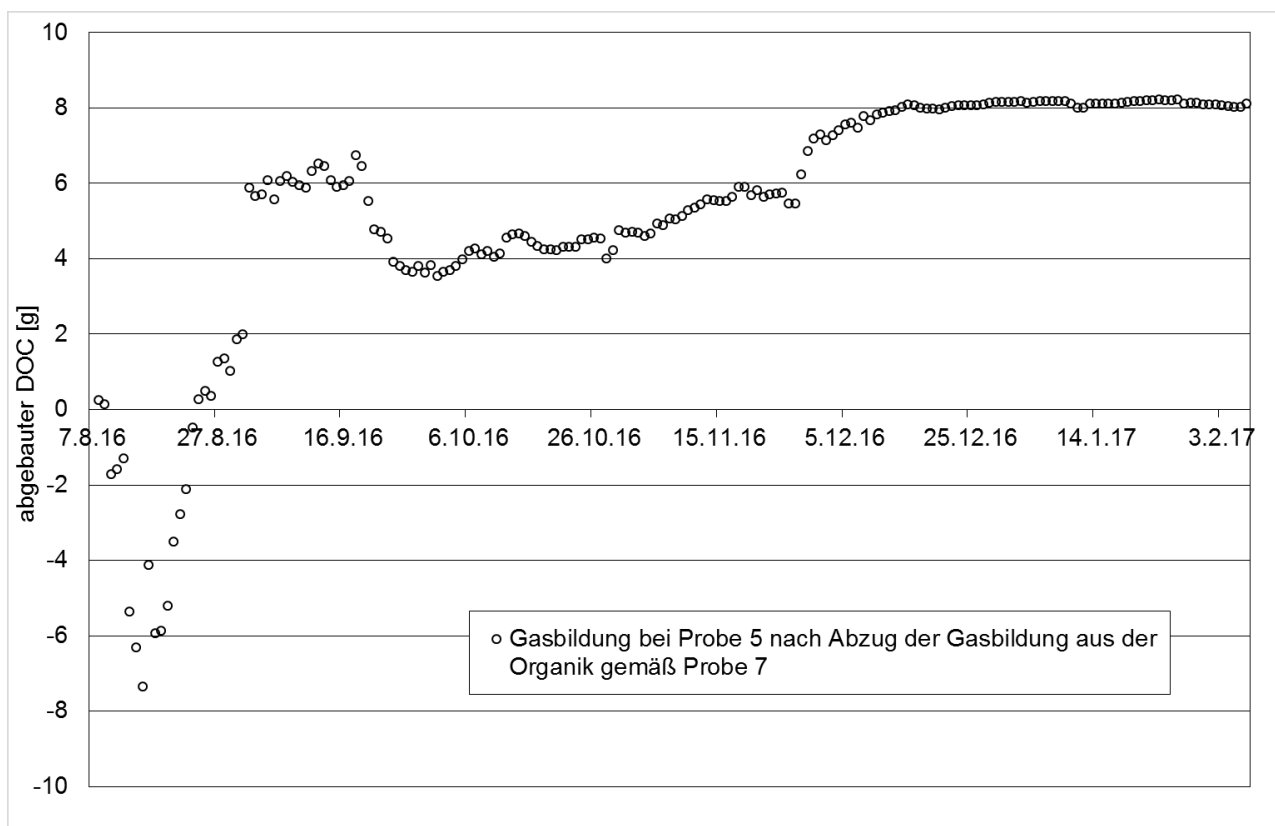


Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Für die Trendkurve ergibt sich eine Halbwertszeit von 12,7 Tagen. Es ergibt sich damit ein schnellerer Abbau als bei der Organik-Fraktion. Die hohe Abbaugeschwindigkeit ist allerdings nicht nur durch die gute Abbaubarkeit der PPK-Fraktion bedingt. Folgende beiden Effekte könnten hierfür mit ursächlich sein:

- ▶ Im Gegensatz zu den Bedingungen bei einer Deponierung von PPK-Fraktion wurde PPK vor dem Langzeitversuch als Ganzes zerkleinert und mit Organik und Impfschlamm vermischt angesetzt. Dadurch waren mit Versuchsbeginn Bedingungen für einen weitgehenden Abbau gegeben.
Zu den Bedingungen bei einer Deponierung von PPK-Fraktion bis zum Jahr 2005 ist auf folgenden Unterschied hinzuweisen, welcher auch Einfluss auf die Halbwertszeit hat:
Papier wurde teilweise trocken bzw. für einen biologischen Abbau zu trocken angeliefert und der Einbau in den Deponiekörper sorgte nur bedingt für eine Homogenisierung mit anderen angelieferten Abfällen. Für den Abbau der PPK-Fraktion geschwindigkeitsbestimmend kann für den zu trocken eingebauten Teil der PPK-Fraktion nicht die Abbaugeschwindigkeit bei der PPK-Fraktion unter optimalen Abbaubedingungen, sondern das Erreichen des für einen Abbau erforderlichen Wassergehaltes sein.
- ▶ Die Probe 4 enthielt zu Versuchsbeginn mehr als doppelt so viel organische Trockenmasse als Probe 7. Die damit gegebene höhere Konzentration an organischem Material könnte insgesamt zu einem Beschleunigungseffekt auch bei dem in der Probe 4 enthaltenen Anteil der Organik-Fraktion geführt haben kann.

Abbildung 36: Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die Holz-Fraktion aus der Summe der Gasbildung bei Probe 5 nach Abzug der Gasbildung aus der Organik-Fraktion



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Für die Holzfraktion ist in der Abbildung 36 bewusst keine Trendlinie als Trendlinie eingezeichnet, da sie aus den folgenden Gründen nicht zielführend ist:

- ▶ Die anfänglich gegebenen negativen Werte werden dadurch verursacht, dass sich der Holzanteil in der Probe 5 behindernd auf den Abbau des in der Probe 5 enthaltenen Anteils der Organik-Fraktion auswirkt.
- ▶ Der anschließende schnelle Abbau kann dadurch verursacht sein, dass die Holzfraktion aufgrund der Zerkleinerung auch Anteile an Holzmehl und Holspänen enthält. Dies wiederum kann durch die dann gegebenen optimalen Abbaubedingungen dazu geführt haben, dass auch die Organik-Fraktion in dieser Zeit beschleunigt abgebaut wird.

Selbst wenn angenommen würde, dass Holzmehl bei den im deutschen NIR angesetzten deponierten Holzanteilen zuzurechnen wäre, was nicht der Fall ist, handelt es sich bei der Gasbildung aus dem Holzmehl um einen Effekt, der nur sehr kurzfristig auftritt. Von Interesse ist jedoch die langfristige Gasbildung. Hier eine Trendlinie festzulegen ist Spekulation. Beispielsweise würde sich beim Start der Trendlinie im Ursprung 0/0 der Abbildung 36 eine Halbwertszeit von 49 Tagen ergeben und bei einem Startpunkt am 01.09.2016 bei einem bis dahin abgebauten DOC von 5,88 g eine Halbwertszeit von 238 Tagen ergeben.

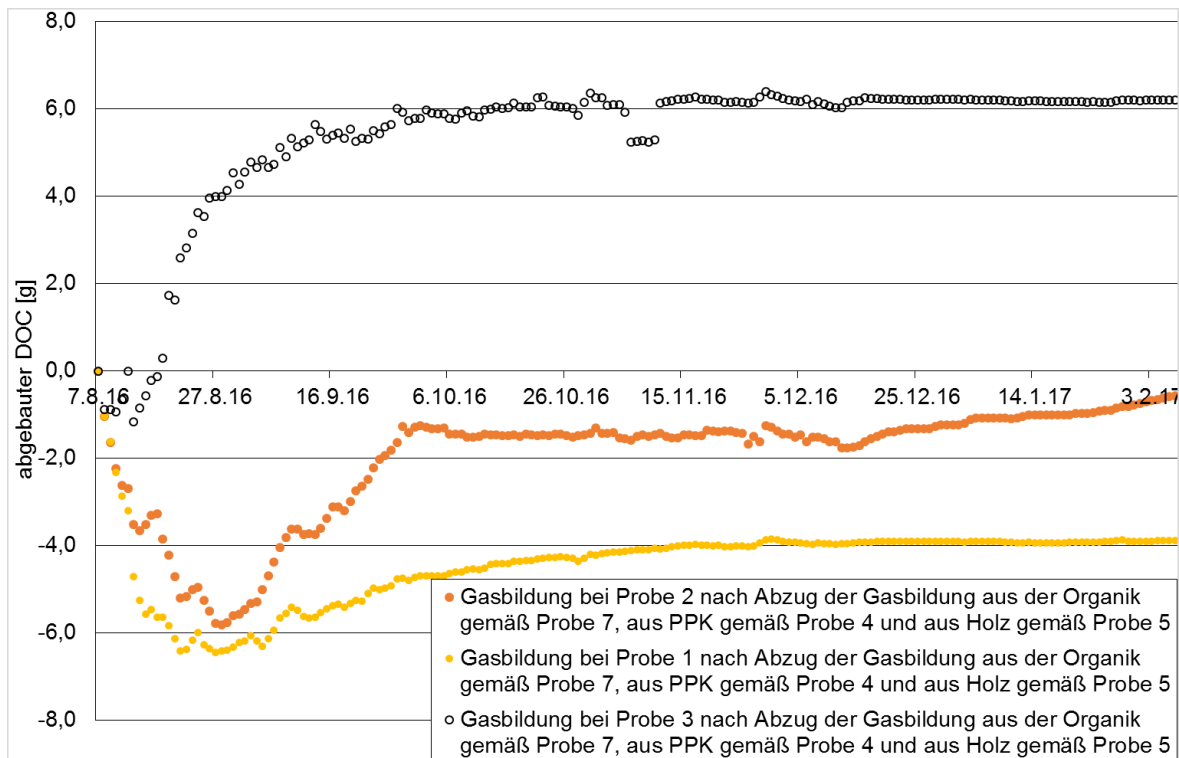
Insgesamt zeigt sich bei der Probe 5 noch mehr als bei Probe 4 die Grenze der Herangehensweise, bei der zur Bestimmung der Gasbildung aus einem Inhaltsstoff der Probe zunächst die anteilmäßige Gasbildung eines anderen Inhaltsstoffes abgezogen werden muss. Bei dieser Methode wird nämlich unterstellt, dass sich die beiden Inhaltsstoffe der Probe im Gemisch gleich verhalten würden wie bei der Untersuchung einer Probe nur mit einem Inhaltsstoff. Dies ist nicht immer so. Besonders bei den in geringeren Anteilen enthaltenen Inhaltsstoffen kann dies zu Schwankungen führen. Dies wird bei den weiteren Auswertungen besonders deutlich.

Bei den Proben 1 bis 3 kann analog den Proben 4 und 5 durch Abzug der Gasbildung aus den Anteilen mit bekannter Gasbildung die Gasbildung aus den dann noch verbleibenden Anteilen ermittelt werden:

- ▶ Bei der Probe 1 müssen hierzu 30 % der Gasbildung aus Organik, 14 % der Gasbildung aus PPK und 7 % der Gasbildung aus Holz abgezogen werden.
- ▶ Bei der Probe 2 müssen hierzu 20 % der Gasbildung aus Organik, 16 % der Gasbildung aus PPK und 8 % der Gasbildung aus Holz abgezogen werden.
- ▶ Bei der Probe 3 müssen hierzu 40 % der Gasbildung aus Organik, 12 % der Gasbildung aus PPK und 6 % der Gasbildung aus Holz abgezogen werden.

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist in der Abbildung 37 dargestellt.

Abbildung 37: Langzeitgärversuche – Bestimmung der Halbwertszeit für die verbleibenden Fraktionen aus der Summe der Gasbildung bei den Proben 1-3 nach Abzug der Organik-, der Holz- und der PPK-Fraktion



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

6.3.4 Ergebnisse aus der Auswertung von erbohrtem Abfall

Am 11. Juli 2017 wurden bei einem Gasbrunnenbau im Kuppenbereich einer zwischen 1974 und 1976 verfüllten Deponie VR die Untersuchungen der Position 2 durchgeführt.

Die Deponie VR befindet sich in einer ehemaligen Sandgrube. Sand wurde in erheblichen Mengen zur Abdeckung der Abfälle eingesetzt, so dass bei den Untersuchungen in der Fraktion < 10 mm erhebliche mineralische Anteile zu finden waren. Die Fraktion < 10 mm ist dadurch mit folgenden festgestellten mittleren Werten nicht mit den Proben nach den Langzeitgärversuchen vergleichbar:

- ▶ Rohasche: 97,5 %
- ▶ Rohprotein: 0,6 %
- ▶ Rohfett: 0,3 %
- ▶ Rohfaser: 1,6 %
- ▶ Hemicellulose: 1,6 %
- ▶ Cellulose: 1,0 %
- ▶ Lignin: 0,4 %
- ▶ Glühverlust 3,7 Gew.-%
- ▶ TOC: 1,1 Gew.-%

Auch in der Fraktion > 10 mm wurden erhebliche Anteile Bodenmaterial und Steine gefunden. Insgesamt wurde folgende Zusammensetzung ermittelt:

- ▶ Bodenmaterial: 45,6 %
- ▶ Metalle 1,2 %
- ▶ PPK: 1,4 %

- ▶ Holz: 0,3 %
- ▶ Kunststoffe: 1,5 %
- ▶ Steine/Glas: 15,2 %
- ▶ < 10 mm 34,8 %

Trotz des hohen Inertanteils wurde eine relevante Gasbildung ermittelt. Der GB_{21} lag bei 5 Untersuchungen zwischen 1,1 und 6,0 l/kg bei einem Mittelwert von 3,2 l/kg.

Das Ergebnis aus den GB_{21} -Untersuchungen wurde mit einer Gasprognose für die Deponie VR unter Ansatz der Werte aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) verglichen. Hierbei zeigt sich für das Jahr 2017 bei beiden Herangehensweisen eine nahezu identische Gasbildungsrate.

6.3.5 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu Pos. 1 und 2

Bei den Langzeitgärversuchen wurden Erkenntnisse zum DDOCm und zu den Halbwertszeiten unterschiedlicher Abfallfraktionen im Labor gewonnen. Bei den Halbwertszeiten mit dem Vorbehalt, dass die Ergebnisse überlagert sind durch sich gegenseitig beeinflussende Fraktionen bei den in 6 von 7 Proben untersuchten Materialmischungen.

Die Sortieranalysen vor und nach den Langzeitgärversuchen wurden zwar ebenfalls ausgewertet, es zeigte sich hierbei jedoch, dass Vieles dabei nicht eindeutig auszuwerten war. Eine stärkere Auswertung als durchgeführt wäre spekulativ und bereits bei der durchgeführten Auswertung waren nicht eindeutig belegbare Annahmen zu treffen. Insofern muss auf eine Verwendung der Ergebnisse zur Bewertung verzichtet werden.

Vorgehensweise:

Insgesamt wurden 7 Langzeitgärversuche mit synthetisch hergestellten Abfallmischungen wie folgt durchgeführt (Pos. 1):

- ▶ 1 Versuch ausschließlich mit Organik Fraktion,
- ▶ 2 Versuche mit PPK bzw. Holz und Anteilen von Organik-Fraktion sowie
- ▶ 4 Versuche mit unterschiedlichen Mischungen von allen Abfallfraktionen, welche in der Gasprognose nach IPCC unterschieden werden. Die Mischungen wurden so hergestellt, dass damit das Deponiegut in deutschen Deponien abgebildet wird.

Zur Kontrolle wurden mit den gleichen Methoden zusätzlich Proben aus der Durchführung einer Greiferbohrung zum Gasbrunnenbau bei einer Altdeponie untersucht (Pos. 2).

Grundsätzliche Erkenntnisse:

Es war bei den vier Versuchen mit den Mischungen aller Abfallfraktionen ein unterschiedliches Abbauverhalten und zwar sowohl hinsichtlich der Summe an Gasbildung als auch hinsichtlich des Zeitverlaufs der Gasentstehung festzustellen.

Die Ergebnisse zeigten, dass das Abbauverhalten stark von der Zusammensetzung des Deponiegutes abhängt. Bereits bei der Betrachtung der Ergebnisse der vier Versuche mit den Mischproben fällt zudem auf, dass die gegenseitige Beeinflussung nicht nur den Abbau von langsam abbaubaren Abfallfraktionen betrifft, sondern auch jene der schnell abbaubaren Abfallfraktionen wie Organik oder PPK.

Erkenntnisse zum DDOCm (= DOC x DOCf):

Bei der Auswertung der Langzeitgärversuche wurden folgende DDOCm-Werte ermittelt:

- ▶ PPK-Fraktion: 203 kg/Mg FM
- ▶ Organik-Fraktion: 44 kg/Mg FM

- ▶ Holzfraktion: 16 kg/Mg FM

Bei den Langzeitgärversuchen wurde für alle Proben ein erheblich niedrigerer Wert für DDOC_m ermittelt, als sich bei den Ansätzen der IPCC rechnerisch ergeben würde.

- ▶ Die geringsten Abweichungen sind bei der PPK-Fraktion gegeben.
- ▶ Die größten Abweichungen treten bei der Holzfraktion auf.
- ▶ Bei der Organik-Fraktion wird mit den rechnerischen Ansätzen der C_{Org.}-Abbau ebenfalls deutlich überschätzt.

Zur Beurteilung der Werte ist auf Folgendes hinzuweisen:

- ▶ Bei der Organik-Fraktion handelt es sich um eine wesentlich inhomogenere Mischung als bei der PPK-Fraktion und bei der Holzfraktion.
- ▶ Insbesondere sind in der Organik-Fraktion Abfälle mit sehr unterschiedlichem Wassergehalt enthalten. Dies macht sich entsprechend bei dem auf die Feuchtmasse bezogenen DDOC_m bemerkbar.
- ▶ Durch die Inhomogenität sind die Versuchsergebnisse für die Organik-Fraktion von der subjektiven Auswahl der Zusammensetzung der Organik-Fraktion bei deren Zusammenstellung für die Versuche beeinflusst.
- ▶ Für die Langzeitgärversuche mit der Holzfraktion wurde das Holz zuvor zerkleinert. Die bei der Zerkleinerung angefallenen Holzspäne und das bei der Zerkleinerung angefallene Holzmehl wurden der Probe zugegeben. Die Betrachtung der Zeitreihe der Gasbildung lässt vermuten, dass ca. 60 % der Gasbildung aus Holzmehl stammen müsste. Wird dieses und zudem berücksichtigt, dass Holzmehl bei der realen Deponierung praktisch keine Rolle spielt, muss der hier abgeleitete Wert für den DDOC_m in einer realen Deponie theoretisch auf 40 % des so experimentell ermittelten Wertes reduziert werden.

Erkenntnisse zu den Halbwertszeiten beim Abbau unter Laborbedingungen:

Wichtig ist die Erkenntnis der Halbwertszeiten relativ zueinander. Demnach ist Folgendes festzustellen:

- ▶ Die Abbaugeschwindigkeit von PPK scheint gleich groß zu sein wie jene der Organik-Fraktion.
- ▶ Die Halbwertszeit der Holzfraktion müsste unter Berücksichtigung des Abbaus von Holzmehl mindestens um den Faktor 4 größer sein als jene von PPK und Organik.

Die Erkenntnis bei der PPK-Fraktion ist noch aufgrund der im Folgenden beschriebenen Effekte zu relativieren:

- ▶ Im Gegensatz zu den Bedingungen bei einer Deponierung von PPK-Fraktion wurde PPK vor dem Langzeitversuch als Ganzes zerkleinert und mit Organik und Impfschlamm vermischt ange-setzt. Dadurch waren mit Versuchsbeginn Bedingungen für einen vollständigen Abbau gegeben. Nicht berücksichtigt ist hierbei, dass in einer realen Deponie für den dort zu trocken deponierten Anteil der PPK-Fraktion nicht die Abbaugeschwindigkeit unter optimalen Abbaubedingungen, sondern das Erreichen des für einen Abbau erforderlichen Wassergehaltes der geschwindigkeitsbestimmende Schritt sein kann.
- ▶ Die DDOC_m-Konzentration war mit 44 kg/Mg zu Beginn des Langzeitgärversuchs nur mit Organik weniger als halb so hoch wie die DDOC_m-Konzentration von 95 kg/Mg zu Beginn des Langzeitgärversuch mit Organik und PPK. Es ist anzunehmen, dass durch die höhere Konzentration an DDOC_m die Abbaubedingungen bei dem Langzeitgärversuch mit PPK und Organik besser waren.

Erkenntnisse zu den im Labor angewendeten Methoden:

Als Ergebnis der Position 2 ist festzuhalten, dass die dort ermittelten Analyseergebnisse durch die Gasprognose für die Deponie, aus der das untersuchte Bohrgut gewonnen worden ist, mit den Ansätzen des Sachverständigengutachtens RUK 2014 bestätigt werden. Die Untersuchungen nach dem Ende der Langzeitgärtests sowie die Art der Durchführung der Langzeitgärtestes waren also vom Grundsatz zielführend.

6.4 Ergebnisse zu Pos. 3: Untersuchungen an Abfallproben aus Deponien

6.4.1 Ablauf der Untersuchungen auf Deponien und Abfallanalysen

Den 18 Deponien AI-QI sind bis zum August 2017 insgesamt 505 Abfallproben entnommen worden, um deren Beschaffenheit und biologische Aktivität im Hinblick auf das noch vorhandene Gasbildungspotenzial zu quantifizieren. Dazu wurden die aufgeführten Standard-Untersuchungsmethoden und Biotests, hauptsächlich zur Atmungsaktivität AT_4 und ergänzend zur Gasbildungsrate GB_{21} vorgenommen. Insbesondere für die beiden UFOPLAN-Vorhaben wurden 2015 – 2016 zusätzlich Untersuchungen an 79 Abfallproben an folgenden Deponiestandorten durchgeführt (Tabelle 30).

Tabelle 30: Deponiestandorte und Untersuchungsprogramm für die beiden UFOPLAN-Vorhaben

			Deponie		MI Neu	NI	Summe
	CI	FI	JI	KI			
Datum Probenahme	07 / 2015	02 / 2015	05 / 2015	04 / 2016	08 - 09 / 2016	07 / 2016	
Anzahl Proben	2	8	8	32	15	14	79
Sortierung	-	-	-	10	-	-	10
Untersuchung w, GV, TOC, N	2	8	8	32	15	14	79
Biotests							
AT_4	2	8	8	32	15	14	79
AT_{20}	1	3	5	9	10	6	34
GB_{21}	2	8	8	24	10	14	66
GB_{60}	1	3	5	8	10	6	33
Van Soest Auf-	1	3	5	12	3	6	30

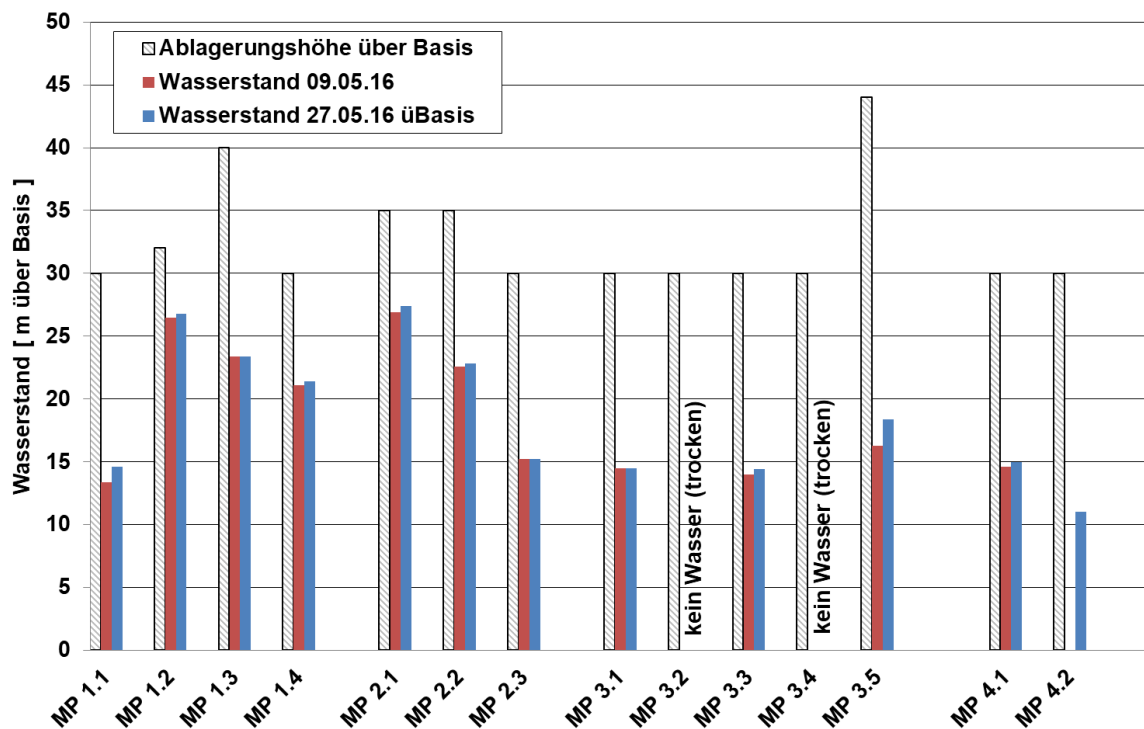
6.4.2 Ergebnisse zum Deponieverhalten und Gasbildungspotenzial der Deponie KI

Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse zum Deponieverhalten, zu den organischen Abfallfraktionen, zum Gasbildungspotenzial sowie dem resultierenden Gashaushalt der Deponie KI aufbereitet.

Wasserhaushalt

Obwohl es sich bei der Deponie KI um eine Haldendeponie handelt, weisen viele Deponiebereiche einen erheblichen Grad an Porenwassersättigung bzw. Sickerwassereinstau im Deponiekörper auf. Derart ausgeprägte Zonen der Porenwassersättigung sind bei zahlreichen der näher untersuchten Deponiestandorte AI–QI festgestellt worden. Der Wasserhaushalt bestimmt maßgeblich die biologischen Abbauprozesse und die Deponiegasbildung.

Abbildung 38: Porenwassersättigung / Sickerwassereinstau in unterschiedlichen Deponiebereichen (Beprobungspunkte MP) der Deponie KI



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Sortieranalysen, organikhaltige Abfallfraktionen

An den sortierfähigen Abfallproben mit geringerem Wassergehalt (keine schlammige Konsistenz) wurden Sortieranalysen der Hauptfraktionen durchgeführt. Dabei wurde nach folgenden Fraktionen sortiert:

- ▶ Organische Anteile enthaltende, erdähnliche Hauptfraktion
- ▶ Papier / Pappe / Kartonagen
- ▶ Holz
- ▶ Textilien
- ▶ Verbundstoffe mit Kunststoffen
- ▶ Mineralische Stoffe

Die Ergebnisse zur Zusammensetzung weisen auf Folgendes hin (Tabelle 31):

- ▶ Den weitaus größten Massenanteil (%FM) mit 71 – 93 Masse-% bildet die erdähnliche Fraktion, die sowohl organische Anteile als auch mineralische Anteile (Glas, Steine, Metalle, die hier jedoch nur in sehr geringen Anteilen vorhanden waren) aufweist. Nach allen vorliegenden Untersuchungen ist diese Fraktion für das verbliebene Deponiegaspotenzial und folglich die bestehende Gasbildung maßgeblich.
- ▶ Papier wurde bei keiner der sortierten Abfallproben mehr vorgefunden. Das deutet darauf hin, dass die PPK-Fraktion bereits sehr weitgehend abgebaut wurde. Ggf. befinden sich noch faserige Reste der PPK-Fraktion in geringen Anteilen (da sie sonst bei der Sortierung erkennbar wären, was nicht der Fall war) in der erdähnlichen Hauptfraktion und tragen darüber zur Deponiegasbildung bei. Ähnliche Erfahrungen wurden auch bei vergleichbaren Untersuchungen an Deponien gemacht. So werden unter anaeroben Bedingungen Papierfraktionen, die wenig Lignin enthalten wie z.B.

Wellpappe oder Kopierpapier, innerhalb weniger Jahre sehr weitgehend abgebaut, so dass die „Wiederfindungsrate“ gering war (Wang et al., 2013).

- Der Holzanteil war mit 0,4 – 3,2 Masse-% ebenfalls sehr gering.
- Auch der Anteil an Textilien war mit 0 – 2,7 Masse-% sehr gering.
- Der Anteil an Verbundstoffen und Kunststoffen lag mit 0 – 19% höher, die Fraktion enthielt augenscheinlich jedoch wenig bioverfügbare Bestandteile.
- Die getrennt sortierbaren, gröberen mineralischen Anteile lagen bei 2 – 14%.

Insbesondere die geringen Anteile der PPK-Fraktion, aber auch des Holz- und der Textilien bestätigen die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen und der Fachliteratur, dass diese Anteile in der Regel auf deutschen Deponien (und mithin ihr Gasbildungspotenzial) geringer sind als sie im Nationalen Inventarbericht für die von 1950 – 2005 abgelagerten Abfälle angesetzt werden.

Tabelle 31: Zusammensetzung von Abfallproben der Deponie KI, Bezug auf Feuchtmasse FM

Bohrpunkt	Deponie KI									
	MP 1.4	MP 2.3	MP 3.1	MP 3.2	MP 3.2	MP 3.4	MP 3.4	MP 4.1	MP 4.2	MP 4.2
Entnahmetiefe [m uGOK]	10	10	10	5	10	5	10	10	10	20
Organikhaltige erdähnliche Hauptfraktion [Masse-%]	87,7 %	83,6 %	71,3 %	92,2 %	79,8 %	78,4 %	93,2 %	90,9 %	71,8 %	90,1 %
Papier / Pappe / Kartonen [Masse-%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Holz [Masse-%]	0,7 %	0,3 %	1,0 %	0,4 %	1,2 %	1,0 %	0,4 %	1,7 %	3,2 %	0,2 %
Textilien [Masse-%]	1,4 %	2,7 %	1,7 %	1,0 %	0,9 %	0%	0,1 %	1,3 %	0,4 %	0,1 %
Verbundstoffe [Masse-%]	7,8 %	8,1 %	19,0 %	4,2 %	13,6 %	7,8 %	3,8 %	0%	10,7 %	7,0 %
Mineralische Stoffe [Masse-%]	2,4 %	5,4 %	7,1 %	2,1 %	4,5 %	12,7 %	2,5 %	6,1 %	13,9 %	2,6 %

Stoffgruppenspezifischer Aufschluss nach van Soest

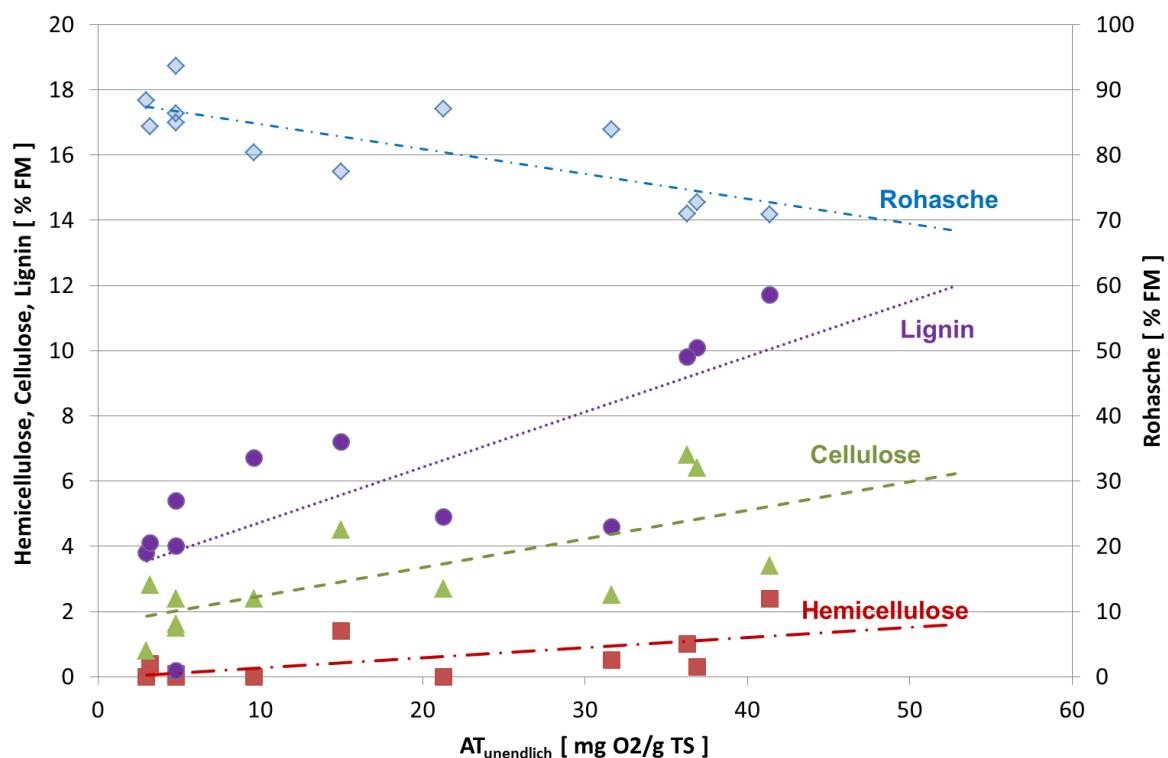
In Abbildung 39 sind die Ergebnisse des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses hinsichtlich Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Rohasche (100 % - Glühverlust GV) im Verhältnis zum langfristigen Sauerstoffverbrauch, abgeleitet aus den Atmungsmessungen, als Maß der biologischen Aktivität bzw. des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs aufgetragen. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass sich aus dem biologisch verfügbaren Kohlenstoffanteil und den mehr oder minder abbaubaren Anteilen des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses ein qualitativer Zusammenhang ergibt: je höher die biologische Aktivität, desto höher auch der Anteil der drei o.g. unterschiedlich abbaubaren Fraktionen.

In Abbildung 40 sind Angaben aus der Fachliteratur zur Zusammensetzung der organischen Abfallbestandteile von frischem Hausmüll aus den achtziger Jahren aufgeführt (Hoeks, 1983, Bidlingmaier 1983). Sie können zur orientierenden Einordnung der Mittelwerte aus den Ergebnissen der Abfallproben der Deponie KI herangezogen werden:

- Danach waren im Frischmüll von 58 % der gesamten organischen Bestandteile etwa 52 – 53 % den drei Fraktionen zuzuordnen, die mit der van Soest Analyse erfasst werden.

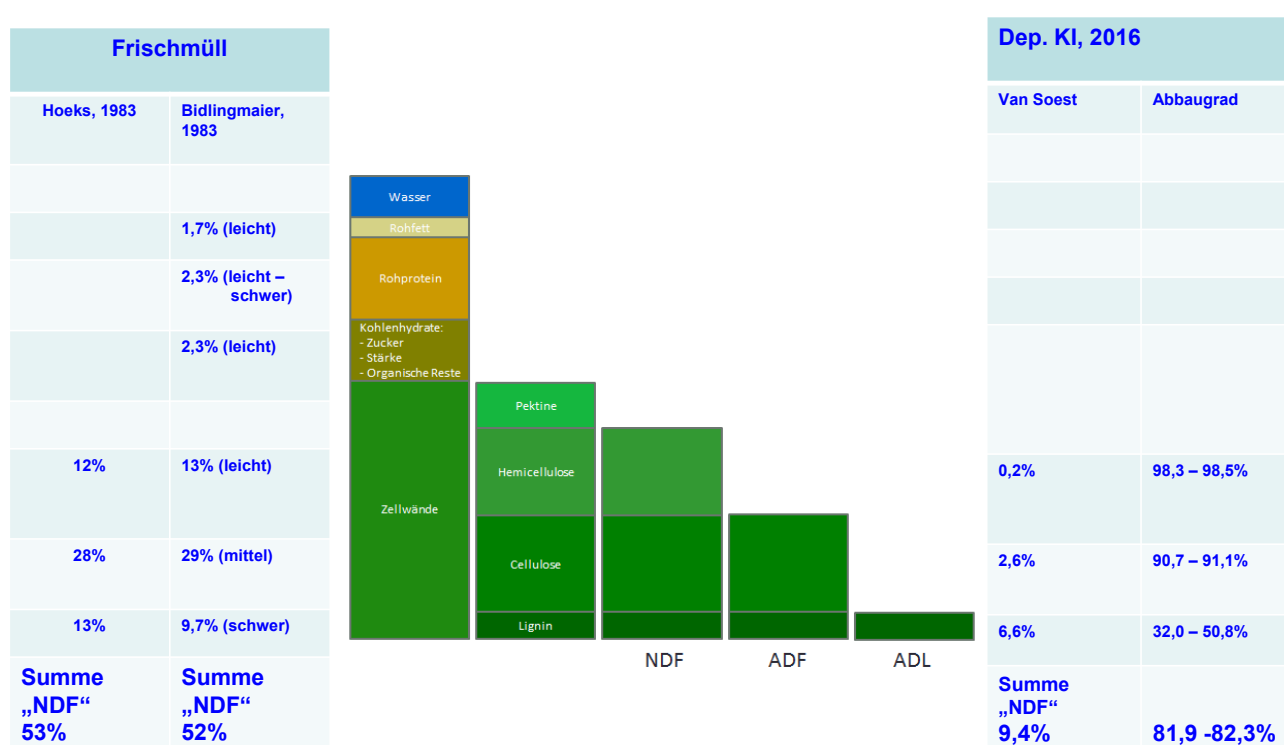
- ▶ Im Vergleich dazu haben sich die leicht abbaubaren Anteile (Hemicellulose) von ursprünglich ca. 13 Masse-% bei der Deponie KI auf 0,2 Masse-% reduziert, was einem nahezu vollständigen Abbau von etwa 98 – 99 % entspricht.
- ▶ Bei den mittel abbaubaren Anteilen (Cellulose) beträgt der Abbau 90 – 91% und bei den schwer abbaubaren Anteilen 32 – 51 %. Erwartungsgemäß ist folglich der Abbau der biologisch schwer abbaubaren Fraktion (ligninähnliche Substanzen) noch nicht so weit vorangeschritten wie der bei den leicht und mittel abbaubaren organischen Verbindungen.
- ▶ Der Gesamtanteil der biologisch unterschiedlich abbaubaren Bestandteile hat sich von ca. 52-53 Masse-% auf 9,4 Masse-% reduziert, was einem Abbaugrad von 82 % entspricht.

Abbildung 39: Anteile Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Rohasche im Verhältnis zum langfristigen Sauerstoffverbrauch, Deponie KI



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Abbildung 40: Vergleich der Anteile Hemicellulose, Cellulose, Lignin im Frischmüll mit den Mittelwerten der Deponie KI



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Ein direkter quantitativer Zusammenhang zwischen den Kohlenstoffanteilen der drei Fraktionen des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses zu dem biologisch verfügbaren Anteil, wie er sich aus den Extrapolationen des Atmungsaktivitätstest AT₄ und des Gärtest GB21 ableitet, ist nicht ohne weiteres herzustellen. Es zeichnet sich eher ab, dass aus dem leicht und mittel abbaubaren Anteil dieser Fraktion der Kohlenstoffanteil herrührt, der auch in den Biotests aerob und bedingt auch noch anaerob umgesetzt werden kann. Lignin ist dagegen anaerob schwer bis nicht verfügbar und trägt auch unter aeroben Milieu- bzw. Testbedingungen nur wenig zum Sauerstoffverbrauch bei.

Hier ergibt sich eine Analogie zum so genannten „korrigierten“ Glühverlust als die Summe aus leicht und mittel abbaubaren organischen Anteilen. Die Methode zur Bestimmung des „korrigierten“ Glühverlusts wurde beim Umweltbundesamt von Amin et al. (1995) in modifizierter Form auf verschiedene Materialien und Abfälle angewendet, um damit einen Alternativwert zum herkömmlichen Glühverlust zu erhalten, der die biologische Abbaubarkeit der organischen Inhaltsstoffe zutreffender wiedergibt.

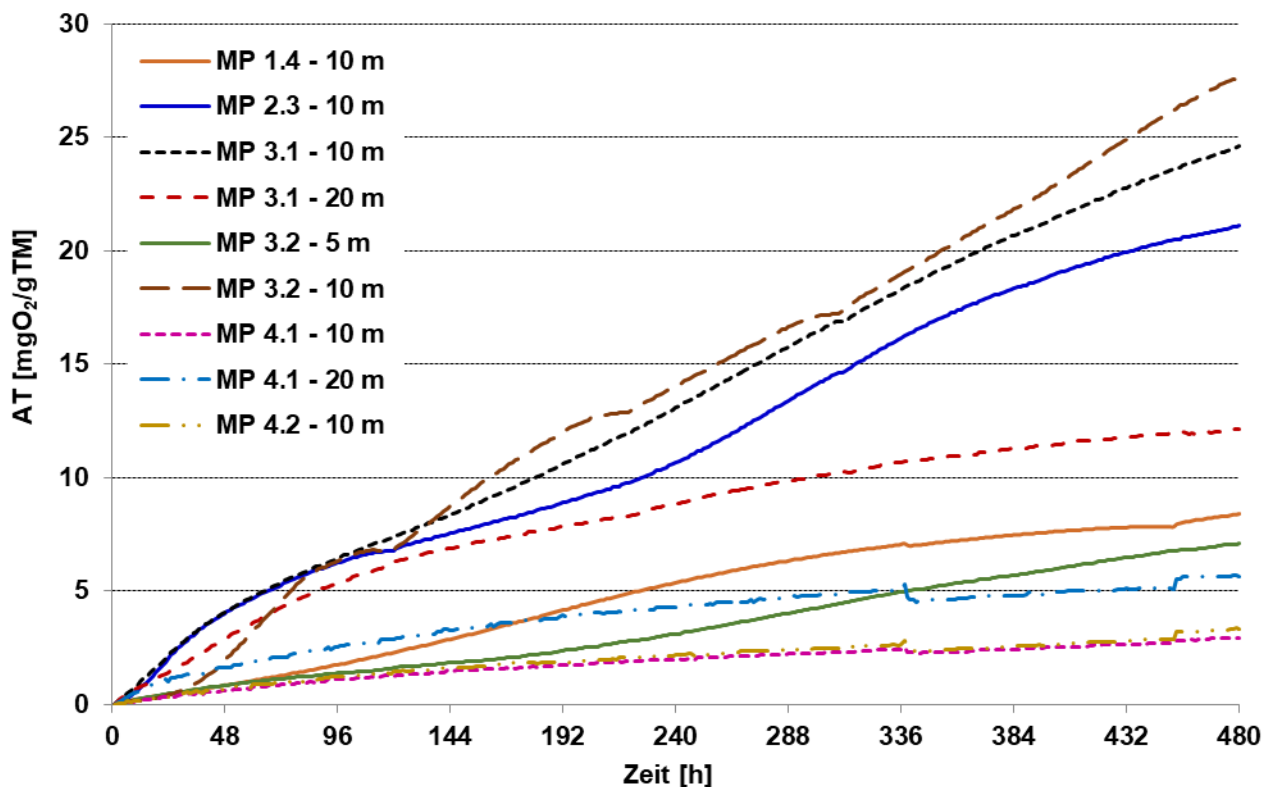
Biotest: Atmungsaktivität AT

In Abbildung 41 sind die Summenlinien des Sauerstoffverbrauchs (Atmungsaktivität AT) von Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 20 Tagen = 480 Stunden aufgetragen. Die Ergebnisse und Auswertungen zeigen:

- ▶ Erwartungsgemäß ist der Sauerstoffverbrauch nach 96 Stunden bzw. 4 Tagen (AT₄ als Standardmesszeitraum) noch nicht abgeschlossen und setzt sich auch nach 480 Stunden = 20 Tagen (AT₂₀) noch weiter fort.
- ▶ Je nach Organikgehalt und biologisch verfügbarem Kohlenstoff bzw. Organikanteil liegen die Atmungsaktivitäten in einer großen Bandbreite nach 4 Tagen von 1 – 7 mgO₂/gTM und nach 20 Tagen von 3 – 28 mgO₂/gTM.

- ▶ Gegenüber frischen Siedlungsabfällen, die zum Zeitpunkt der Ablagerung im Bereich von $AT_4 = 50 \text{ mgO}_2/\text{gTM}$ liegen können, haben sich die Atmungsaktivitäten bereits erheblich reduziert.
- ▶ Extrapolationsrechnungen an den Abfallfeststoffproben der Deponie KI sowie einer großen Anzahl weiterer Deponien und der dort entnommenen Abfallfeststoffproben ermöglichen eine Abschätzung des langfristigen Gesamtsauerstoffbedarfs (Zeitraum „unendlich“ bzw. AT_∞) mit folgenden empirischen Faktoren:
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 0 - 5 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 8 * AT_4 [\text{mgO}_2/\text{gTM}]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 5 - 10 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 6 * AT_4 [\text{mgO}_2/\text{gTM}]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich 10 - 20 mgO_2/gTM : $AT_\infty = 4 * AT_4 [\text{mgO}_2/\text{gTM}]$
 - Atmungsaktivität AT_4 im Bereich $> 20 \text{ mgO}_2/\text{gTM}$: $AT_\infty = 3 * AT_4 [\text{mgO}_2/\text{gTM}]$
- ▶ Aus dem langfristigen Sauerstoffverbrauch kann der bioverfügbare Kohlenstoff analog zum Parameter DDOC_m abgeleitet werden, der im weiteren Schritt eine Abschätzung des noch vorhandenen Gasbildungspotenzials bzw. Methanbildungspotenzials L_0 zum Zeitpunkt der Probenahme erlaubt.
- ▶ Hierbei wird wie bisher im Nationalen Inventarbericht im ersten Schritt zur sicheren Seite abgeschätzt, dass der bioverfügbare Kohlenstoff unter ausschließlich anaeroben Milieubedingungen zu Deponiegas umgesetzt wird. Im nächsten Schritt kann berücksichtigt werden, inwieweit im Deponiekörper bereits ein Austausch mit Luftsauerstoff aus der Atmosphäre einen Teilabbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs unter aeroben Milieubedingungen hervorruft. Dazu können die Gaszusammensetzung im Deponiekörper bzw. Gasabsaugbetrieb der einzelnen näher untersuchten Deponiestandorte herangezogen werden (wie erläutert über die Berücksichtigung des Stickstoffanteils im abgesaugten Deponiegas, über den der Anteil des veratmeten Sauerstoffs im Deponiekörper berechnet werden kann).

Abbildung 41: Summenlinien des Sauerstoffverbrauchs (Atmungsaktivität AT) von Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 20 Tagen = 480 Stunden



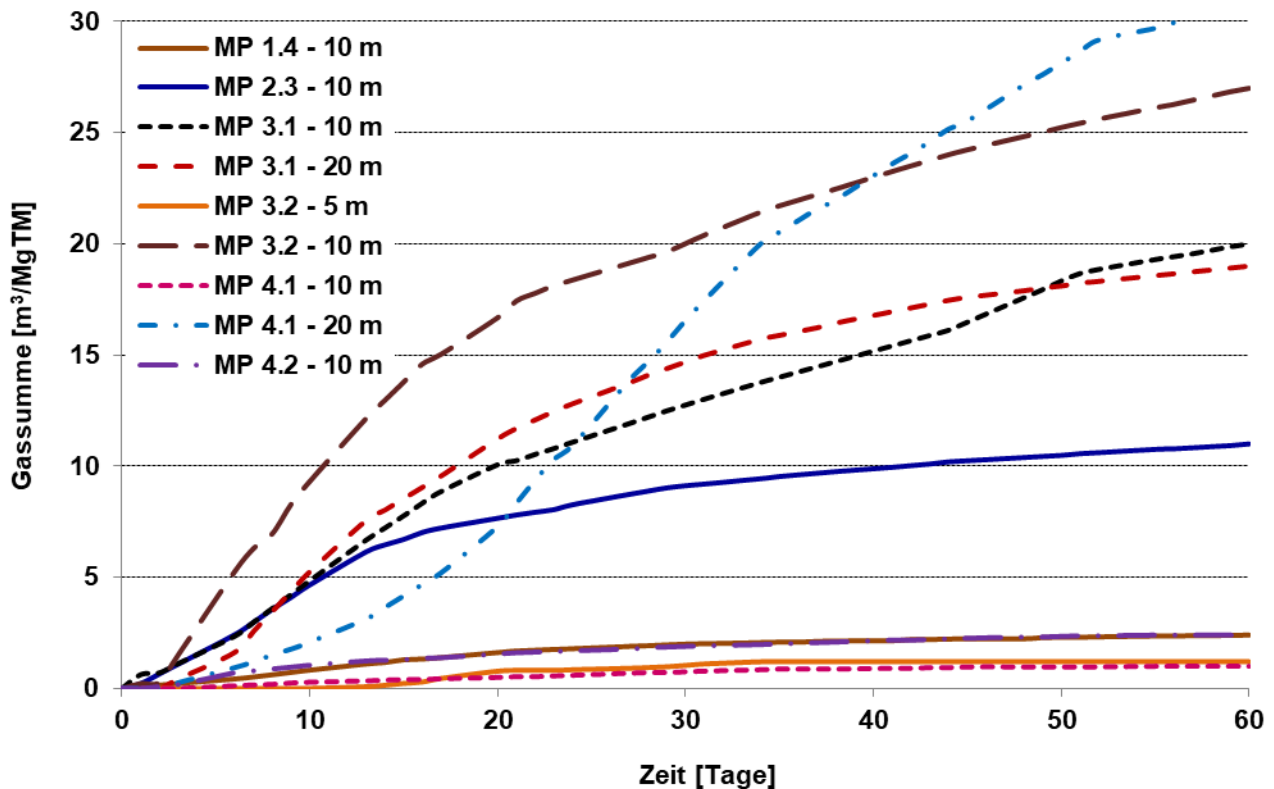
Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Biotest: Gasbildungspotenzial GB

In Abbildung 42 sind die Summenlinien der Gasbildung (Gasbildungspotenzial GB) über einen Untersuchungszeitraum von 60 Tagen aufgetragen. Die Ergebnisse und Auswertungen zeigen:

- ▶ Erwartungsgemäß ist der Gasbildungsprozess nach 21 Tagen (GB₂₁) noch nicht abgeschlossen und setzt sich in Analogie zum Verlauf der Atmungsaktivität auch nach 60 Tagen (GB₆₀) noch weiter fort.
- ▶ Je nach Organikgehalt und biologisch verfügbarem Kohlenstoff bzw. Organikanteil liegen die Gasbildungspotenziale in einer großen Bandbreite nach 20 Tagen von 1 – 17 m³/MgTM und nach 60 Tagen von 2 – 32 m³/MgTM.
- ▶ Gegenüber frischen Siedlungsabfällen, deren Gesamtgaspotenzial zum Zeitpunkt der Ablagerung im Bereich von 120 – 180 m³/MgTM liegen kann, haben sich die Gasbildungspotenziale bereits erheblich reduziert.
- ▶ Extrapolationsrechnungen anhand der Verläufe der Gasbildung sind i.d.R. unsicherer als jene auf der Grundlage der Atmungsaktivität, wie es beispielhaft anhand der Verlaufskurve der Gasbildung der Abfallfeststoffprobe MP4.1-20m in Abbildung 42 zu erkennen ist. Daher wird zur Abschätzung des bioverfügbaren Kohlenstoffs bei dieser Auswertung i.d.R. die extrapolierte Gesamtsumme des Sauerstoffbedarfs bzw. der über die empirischen Werte und den AT₄ abgeschätzte Gesamtsauerstoffbedarf herangezogen. Nicht zuletzt stehen deutlich mehr AT₄-Werte als GB₂₁-Ergebnisse zur statistischen Auswertung zur Verfügung.

Abbildung 42: Summenlinien der Gasbildung (Gasbildungspotenzial GB) von Abfallfeststoffproben der Deponie KI über einen Untersuchungszeitraum von 60 Tagen



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

6.4.3 Untersuchungsergebnisse an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI

In der Tabelle 32 sind die Ergebnisse der Standard-Analysen, Biotests und des stoffgruppenspezifischen Aufschlusses an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI zusammenfassend aufgeführt. Auf der einen Seite bestätigen die meisten Ergebnisse die bisher erläuterten Tendenzen und Schlussfolgerungen zur Quantifizierung des Gasbildungspotenzials auf Deponien.

So zeigen auch Referenzergebnisse an Abfallfeststoffproben (gemischte Siedlungsabfälle), die nach einigen Jahren anaeroben Abbaus dem Deponiekörper entnommen wurden, vergleichbare Bereiche an leicht (Hemicellulose), mittel (Cellulose) und schwer (Lignin) abbaubaren Anteilen:

- ▶ Die Abfälle einer deutschen Siedlungsabfalldeponie (Dep. COE-A) wurden bereits 1994 – 1995 nach 6 – 18 Jahren Ablagerungsdauer dem Deponiekörper entnommen, sie wurden folglich in den siebziger und achtziger Jahren abgelagert (Heyer, 2003).
- ▶ Die Siedlungsabfälle von zwei amerikanischen Deponien (LF U+M) wurden nach 1,5 – 2,5 Jahren intensivem anaeroben Abbau mit Sickerwasserinfiltration entnommen (Wang et al., 2013).

Auf der anderen Seite sind Einzelergebnisse insbesondere zum stoffgruppenspezifischen Aufschluss nach van Soest widersprüchlich, so dass der Aussagewert dieser Methodik im Hinblick auf die übergeordnete Fragestellung zur Quantifizierung des Gasbildungspotenzials deutscher Deponien begrenzt ist. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Biotests gemäß DepV die geeigneteren Verfahren sind, um das Gasbildungspotenzial in Deponien zu quantifizieren. Auch dieses bestätigt letztlich die Regelungen der Deponieverordnung hinsichtlich der Zuordnungswerte von Abfällen zu den unterschiedlichen Deponieklassen. Es wurden die Biotests AT₄ und GB₂₁ festgelegt und von der Einführung eines „korrigierten Glühverlusts“ auf der Grundlage von van Soest Analysen abgesehen.

Tabelle 32: Ergebnisse der Standard-Analysen, Biotests und des stoffgruppenspezifischen Aufschluss` an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI (Auszug)

Deponie	Bohrpunkt / Feststoffprobe	Standard-Parameter				Biotestes				Aufschluss n. van Soest		
		WG	GV	TOC	N _{ges.}	AT ₄	AT ₂₀	GB ₂₁	GB ₆₀	„leicht“	„mittel“	„schwer“
		[%F M]	[%T M]	[%T M]	[g/kgT M]	[mgO ₂ /gTM]		[l/kgTM]		[%TM]		
CI	GB09 – 9m	46,9	52,1	26,0	9,6	17,1		37,0				
CI	GB09 – 15m	33,0	38,8	22,0	5,2	4,6	14,4	9,4	20,0	0,7	6,3	12,2
FI	MP02 - 12 m	46,8	33,8	22	7,0	2,4	8,4	3,3	5,7	2,4	7,5	14,3
FI	MP03 – 12m	73,7	61,4	37,0	19,0	3,8	6,4	8,0	24,0	3,5	29,1	15,4
FI	MP04 – 5m	58,7	47,1	34,0	11,0	5,7	20,6	18,0	32,0	6,2	15,9	13,9
JI	P02 – 21 m	38,6	12,0	7,8	3,7	2,0	4,5	2,1	4,7	0,2	2,4	4,3
JI	P04 – 18 m	29,5	31,4	19,7	7,5	3,3	8,2	3,0	8,0	1,0	7,0	9,9
JI	P05 – 15 m	39,0	13,4	6,7	3,9	1,5	3,0	2,7	5,0	0,2	4,1	5,1
JI	P06 – 15 m	44,5	16,1	6,9	4,2	4,1	10,0	5,2	9,3	0,3	7,4	6,7
JI	P08 – 10 m	32,9	22,8	17,3	6,0	1,5	5,1	< 1,0	3,0	0,5	2,4	7,6
KI	MP 1.1 - 10 m	56,0	21,4	19,9	6,3	3,2		5,6				
KI	MP 1.1 - 20 m	68,2	45,6	29,4	16,0	13,2		30,0				
KI	MP 1.2 - 10 m	38,8	18,1	9,9	7,3	3,7		9,4				
KI	MP 1.4 - 10 m	30,6	22,1	18,3	5,5	1,7	8,4	1,7	2,4	0,0	2,4	6,7
KI	MP 2.1 - 10 m	66,2	27,5	20,8	11,0	3,9		8,2				
KI	MP 2.3 - 10 m	19,9	20,0	11,2	7,6	6,2	21,1	7,8	11,0	0,5	2,5	4,6
KI	MP 3.1 - 10 m	27,6	39,9	22,2	7,5	6,4	24,6	10,2	20,0	0,3	6,4	10,1
KI	MP 3.1 -	54,4	32,0	26,8	10,0	5,3	12,1	11,7	19,0	1,0	6,8	9,8

Deponie	Bohrpunkt / Feststoffprobe	Standard-Parameter				Biotestes				Aufschluss n. van Soest		
		WG	GV	TOC	N _{ges.}	AT ₄	AT ₂₀	GB ₂₁	GB ₆₀	„leicht“	„mittel“	„schwer“
	20 m											
KI	MP 3.2 - 5 m	21,0	20,3	13,5	2,5	1,4	7,1	0,8	1,2	0,0	2,7	4,9
KI	MP 3.2 - 10 m	19,1	32,8	23,3	6,8	6,3	27,6	17,4	27,0	2,4	3,4	11,7
KI	MP 3.4 - 5 m	20,7	10,3	7,4	2,3	0,4		1,6		0,0	0,8	3,8
KI	MP 3.4 - 10 m	20,4	7,9	2,5	2,7	0,6		< 1		0,0	1,6	0,2
KI	MP 4.1 - 10 m	21,4	10,1	7,8	2,7	1,1	2,9	< 1		0,0	2,4	4,0
KI	MP 4.1 - 20 m	55,1	30,9	14,8	5,9	2,5	5,6	8,3	31,0	1,4	4,5	7,2
KI	MP 4.2 - 10 m	23,8	13,3	8,9	3,2	1,2	3,3	1,6	2,4	0,4	2,8	4,1
KI	MP 4.2 - 20 m	25,4	15,2	9,8	3,0	1,4		< 1		0,1	1,5	5,4
MI	KB06 – 20 m	22,5	12,6	4,1	1,0	1,1				0,9	3,9	4,3
MI	KB06 – 30 m	31,5	35,2	18,5	4,8	6,3				5,3	13,4	10,4
MI	KB06 – 40 m	33,1	24,8	13,4	4,9	4,0				2,2	15,2	10,5
NI	MP02 – 5 m	42,9	38,4	22,3	6,5	4,5	24,2	2,2	10,0	4,5	18,9	16,4
NI	MP03 – 5 m	28,9	21,4	11,0	4,3	3,0	7,7	1,2	1,5	0,0	2,1	0,1
NI	MP04 – 5 m	20,5	9,1	4,6	1,2	2,1	6,8	1,4	2,9	0,0	1,8	4,4
NI	MP05 – 5 m	41,3	36,1	21,2	4,3	4,5	19,9	4,6	11,0	1,1	7,9	7,9
NI	BP06 – 5 m	20,8	12,8	6,5	3,3	1,4	1,5	3,3	8,8	0,2	4,2	3,2
NI	BP07 – 3 m	26,4	12,8	6,0	2,3	1,3	5,7	2,5	4,0	1,2	15,5	11,3
	Referenzen:											
	LF U + M (Wang et al., 2013)	41,4 – 47,2	21,6 – 35,3	9,0 – 25,3	-	-	-	-	-	1,1 – 2,8	2,6 – 6,8	12,0 – 19,2

Deponie	Bohrpunkt / Feststoffprobe	Standard-Parameter				Biotestes				Aufschluss n. van Soest		
		WG	GV	TOC	N _{ges.}	AT ₄	AT ₂₀	GB ₂₁	GB ₆₀	„leicht“	„mittel“	„schwer“
	Dep. COE-A (Heyer, 2003)	21,4 – 42,7	6,8 – 31,5	5,2 – 19,0	1,7 – 13,9	0,5 – 3,6	1,8 – 21,7	-	-	1,2 – 9,7	1,8 – 6,9	3,2 – 14,9

7 Ergebnisse zum Arbeitspaket C: Abgleich und Absicherung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B

7.1 Zielstellung und Vorgehen

Die Absicherung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B soll durch einen Vergleich mit Untersuchungen aus realen Abfallbeprobungen aus mindestens 10 Deponien erfolgen. Hierzu wurden Ergebnisse von mehr als 500 Abfallfeststoffproben aus Bohrungen und Aufgrabungen im Deponiekörper von 18 der 37 näher ausgewerteten Deponien herangezogen.

Aus methodischen Gründen ist diese Absicherung der Ergebnisse bzw. der Abgleich der Methanemissionsabschätzungen gemäß der Ansätze nach IPCC/NIR mit den im ersten Schritt modifizierten Ansätze (RUK 2014) und den Ergebnissen von Abfallanalysen der Deponien bereits in der Dokumentation des Arbeitspakets A in Kap. 5 vorgenommen worden.

Die aus den Abfallfeststoffbeprobungen vorliegenden Ergebnisse (z.B. biogene Kohlenstoffgehalte, organische Kohlenstoffgehalte, Gasbildungspotenzial GB₂₁ oder alternativ Sauerstoffverbrauchswerte AT₄, Wassergehalt, etc.) zum Abbaugrad der biogenen Abfallbestandteile wurden mit den rechnerisch ermittelten Werten des nach Arbeitspaket A und B angepassten FOD Modells verglichen. Zu den organischen Anteilen und ihrer biologischen Abbaubarkeit wurden zudem auch die zusätzlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket B, Position 1 - 3 genutzt. Weiterhin wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 zu den Laboruntersuchungen zur Reaktionskinetik und zum Gasbildungspotenzial an Abfallfeststoffproben des UFOPLAN-Projekts „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“ einbezogen.

7.2 Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

Nachfolgend werden aufgrund der erläuterten Untersuchungsergebnisse Ableitungen zur Reaktionskinetik und zum Gasbildungspotenzial als Grundlage für die Bewertung der in den Berechnungsansatz der Deponiegasbildung eingehenden Faktoren vorgenommen.

Dazu erfolgt eine Quantifizierung des noch vorhandenen Deponiegaspotenzials und – soweit möglich - die Ableitung von Korrelationen zu den leicht, mittel und schwer abbaubaren organischen Bestandteilen. So werden die relevanten abfallspezifischen Parameter gemäß IPCC direkt an den Abfallstoffproben ermittelt bzw. rechnerisch abgeleitet, insbesondere:

- Lo Methanbildungspotenzial, das zum Zeitpunkt der Abfallfeststoffprobenahme noch im Deponiekörper vorhanden ist
- DDOCm korrespondierende Masse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs (DOC * DOC_f), der unter anaeroben Bedingungen über die Zeit t noch abgebaut wird (wovon ein gewisser Anteil jedoch auch aerob abgebaut werden kann)

Zusammen mit den Ergebnissen aus den „Cross Check“-Laborversuchen ergeben sich somit u.a. Rückschlüsse auf:

DDOC _{m0}	Deponierte Ausgangsmasse des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs zurzeit 0, wenn die Abbauprozesse beginnen (Ablagerungsjahr)
k	Abbaukonstante = $\ln 2 / t_{1/2}$ [1/a]
$t_{1/2}$	Halbwertszeit, soweit wie möglich mit Differenzierung nach leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteilen
MCF	Methankorrekturfaktor (MCF), der aerobe Abbauprozesse z.B. vor dem Erreichen anaerober Deponieverhältnisse oder (als Vorschlag zur Erweiterung der MCF-Definition) allmählich zunehmende Aerobisierungsprozesse im Deponiekörper quantifiziert

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen werden zudem mit den standortbezogenen Ergebnissen zum Gashaushalt abgeglichen. Daraus lassen sich zusätzliche Rückschlüsse zu Halbwertszeiten und Gaserfassungsgraden für die untersuchten Deponien ableiten.

Wie zur Methodik der 2006 IPCC Guidelines erläutert, können die „default values“ durch länderspezifisch genauere Daten ersetzt werden: „Die Verwendung länderspezifischer Werte wird unterstützt, soweit solche verfügbar sind. Die Durchführung direkter Messungen zur Abschätzung der Modellparameter des FOD-Modells ist eine Option für eine good practice-Fortschreibung länderspezifischer Werte. Messungen sind an einem repräsentativen Satz von Siedlungsabfalldeponien durchzuführen.“ (Kap. 3.1). Diese Verfügbarkeit der Daten ist anhand der durchgeführten Untersuchungen an mehr als 35 Deponien und mehr als 500 Abfallfeststoffproben in einem hohen Maße gegeben:

- ▶ Tier 2:
Ersetzen der „default values“ zu den in den Siedlungsabfalldeponien deponierten Abfällen durch länderspezifische Werte guter Qualität, die auf der Basis historischer Daten von 10 Jahren oder mehr ermittelt wurden.

Hier wurden Daten zum Gashaushalt von Deponien über mehr als 30 Jahre, teilweise bis zu 45 Jahre ausgewertet und zusammengeführt.

- ▶ Tier 3:
Zusätzlich zu Tier 2:
 - Anwendung länderspezifischer Werte für die Schlüsselparameter DOC (oder L_0), DOC_f und Halbwertszeit bei Nutzung der FOD-Methode
 - oder
 - Anwendung von aus Messungen abgeleiteten länderspezifischen Parametern (bei Nutzung einer länderspezifischen Methode, die gleichwertig oder von höherer Qualität sein muss als die Tier 3-Stufe unter Anwendung der FOD-Methode.)

Die Untersuchungsergebnisse erlauben wie erläutert aktuelle Quantifizierungen des biologisch noch verfügbaren Kohlenstoffs (DDOC_m) und des resultierenden noch vorhandenen Methanbildungspotenzials (L_0) deutscher Deponien.

Mit dieser Auswertung wird nicht die FOD-Methodik als solche modifiziert, sondern es werden zur Abschätzung der aktuell noch von deutschen Siedlungsabfalldeponien ausgehenden Methanemissionen die Parameter angepasst. Bei den 18 durch Abfallfeststoffanalysen von Bohrgut näher untersuchten Deponien beziehen sich die Ergebnisse nicht auf die organischen Einzelfractionen, sondern auf die Mischprobe des Siedlungsabfalls, wie sie nach 14 – 33 Jahren durchschnittlicher Ablagedauer dem jeweiligen Deponiekörper entnommen werden konnten. Zudem wurden im Arbeitspaket B die einzelnen organikhaltigen Faktionen in den synthetischen Frischmüllproben hinsichtlich

ihres Methanbildungspotenzials und der kinetischen Kenndaten, die den anaeroben Abbau im Deponiekörper bestimmen, eingehend untersucht.

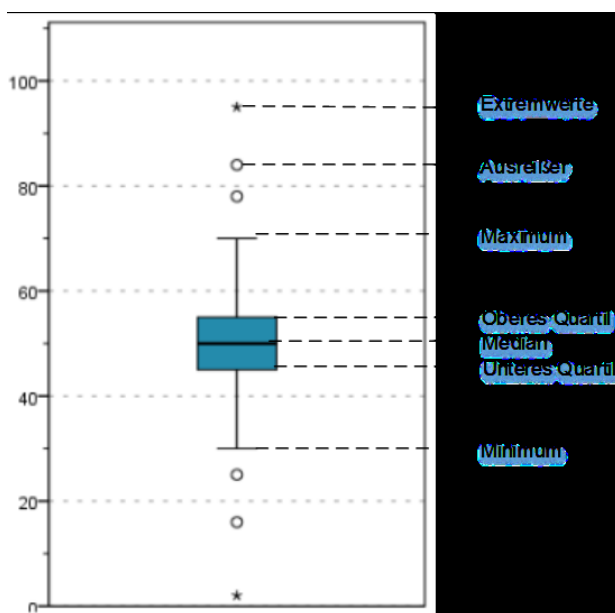
7.3 Abfallfeststoffanalysen und Biotestes: Statistische Auswertung der beprobten Deponien

Anhand der Analysenergebnisse der Abfallfeststoffproben sollen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Deponien und hinsichtlich der Ablagerungsbedingungen und -zeiträume aufbereitet werden. Die Auswertung der vorliegenden Analysenergebnisse der Feststoffproben erfolgt mit Statistikprogramm, u.a. mit Hilfe von Boxplots.

Durch Streudiagramme können Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern identifiziert werden. Durch die Ausweisung der Mediane wird dieser Zusammenhang im Diagramm veranschaulicht.

Die Analysenergebnisse der Feststoffproben werden als Boxplot dargestellt (Abbildung 43). Dabei gibt die Box den Bereich der Daten an, in dem die mittleren 50 % der Messergebnisse liegen. Somit ist die Länge der Box ein Maß dafür, wie sehr die Werte streuen. Ist die Box eher kurz, so liegen die meisten Werte in einem kleinen Bereich. Ist die Box lang, so ist auch die Streuung größer. Der schwarze Strich in der Mitte der Box zeigt den Median an. Weiterhin werden durch „Antennen“ die höchsten bzw. niedrigsten Werte der Verteilung dargestellt, die keine Ausreißer oder Extremwerte sind. Ausreißer werden durch Kreise, Extremwerte durch Sternchen markiert. Dabei ist ein Ausreißer ein Wert, der zwischen 1,5 und 3 Boxenlängen vom oberen Quartilswert nach oben bzw. vom unteren Quartilswert nach unten abweicht. Ein Extremwert kennzeichnet sich dadurch, dass er mehr als drei Boxenlängen vom oberen Quartilswert nach oben bzw. vom unteren Quartilswert nach unten abweicht. Weiterhin wurden arithmetische Mittelwerte, Medianwerte, Minima und Maxima für die einzelnen Deponien sowie auch für alle Feststoffproben zusammen berechnet.

Abbildung 43: Beispielabbildung für einen Boxplot mit den im Boxplot dargestellten statistischen Kennwerten



Extremwerte: Datenwert, der mehr als 3 Boxenlängen nach oben oder unten abweicht

Ausreißer: Datenwert, der zwischen 1,5 und 3 Boxenlängen nach oben oder unten abweicht

Maximum: größter Datenwert des Datensatzes, der kein Ausreißer ist

Oberes Quartil: die kleinsten 75 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Wert

Median: die kleinsten 50 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Wert

Unteres Quartil: die kleinsten 25 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Wert

Minimum: kleinster Datenwert des Datensatzes, der kein Ausreißer ist

Interquartilsabstand: Wertebereich, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden (Länge der Box)

Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

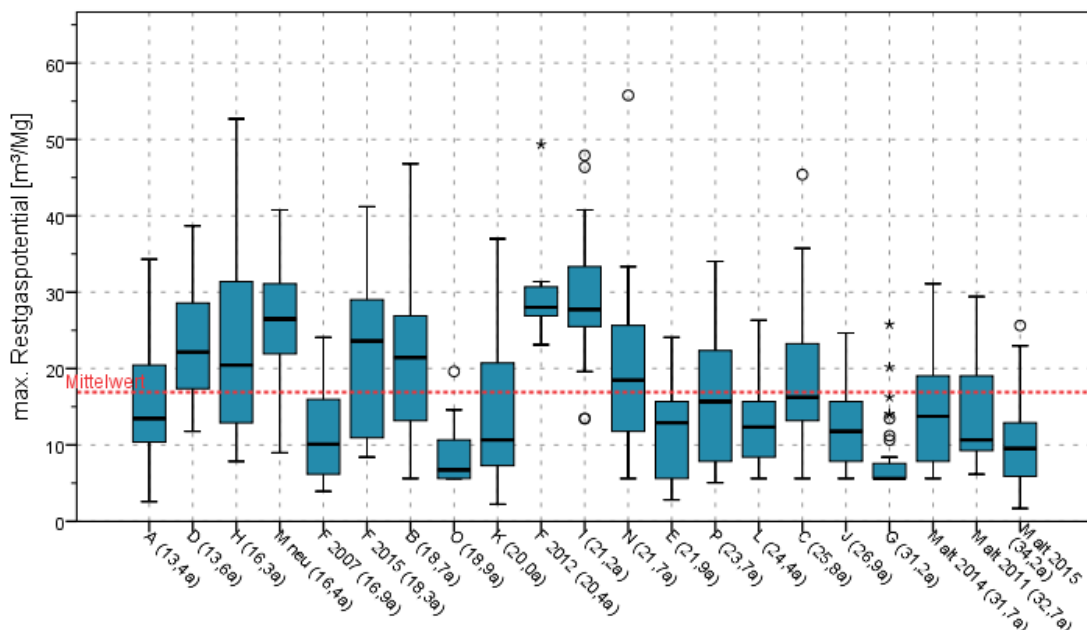
Zur Differenzierung nach den einzelnen Deponiestandorten wurde das maximale Restgaspotenzial in Abbildung 44 in der Reihenfolge der Ablagerungsdauer (von A mit 14 Jahren mittlerer Ablagerungsdauer bis M_{alt} mit 33 Jahren mittlerer Ablagerungsdauer) aufgetragen.

Das arithmetische Mittel des max. Restgaspotenzials beträgt 16,6 m³/MgTM, was einem Methanbildungspotenzial L₀ von 8,4 m³CH₄/MgTM entspricht. Der Median liegt bei 14,0 m³/MgTM (L₀ von 7,0 m³CH₄/MgTM). Trotz der Schwankungen ist die tendenzielle Abnahme der durchschnittlichen Restgaspotenziale in Abhängigkeit der Ablagerungsdauer zu erkennen.

Betrachtet man das Restgaspotenzial differenziert nach Gruben- und Haldendeponien, so weisen die 16 hier ausgewerteten Deponiestandorte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Deponieformen auf. Die Mittelwerte der Restgaspotenziale liegen bei 18,1 m³/MgTM für Haldendeponien und 16,9 m³/MgTM für Grubendeponien.

Die Abbildung 45 zeigt die Abhängigkeit der Parameter Glühverlust, AT₄ und max. Restgaspotenzial vom Ablagerungsalter der Einzelproben. Das Alter der Proben wurde in Klassen zu jeweils 5 Jahren eingeteilt. Es wurden jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung für jede Klasse berechnet. Die Mittelwerte sind als verbundene, rote Punkte in die Diagramme eingezeichnet. Die roten Fehlerbalken in den Diagrammen entsprechen der Standardabweichung.

Abbildung 44: Boxplot der Restgaspotenziale der Deponiestandorte AI – PI (Bezug auf TM). (Jahreszahlen hinter dem Deponiebuchstaben = Jahr der Probenahme zur Unterscheidung), Reihenfolge der Deponien auf der x-Achse entspricht dem mittleren Ablagerungsalter



Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

Die ermittelten Glühverluste weisen eine große Spannweite auf. So lag der kleinste gemessene Glühverlust bei 2,6 %, der größte bei 86 %. Dies ist der Heterogenität des Abfalls und dem unterschiedlichen Anteil mineralischer Abfälle zuzuschreiben. Anhand des im Vergleich zu Frischmüll (GV ca. 52%) deutlich verminderten mittleren Glühverlusts von knapp 26 % ist zu erkennen, dass es sich um bereits biologisch weitgehend abgebaute Abfälle handelt.

Insbesondere die AT₄-Werte verdeutlichen, dass die abbaubare, organische Substanz in den Deponien bereits zu großen Teilen abgebaut wurde.

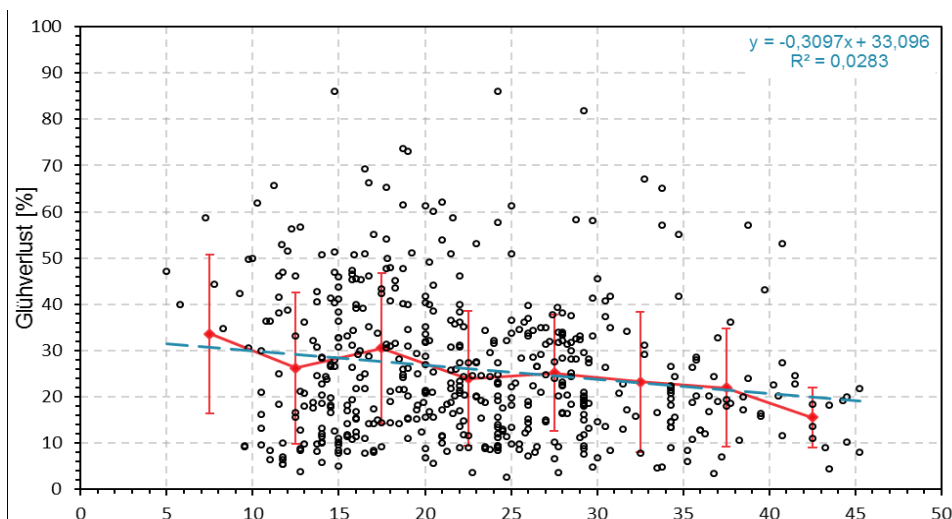
Insgesamt ist ein stark reduziertes Restgaspotenzial im Vergleich zu Frischmüll zu erkennen. In der Literatur werden für das Restgaspotenzial von Frischmüll unterschiedliche Werte zwischen 70 und 186 m³/MgFM angegeben (siehe Kap. 4.1). Bei den durchschnittlichen Restgaspotenzialen der Deponiestandorte (6 - 25 m³/MgFM) entspricht dies nur noch ca. 9 – 13% des vermutlichen Ausgangspotenzials.

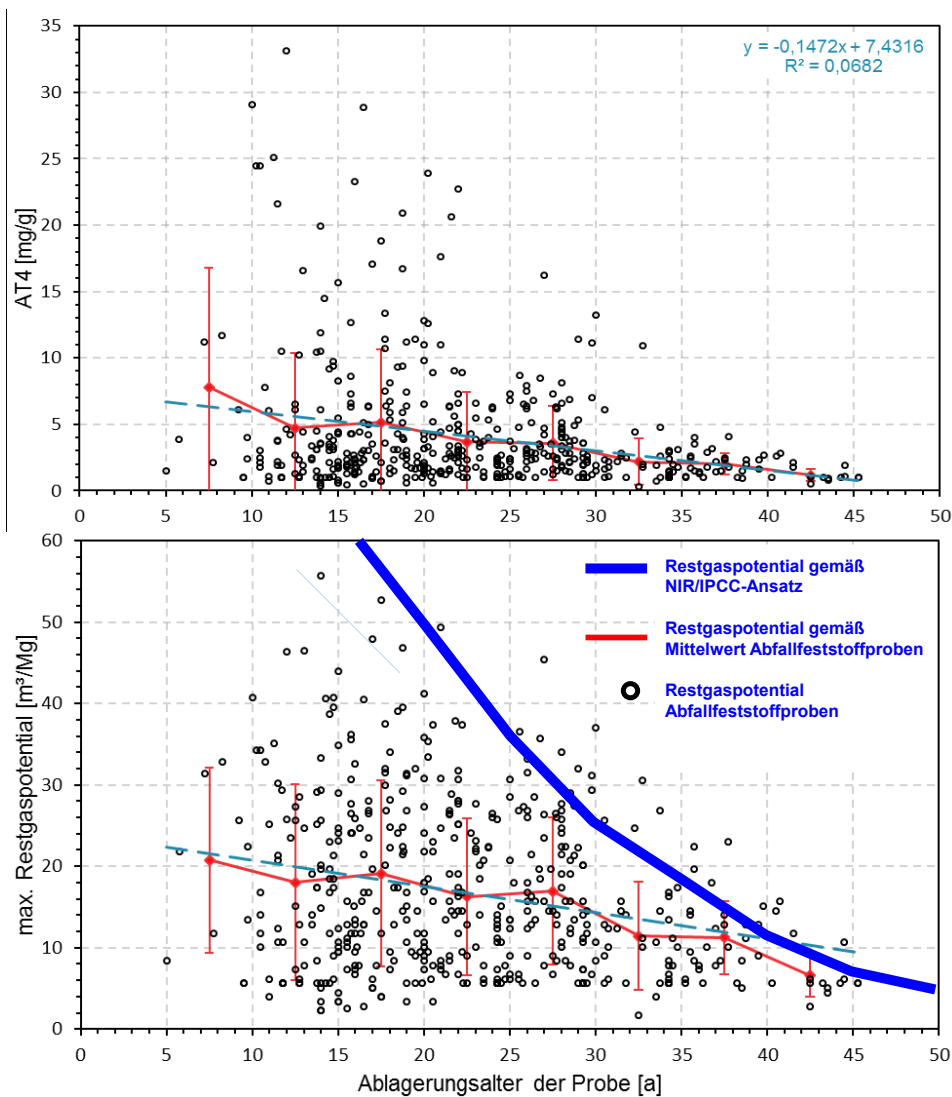
Die Mittelwerte vom Glühverlust zeigen mit steigendem Alter der Probe trotz der großen Streuung erwartungsgemäß eine abnehmende Tendenz. Die Mittelwerte von AT₄ und max. Restgaspotenzial weisen einen stärker abnehmenden Trend mit steigendem Probenalter auf, da sie anders als der Glühverlust nur die biologisch abbaubaren Anteile quantifizieren.

Die untere Darstellung in der Abbildung 45 zu den verbleibenden Restgaspotenzialen über die Ablagerungsdauer bestätigt folgenden Sachverhalt nochmals sehr deutlich:

- ▶ Das Restgaspotenzial, das sich aufgrund der bisherigen Annahmen und Vorgabewerte im NIR-Bericht auf der Grundlage der IPCC Default values ergibt, überschätzt das tatsächlich auf den Deponien feststellbare Restgaspotenzial erheblich. Die Entwicklung des Restgaspotenzials auf der Basis der Vorgabewerte im NIR-Bericht wurde mit der Abfallzusammensetzung des Jahres 1993 berechnet, um die Organikfraktionen mit ihren unterschiedlichen bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten und Halbwertszeiten anteilmäßig zu berücksichtigen (Ausgangsgaspotenzial 231 m³/MgFM).
- ▶ Gerade in den ersten 20 – 30 Jahren der Ablagerung wird das Restgaspotenzial auf der Basis der Vorgabewerte im NIR-Bericht erheblich überschätzt. Erst langfristig nach ca. 40 – 50 Jahren Ablagerungsdauer findet eine Angleichung der Entwicklung der dann noch vorhandenen Gaspotenziale statt.
- ▶ Dieser Sachverhalt hat sich bereits bei der Literaturlauswertung im Kapitel 4 dargestellt und wurde durch die Auswertung der 37 Deponien anhand der Gasprognoserechnungen im Kapitel 5 und der Untersuchungen am Deponiekörper wie des jeweiligen Gashaushalts ebenfalls bestätigt.

Abbildung 45: Auswertung aller Abfallfeststoffproben der Deponie AI – QI: Glühverlust, AT₄ und Restgaspotenzial in Abhängigkeit vom Ablagerungsalter (Bezug auf TM)





Quelle: eigene Abbildung, IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft

7.4 Abgleich mit Abfallfeststoffanalysen und Langzeit-Biotests

In der Tabelle 33 sind in Erweiterung der Tabelle 32 die Ergebnisse der Standard-Analysen und der Langzeit-Biotests an Abfallproben der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI und die daraus abgeleiteten Parameter DDOCm und L_0 zusammenfassend aufgeführt. Die meisten Ergebnisse bestätigen die bisher erläuterten Tendenzen und Schlussfolgerungen zur Quantifizierung des Gasbildungspotenzials auf Deponien:

- Auch diese Ergebnisse zeigen einerseits die große Bandbreite an Organikgehalten, deren bioverfügbarer Anteil und das daraus resultierende verbleibende Gasbildungspotenzial bzw. Methanbildungspotenzial L_0 . Trotz aller Streuungen der Ergebnisse und einiger Einzelwerte, die als „Ausreißer“ einzuordnen sind, ist der Zusammenhang zwischen Ablagerungsalter, Organikgehalt und Restgasbildung qualitativ zu erkennen. Weiterhin spielt die vermutliche Ausgangszusammensetzung der abgelagerten Abfälle eine große Rolle, insbesondere die organikhaltigen Siedlungsabfälle und der mineralische, quasi inerte Anteil (Boden, Bauschutt, wie er früher in nennenswertem Umfang auf Siedlungsabfalldeponien mit abgelagert wurde). Erhöhte mineralische Abfallanteile prägen neben dem biologischen Abbau im Deponiekörper die geringen Kohlenstoffgehalte und Gasbildungspotenziale wie z.B. bei der Abfallfeststoffprobe KI MP 3.4 - 10 m.

- ▶ Bei den sechs hier mit Langzeit-Biotests näher betrachteten Deponiestandorten liegt der Bereich des bioverfügbaren Kohlenstoffs **DDOC_m** bei 1 – 27 kgC/MgTM, was 1 – 18% des Gesamtkohlenstoffgehalts (TOC) entspricht.
- ▶ Das daraus resultierende Methanbildungspotenzial **L₀** liegt bei 1 - 17 kgCH₄/MgTM, was 1 – 24 m³CH₄/MgTM entspricht.
- ▶ Zum Zeitpunkt der Abfallbeprobung und Untersuchung der Deponiestandorte lagen die mittleren Methankonzentrationen im Gaserfassungsbetrieb bei 25 – 60 Vol.-%. Daraus leitet sich ein aktueller Anteil an aeroben Abbauprozessen (und mithin Reduzierung der Methanbildung) von 1 – 25% des Kohlenstoffabbaus ab, so dass der **MCF_{langfristig}**-Anteil im Gaserfassungsbetrieb der Stilllegungs- und Nachsorgephase bei 0,75 – 0,99 mit abnehmender Tendenz liegt.
- ▶ Wenn von einem Deponiegasbildungspotenzial von 120 – 180 m³/MgTM zum Zeitpunkt der Ablagerung ausgegangen und die Ablagerungsdauer wie die verbliebenen Restgasbildungspotenziale betrachtet werden, so ergibt sich eine durchschnittliche **Halbwertszeit** bzw. Reaktionskonstante über die Ablagerungsphase von 5 – 10 Jahren. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in den ersten Jahren der Ablagerung die leicht abbaubaren Organikbestandteile die Gasbildung dominiert haben, während zum Zeitpunkt der Abfallfeststoffprobenahme die mittel und schwer abbaubaren Organikbestandteile die Restgasbildung prägen. Daher wäre in erster Näherung von einer Halbwertszeit in der ersten Phase der Ablagerung von eher 3 – 7 Jahren auszugehen, während sie zum Zeitpunkt der Abfallfeststoffprobenahme, d.h. 11 bis 36 Jahre nach der Ablagerung, im Bereich von 8 – 12 Jahren mit anwachsender Tendenz angesiedelt werden kann.

Tabelle 33: Ableitung bioverfügbarer Kohlenstoff DDOCm und Methanbildungspotenzial L_0 aufgrund der Ergebnisse der Biotests an Abfallproben, $MCF_{\text{langfristig}}$ im Gasabsaugetrieb der Deponien CI, FI, JI, KI, MI und NI (Auszug)

Deponie	Feststoffprobe	Abl.-alter	TOC	AT ₄	GB ₂₁	DDOCm	L_0	L_0	DDOCm/TOC	$MCF_{\text{langfristig}}$
		[a]	[%T M]	[mg O ₂ /gT M]	[l/kgT M]	[kgC/MgTM]	[kgCH ₄ /MgTM]	[m ³ C H ₄ /MgTM]	[%]	[-]
CI	GB09 – 9m	27	26,0	17,1	37,0	25,7	17,1	24,0	9,9	0,75
CI	GB09 – 15m	28	22,0	4,6	9,4	13,8	9,2	12,9	6,3	0,75
FI	MP02 - 12 m	17	22	2,4	3,3	7,2	4,8	6,7	3,3	0,88
FI	MP03 – 12m	17	37,0	3,8	8,0	11,4	7,6	10,6	3,1	0,88
FI	MP04 – 5m	11	34,0	5,7	18,0	17,1	11,4	16,0	5,0	0,88
JI	P02 – 21 m	36	7,8	2,0	2,1	6,0	4,0	5,6	7,7	0,94
JI	P04 – 18 m	28	19,7	3,3	3,0	9,9	6,6	9,2	5,0	0,94
JI	P05 – 15 m	24	6,7	1,5	2,7	4,5	3,0	4,2	6,7	0,94
JI	P06 – 15 m	29	6,9	4,1	5,2	12,3	8,2	11,5	17,8	0,94
JI	P08 – 10 m	24	17,3	1,5	< 1,0	4,5	3,0	4,2	2,6	0,94
KI	MP 1.1 - 10 m	28	19,9	3,2	5,6	9,6	6,4	9,0	4,8	0,93
KI	MP 1.1 - 20 m	30	29,4	13,2	30,0	19,8	13,2	18,5	6,7	0,93
KI	MP 1.2 - 10 m	28	9,9	3,7	9,4	11,1	7,4	10,4	11,2	0,93
KI	MP 1.4 - 10 m	28	18,3	1,7	1,7	5,1	3,4	4,8	2,8	0,93
KI	MP 2.1 - 10 m	24	20,8	3,9	8,2	11,7	7,8	10,9	5,6	0,93
KI	MP 2.3 - 10 m	24	11,2	6,2	7,8	14,0	9,3	13,0	12,5	0,93
KI	MP 3.1 - 10 m	22	22,2	6,4	10,2	14,4	9,6	13,4	6,5	0,93

Deponie	Feststoffprobe	Abl.-alter	TOC	AT ₄	GB ₂₁	DDOCm	L ₀	L ₀	DDOCm/TOC	MCF _{langfristig}
		[a]	[%T M]	[mg O ₂ /gT M]	[l/kgT M]	[kgC/MgTM]	[kgCH ₄ /MgTM]	[m ³ CH ₄ /MgTM]	[%]	[-]
KI	MP 3.1 - 20 m	23	26,8	5,3	11,7	11,9	8,0	11,1	4,4	0,93
KI	MP 3.2 - 5 m	22	13,5	1,4	0,8	4,2	2,8	3,9	3,1	0,93
KI	MP 3.2 - 10 m	23	23,3	6,3	17,4	14,2	9,5	13,2	6,1	0,93
KI	MP 3.4 - 5 m	22	7,4	0,4	1,6	1,2	0,8	1,1	1,6	0,93
KI	MP 3.4 - 10 m	23	2,5	0,6	< 1	1,8	1,2	1,7	7,2	0,93
KI	MP 4.1 - 10 m	20	7,8	1,1	< 1	3,3	2,2	3,1	4,2	0,93
KI	MP 4.1 - 20 m	21	14,8	2,5	8,3	5,6	3,8	5,3	3,8	0,93
KI	MP 4.2 - 10 m	20	8,9	1,2	1,6	3,6	2,4	3,4	4,0	0,93
KI	MP 4.2 - 20 m	21	9,8	1,4	< 1	4,2	2,8	3,9	4,3	0,93
MI	KB06 – 20 m	18	4,1	1,1		3,3	2,2	3,1	8,0	0,99
MI	KB06 – 30 m	20	18,5	6,3		14,2	9,5	13,2	7,7	0,99
MI	KB06 – 40 m	22	13,4	4,0		12,0	8,0	11,2	9,0	0,99
NI	MP02 – 5 m	22	22,3	4,5	2,2	13,5	9,0	12,6	6,1	0,88
NI	MP03 – 5 m	22	11,0	3,0	1,2	9,0	6,0	8,4	8,2	0,88
NI	MP04 – 5 m	22	4,6	2,1	1,4	6,3	4,2	5,9	13,7	0,88
NI	MP05 – 5 m	22	21,2	4,5	4,6	13,5	9,0	12,6	6,4	0,88
NI	BP06 – 5 m	36	6,5	1,4	3,3	4,2	2,8	3,9	6,5	0,88
NI	BP07 – 3 m	26	6,0	1,3	2,5	3,9	2,6	3,6	6,5	0,88

8 Ergebnisse Arbeitspaket D: Ableitung und Überprüfung eines angepassten Parametersatzes

Nach einer kurzen Darstellung der verwendeten Grundlagen werden anschließend in einer Parameterstudie Wertekombinationen hergeleitet, mit welchen die Ergebnisse aller Näherungswege am besten abgebildet werden können. Hierbei ergibt sich der für deutsche Deponien geeignetste Satz für die in die Gasprognose einzugebenden Werte.

8.1 Grundlage für die Ableitung eines angepassten Parametersatzes

Mit den Ansätzen aus dem deutschen NIR ergeben sich für die Organik-Fraktion, die PPK-Fraktion und die Holzfraktion für den DDOCm als Produkt von DOC und DOC_f die folgenden Werte:

- ▶ Organik: 90 kg/Mg FM
- ▶ PPK: 200 kg/Mg FM
- ▶ Holz: 215 kg/Mg FM

Mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten ergeben sich für die Organik-Fraktion, die PPK-Fraktion und die Holzfraktion für den DDOCm als Produkt von DOC und DOC_f die folgenden Werte:

- ▶ Organik: 144 kg/Mg FM
- ▶ PPK: 160 kg/Mg FM
- ▶ Holz: 43 kg/Mg FM

Aus den Literaturangaben zu den DOC- und DOC_f -Werten in Kapitel 4.1.1 ergeben sich für das Produkt $DOC \times DOC_f$ die folgenden Werte:

- ▶ Organik: 42 bis 115 kg/Mg FM
- ▶ PPK: 77 bis 82 kg/Mg FM für Zeitungspapier
221 bis 230 kg/Mg FM für Wellpappe
44 bis 181 kg/Mg FM für Magazinpapier
- ▶ Holz: 5,3 kg/Mg FM für Holzspäne
55 bis 97 kg/Mg FM für Hartholz
0 bis 36 kg/Mg FM für Weichholz
49 kg/Mg FM bei Untersuchung aller Holzarten

Aus den Literaturangaben zum Gaspotenzial in Kapitel 4.1.2 angegebenen Werten können folgende $C_{Org.}$ -Anteile in kg/Mg FM berechnet werden:

- ▶ Organik: 41 bis 90 kg/Mg FM
bei Ansatz einer Methankonzentration von 50 % im Biogas, entsprechend dem Ansatz in Kapitel 4.1.2, welcher dort wegen der Vorgaben im IPCC (2006a) gewählt wurde, bzw.
34 bis 75 kg/Mg FM
bei Ansatz einer Methankonzentration von 60 % im Biogas, was im Mittel der Methankonzentration entspricht, welche beim anaeroben Abbau der Organik-Fraktion erwartet werden kann.
- ▶ PPK: 51 bis 109 kg/Mg FM bei Ansatz einer Methankonzentration von 50 % im Biogas.
- ▶ Holz: 11 bis 50 kg/Mg FM (mit Ausnahme einer Untersuchung für Hartholz mit 135 kg/Mg FM).

Gegenüber den genannten Literaturwerten wurden bei den Langzeitgärversuchen gemäß der Auswertung in Kapitel 6 die folgenden Ergebnisse für das Parameterpaar $\text{DOC} \times \text{DOC}_f$ ermittelt:

- ▶ Organik: 44 kg/Mg FM
- ▶ PPK: 203 kg/Mg FM
- ▶ Holz: 16 kg/Mg FM

Mit den Ansätzen aus dem deutschen NIR ergeben sich für die Organik-Fraktion, die PPK-Fraktion und die Holzfraktion für den DDOC_m die folgenden Ansätze für die Halbwertszeit beim anaeroben Abbau in der Deponie:

- ▶ Organik: 4 Jahre
- ▶ PPK: 12 Jahre
- ▶ Holz: 23 Jahre

Mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten (RUK, 2014) ergeben sich für die Organik-Fraktion, die PPK-Fraktion und die Holzfraktion für die Halbwertszeit die folgenden Werte:

- ▶ Organik: 3 Jahre
- ▶ PPK: 7 Jahre
- ▶ Holz: 50 Jahre

Gegenüber den genannten Literaturwerten wurde bei den Langzeitgärversuchen gemäß der Auswertung in Kapitel 6.3.3.3 Folgendes ermittelt:

- ▶ Die Halbwertszeit beim Abbau von PPK entspricht in etwa jener beim Abbau von Organik.
- ▶ Zur Bewertung wurde darauf hingewiesen, dass bei den Laborversuchen gegenüber den Bedingungen in einer Deponie bei der PPK-Fraktion größere Abweichungen als bei der Organik-Fraktion zu erwarten sind, da die Bedingungen in einer Deponie tendenziell dazu führen, dass der Abbau von PPK langsamer ablaufen wird als der Abbau von Organik.
- ▶ Die Halbwertszeit beim Abbau von Holz ist um den Faktor 4 höher als jene beim Abbau von Organik, wenn der bei den Laborversuchen enthaltene Holzstaub aus dem Sägen der Probewürfel mit betrachtet wird und um den Faktor ≤ 18 höher, wenn der Abbau des Holzstaubes herausgerechnet wird.

Bei der Auswertung von Literaturwerten und eigenen Untersuchungen wurde in Kapitel 0 der Ansatz eines $\text{MCF} = 1$ für BRD-Deponien ab 1972 und für alle deutschen Deponien ab 1990 im deutschen NIR mit folgendem Ergebnis hinterfragt:

- ▶ Zu Ablagerungsbeginn ist ein Wert im Bereich von 0,8 – 0,95 realistisch.
- ▶ Bei Deponien, bei denen schon mehrere Jahre bis Jahrzehnte keine Abfälle mit nennenswertem DDOC_m mehr abgelagert worden sind, bilden sich vom Rand her zunehmend aerobisierte Deponiebereiche, in denen der verbliebene DDOC_m aerob nur noch zu Kohlenstoffdioxid abgebaut wird. Methanbildung aus DDOC_m findet in diesen Bereichen nicht mehr statt. Aus der Deponiegaszusammensetzung kann abgeleitet werden, in wie weit bei Einzeldeponien bereits eine Aerobisierung von Randbereichen stattgefunden hat. Demnach dürfte der langfristige MCF bei jüngeren Altdeponien derzeit im Bereich von 0,87 – 0,93, bei älteren Altdeponien und der großen Zahl von kleinen Altablagerungen (Ablagerungszeitraum ca. 1950 – 1972) bei ca. 0,64 liegen.

Als vereinfachten Schritt zur Anpassung an die überwiegend vorherrschenden Deponiebedingungen wird aufgrund dieser Auswertung empfohlen, den MCF auf einen Festwert von 0,9 abzusenken.

Bei der Überprüfung der Gasprognose mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten (RUK 2014) zeigen die Überprüfungen anhand der Gasbildungsdaten von aus Bohrgut von Deponien verschiedenen Alters gewonnenen Proben eine gute Übereinstimmung mit der Gasprognose. Aus den folgenden Gründen sollten die Ansätze des Sachverständigengutachtens dennoch angepasst werden:

- ▶ Der Ansatz eines DDOC_m von 144 kg/Mg FM für die Organik-Fraktion im Sachverständigengutachten ist gemäß den v. g. Auswertungen deutlich zu hoch.
- ▶ Die Gasprognose mit den Ansätzen aus dem Sachverständigengutachten führt zu einer leichten Unterschätzung der in den letzten Jahren und aktuell stattfindenden Deponiegasbildung. Bei den Deponien AR bis UR werden mit dieser Gasprognose in über 50 % der Fälle Erfassungsgrade ermittelt, welche entweder über 100 % liegen oder höher sind, als für den jeweils bekannten Entgasungszustand der Deponie zu erwarten gewesen wäre.

8.2 Ableitung eines angepassten Parametersatzes

Aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 8.1 wurde eine Anpassung gegenüber dem Ansatz im Sachverständigengutachten zunächst wie folgt durchgeführt (im Weiteren als Variante A bezeichnet, die Werte sind in Kapitel 8.3 angegeben):

- ▶ Für die Organik-Fraktion werden die Ansätze aus dem deutschen NIR (bis 2018 genutzte Werte) gewählt.
- ▶ Für Garten- und Park-Abfälle werden die Ansätze aus dem deutschen NIR gewählt, außer dass der Wert für den DOC_r auf 0,3 reduziert wird. Damit wird der Erkenntnis zu dem wesentlich geringeren DDOC_m bei den Holzigen Anteilen der Garten- und Parkabfälle Rechnung getragen.
- ▶ Für PPK wird die Halbwertszeit gegenüber dem deutschen NIR von 12 auf 7 Jahre reduziert, was dem Ansatz im Sachverständigengutachten entspricht. Zudem wird der DDOC_m von 200 kg/Mg FM im deutschen NIR auf 190 kg /Mg FM verringert und liegt damit höher als im Sachverständigengutachten (dort: 160 kg/Mg FM). Mit der Erhöhung gegenüber dem Sachverständigengutachten wird den Erkenntnissen aus den Laborversuchen Rechnung getragen.
- ▶ Für Holz hat sich der Ansatz aus dem Sachverständigengutachten durch die weiteren Erkenntnisse bestätigt.
- ▶ Für Textilien (Textiles) und Windeln sowie für die Verbundstoffe wurde der Ansatz aus dem Sachverständigengutachten übernommen, nur dass jeweils die Halbwertszeit wieder so erhöht wurde, dass diese zwischen dem Ansatz des Sachverständigengutachtens und dem Ansatz des deutschen NIR liegt.
- ▶ Der Ansatz für den MCF wurde analog den Ansätzen im Sachverständigengutachten in dieser Variante noch nicht verändert, also unverändert gegenüber den Ansätzen im deutschen NIR übernommen.

Die Ergebnisse zur Variante A werden im folgenden Kapitel zusammen mit den Ergebnissen zu den weiteren in der Parameterstudie betrachteten Varianten dargestellt.

8.3 Überprüfung des angepassten Parametersatzes

Für die Parameterstudie wurde an vierzehn westdeutschen Beispieldeponien AR, BR, CR, ER, FR, HR, IR, JR, LR, NR, OR, SR, TR, UR eine Überprüfung der Varianten A bis E durchgeführt. Die Ansätze der Varianten A bis E im Vergleich zu den Ansätzen im Sachverständigengutachten (hier als SVG abgekürzt) und zu den Ansätzen im deutschen NIR sind in der Tabelle 34 dargestellt, wobei

- ▶ bei den Varianten A bis C für den MCF entsprechend dem deutschen NIR bis 1972 ein Wert von 0,6 und ab 1972 ein Wert von 1 angesetzt ist und

- bei den Varianten D und E für den MCF bis 1972 ein Wert von 0,6 und ab 1972 ein Wert von 0,9 angesetzt ist. Der Unterschied der Varianten D und E besteht darin, dass bei Variante D angestrebt wurde eine Anpassung des 1990er Wertes zu vermeiden und bei Variante E nicht.

In der Tabelle 34 sind Werte, welche vom deutschen NIR (bis zum Jahr 2018 verwendete Werte) abweichen, jeweils fett dargestellt.

Tabelle 34: Ansätze der Varianten A bis E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigen-gutachten und den Ansätzen im deutschen NIR

Abfallfraktion	Variante	Ansatz im deutschen NIR		
		DOC	DOC _f	Halbwertszeit (Jahre)
Organik (Food waste)	Deutscher NIR	0,18 (ab NIR 2019: 0,15)	0,5	4,0
	SVG	0,18	0,8	3,0
	Variante A	0,18	0,5	4,0
	Variante B	0,18	0,5	4,0
	Variante C	0,18	0,5	4,0
	Variante D	0,18	0,5	4,0
Garten- und Parkabfälle (Garden)	Variante E	0,15	0,5	4,0
	Deutscher NIR	0,2	0,5	7,0
	SVG	0,2	0,4	4,0
	Variante A	0,2	0,3	7,0
	Variante B	0,2	0,3	7,0
	Variante C	0,2	0,3	7,0
Papier und Pappe (Paper)	Variante D	0,2	0,3	7,0
	Variante E	0,2	0,5	7,0
	Deutscher NIR	0,4	0,5	12,0
	SVG	0,4	0,4	7,0
	Variante A	0,38	0,5	7,0
	Variante B	0,3	0,6	7,0
Holz und Stroh (Wood and straw)	Variante C	0,3	0,6	5,5
	Variante D	0,4	0,5	4,0
	Variante E	0,4	0,5	7,0
	Deutscher NIR	0,43	0,5	23,0
	SVG	0,43	0,1	50,0
	Variante A	0,43	0,1	50,0
	Variante B	0,43	0,1	50,0
	Variante C	0,43	0,1	50,0
	Variante D	0,43	0,2	50,0

Abfallfraktion	Variante	Ansatz im deutschen NIR		
		DOC	DOC _f	Halbwertszeit (Jahre)
Textilien (Textiles) und Windeln (Disposable nappies)	Variante E	0,43	0,1	50,0
	Deutscher NIR	0,24	0,5	12,0
	SVG	0,24	0,4	7,0
	Variante A	0,24	0,4	10,0
	Variante B	0,24	0,5	9,0
Klärschlamm (Sewage sludge)	Variante C	0,24	0,5	12,0
	Variante D	0,24	0,5	12,0
	Variante E	0,24	0,5	12,0
	Deutscher NIR	0,15	0,5	4,0
	SVG	0,15	0,8	3,0
Verbundmaterialien	Variante A	0,15	0,5	4,0
	Variante B	0,15	0,5	4,0
	Variante C	0,15	0,5	4,0
	Variante D	0,15	0,5	4,0
	Variante E	0,15	0,5	4,0
	Deutscher NIR	0,1	0,5	12,0
	SVG	0,1	0,4	7,0
	Variante A	0,1	0,4	10,0
	Variante B	0,1	0,5	9,0
	Variante C	0,1	0,5	12,0
	Variante D	0,1	0,5	12,0
	Variante E	0,1	0,5	12,0

In der Tabelle 35 ist am Beispiel der Deponie AR dargestellt, aus welchen Abfällen im Jahr 2018 das entstehende Deponiegas nach Prognose mit den verschiedenen Varianten der Parameterstudie im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR hervorgeht.

Tabelle 35: Anteile der einzelnen Abfallfraktionen an der Deponiegasbildung des Jahres 2018 am Beispiel der Deponie AR

Variante	Organik	Garten/ Park	PPK	Holz/ Stroh	Textilien	Windeln	Schläm- me	Verbund
Deutscher NIR	3%	2%	49%	24%	11%	4%	1%	5%
SVG	5%	1%	57%	11%	13%	6%	0	6%

A	8%	3%	50%	8%	16%	7%	1%	8%
B	8%	3%	47%	8%	18%	7%	1%	8%
C	8%	3%	29%	9%	26%	10%	1%	12%
D	9%	3%	13%	19%	29%	11%	2%	13%
E	7%	4%	49%	8%	15%	6%	1%	8%

In den folgenden Abbildungen und dazugehörigen Bewertungen sind die Ergebnisse der Variantenbetrachtung für drei von 14 Deponien beispielhaft für folgende Varianten angegeben; die übrigen derart berechneten Deponien sind im Anhang aufgeführt:

- Variante A
- Variante C
- Variante E
- Zum Vergleich: Ansätze aus dem Sachverständigengutachten RUK 2014
- Zum Vergleich: Bisherige Ansätze aus dem deutschen NIR = IPCC default values

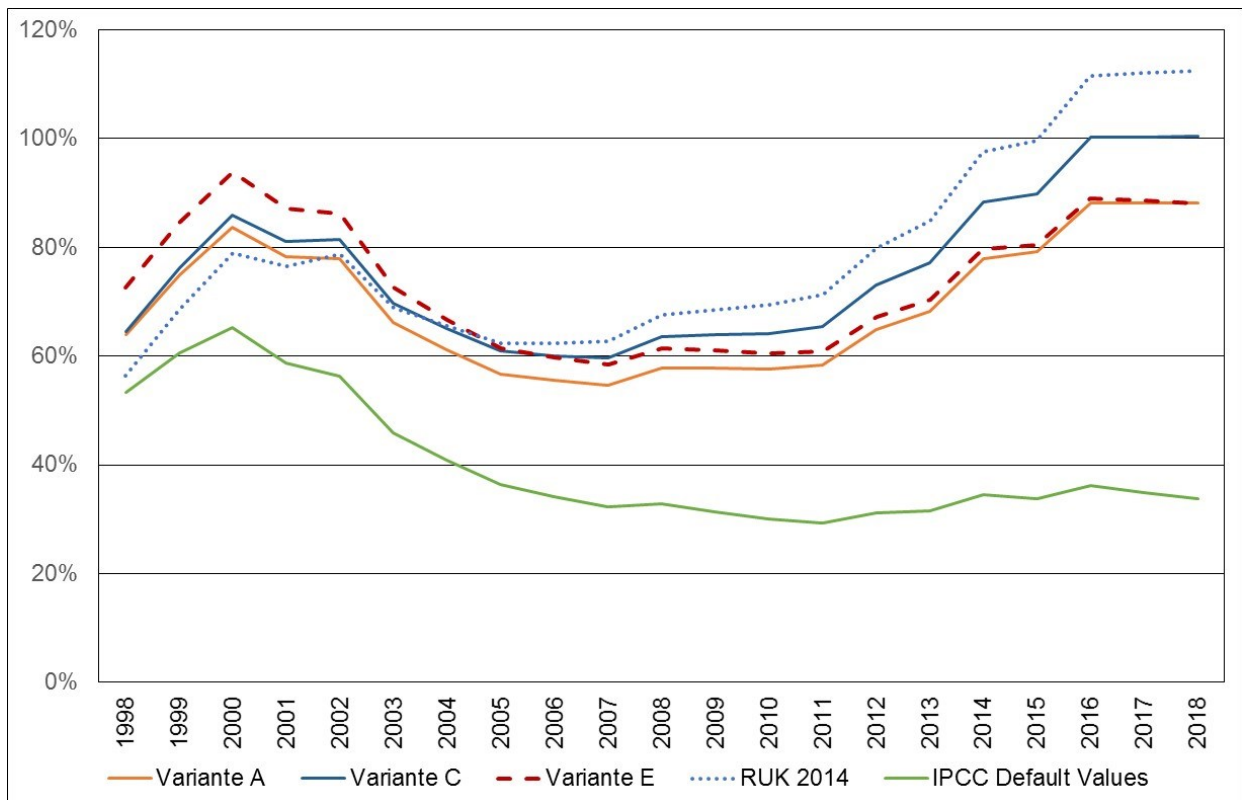
Als Vergleichsgröße wurde der Erfassungsgrad verwendet. Auch bei der Bewertung der Abbildungen wird bei Bedarf die Abkürzung SVG für das Sachverständigengutachten (RUK, 2014) verwendet.

Auf der **Deponie LR** erfolgte ab dem Jahr 2013 eine motorische Verwertung mit Motoren, welche mit relativ geringen Methankonzentrationen betrieben werden können. Die zunehmenden Erfassungsgrade in den letzten Jahren ergeben sich dadurch, dass die Motoren zwischenzeitlich nahe dem unteren Leistungsbereich betrieben werden müssen. Der optimierte Betrieb der Entgasung ist zwingend erforderlich, um genügend Gas für den Betrieb der Motoren im gerade noch zulässigen Teillastbetrieb liefern zu können.

Die geringeren Erfassungsgrade in den Jahren bis 2013 ergaben sich dadurch, dass in diesen Jahren das Deponiegas zusammen mit Biogas verwertet wurde und damit die Art der Deponieentgasung von externen Faktoren beeinflusst war. Es wurde (nur) so viel Gas abgesaugt, wie für den Betrieb der Gasmotoren zusätzlich zum Biogas zugegeben werden musste.

Aktuell erfolgt wieder ein Umbau auf gemeinsame Nutzung mit Biogas, jetzt aber durch zurückgehende Deponiegasmengen und Neubau der Biogasanlage in wesentlich geringeren Anteilen. Bei den gegebenen Rahmenbedingungen sind die Prognoseergebnisse der Variante E plausibel.

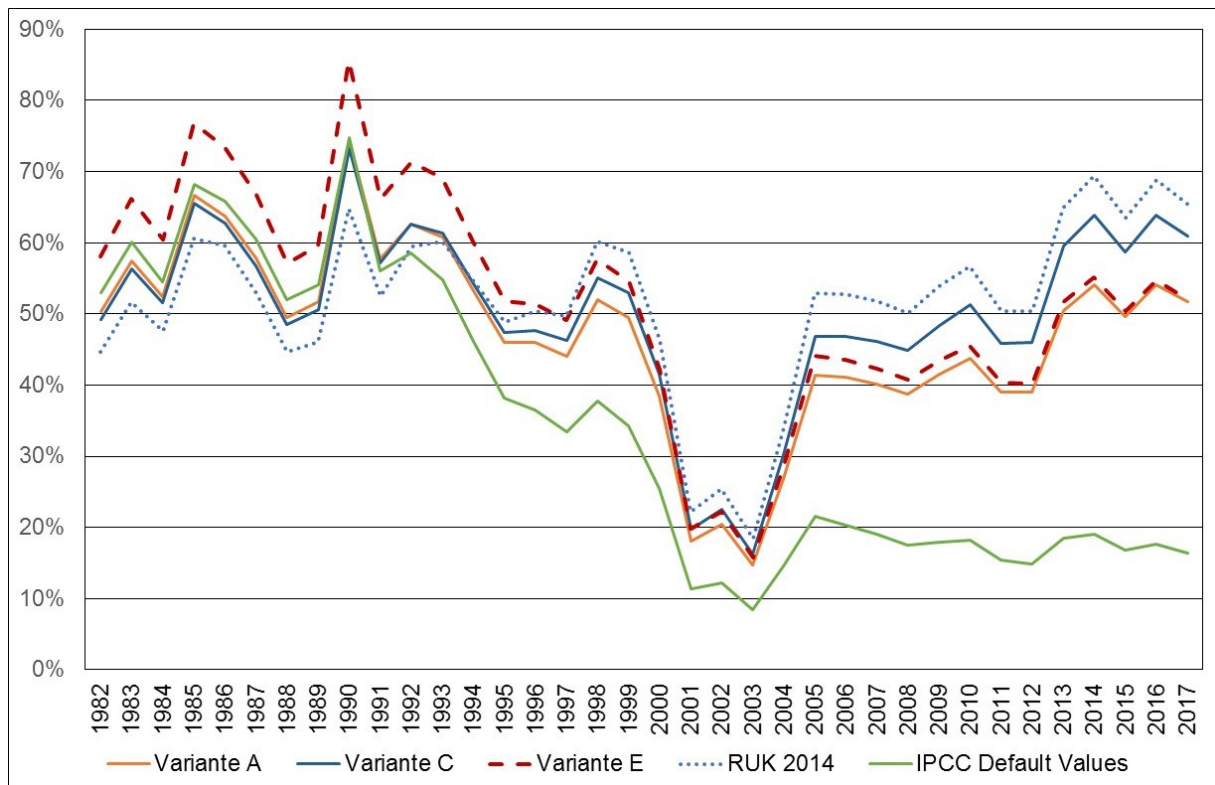
Abbildung 46: Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie LR



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Deponie NR hat noch keine Oberflächenabdichtung nach Deponieverordnung (2018/2019 beginnt die Planung), jedoch seit 2004 eine Entsorgung über eine Schwachgasfackel. Bei den gegebenen Rahmenbedingungen sind die Prognoseergebnisse der Variante E plausibel.

Abbildung 47: Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie NR.

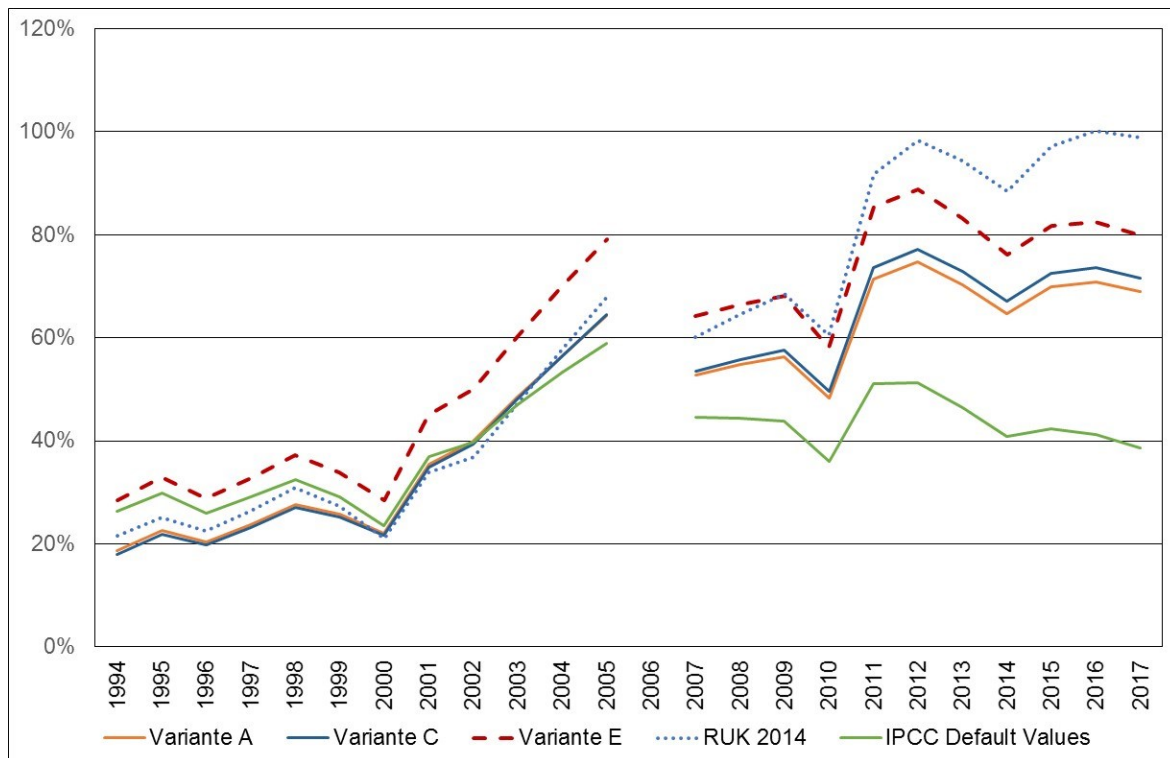


Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Bei der Deponie TR sind Bedingungen wie bei der Deponie LR seit 2013 und bei der Deponie OR gegeben, jedoch sind hier mehrere Motoren und damit mehr Steuermöglichkeiten vorhanden. Bei Deponie TR wird sehr viel betrieblicher Aufwand und Technik in die Entgasung und Gasverwertung investiert. Der Abstand zu 100 % Erfassungsgrad ist jedoch erklärbar, da es noch Bereiche mit zu geringer Brunnendichte gibt. Dies wird aktuell in zwei Bauabschnitten korrigiert (erster Bauabschnitt ist bereits in Betrieb, zweiter Bauabschnitt wird seit Juli 2018 gebaut). Die Variante E prognostiziert den aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen erwarteten Gaserfassungsgrad am besten.

Für alle Deponien AR bis UR ergibt sich aus der durchgeführten Parameterstudie die Variante E als die geeignetste Variante. In der Anlage 2 ist hierzu für alle betrachteten Deponien AR bis UR das Ergebnis der Variante E im Vergleich zu den Ergebnissen bei Verwendung des dem im Sachverständigengutachten verwendeten Parametersatzes und bei Verwendung des im deutschen NIR bislang verwendeten Parametersatzes grafisch dargestellt. Anlage 3 beinhaltet die hier nicht näher aufgeführten Deponien.

Abbildung 48: Erfassungsgrad bei den Varianten A, C und E im Vergleich mit den Ansätzen im Sachverständigengutachten und den Ansätzen im deutschen NIR für die Deponie TR



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

8.4 Übertragung des angepassten Parametersatzes auf die Vorgabewerte im NIR

Im Folgenden soll die Übertragung des angepassten Parametersatzes auf die Methodik und die Vorgabewerte zur Ermittlung der Methanbildung in Deponien gemäß dem Nationalen Inventarbericht vorgenommen werden. Hierzu lassen sich folgende grundsätzlichen Ergebnisse und Erkenntnisse festhalten:

- Die Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien ist sinnvoll, da die bisherigen Modellansätze unter Heranziehung der nur geringfügig modifizierten IPCC-Werte zu Methanbildungsraten führen, die die tatsächlichen Bedingungen auf den deutschen Deponien nicht widerspiegeln. Damit werden in den NIR-Berichten die Methanbildungsraten deutlich überschätzt.
- Sowohl die Aufbereitung des Sachstandes, der Fachliteratur als auch der Erkenntnisse zum Gashaushalt zahlreicher Siedlungsabfalldeponien in Deutschland bestätigen den genannten Sachverhalt. Dies wird mit den Ergebnissen der Arbeitspakete A und B nochmals vertieft und verdeutlicht.
- Mit den Laboruntersuchungen im Arbeitspaket B wurden die Erkenntnisse des Arbeitspakets A weiter abgesichert. So ergeben die Prognoserechnungen der Methanemissionen verschiedener untersuchter Deponien aufgrund modifizierter Ansätze zum Methanbildungspotenzial und zur Kinetik der Methanbildung (Arbeitspakete A - D) im Abgleich mit den Ergebnissen von Biotests zur Methanbildung eine gute Übereinstimmung.
- Zur genaueren Ermittlung des Methanbildungspotenzials und der Methanbildung in Deponien anhand von Modellberechnungen sollten dazu für die einzelnen organikhaltigen Abfallfraktionen insbesondere folgende Parameter modifiziert werden:

- DOC
- DOC_f
- Halbwertszeit
- MCF

Nach derzeitigem Kenntnisstand, der Auswertung der Untersuchungsergebnisse und Berechnungen zum Gashaushalt von Deponien wird vorgeschlagen, die Parameter wie in Tabelle 36 aufgeführt anzupassen.

Die fett angegebenen Werte entsprechen den Ansätzen der Variante E. Die in Klammern angegebenen Werte sollen den Wertebereich widerspiegeln, welcher sich bei den Variantenbetrachtungen der Parameterstudie als Bandbreite aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ergeben hat.

Erläuterung zur Anpassung:

- ▶ Die Anpassung erfolgt dahingehend, dass nur wenige Werte modifiziert werden. Es wurden hauptsächlich die Werte angepasst, die die aktuelle Methangasbildung auf deutschen Deponien bisher eindeutig zu hoch prognostizieren lassen. Es wurden ferner insbesondere die Werte der organikhaltigen Fraktionen angepasst, die einen großen Anteil an der Ablagerungsmasse und an der Methanbildung haben.
- ▶ DOC-Wert: Der DOC-Wert muss nicht unbedingt modifiziert werden, da auf der Grundlage der umfangreichen Untersuchungen und Auswertungen auch eine Anpassung der aktuell noch vorhandenen Methanbildung der einzelnen organikhaltigen Fraktionen über die Parameter DOC_f und die Halbwertszeit vorgenommen werden kann. Der DOC bezieht sich in der Methodik der IPCC auf die Feuchtmasse FM. Sofern vor diesem Hintergrund und im Abgleich mit der Fachliteratur und den Ergebnissen der Laborversuche dennoch eine Anpassung vorgenommen werden sollte, wäre eine Reduzierung bei den Fraktionen Organik (Food), Papier (PPK), Holz/Stroh und ggf. Windeln angeraten.

Tabelle 36: Vergleich der bisher im deutschen NIR für die Halbwertszeit, den DOC und den DOC_f angesetzten Werte, Vorschlag zur Anpassung zur genaueren Abschätzung der Methanemissionen von Deponien (Klammerwerte geben Schwankungsbreiten bzw. mögliche Unsicherheiten an)

Abfallfraktion	Ansatz im deutschen NIR			Vorschlag modifizierter Ansatz		
	DOC	DOC _f	Halbwertszeit	DOC	DOC _f	Halbwertszeit
	MgC/Mg FM	-	Zeit Jahre	MgC/MgF M	-	Zeit Jahre
Organik (Food waste)	0,18 (ab NIR 2019: 0,15)	0,5	4	0,15 (0,09)	0,5 (0,8)	4 (3)
Garten- und Parkabfälle (Garden)	0,2	0,5	7	0,2	0,5 (0,3)	7 (4)
Papier und Pappe (Paper)	0,4	0,5	12	0,4 (0,3)	0,5 (0,6)	7 (4)
Holz und Stroh (Wood and straw)	0,43	0,5	23	0,43 (0,35)	0,1 (0,2)	50 (35)
Textilien	0,24	0,5	12	0,24	0,5	12

Abfallfraktion	Ansatz im deutschen NIR			Vorschlag modifizierter Ansatz		
	DOC	DOC _f	Halbwertszeit	DOC	DOC _f	Halbwertszeit
	MgC/Mg FM	-	Jahre	MgC/MgF M	-	Jahre
(Textiles)						(7 – 12)
Windeln (Disposable nappies)	0,24	0,5	12	0,24 (0,18)	0,5	12 (7 – 12)
Klärschlamm (Sewage sludge)	0,15	0,5	4	0,15	0,5	4 (3)
Verbundmaterialien	0,1	0,5	12	0,1	0,5	12 (7)
MBA-Abfälle	0,023	0,5	12	0,023	0,5	12 (4)

- **DOC_f-Wert:** Der Ansatz im IPCC-Modell, wonach bei allen organikhaltigen Fraktionen einheitlich 50 % des Kohlenstoffs unter Deponiebedingungen abbaubar sind, stellt einen unrealistischen Fall dar. Bei leicht abbaubaren Abfällen ist der Anteil an sich bereits wesentlich größer als bei schwer abbaubaren Abfällen. Zudem wurden leicht abbaubare Abfälle häufig mit hohem Wassergehalt abgelagert, so dass eine Austrocknung unwahrscheinlich erscheint, während beispielsweise Holz in Sperrmüllablagerungen oft sehr trocken deponiert wird und die Möglichkeit besteht, dass dieses Holz gar nicht mit Wasser in Kontakt kommt. Daher wurde für Holz der biologisch abbaubare Kohlenstoffanteil DOC_f angepasst. Erkundungsbohrungen und Schürfe auf Deponien haben gezeigt, dass Holz unter anaeroben Bedingungen kaum abgebaut wurde, zumal wenn es sich um grobstückige Holzbestandteile handelt, die für die Mikroorganismen nicht zugänglich sind. Hinsichtlich der biologischen Verfügbarkeit könnten auch die DOC_f-Werte für die Fraktionen Textilien, Windeln und Verbundmaterialien etwas reduziert werden.
- **Halbwertszeit:** Erfahrungswerte zeigen, dass in Phasen mit noch hohem Abbaupotenzial bei deutschen Deponien von Halbwertszeiten zwischen 4 (zu Beginn dieser Phase) und 7,5 Jahren auszugehen ist (Rettenberger, 2004). Demgegenüber ergibt sich bei Ansatz des IPCC-Modells bei allen untersuchten Deponien bereits für das erste Jahr eine Halbwertszeit um oder über 7 Jahre. Die Restgaspotenziale, die bei umfangreichen Untersuchungen auf den Deponien bzw. anhand der Abfallfeststoffproben ermittelt wurden, liegen überwiegend deutlich unter denen, die sich für diese Deponiestandorte nach den Berechnungen gemäß den NIR/IPCC-Ansätzen ergeben. Das lässt darauf schließen, dass einige organikhaltige Abfallfraktionen wie insbesondere das Papier, die maßgeblich zur Deponiegasbildung beitragen, eine eher kürzere Halbwertszeit aufweisen. Das Papier, dem im Nationalen Inventarbericht derzeit noch ein erhebliches Methanbildungspotenzial von etwa 52% der aktuellen Gesamtmethanemissionen zugeschrieben wird, wurde bei den Erkundungen auf Deponien kaum noch vorgefunden, da es bereits weitgehend abgebaut wurde. Daher wurde die Halbwertszeit von 12 auf durchschnittlich 7 Jahre reduziert. Für etliche Papiersorten und günstige Ablagerungsbedingungen, was den Wassergehalt und die Verfügbarkeit für die Mikroorganismen anbetrifft (ggf. etwas erhöhter DOC_f), könnte die Halbwertszeit auch auf 4 Jahre herabgesetzt werden. Tendenzielle Reduzierungen der Halbwertszeit mit einer größeren Schwankungsbreite wären auch bei den Fraktionen Textilien, Windeln und Verbundmaterialien vornehmbar. Umgekehrt weist die Fraktion Holz (und Stroh) wie erläutert eine geringe biologische Verfügbarkeit unter anaeroben Milieubedingungen auf und ist, wenn überhaupt, nur unter sehr hohen Halbwertszeiten abbaubar. Daher sollte auch hier eine Anpassung erfolgen, da die Holzfraktion

keinen Anteil von 16% der gesamten Methanbildung ausmacht, wie es bisher noch bei den Berechnungen zum Nationalen Inventarbericht ausgewiesen ist.

Die deponierten MBA-Rückstände sind massenmäßig nur von untergeordneter Bedeutung.

Gleichwohl weisen sie, wenn sie aus der biologischen Vorbehandlungsstufe kommen und deponiert werden, noch eine relativ intensive biologische Aktivität auf. Der geringe noch bioverfügbare Anteil wird daher vermutlich unter eher kürzeren Halbwertszeiten abgebaut.

Weiterhin wird empfohlen, den aeroben Abbau von bioverfügbarem Kohlenstoff (DDOC_m) stärker zu berücksichtigen. Dazu kann der Methan-Korrektur-Faktor (MCF) erweitert und angepasst werden zu:

MCF _{Ablagerungsbeginn}	wie bisher aerober Abbau zu Beginn der Ablagerung
MCF _{langfristig}	Erweiterung: aerober Abbau mit zunehmendem Ablagerungsalter und nachlassender Gasbildung infolge anwachsender Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre

Nach der Literaturlauswertung, Angaben des Statistischen Bundesamts zu durchschnittlichen Methankonzentrationen sowie Auswertungen an den näher untersuchten Deponiestandorten könnten folgende Wertebereiche für jüngere und ältere Abfallablagerungen gewählt werden:

MCF _{Ablagerungsbeginn}	= 0,6 für das Gebiet der ehemaligen DDR und für die BRD vor 1972
	= 0,8 – 0,95 für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990
MCF _{langfristig}	= 0,6 – 0,7 für kleinere Altdeponien und Altablagerungen (Zeitraum 1950 – 1972)
	= 0,87 – 0,93 für größere Altdeponien in der Stilllegung und Nachsorge

Die Werte für MCF_{langfristig} würden eine tendenzielle Abnahme über die weitere Ablagerungsdauer erfahren, da die Gasaustauschprozesse mit der Atmosphäre und die aeroben Abbauprozesse in der Regel zunehmen.

Vereinfachte Anpassung zum MCF

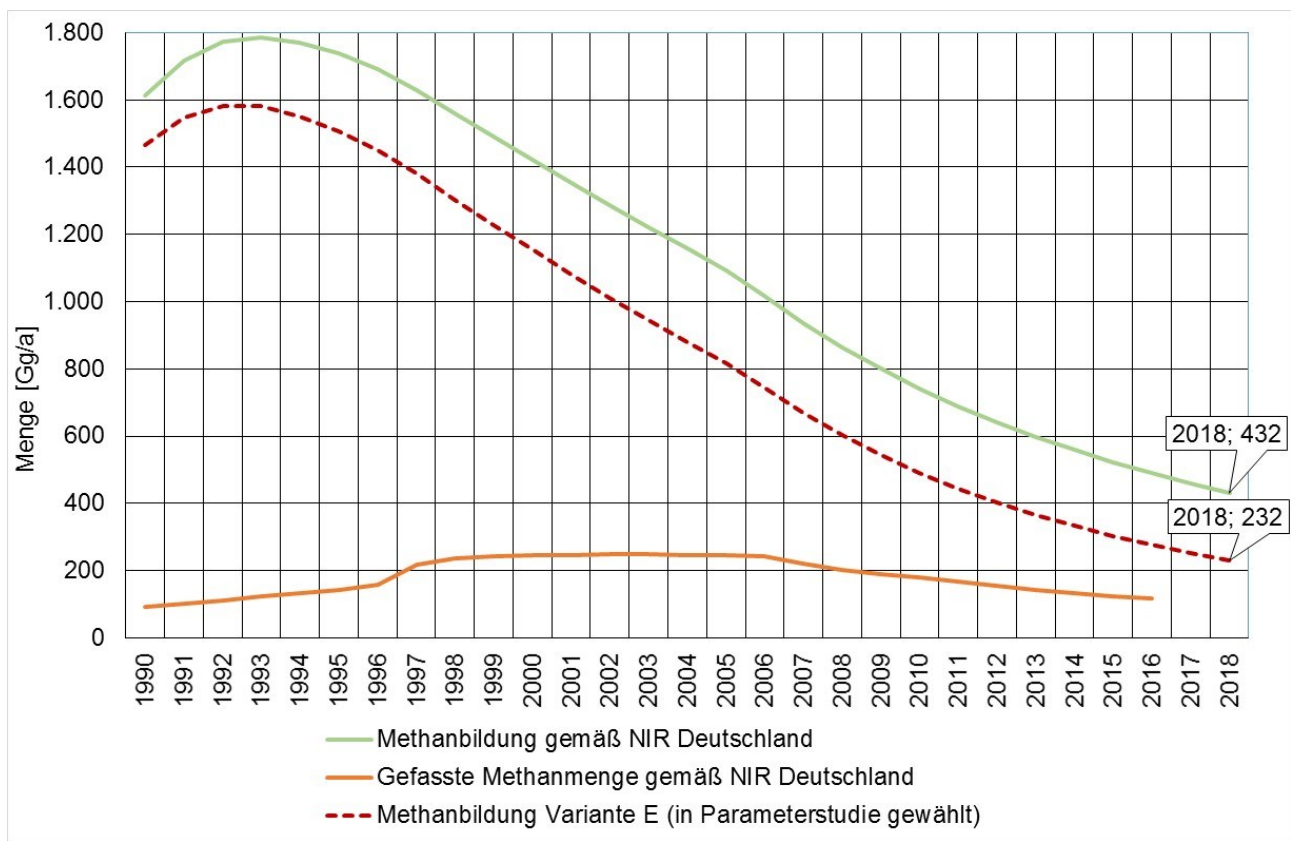
Als vereinfachte Anpassung sollte zumindest der MCF, der in der bisherigen Berechnungsmethodik im NIR mit 1 für BRD-Deponien ab 1972 und für alle deutschen Deponien ab 1990 angesetzt wird, auf einen Festwert von 0,9 abgesenkt werden. Damit wird der Anteil des aeroben Abbaus an der Reduzierung der Methanbildung zwar vom zeitlichen Verlauf und der Größe immer noch nicht realistisch abgebildet, aber es wird zumindest eine „pragmatische“ Annäherung an die Verhältnisse der Abbauprozesse auf deutschen Deponien erreicht.

8.5 Abschätzung zum Gasfassungsgrad auf deutschen Deponien mit dem angepassten Parametersatz

Bei den betrachteten Deponien hat sich die Variante E als am geeignetsten herausgestellt. Der Einfluss dieser Variante auf die Methanbildung aller Deponien im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen im NIR und beispielhaft im Vergleich zur Variante A ist in der Abbildung 49 für die Jahre ab 1990 dargestellt.

In der Grafik ist der Wert für die jährliche Methanbildung für das Jahr 2018 als Ergebnis einer Gasprognose mit den Ansätzen der Variante E (232 Gg/a) und als Ergebnis einer Gasprognose mit den Ansätzen aus dem deutschen NIR (432 Gg/a) angegeben.

Abbildung 49: Jährliche Methanbildung aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E für die Jahre ab 1990



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

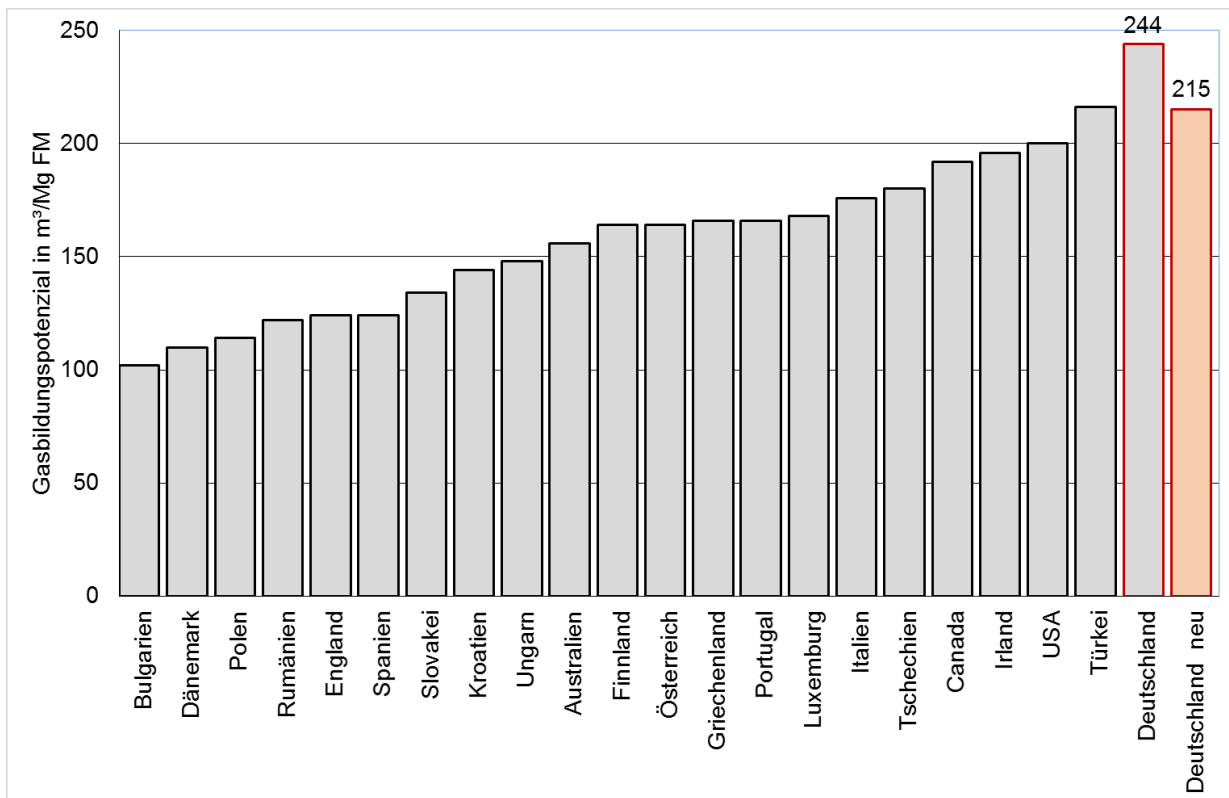
Bei Variante E erfolgten Anpassungen derart, dass sich in der Summe aller Anpassungen auch das Gasbildungspotenzial geändert hat, wenn auch nur moderat. Durch die moderate Anpassung ist das für deutsche Deponien angesetzte Gasbildungspotenzial im Vergleich zu vielen anderen Ländern immer noch eines der höchsten. Dennoch führt die Anpassung dazu, dass das Gesamtgasbildungspotenzial für das Bezugsjahr 1990 angepasst werden muss (Abbildung 49). In der Abbildung 50 sind die Angaben aus der Tabelle 10 auf der Seite 75 grafisch dargestellt und um das Gaspotenzial der Variante E (= „Deutschland neu“) ergänzt.

Folglich ergeben sich im Abgleich mit den erfassten Deponiegas- bzw. Methanvolumenströmen der Deponien, die ihre Daten an das Statistische Bundesamt weitergeben, entsprechend höhere Gaserfassungsgrade. Die zeitliche Entwicklung der im deutschen NIR ab 1990 registrierten Gaserfassungsgrade im Vergleich zu den Varianten A und E ist in der Abbildung 51 dargestellt.

Bisher wurde im Nationalen Inventarbericht ein Gaserfassungsgrad für das Jahr 2016 von 23,9% ausgewiesen. Mit dem angepassten Parametersatz ergibt sich bei der Variantenbetrachtung für 2016 für Variante E ein Gaserfassungsgrad von 42,3 %.

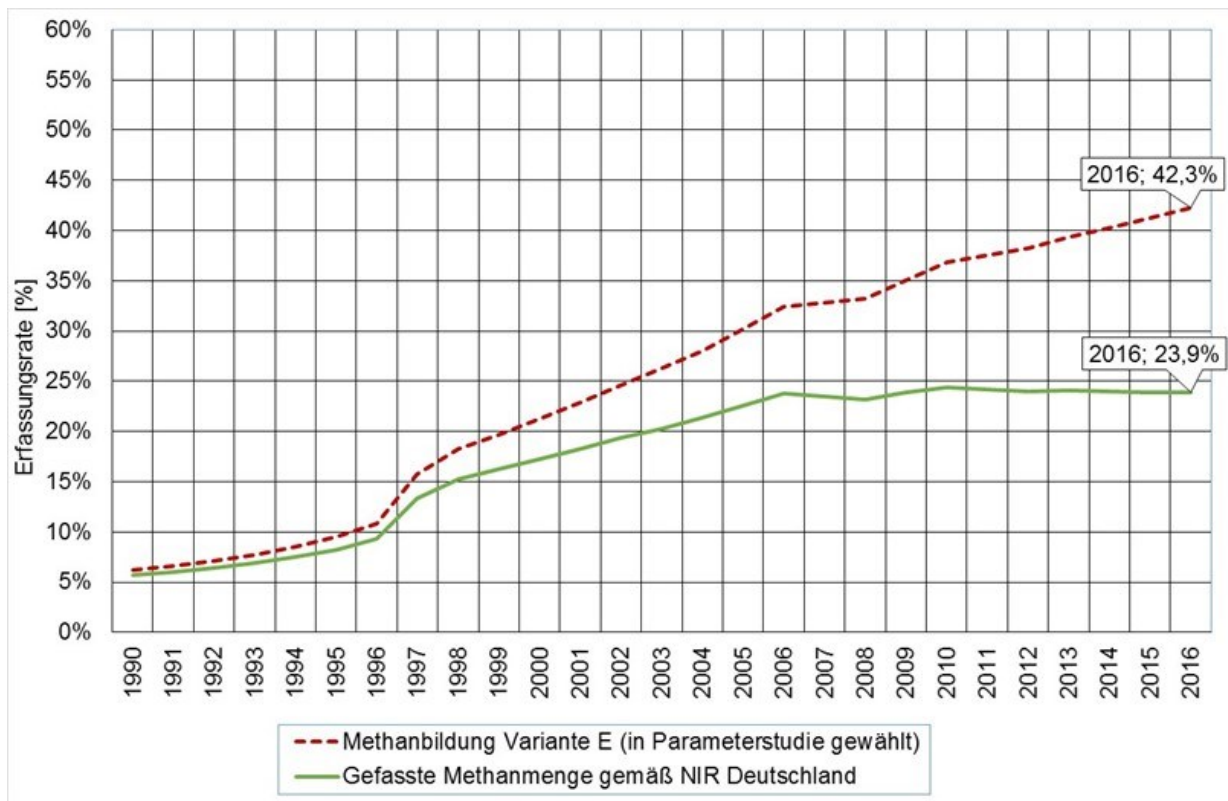
Die Berechnungsergebnisse decken sich sehr gut mit den Untersuchungen und Auswertungen zum Gashaushalt und zum Gaserfassungsbetrieb der meisten der 37 Deponien, die im Rahmen dieses Vorhabens näher betrachtet wurden.

Abbildung 50: Gaspotenzial bei deutschen Deponien im internationalen Vergleich bei den Ansätzen aus dem NIR und den Ansätzen der Variante E



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 51: Entwicklung der Gaserfassungsgrade aller deutschen Deponien gemäß bisherigem Ansatz im NIR und mit modifiziertem Parametersatz der Variante E für die Jahre ab 1990



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Würden nur die Deponien betrachtet, welche für die Parameterstudie verwendet wurden, nämlich die Deponien AR, BR, CR, ER, FR, HR, IR, JR, LR, NR, OR, SR, TR und UR, so würde sich für die letzten Jahre bei Ansatz der Variante E für diese gut entgasteten Deponien folgender Erfassungsgrad ergeben:

- 2013 59 %
- 2014 62 %
- 2015 62 %
- 2016 64 %
- 2017 66 %

Im Vergleich dazu läge der Erfassungsgrad bei Ansatz der Parameter aus dem deutschen NIR sowie des Sachverständigengutachtens (SVG) RUK 2014 für diese Deponien im Mittel bei:

- 2013 32% (NIR) 74% (SVG)
- 2014 32% (NIR) 78% (SVG)
- 2015 31% (NIR) 80% (SVG)
- 2016 31% (NIR) 84% (SVG)
- 2017 30% (NIR) 89% (SVG)

Die geringeren Erfassungsgrade gegenüber dem SVG sind bei allen betrachteten Deponien jeweils unter Berücksichtigung der im jeweiligen Jahr gegebenen Rahmenbedingungen nachvollziehbar zu erklären und plausibel. Demgegenüber spiegeln die geringen Erfassungsgrade gemäß NIR die tatsächliche Entgasungssituation an diesen Deponien nicht angemessen wieder.

Die nicht weiter ausgewerteten Deponien zeigen demgegenüber wesentlich geringere Erfassungsgrade, beispielsweise weisen die Deponien DR und MR bei Ansatz der Variante E Erfassungsgrade um 20 % auf, wobei auch dort derzeit Bemühungen im Gange sind, die Erfassungsgrade wesentlich zu erhöhen. Bei der Recherche der letztlich betrachteten Deponien wurden weitere Standorte außer jene der Deponien AR bis UR angefragt. Insgesamt zeigt sich, dass Deponien wie die Deponie DR und MR eher die Ausnahme bei Deponien mit Gaserfassung sind. Massemäßig machen diese Deponien sicher weniger als ein Viertel aller entgasten Standorte aus, eher weniger.

Neben den entgasten Deponiestandorten gibt es massemäßig untergeordnet Deponien ohne Entgasung, wobei es sich dabei in der Regel um kleine und alte Ablagerungen handelt, bei denen nur bereichsweise bzw. im beschränkten Umfang Bedingungen für einen anaeroben Abbau gegeben sind (s. Auswertung bezüglich MCF).

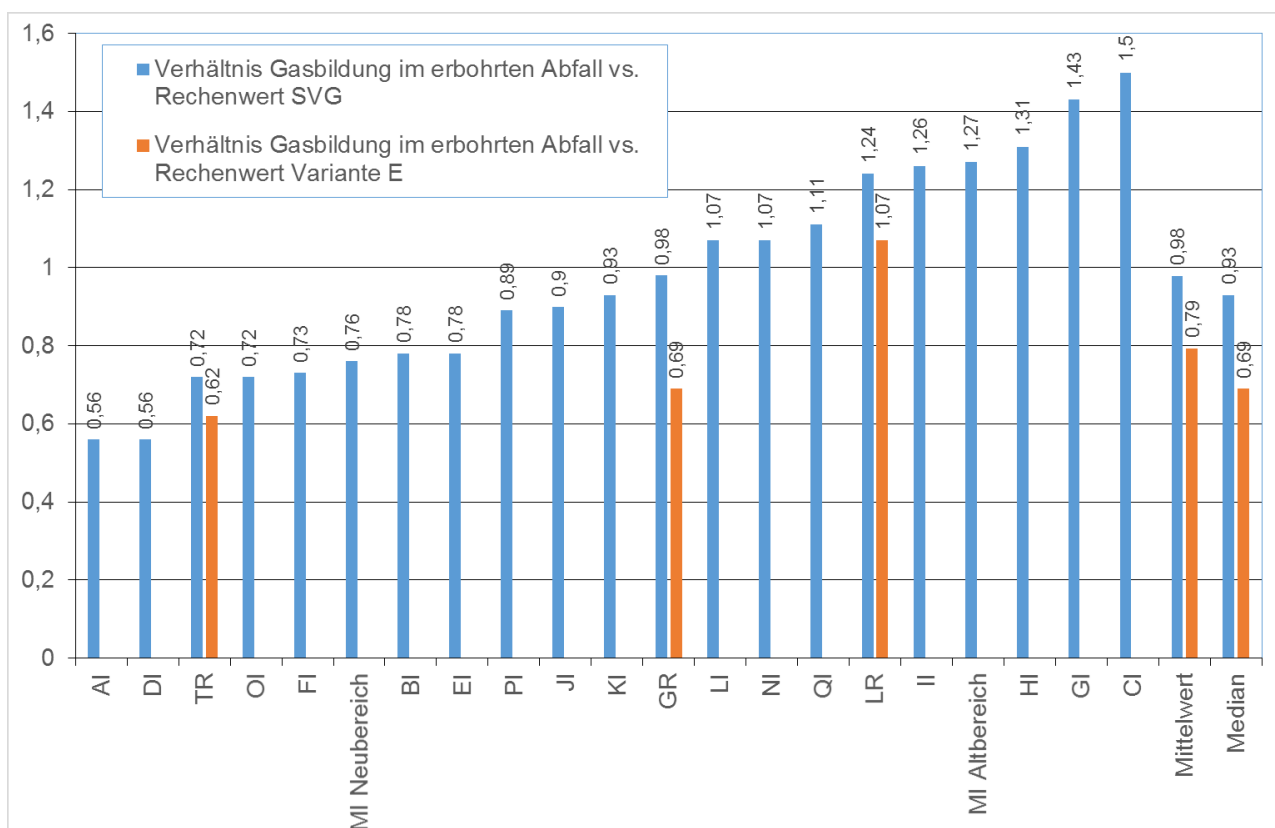
Bei der Gruppe der Deponien AI – QI liegt der Gaserfassungsgrad aufgrund des ersten gewählten Berechnungsansatzes des Sachverständigengutachtens von 2014 ohne/mit Berichtigung des MCF-Faktors von 0,9 im Bereich von 43 – 48%. Aufgrund der umfangreichen Abfallanalysen zum noch vorhandenen Gasbildungspotenzial und der aktuellen Deponiegas- bzw. Methanbildung wurde der Gaserfassungsgrad zu 45 – 50% (jeweils Durchschnittswerte) abgeleitet.

Der angepasste Parametersatz scheint daher immer noch eine konservative Abschätzung „zur sicheren Seite“ zu bilden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei der Ableitung des Gaserfassungsgrads im Nationalen Inventarbericht der Bezug zu sämtlichen Abfällen, die seit 1950 abgelagert wurden, gewählt wird (und nicht nur die Abfallmasse der 429 Deponien, die ihre Daten an das Statistische Bundesamt melden). Bei der Auswertung der Deponiestandorte wurde nur die dort abgelagerte Abfallmasse zur Berechnung herangezogen, so dass sich auch durch den unterschiedlichen Massenbezug die Unterschiede bei den Gaserfassungsgraden anhand der Variante E ergeben.

8.6 Zusammenfassende Überprüfung der Ansätze der Variante E

In der Abbildung 52 wird für alle Deponien, an denen Abfallfeststoffbeprobungen vorgenommen wurden, das darüber ermittelte Gasbildungspotenzial mit der berechneten Gasbildung verglichen. Es wird zum einen mit den Ansätzen aus dem SVG und zum anderen mit den Ansätzen der Variante E berechnet. Werte unter 1 bedeuten, dass die aus den Proben ermittelte tatsächliche Gasbildung geringer ist als die rechnerisch prognostizierte Gasbildung. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass gegenüber dem tatsächlich an erbohrtem Abfall im Deponiekörper noch vorhandenen Gasbildungspotenzial mit der Prognose unter Verwendung der Ansätze von Variante E eher eine Überschätzung des Gasfassungsgrads stattfindet. Dies bedeutet im Hinblick auf den Gaserfassungsgrad wie erläutert weiterhin eine Abschätzung „zur sicheren Seite“.

Abbildung 52: Vergleich der aus den Abfallproben ermittelten Gasbildung mit der berechneten Gasbildung bei allen Deponien, an denen eine Beprobung stattgefunden hat



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

In Kapitel 7.3 wurde aus den Laborproben das Gasbildungspotenzial für verschiedene Abfallalter ausgewertet und zwar anhand der Atmungsaktivität und der Restgasbildung im Labor. Werden die Abfallalter zwischen 17,5 Jahre und 43 Jahre ausgewertet, ergeben sich als grobe Orientierungswerte folgende Halbwertszeiten:

- ▶ abgeleitet aus der Atmungsaktivität: 13 Jahre
- ▶ abgeleitet aus der Restgasbildung: 17 Jahre

Demgegenüber wurde bei den zur Herleitung der Variante E verwendeten Deponien folgende Halbwertszeiten für das Jahr 2018 ermittelt:

- ▶ Deponie AR (mittleres Abfallalter = 32 Jahre): 10 Jahre
- ▶ Deponie BR (mittleres Abfallalter = 29 Jahre): 8,5 Jahre

- ▶ Deponie CR (mittleres Abfallalter = 32 Jahre): 9,5 Jahre
- ▶ Deponie ER (mittleres Abfallalter = 34,5 Jahre): 10 Jahre
- ▶ Deponie TR (mittleres Abfallalter = 22 Jahre): 9 Jahre

Bei der Variante E werden gegenüber den beprobten Altdeponien also etwas kleinere Halbwertszeiten und damit ein etwas schnellerer Abbau angesetzt. Grundsätzlich handelt es sich bei der mit dem FOD-Modell bestimmten mittleren Halbwertszeit um eine Mittelung der im Prognosemodell verwendeten sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten. Die Ermittlung einer etwas kleineren mittleren Halbwertszeit bei Berechnungen mit dem FOD-Modell für die gewählte Variante gegenüber der in Laboruntersuchungen an erbohrtem Abfall gleichen Alters ermittelten Halbwertszeit könnte dadurch verursacht sein, dass im Prognosemodell schnell abbaubare Abfälle eingerechnet werden, die in der Deponie zum Zeitpunkt der Probenahme schon längst abgebaut sind.

Die Halbwertszeiten der Variante E ergeben sich aus der jeweiligen Deponiegutzusammensetzung und den angesetzten Halbwertszeiten. Aufgrund der Erkenntnisse zu den Halbwertszeiten aus den Langzeitgärversuchen und der Fachliteratur wurden die Halbwertszeiten bei Variante E gegenüber den Ansätzen im NIR für folgende Fraktionen angepasst:

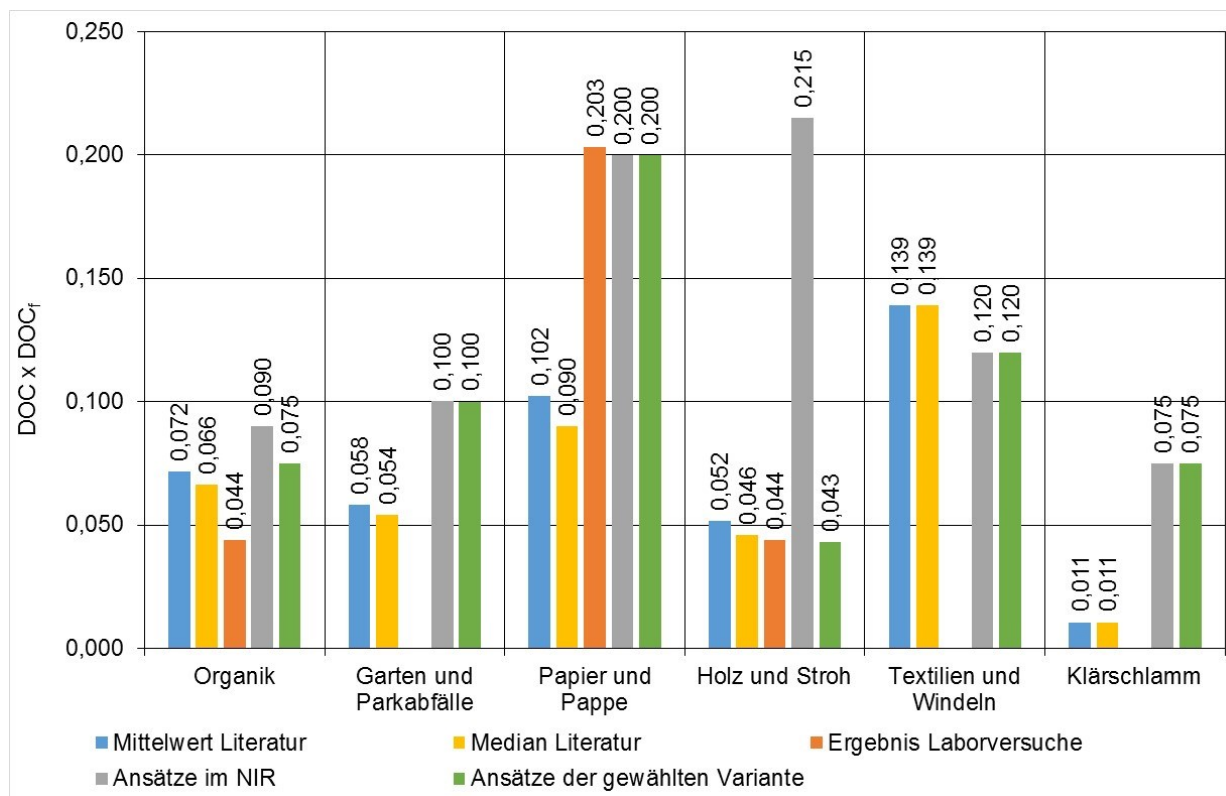
- ▶ Bei PPK wurde bei den Langzeitgärversuchen eine vergleichbare Halbwertszeit ermittelt wie bei der Organik, gleichzeitig aber festgestellt, dass bei der Auswertung der Laborversuche Abweichungen gegenüber den Bedingungen in einem Deponiekörper zu berücksichtigen sind. In Deponien ist Papier und Pappe zum Teil trocken und zudem weniger stark zerkleinert und weniger stark vermischt abgelagert. Dies sollte durch eine größere Halbwertszeit, als bei den Laborversuchen ermittelt wurde, einkalkuliert werden. Mit 7 Jahren Halbwertszeit wurde bei Variante E eine Halbwertszeit angesetzt, welche etwa um den Faktor 1,7 niedriger ist als im NIR angesetzt wird (dort 12 Jahre) und etwa um den Faktor 1,7 höher ist als die Halbwertszeit von Organik (4 Jahre).
- ▶ Bei den Laborversuchen mit Holz wurde unter Berücksichtigung des bei der Herstellung der Laborproben entstandenen Holzstaubes eine um den Faktor 3,8 höhere Halbwertszeit als bei der Organik und nach Herausrechnen des Holzstaubanteils eine um den Faktor 18,4 höhere Halbwertszeit als bei Organik festgestellt. Da der letztgenannte Wert wahrscheinlicher ist, wurde bei der Variante E für Holz eine um den Faktor 12,5 höhere Halbwertszeit als für Organik angesetzt.

Insgesamt wurden bei Variante E nur die sehr eindeutigen Ergebnisse und Ableitungen berücksichtigt, um so an möglichst wenigen Parametern Anpassungen durchzuführen. Neben den genannten Anpassungen bei den Halbwertszeiten und der Anpassung beim MCF wurde das Produkt aus $DOC \times DOC_f$ daher nur bei wenigen Abfallfraktionen angepasst.

So erfolgt für den DOC_f eine Anpassung nur bei Holz, dort allerdings in erheblichem Umfang. Hintergrund sind die Ergebnisse aus der Literatur und aus den Laborversuchen, gemäß derer bei Holz insbesondere der DOC_f wesentlich niedriger ist als bei den Ansätzen im NIR. In der Variante E wurde dazu bei unverändertem DOC von 430 kg/Mg der DOC_f von 0,5 auf 0,1 abgesenkt. Diese Anpassung wird den Erkenntnissen aus der Literatur und aus den Laborversuchen am besten gerecht.

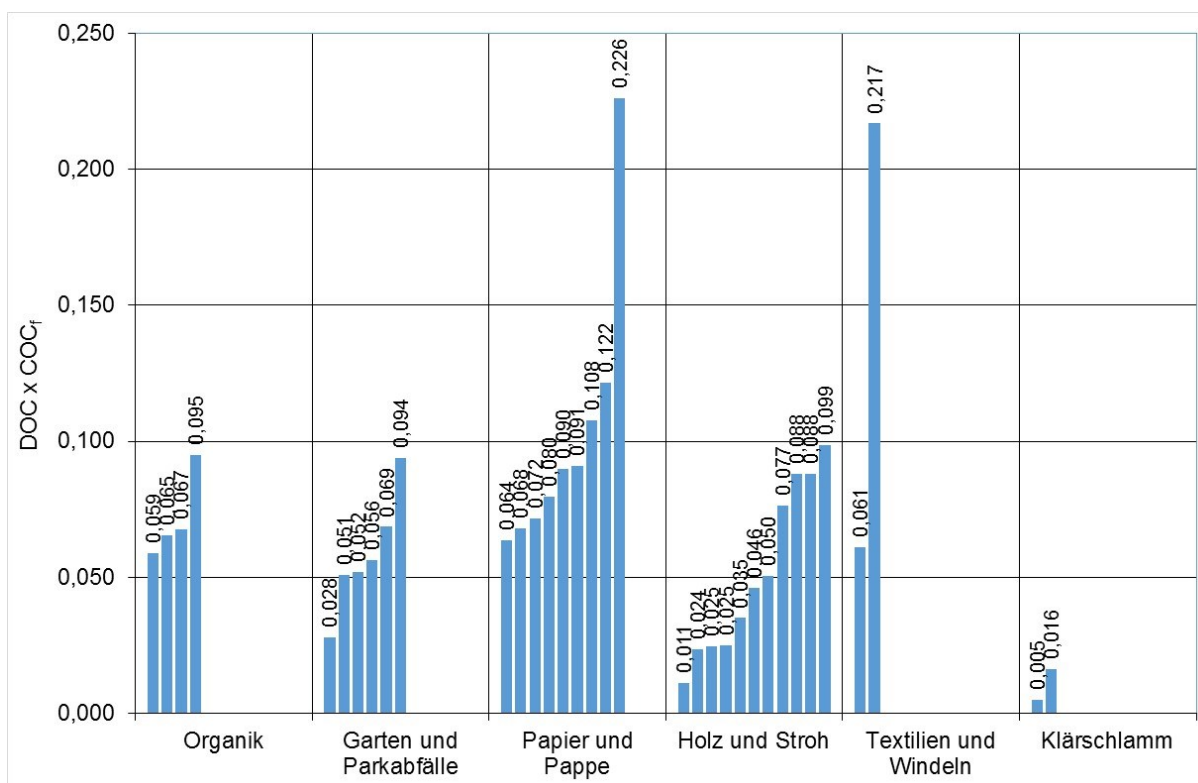
Hierzu wird in der Abbildung 53 der Ansatz für $DOC \times DOC_f$ bei Variante E mit den Ansätzen im NIR, den Ergebnissen der Langzeitgärversuche und dem Mittelwert und dem Median der in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 durchgeführten Literaturlauswertung (Tabelle 7 und Tabelle 8) verglichen. Zu den Literaturwerten sind in der Abbildung 54 die Einzelwerte der Literaturlauswertung aufgeführt.

Abbildung 53: Vergleich des Ansatzes für $\text{DOC} \times \text{DOC}_r$ bei Variante E mit den Ansätzen im NIR, den Ergebnissen der Langzeitgärversuche und dem Mittelwert und dem Median der Literaturlauswertung



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

Abbildung 54: Einzelwerte der Literaturlauswertung



Quelle: eigene Abbildung, Ingenieurgruppe RUK GmbH

9 Ergebnisse Arbeitspaket E: Unsicherheiten

Nach den IPCC-Guidelines sind zur Beurteilung der Unsicherheiten bei der Abschätzung von Methanemissionen hauptsächlich zwei Bereiche anzusprechen:

- ▶ die Methodik des FOD-Ansatzes
- ▶ die Eingangsdaten (Abfallmassen, Abfallbeschaffenheit und resultierende Emissionsparameter)

Die Unsicherheiten, die mit jedem Bearbeitungsschritt verbunden waren, wurden differenziert in den Arbeitspaketen A – D dargestellt, z.B.:

- ▶ Unsicherheiten bei der Datenerhebung, insbesondere bei den abgelagerten Abfallmengen und der Abfallzusammensetzung, die in der Regel von den Deponiebetreibern nur unzureichend dokumentiert wurden, zumal es sich um Deponiestandorte handelt, die häufig nur bis 2005 betrieben wurden.
- ▶ Unsicherheiten bei der Zusammensetzung z.B. des Hausmülls, der jahreszeitlich, regional und über den Verlauf einer Deponieverfüllung erheblichen Änderungen und Schwankungen unterworfen sein kann. Es wurden daher in den meisten Fällen die Angaben zur Abfallzusammensetzung gemäß des Nationalen Inventarreports herangezogen. Ferner wurde die Fachliteratur ausgewertet, um auch darüber zu einer Abschätzung von Bandbreiten zu Annahmen und Vorgabewerten, insbesondere zum Gasbildungspotenzial in Analogie zu den IPCC Default values zu gelangen.
- ▶ Quantifizierung von Unsicherheiten bei statistischen Auswertung und Angaben zu Schwankungsbereichen von Annahmewerten, die daraus abgeleitet wurden (Boxplots etc.).

Weitere Aspekte zur Unsicherheit der FOD-Methodik können sein:

- ▶ Letztlich laufen in einem Deponiekörper sehr unterschiedliche chemische, physikalische und biologische Prozesse ab, die mit dem FOD-Ansatz nur vereinfacht wiedergegeben werden. So können sich z.B. Austrocknungsvorgänge, Veränderungen des Wasserhaushalts oder auch Hemmungen durch Inhibitoren auf die Mikroorganismen und die Kinetik der biologischen Abbauprozesse auswirken.
Beispielhaft sei hier der Aspekt genannt, dass die Halbwertszeiten für die organikhaltigen Abfallfraktionen u.a. nach der Klimazone mit der mittleren Jahrestemperatur, den mittleren Jahresniederschlägen und der jährlichen Verdunstung abgeleitet werden (siehe Kap. 3.1.2.1 und Tabelle 1 gemäß IPCC Guidelines, 2006). Diese Bedingungen insbesondere zum Jahresniederschlag beziehen sich letztlich auf noch offene, nicht abgedeckte Deponien. In Deutschland sind aber sämtliche größeren Deponien, auf denen organikhaltige Siedlungsabfälle bis 2005 abgelagert wurden, mittlerweile abgedeckt oder abgedichtet, so dass Niederschläge nur noch reduziert oder gar nicht mehr in den Deponiekörper eindringen können. Gemäß Tabelle 1 sollte dies eher zu trockenen Ablagerungsbedingungen führen, die eine Verlängerung der Halbwertszeiten von 50 % - 300 % zur Folge haben (IPCC Guidelines, 2006).
- ▶ Weiterhin sind unterschiedliche Abbaubedingungen über die Deponiehöhe zu erwarten, weil es auflastbedingt zu einer zunehmenden Verdichtung im unteren Deponiebereich kommt. Es werden jedoch nur durchschnittliche Mittelwerte über die Höhe für alle Deponien unabhängig von ihrer Ablagerungsmächtigkeit und Schüttgeschwindigkeit abgeleitet.

Die größeren Unsicherheiten gegenüber der Grundmethodik sind folglich eher über die Auswahl der Eingangsparameter zu erwarten, wie es bei der Auswertung der verfügbaren Ergebnisse insbesondere zur Abfallbeschaffenheit deutlich wurde.

In Tabelle 37 sind die Abschätzungen zu den Unsicherheiten zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 37: Beurteilung der Unsicherheiten der Eingangsdaten zur Abschätzung der Methanemissionen von Deponien vor dem Hintergrund der IPCC Angaben (IPCC, 2006)

Eingangsdaten	IPCC- Angaben* zu Unsicherheiten	Deponien in Deutschland
Ablagerungsmassen (mit biologisch verfügbarem Anteil)	± 10 % für Länder mit Daten hoher Qualität ± 30 % für Länder mit regulärer Datenerfassung zur Ablagerung	Für jüngere Deponien noch gegeben (Angaben Statistisches Bundesamt, Angaben Deponiebetreiber und Überwachungsbehörden). Für ältere Deponien und Altablagerungen.
Abfallzusammensetzung	± 10 % für Länder mit Daten hoher Qualität ± 30 % für Länder mit regulärer Datenerfassung aus periodischer Sortierung	Für jüngere Deponien noch gegeben (Angaben Deponiebetreiber und Auswertung Ökoinstitut für deutschen NIR). Für ältere Deponien und Altablagerungen (z.B. BHMA 1985).
Abbaubarer organischer Kohlenstoff DOC	± 20 % als Default-Wert ± 10 % für Länder mit repräsentativen Messungen	± 20 % als Default-Wert akzeptabel ± 10 % nach Anpassung der Werte aufgrund der erfolgten länderspezifischen Auswertungen und Messungen
Anteil abbaubarer organischen Kohlenstoffs unter anaeroben Bedingungen DOC _f	Für IPCC default value (0.5): ± 20 % Für länderspezifische Daten: ± 10 % für Länder basierend auf Untersuchungsergebnissen über längere Zeit	± 20 % als Default-Wert akzeptabel ± 10 % nach Anpassung der Werte aufgrund der erfolgten länderspezifischen Auswertungen und Messungen (Kap. 4 ff.)
Methanbildungspotenzial L ₀ (analog zu Anteil des biologisch verfügbaren Kohlenstoffs DDOC _m)	± 20 % als Default-Wert ± 10 % für Länder mit Messergebnissen über einen längeren Zeitraum	± 20 % als Default-Wert akzeptabel, bis -40 % bei organikhaltigen Fraktionen wie z.B. Holz, in Abhängigkeit der Holzart. Langfristig ± 10 % bei Auswertung weiterer Überwachungsergebnisse von Deponien über einen längeren Zeitraum möglich
Methan-Korrektur-Faktor MCF	Für IPCC-Default-Werte: - 10 %, + 0 % ± 20 %	IPCC-Angaben können hinsichtlich der Unsicherheit bedingt übernommen werden (siehe Kap. 0): - 15 %, + 0 % ± 25 %
1,0 0,6		
Anteil Methan im Deponiegas F = 0,5	Für IPCC-Default-Wert: ± 5 %	Für F = 0,5 + 30 %, - 0 %
Methan-/Deponie-		

Eingangsdaten	IPCC- Angaben* zu Unsicherheiten	Deponien in Deutschland
gaserfassungs- rate R R = 0 R > 0	- ± 10 % bei messtechnischer Überwachung ± 50 % ohne messtechnische Überwachung	R = 0 bei den meisten Altablagerungen ± 10 % bei R > 0 (bei zumindest 429 Deponien und Altdeponien lt. Statistischem Bundesamt) nach Anpassung der Vorgabewerte
Oxidationsfaktor OX	Abschätzung zur Unsicherheit erforderlich, wenn OX > 0	Unsicherheitsfaktor für OX (bei OX = 0,1) vermutlich ± 100%, bei größeren OX-Werten nimmt prozentuale Unsicherheit ab. OX bestimmt nicht die Methanbildung, sondern die Methanemission.
Halbwertszeit $t_{1/2}$	Unsicherheitsbereiche gemäß Vol. 5, Chapter 3, Table 3.4, hier Tabelle 1	Unsicherheiten bzw. Bandbreiten gemäß Tabelle 36

* IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Chapter 3, Table 3.5, 2006

10 Fazit

10.1 Zusammenfassendes Fazit zum Vorgehen

Im Endbericht werden die Ergebnisse zur Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien umfassend erläutert und dokumentiert. Sie entsprechen inhaltlich den Aufgabenstellungen, die sich aus den Arbeitspakten, insbesondere dem Arbeitspaket A „Entwicklung von angepassten Parametern zur Kalibrierung des FOD Modelles an die Deponieverhältnisse in Deutschland“ und dem Arbeitspaket B „Laboruntersuchungen“ ergeben. Ergänzend und in Erweiterung der Arbeitspakete werden der Stand des Wissens aufbereitet und die Fachliteratur ausgewertet, um die fachlichen Grundlagen zum Deponiegashaushalt von Deponien und zu den Methoden der Quantifizierung der Deponiegasbildung näher aufzuzeigen. Aufgrund dieser vertieften Betrachtung des Stands des Wissens, die u.a. auf den vorherigen Arbeiten im Sachverständigengutachten „Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien“ (RUK, 2014) und den zwei Zwischenberichten aufbaut, wurden weitere Erkenntnisse insbesondere zu den Parametern DOC, DOC_f , MCF und den daraus resultierenden Methan- bzw. Deponiegasbildungspotenzialen gewonnen. Als weitere Basis einer Anpassung des FOD-Modells an die deutschen Verhältnisse erfolgte für zahlreiche Deponien ein Abgleich der mit diesem Modell ermittelten Berechnungsergebnisse mit Betriebsdaten zur Deponiegaserfassung. Dazu wurden vertieft aufbereitet:

- ▶ 7 Deponiestandorte mit gasdichter Oberflächenabdichtung
- ▶ 31 Deponiestandorte mit unterschiedlich gasdurchlässiger Oberflächenabdichtung

Weiterhin wurden in die Bearbeitung des Arbeitspakets B „Laborversuche“ die Ergebnisse des UFOPLAN-Vorhabens „Durchführung von Cross-Checks für die deutschen Emissionsinventare: Validierung der modellierten Methanbildungsraten durch Untersuchungen von Abfallproben aus Deponien“ (UFOPLAN-Projekt: 3715 41 110 0, Az.: 50 477/4) einbezogen. Mit den Untersuchungsmethoden wurde das Ziel verfolgt, an Abfallproben aus Deponien die Emissionsfaktoren und aktuellen Methanbildungsraten in Deponien zu überprüfen.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden Abfallgemische synthetisch hergestellt, die auf ihr Gasbildungspotenzial und die damit verbundene Abbaukinetik untersucht wurden. Neben den Standard-Untersuchungsmethoden wurden Langzeitbiotests und stoffgruppenspezifische Aufschlüsse zur Bestimmung der biologisch leicht, mittel und schwer abbaubaren Anteile vorgenommen.

Auf dieser Grundlage wurden die nächsten Arbeitspakete umgesetzt:

- ▶ Arbeitspaket C: Verifizierung der Ergebnisse der Arbeitspakete A und B, was nach Vorliegen aller Ergebnisse des Arbeitspakets B effektiv bearbeitet werden konnte
- ▶ Arbeitspaket D: Erarbeitung und Begründung von Vorschlägen für angepasste Default-Werte, was nach Vorliegen aller Ergebnisse der Arbeitspakete B und C hauptsächlich in der Endphase des Vorhabens erarbeitet wurde
- ▶ Arbeitspaket E: Schätzung der Unsicherheiten parallel zu den Arbeitspaketen A – D und zum Abschluss der Projektbearbeitung

Damit entspricht der Bearbeitungsrahmen inhaltlich und bis auf kleinere Abweichungen und Anpassungen bei den Laborversuchen im Arbeitspaket B, um die inhaltlich abgestimmte Vorgehensweise mit dem ergänzenden UFOPLAN-Vorhaben zu gewährleisten, dem vereinbarten Arbeitsplan.

Weiterhin wurden die Ergebnisse in regelmäßigen Zeitabständen den Mitarbeitern des Umweltbundesamts vorgestellt und mit ihnen diskutiert, um so gemeinsam das weitere Vorgehen abzustimmen.

10.2 Ergänzende Aspekte zur Ermittlung der Methanemissionen von Deponien

Neben den erläuterten Ergebnissen können zur Ermittlung der Methanemissionen von Deponien und Altablagerungen in Deutschland noch folgende Aspekte näher betrachtet werden:

- ▶ Die Ansätze der deponierten Abfallmassen und Abfallfraktionen in den NIR-Berichten auf der Grundlage von Abfallsortierungen könnten nochmals überprüft und angepasst werden. So wird z.B. bei der Fraktion „Papier, Pappe, Kartonagen“ in den NIR-Berichten von sehr hohen Ablagemassensmassen bzw. Anteilen am Gesamtabfall ausgegangen. In Verbindung mit dem bisher hohen DOC und DOC_f -Wert ergibt sich danach für das Jahr 2015 rechnerisch eine Methanbildung allein dieser Fraktion von 52% der Gesamtmethanbildung aller deponierten Abfälle. **Dieser Sachverhalt bzw. dieser hohe Anteil lässt sich bei keiner der näher untersuchten Deponien wiederfinden.** Sowohl der Anteil der deponierten PPK-Fraktion ist offenbar geringer als auch der derzeit noch vorhandene Anteil, was zudem auch Aufgrabungen und Analysen verschiedener aktueller Vorhaben zum Deponierückbau zeigen (z.B. „Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining“ (Krüger et al., 2016). In Verbindung mit zu hoch angesetzten Werten zum DOC und DOC_f ergeben sich hier wie auch für die Fraktion Holz eindeutig zu hoch quantifizierte aktuelle Methanemissionen im Nationalen Inventarbericht.
- ▶ Der Gaserfassungsgrad im NIR-Bericht wird aus dem Verhältnis der gefassten Methanmenge aller über das Statistische Bundesamt erfassten Deponien bezogen auf die gebildete Methanmenge aus anaerob umgesetztem Kohlenstoff abgeleitet. 2014 wurden dem Statistischen Bundesamt 429 Deponien und Altablagerungen gemeldet, auf denen eine aktive Deponiegaserfassung erfolgt. Es ist jedoch zu vermuten, dass dieser ausgewertete Datensatz nicht vollständig war und es insbesondere eine größere Anzahl an Altablagerungen in Deutschland gibt, auf denen noch eine Gaserfassung und -behandlung erfolgt, ohne dass diese Standorte an das Statistische Bundesamt gemeldet werden. Dieser Sachverhalt könnte näher geprüft werden, zumal für den Gaserfassungsgrad sämtliche Siedlungsabfälle seit 1950 rechnerisch berücksichtigt werden, folglich auch alle Abfälle, die auf den mehr als 100.000 Altablagerungen deutschlandweit abgelagert wurden.
- ▶ Der Gaserfassungsgrad auf zahlreichen Deponien liegt nach den aktuellen Auswertungen deutlich höher als der im Nationalen Inventarbericht bisher ausgewiesene Wert von 24%. Selbst wenn er bei 40 – 50% liegt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass trotz der Methanoxidation an der Deponieoberfläche (Faktor OX) noch immer ein erheblicher Anteil an Methanemissionen in die Atmosphäre entweicht und zum Treibhauseffekt beiträgt. So haben die Untersuchungen an zahlreichen Deponiestandorten auch gezeigt, dass ein erheblicher Ertüchtigungsbedarf an den dortigen Gasfassungssystemen besteht. Dieses betrifft sowohl die Erneuerung bestehender Gasfassungselemente, die ihre Funktion zunehmend einbüßen, als auch die Erweiterung des Gasfassungssystems z.B. durch zusätzliche, technisch optimierte Gasbrunnen.
- ▶ Weiterhin ist zum Gaserfassungsgrad im NIR-Bericht zu berücksichtigen, dass der positive Effekt der allmählichen Aerobisierung und insbesondere der aktiven Deponiebelüftung auf die Reduzierung der Methanemissionen bisher nicht adäquat bilanziert wurde. Dieser Anteil an derart reduzierten Methanemissionen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da Deponiebelüftungsmaßnahmen mittlerweile auf zahlreichen Deponien in Deutschland durchgeführt werden oder unmittelbar vor der Realisierung stehen. Deren Anzahl liegt mittlerweile bei ca. 10% bezogen auf die Deponiestandorte, die an das Statistische Bundesamt gemeldet werden.
- ▶ Zur weiteren Absicherung und Bewertung der Ergebnisse zur Ermittlung der Methanemissionen von Deponien und Altablagerungen in Deutschland könnten noch folgende Aspekte näher betrachtet werden: Es dürfte zielführend sein, bei einer zusätzlichen Auswertung der Untersuchungsergebnisse unterschiedliche Bedingungen an den untersuchten Deponiestandorten systematisch einzubinden. Neben dem Einfluss technischer Gegebenheiten durch die Deponieform, den Abdichtungsstatus an der Oberfläche und an der Basis, die Entgasungssituation und das Ab-

lagerungsalter werden hierbei die Milieubedingungen, insbesondere der Wasser- und Wärmehaushalt, ggf. auch weitere Faktoren, welche sich hemmend auf einen ungestörten anaeroben Abbau auswirken könnten, eine Rolle spielen.

11 Quellenverzeichnis

- Amin, M., Lepom, P. (1995): Stoffgruppenanalyse zur Charakterisierung des biologisch abbaubaren Anteils der organischen Substanz in Müllproben; in: Müll & Abfall 4/95, S. 242 - 250
- Baumeler, A.; Brunner, P.H.; Fehring, R.; Kisliakova, A., Schachermayer, E. (1998): Reduktion von Treibhausgasen durch Optimierung der Abfallwirtschaft (CH₄). Schriftenreihe der Energieforschungsgemeinschaft im Verband der E-Werke Österreichs, Bestell-Nr.: 650/457
- Barghoorn, M, Gössele, P. Kaworski, W. (1986): Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 bis 1985. Forschungsbericht 10303508. Umweltbundesamt Berlin, 1986
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008): Merkblatt, 2008: Hinweise zu Aufbereitung und Entsorgung von Straßenkehricht in Bayern, verfügbar unter:
http://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=STMUG&DIR=stmug&ACTIONxSETVAL%28artdtl.htm,APGxNO-DENR:283761,AARTxNR:lfu_abfall_00155,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x%29=X
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (BLfU) (2010) (2003): Zusammensetzung und Schadstoffgehalte von Siedlungsabfällen. Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Abfallratgeber Bayern Abfallinformationsstelle des LfU Infoblatt Abfallwirtschaft, Mai 2010 Straßenkehricht, verfügbar unter:
<http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/infoblaetter/strassenkehricht.pdf>
- Bidlingmaier, W. (1983): Das Wesen der Kompostierung von Siedlungsabfällen; in: Schenkel, W., Hösel, G., Schnurer, H. (Hrsg.): Müll-Handbuch, Erich Schmidt Verlag, Berlin, KZ 5305
- De Baere, L. (2000): Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. Water Sci. Technol. 41, S. 283 - 290
- DESTATIS (2014): Umwelt. Abfallentsorgung 2012. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt. 29. Juli 2014
- DESTATIS (2016): Umwelt. Abfallentsorgung 2014. Fachserie 19 Reihe 1. Statistisches Bundesamt. 18. August 2016
- Ehrig, H.-J. et al. (1995): BMBF-Statusbericht – Teil 1, Statusbericht Deponiekörper. S.116.
- Eleazer, W.E., Odle, W.S., Wang, Y.S., Barlaz, M.A. (1997): Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills. Environ Sci. Technol. 31, S. 911-917
- Heyer, K.-U., Hupe, K., Stegmann, R. (2012): „Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen“, Förderkennzeichen 360 16 036, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2012
- Hoeks, J. (1983): Significance of Biogas Production in Waste Tips, in: Waste Management and Research 1, pp. 323 - 335
- IPCC (2000): Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, chapter 5, verfügbar unter: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5_Waste.pdf; aufgerufen am 08.01.2014
- IPCC (2006a): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, chapter 3 des volume 5, verfügbar unter: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf; aufgerufen am 08.01.2014
- IPCC (2006b): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, spreadsheet, verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> unter Chapter 3 verfügbar.
- Jessberger, H.-L. (1992): Zwischenbericht des Forschungsprojektes Geotechnik der Abfallstoffe. September 1992
- Kragten, S.A. (2008). Bestimmung des Fasergehaltes in Futtermitteln bei ALP. Verfügbar unter:
https://www.google.de/search?q=Kragten+Fasergehalt+Futtermittel+&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&ei=u6lhWJzGuqv8werkKrlCA
- Krause, M.J., Chickering, G.W., Townsend, T.G., Reinhart, D.R. (2016): Critical review of the methane generation potential of municipal solid waste. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. S. 1117 – 1182, DOI: [10.180/10643389.2016.1204812](https://doi.org/10.180/10643389.2016.1204812)

- Krüger, M. et al. (2016): Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining. Leitfaden gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Porta Westfalica, Mai 2016
- Kruse, K. (1994): Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldeponien, Heft 54 des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Braunschweig, ISSN 0934-9731
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2005): Gasaubeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 50, 1. Auflage, Darmstadt
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt
- Lechner, P. (2004): Kommunale Abfallentsorgung. UTB 2114. Facultas Universitätsverlag, Wien
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen - Leitfaden Deponiegas -. Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 10, Karlsruhe, 1992
- Nelles, M.; Harant, M.; Hofer, M.; Lorber, K. E.; Raninger, B. (1998): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung zur Umsetzung der Deponieverordnung. IED Schau. Schriftenreihe Abfall – Umwelt. Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik der Montanuniversität Leoben.
- Niederösterreichische Landesakademie (2005): EU-Life Vorhaben EVAPASSOLD - Evaluierung und Erstabschätzung von Altablagerungen. Abschlussbericht der PHASEN I-III, März 2005
- N. N. (1993): TA Siedlungsabfall - Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993
- N. N. (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV); Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009; BGBl Teil I vom 29.04.2009, Seite 900; die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
- Ramke, H.G. (2008): Plausibilitätskontrollen in der Analytik von Zuordnungsparametern fester Siedlungsabfälle. Fachgespräch Feststoffuntersuchung 2008. Fachtagung in der Bildungsstätte Essen des BEW Bildungszentrum für Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, Essen, 21./22. April 2008
- Ramke, H.G. (2010): Hydrothermale Carbonisierung. Abschlussbericht. Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Fachbereich Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik. Höxter, Oktober 2010
- Rettenberger, G. (2004): Untersuchungen zur Charakterisierung der Gasphase in Altablagerungen. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Band 82. Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München
- Rettenberger, G., Mezger, H. (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas. Herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. 1. Auflage. Karlsruhe.
- RUK (2014): Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien - Sachverständigengutachten der Ingenieurgruppe RUK GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, Projektnummer 29180, vom Januar 2014, Berlin
- Scheelhaase, T. (2002): Der Kohlenstoffaustrag aus Abfalldeponien mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen, Schriftenreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft, Bauhaus Universität Weimar
- Soyez, D.; Thrän, M.; Koller, T.; Hermann (2000): Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung“, veröffentlicht in Brandenburgische Umweltbericht (BUB) 8, 2000
- Spendlin, H.-H. (1991): Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen, Hamburger Berichte, Bd. 4, ISBN 3-87081-271-0, Economica Verlag, Bonn
- Spillmann, P. (1989): Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Müll- und Müll-Klärschlamm-Deponien. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 27. Erich Schmidt Verlag, Berlin, ISBN 3-503-0208-0
- Tallner, L. (1993): Produktion und Nutzung von Deponiegas. <http://lotall.bplaced.com/lotall/dgas/index-d.htm>
- Umweltbundesamt (1993): Hausmülldeponien in der Bundesrepublik Deutschland. UBA-Texte 44/93
- Umweltbundesamt (2014): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012, Berlin, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate-change_24_2014_nationaler_inventarbericht.pdf; aufgerufen am 07.10.2015
- Umweltbundesamt (2016): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2014, Berlin, verfügbar unter:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_23_2016_nir_2016_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf; aufgerufen am 01.11.2016

VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche, Stand November 2016

Van Soest, P. J. (1994). Nutritional Ecology of the Ruminant. Ithaca und London, S. 476: Cornell University Press

Weber, B. (1990): Minimierung von Emissionen der Deponie, Veröff. des ISAH, Universität Hannover, Heft 74, 1990

Wang, Y.S., De la Cruz, F.B., Ximenes, F., Barlaz, M.A. (2015): Decomposition and carbon storage of selected paper products in laboratory-scale landfills. Science of the Total Environment, 532. Elsevier B.V., S. 70-79

Wang, Y.S., Barlaz, M.A. (2016): Decomposition and carbon storage of hardwood and softwood branches in laboratory-scale landfills. Science of the Total Environment, 557 – 558. Elsevier B.V., S. 355-362