

Landeshauptstadt Kyiv



DEPONIE NR. 5 IN KYIV

MACHBARKEITSSTUDIE ZUR SICHERUNG DER DEPONIE

Erläuterungsbericht

(Stand: 27.11.2018)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



BN Umwelt GmbH
Drosselweg 13
D-25569 Kremperheide
Tel: 04821/8993-0
Fax: 04821/8993-33
E-Mail: info@bn-umwelt.sh

INHALTSVERZEICHNIS DES ERLÄUTERUNGSBERICHTS

| | |
|--|-------|
| Inhaltsverzeichnis des Erläuterungsberichts..... | II |
| Abbildungsverzeichnis..... | IV |
| Tabellenverzeichnis..... | VI |
| Literaturhinweise, verwendete Unterlagen..... | VI |
| Abkürzungsverzeichnis..... | XVI |
| Planverzeichnis..... | XVII |
| Anlagenverzeichnis..... | XVIII |
| Danksagung..... | 1 |
| Erläuterungsbericht..... | 3 |
| 1 Sicherungskonzept..... | 3 |
| 1.1 Zustand der Deponien in der Ukraine..... | 3 |
| 1.1.1 Einleitung..... | 3 |
| 1.1.2 Anfallmengen und Entsorgungswege für Siedlungsabfall..... | 4 |
| 1.1.3 Menge der deponierten Abfälle..... | 4 |
| 1.1.4 Anzahl von Deponien und in Anspruch genommene Flächen..... | 5 |
| 1.1.5 Zustand der ukrainischen Deponien..... | 7 |
| 1.1.6 Zusammensetzung des Abfalls..... | 9 |
| 1.1.7 Deponieentgasung..... | 10 |
| 1.1.8 Informationen zu einzelnen Deponien und Regionen..... | 11 |
| 1.2 Rechtliche Grundlagen..... | 21 |
| 1.2.1 Ukrainisches Recht..... | 21 |
| 1.2.2 EU-Recht..... | 25 |
| 2 Umweltgefahren durch eine Hausmülldeponie..... | 27 |
| 2.1 Abfall und Zusammensetzung Hausmüll..... | 27 |
| 2.1.1 Definition und Zusammensetzung Abfall..... | 27 |
| 2.2 Umsetzungsprozesse in einer Hausmülldeponie..... | 30 |
| 2.2.1 Anaerober Abbau..... | 30 |
| 2.2.2 Aerober Abbau..... | 36 |
| 2.3 Sickerwasser..... | 37 |
| 2.3.1 Eintrag..... | 37 |
| 2.3.2 Speichkapazität im Müllkörper..... | 37 |
| 2.3.3 Schadstoffrückhalt durch Bindung im Abfall..... | 38 |
| 2.3.4 Potentielle Belastung aus Siedlungsabfällen ohne industrielle Belastung..... | 39 |
| 2.3.5 Potentielle Belastungen aus industriellen Ablagerungen..... | 41 |
| 2.4 Deponiegas..... | 41 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.4.1 | Zusammensetzung (Haupt- und Spurengase in Deponien) | 41 |
| 2.4.2 | Einflussfaktoren auf den Gashaushalt | 42 |
| 2.4.3 | Bewertung potentiell toxisch wirkender Gase | 56 |
| 2.4.4 | Modellhafte Beschreibung der Gasproduktion | 59 |
| 2.4.5 | Gasableitung | 67 |
| 2.4.6 | Gasumwandlung | 67 |
| 2.4.7 | Gasadsorption / Gasabsorption | 68 |
| 2.4.8 | Gasfassung | 68 |
| 2.4.9 | Konzept einer aktiven Deponieentgasung | 75 |
| 2.5 | Sickerwasserbehandlung | 79 |
| 2.5.1 | Biologisches Reinigungsverfahren | 79 |
| 2.5.2 | Nachgeschaltete Filtration | 81 |
| 2.5.3 | Chemisch-physikalische Stufe | 82 |
| 3 | Deponiesicherungsverfahren | 85 |
| 3.1 | Oberflächenabdichtung | 85 |
| 3.1.1 | Allgemein (EU-Norm) | 85 |
| 3.1.2 | Planungsgrundsätze Ukrainische Baunorm - Deponien für feste Siedlungsabfälle | 86 |
| 3.1.3 | Potentielle Oberflächenabdichtungsvarianten | 88 |
| 3.2 | Dichtwände als Umschließung der Deponie | 112 |
| 3.2.1 | Dichtwände | 112 |
| 3.2.2 | Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt | 117 |
| 3.3 | Landfill Mining | 118 |
| 4 | Planung der Oberflächenabdichtung | 122 |
| 4.1 | Grundlagenermittlung (Bestandspläne, Vermessung, Grundwasserbrunnen, Gasmigrationsmessung) | 122 |
| 4.2 | Ist-Situation Deponie Nr. 5 | 122 |
| 4.2.1 | Lage | 122 |
| 4.2.2 | Klima | 123 |
| 4.2.3 | Deponie | 127 |
| 4.2.4 | Abfallmengen | 137 |
| 4.2.5 | Abfallarten/Deponieklasse | 137 |
| 4.2.6 | Deponiesickerwasseranalytik | 138 |
| 4.2.7 | Grundwasseranalytik | 138 |
| 4.2.8 | Dimensionierung eines Entgasungssystem (Theoretische Abschätzung) | 142 |
| 4.3 | Maßnahmen vor der Abdichtung | 145 |
| 4.3.1 | Leerung der Sickerwasserseen | 145 |
| 4.3.2 | Deponiekontur/Restvolumen | 148 |
| 4.4 | Bewertung der Oberflächenabdichtungssysteme | 152 |
| 4.4.1 | Definition der Bewertungskriterien | 152 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.4.2 | Gegenüberstellung und Wertung der Oberflächenabdichtungssysteme | 154 |
| 4.4.3 | Bewertung Variante 1 - „Ton“- Dichtung, d = 1,0 m | 157 |
| 4.4.4 | Bewertung Variante 2 - TRISOPLAST®- Dichtung (Dicke 8 cm) | 158 |
| 4.4.5 | Bewertung Variante 3 - Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) | 159 |
| 4.4.6 | Bewertung Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht | 161 |
| 4.4.7 | Bewertung Variante 5 - Kapillarsperre mit mineralischem Kapillarblock und Kapillarschicht | 162 |
| 4.4.8 | Bewertung Variante 6 - Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn und Kapillarschicht | 164 |
| 4.4.9 | Ergebnis des Variantenvergleichs | 165 |
| 4.5 | Planungsvoraussetzung | 166 |
| 4.6 | Bauablauf und Jahresleistung | 166 |
| 4.7 | Qualitätsmerkmale der Baustoffe und der ausführenden Firma | 167 |
| 4.8 | Bedingungen an die bauliche Umsetzung | 167 |
| 4.9 | Mögliche Einbaujahresleistung | 167 |
| 4.10 | Baukosten geschätzt | 168 |
| 5 | Zusammenfassung und weitere Schritte | 168 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Deponierte Siedlungsabfälle pro Oblast (UKRSTAT 2017) | 5 |
| Abbildung 2: | Footprint der ukrainischen Siedlungsabfalldeponien (Makarenko/Budak 2017) .. | 7 |
| Abbildung 3: | Zusammensetzung des Siedlungsabfalls (Sixth National Communication 2014) | 9 |
| Abbildung 4: | Standorte der Deponien mit Gasfassung (eigene Recherchen, Karte Wikipedia) | 10 |
| Abbildung 5: | Deponiestandorte mit Gasverwertungspotenzial (BETEN 2018) | 11 |
| Abbildung 6: | Anfall und Zusammensetzung des auf der Deponie Boryspil entsorgten Abfalls Juni 2010 – Mai 2011 (Denafas et al 2014). | 12 |
| Abbildung 7: | Karte der Deponien im Oblast Transkarpatien (ENPI 2011) | 19 |
| Abbildung 8: | Hauptabwege der organischen Abfälle durch anaerobe Bedingungen (Schobert, 1978 [7]) | 31 |
| Abbildung 9: | Systematik der Oxidationswege während des Abbaus organischer Abfälle (Battelle Institut, 1982 [8]) | 32 |
| Abbildung 10: | Hauptabbauwege unterschiedlicher Ausgangsstoffe nach deren Ablagerung (Maurer und Winkler, 1982 [9]) | 34 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 11: | Auswirkung der unterschiedlichen Abbauphasen auf die Zusammensetzung der entstehenden Gashauptbestandteile (Farquhar und Roves, 1973 [10], ergänzt von Rees 1981 [11]) | 35 |
| Abbildung 12: | Abhängigkeit der austretenden Gasmengen vom Luftdruck gemessen an einer künstlich geschaffener Gasaustrittsöffnung [Rettenberger et al 1982 [25]]..... | 48 |
| Abbildung 13: | Charakteristische Temperaturprofile eines Brunnens im Februar und im August (Richter, 1986 [26])..... | 49 |
| Abbildung 14: | Deponiegas Langzeitkonzentrationsverlauf bei Altablagerung..... | 51 |
| Abbildung 15: | Abbaugeschwindigkeit verschiedener Stoffe | 53 |
| Abbildung 16: | Modell für den Verlauf des anaeroben Abbaus bezogen auf den Parameter organischer Kohlenstoffe Tabasaran (1976) [28] | 61 |
| Abbildung 17: | Modelle zur Berechnung der Deponiegasbildung (Zusammenstellung nach Baumeler, et al, 1998 [31]) | 66 |
| Abbildung 18: | Regelaufbau gemäß [35]..... | 88 |
| Abbildung 19 | OFD-Variante 1 - „Ton“-Dichtung | 90 |
| Abbildung 20 | OFD-Variante 2 - TRISOPLAST®-Dichtung | 94 |
| Abbildung 21 | OFD-Variante 3 - GTD-Dichtung | 98 |
| Abbildung 22 | OFD-Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht | 102 |
| Abbildung 23 | OFD-Variante 5 - Kapillarschicht mit mineralischem Block | 107 |
| Abbildung 24 | OFD-Variante 6 - Kapillarsperre mit Bockbahn..... | 110 |
| Abbildung 25: | Lage der Deponie Nr. 5 im Oblast Kyiv, südlich der Stadt Kyiv..... | 123 |
| Abbildung 26: | Mittlere tägliche Minimum- und Maximumwerte der Temperaturen in Kyiv | 124 |
| Abbildung 27: | Mittlere Monatsniederschlagsmengen in Kyiv | 125 |
| Abbildung 28: | Walter/Lieth-Klimadiagramm (hygrothermisch) für Kyiv | 126 |
| Abbildung 29: | Anhaltswerte zur Verteilung der potentiellen Verdunstung über das Jahr im Bereich der Stadt Kyiv | 126 |
| Abbildung 30: | Annahmehalle in der Deponiezufahrt..... | 128 |
| Abbildung 31: | Betriebshof der Deponie vom östlichen Ablagerungsbereich gesehen | 129 |
| Abbildung 32: | Übersicht Grundwassermessstellen | 140 |
| Abbildung 33: | Verlauf der Ammonium-Konzentrationen im Grundwasser | 141 |
| Abbildung 34: | Verlauf der Chlorid-Konzentrationen im Grundwasser..... | 141 |
| Abbildung 35: | Mindestdauer der Entleerung der Sickerwasserseen bei unterschiedlichen Reinigungskapazitäten unter ideellen Bedingungen..... | 147 |
| Abbildung 36: | Ab- und Auftragsmengen für Map 1 bei unterschiedlichen Grat-Höhen | 150 |
| Abbildung 37: | grafischer Vergleich der Oberflächenabdichtungsvarianten..... | 156 |
| Abbildung 38: | Wertungsdiagramm Variante 1 | 158 |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|-----|
| Abbildung 39: | Wertungsdiagramm Variante 2 | 159 |
| Abbildung 40: | Wertungsdiagramm Variante 3 | 161 |
| Abbildung 41: | Wertungsdiagramm Variante 4 | 162 |
| Abbildung 42: | Wertungsdiagramm Variante 5 | 164 |
| Abbildung 43: | Wertungsdiagramm Variante 6 | 165 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Anzahl von Deponien in der Ukraine | 5 |
| Tabelle 2: | Deponien im Oblast Transkarpatien (ENPI 2011) | 18 |
| Tabelle 3 | Haupt- und Spurengase in Deponie (LAGA-Merkblatt 1983 [17], Battelle-Inst. 1982 [8], Rettenberger, 1978 [18]) | 42 |
| Tabelle 4: | Häufige Chlorkohlenwasserstoffe in Deponiegas (Poller 1990 [24]) | 58 |
| Tabelle 5: | Literaturauswertung zur Messung produzierter Gasmengen für Hausmüll | 60 |
| Tabelle 6 | Literaturauswertung für $T_{1/2}$ und Abbaukonstanten im Hausmüll nach (Drees Dissertation 2000 [29]) | 63 |
| Tabelle 7: | Faktoren für die Berücksichtigung betriebstechnischer Einflussgrößen einer Deponie (Weber, 1990, [30]) | 66 |
| Tabelle 8: | Oberflächenabdichtungen von Deponien nach Anhang I in [38] | 85 |
| Tabelle 9: | Klimadaten für Kyiv nach Angaben WMO | 123 |
| Tabelle 10: | Einschätzung der Sickerwasserbildungsrate | 134 |
| Tabelle 11: | Ergebnisse der Abschätzung der eingelagerten Abfallmengen | 137 |
| Tabelle 12: | Untersuchte Parameter Sickerwasser mit Grenzwerten | 138 |
| Tabelle 13: | Mindestdauer der Entleerung der Sickerwasserseen bei unterschiedlichen Reinigungskapazitäten unter idealen Bedingungen | 146 |
| Tabelle 14: | Mögliche Restvolumen Map 2 | 152 |
| Tabelle 15: | Wertungsmatrix Vergleich der Oberflächenabdichtungsvarianten | 155 |

LITERATURHINWEISE, VERWENDETE UNTERLAGEN

- [1] 2001/119/EG Entscheidung der Kommission vom 22. Januar 2001 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG

- des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2001) 106) (Text von Bedeutung für den EWR)
- [2] World Meteorological Organization; World Weather Information Service (<http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=207>)
- [3] Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining, Krüger et al., erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, unterstützt durch das Land Nordrhein-Westfalen, Porta Westfalica Mai 2016
- [4] Мониторинг за уровнями и качеством подземных вод, фильтрата и пермиата в районе полигона ТБО №5 в с. Подгорцы Обуховского района Киевской области в 2014 году (1 этап), Киев-2014
- [5] Sanierungstechniken und -verfahren, Dichtwände -Reaktive Wände - Biologische in-situ-Sanierungen, Handbuch Altlasten, Band 6 Teil 3; Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; unveränderte Neuauflage 2010
- [6] Spillmann, P.: Abfall- und Deponiewirtschaft, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- [7] Schobert, S.: Mikrobielle Methanisierung von Klärschlamm, Expertenrund Biotechnologie Jülich 1978
- [8] Battelle-Institut e.V.: Identifizierung chemischer Stoffe in Deponien, Bericht des Battelle-Institutes i.A.d. Regierungspräses-. Köln, 1982
- [9] Mauer, M.; Winkler, J. P.: Biogas theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen, Verlag C.F. Müller; 1980
- [10] Farquhar; Roves: Gas Production During Refuse Decomposition, Water, Air and Soil Pollution, 1973
- [11] Rees, J. F.: Major Factors effecting methane produktion in landfills. Landfill Gas Symposium 1981, Hawell Laboratory
- [12] Schildknecht, H., Jäger, J.: Zur chemischen Ökologie der biologischen Abfallbeseitigung. Forschungsbericht 10-30-40-18 d. Umweltforschungsplan des BMI, Juli 1979
- [13] Collins, H. J.; Ranke, H. G.: Einfluss der Entwässerung (Setzung) auf die Nutzungsdauer von Deponien gemischter Abfälle. Hannover Technische Informationsbibliothek, 1986

- [14] Frimmel, F. H., Weis, M.: Ageing Effects of Highmolecular Weight Organic Acids which an be isolated from Landfill, Beitrag zu IAWPRC Konferenz in Kyoto
- [15] Herklotz, K.: Sorptions- und Mobilitätsverhalten von ausgewählten Pestiziden in Hausmüll, Böden und Porengrundwasserleitern, Hannover: Universität Hannover, Diss. am Fachbereich Gartenbau
- [16] Jung, K. D.: Verhalten pathogener Indikatorkeime in Versuchsdeponien in Abhängigkeit besonderer Betriebsbedingungen. Forum Städtehygiene 37,27-32, 1986
- [17] LAGA-Merkblatt: Informationsschrift „Deponiegas“, 1983
- [18] Rettenberger, G.: Entstehung, Folgen, Erfassung und Verwertung von Deponiegasen. Stuttgarter Bericht zur Abfallwirtschaft, Band 9, 1978
- [19] Ham, R.K.: Einflussfaktoren auf die Gasproduktion von Proben aus Mülldeponien. In: Veröffentlichungen des Institutes für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 33, 1982
- [20] Scharf, W.: Untersuchungen zur gemeinsamen Ablagerung von Müll und Klärschlamm im Labormaßstab. In: Veröffentlichungen des Institutes für Stadtbauwesen der TU Braunschweig Heft 33, 1982.
- [21] Dernbach, H.: Versuche zur Abschätzung des Gaspotentials einer Deponie anhand von Müllproben. In: Veröffentlichungen des Institutes für Stadtbauwesen der TU Braunschweig Heft 33, 1982.
- [22] Duarte, A.C. Anderson, G.K.: Modellrechnung für die Hemmung der anaeroben Abbauprozesse, 11. IAWPR-Konferenz Kapstadt. Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 2, 1983.
- [23] Kapp, H.: Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. In: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86, 1984.
- [24] Poller, T.: Hausmüllbürtige LCKW / FCKW und deren Wirkung auf die Methanbildung, Hamburger Berichte 2, Economica Verlag, Bonn, 1990.
- [25] Rettenberger, G., Tabasaran, O.: Forschungsbericht 103-02-207 Teil I: Untersuchung zur Entstehung, Ausbereitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen, Texte des Umweltbundesamtes, 1982.
- [26] Richter, J.: Der Boden als Reaktor. Enke Verlag, 1986.

- [27] Christensen, T. H., Kjeldsen, P.: Basis Biochemical Processes in Landfills. In: Christensen, Cossu, Stegmann: Sanitary Landfilling, Process, Technology and Environmental Impact, Academie Press, 1989.
- [28] Tabasaran, O.: Überlegungen zum Problem Deponiegas. In: Müll und Abfall, Heft 7, S. 204-210, 1976.
- [29] Drees, K. T.: Beschleunigter Stoffaustrag aus Reaktordeponie. Diss. RWTH Aachen, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. Band 23, 2000
- [30] Weber, B.: Minimierung von Emissionen der Deponie. Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 74, S. 46, 1990
- [31] Baumeler A., Brunner P.H., Fehringer R., Kisliakova A. & Schachermayer E.: Reduktion von Treibhausgasen durch Optimierung der Abfallwirtschaft. Verband der Elektrizitätswerke Österreich (VEÖ), Wien 1998
- [32] Mancinelli, R. L. Mc Kay, C. P.: Methan Oxidising Bacteria in Sanitary Landfills. In: Antonopolus, A. A: Biotechnological Advances in Processing Municipal Wastes for Fuels and Chemicals. Argonne National Laboratory Report. 1985.
- [33] TA Siedlungsabfall Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz; Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen. - 1. Auflage, Stand Mai 1993. – Köln: Bundesanzeiger, 1993
- [34] E2-18 Geotechnische Belange der Deponieentgasung GDA-Empfehlungen, 3. Auflage 1997 S.173 Bautechnik 9/2005 Überarbeitung 3/2017
- [35] ДБН В.2.4-2-2005 (Ukrainische Baunorm)
- [36] Spendlin, H. H.: Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen. In: Hamburger Berichte 4, Economoca Verlag, 1991.
- [37] Rettenberger, G., Tabasaran, O.: Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen. In: Müllhandbuch, 1987.

Richtlinie und Gesetze

- [38] Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien
- [39] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

- [40] Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle, nicht mehr gültig, ersetzt durch [39]
- [41] Richtlinie 75/442/EWG des Rates vom 15. Juli 1975 über Abfälle - 16/05/2006; aufgehoben durch 32006L0012 [42]
- [42] Richtlinie 2006/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Abfälle; 11/12/2010; aufgehoben durch 32008L0098 [39]
- [43] 2000/532/EG: Entscheidung der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2000) 1147) (Text von Bedeutung für den EWR); Date of entry into force unknown (pending notification) or not yet in force (EUR-Lex Stand 09.03.2018)
- [44] Assoziierungsabkommen zwischen der EU und der Ukraine (Association Agreement between the European Union and its Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part) September 2017
- [45] 2001/573/EG Entscheidung des Rates vom 23. Juli 2001 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis
- [46] Beschluss des gemeinsamen EWR-Ausschusses Nr. 9/2002 vom 1. Februar 2002 zur Änderung des Anhangs XX (Umweltschutz) des EWR-Abkommens
- [47] 2001/118/EG Entscheidung der Kommission vom 16. Januar 2001 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2001) 108) (Text von Bedeutung für den EWR)

Quellenverzeichnis für die Basisdaten zu vorhandenen Deponien (Abschnitt 1.1)

AEU 2016. Persönliche Mitteilung Jörg Meißner, Alternative Energiesysteme und Umwelttechnik GmbH, Winnyzja, 17.10.2016

- Al-Naber, Helena Munir Freih; Slenzak, Alexei; Stranadko, Natalia; Tykhyy, Volodymyr; Sulukhia, Tamar; Lvovsky, Kseniya; Fan, Qimiao; Ahmed, Kulsum, 01.01.2016. Ukraine - Country environmental analysis, Seite 8. World Bank Group. Washington, D.C. Online im Internet unter <http://documents.worldbank.org/curated/en/327881470142199866/pdf/AUS16696-WP-OUO-9-Ukraine-CEA-has-been-approved-P151337.pdf>, letzter Zugriff 03.03.2018.
- BETEN 2018. Ukrainian landfills, the most perspective for Biogas valorization, Collection basin >200 000 inhabitants. Online im Internet unter http://www.betenenergy.com/en/fields_of_expertise/bio, letzter Zugriff 01.03.2018.
- Bloomberg 2017. Smoldering Mounds of Trash Obstruct Ukraine's Road to Recovery. Online im Internet unter <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-29/smoldering-mounds-of-trash-obstruct-ukraine-s-road-to-recovery>, letzter Zugriff 01.03.2018.
- Business Sweden 2016. Solid waste management in Ukraine, August 2016. Business Sweden, Kyiv.
- A. Choban, I. Winkler, M. Rogozynskyi 2012. Environmental safety analysis of the projected municipal landfill area in a small city in Ukraine. Journal of Faculty of Food Engineering, Stefan cel Mare University, Suceava, Rumania, Volume XI, Issue 3 – 2012.
- V. Demus, R. Zechkov 2014. Background Paper on Financing Waste Management in Ukraine, 04.01.2014, Seite 8. Regional Environmental Center, Szentendre, Ungarn. Online im Internet unter http://documents.rec.orgg/events/EF/Background%20paper_financing%20waste%20management%20in%20Ukraine.pdf, letzter Zugriff 03.03.2018.
- G. Denafas, T. Ruzgas, D. Martuzevicius, S. Shmarin, M. Hoffmann, V. Mykhaylenko, S. Ogorodnik, M. Romanov, E. Neguliaeva, A. Chusov, T. Turkadze, I. Bochoidze, C. Ludwig 2014. Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities, Resources, Conservation and Recycling, Volume 89, August 2014, Pages 22-30
- Ecomapa 2018. Online im Internet <https://ecomapa.gov.ua/>, letzter Zugriff 01.03.2018.
- ENPI 2011. Waste Governance – ENPI East, WP4 (Register of Waste Disposal Sites), European Neighbourhood Partnership Instrument (Eastern Region), 31.05.2011
- G. Geletukha 2016. Biogas experience in Ukraine. 4th Bioenergy Week, Budapest, 21. – 24.6.2016.
- Global Methane Initiative, 2013. Development of Landfill Gas Technology in Ukraine – Status and Prospects, Methane Expo 12-15 March 2013, Vancouver.

- GTAI 2017. Ukrainische Regierung verabschiedet Abfallwirtschaftsstrategie, 16.11.2017. Germany Trade & Invest, Bonn. Online im Internet unter <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/suche,t=ukrainische-regierung-verabschiedet-abfallwirtschaftsstrategie,did=1817168.html?view=renderPdf>, letzter Zugriff 01.03.2018
- Heers & Brockstedt 2018. Ukraine: Deponie Vinnica und Deponie Kremenschuk. Heers & Brockstedt Umwelttechnik GmbH, Neumünster. Online im Internet unter <http://heers-brockstedt.de/cms/40-0-Ukraine.html>, letzter Zugriff 01.03.2018.
- IFC 2015. Municipal Solid Waste in Ukraine: Development Potential, 2015, IFC in Ukraine, Kyiv.
- Intecus 2011. Faktenblatt Emissionsreduktionspotenziale u. flexible Mechanismen: Ukraine, letzte Aktualisierung 04/2011. Intecus GmbH, Dresden. Online im Internet unter http://www.retech-germany.net/fileadmin/retech/05_mediathek/bifa/cdm_laenderinfo_ukraine.pdf, letzter Zugriff 01.03.2018.
- InvestUkraine 2012. Solid waste management in Ukraine, 2012. InvestUkraine und Deloitte, Kyiv
- LNK 2017. Die Webseite von LNK Energy enthält Informationen über die Deponiegasverwertungsanlagen in Borispyl, Brovary und Kyiv #5, B. LNK Energy, Kyiv. Online im Internet unter <http://www.lnkenergy.com/eng/>, letzter Zugriff 01.03.2018.
- Luhansk Regional Military and Civil Administration 2016. The Luhansk Region Development Strategy for the Period until 2020, Severodonetsk 2016, S. 83. Online im Internet unter http://www.ua.undp.org/content/dam/ukraine/docs/Donbas/RPP/Luhansk-reg-dev-strategy_ENG-14-06-2017.pdf, letzter Zugriff 22.03.2018.
- N. Makarenko, O. Budak 2017. Waste management in Ukraine: Municipal solid waste landfills and their impact on rural areas, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv. *Annals of Agrarian Science* 15 (2017) 80 – 87.
- Mesogeos 2016. Construction of Municipal Solid Waste Treatment Facility – Kharkiv Ukraine, MESOGEOS S.A., Athen, Griechenland, 26.01.2016. Online im Internet unter <http://mesogeos.gr/en/construction-of-municipal-solid-waste-treatment-facility-kharkiv-ukraine/>, letzter Zugriff 22.02.2018.
- T. Mostenska, I. Boiko 2015. Current State and Trends in Solid Waste Recycling in Ukraine, National University of Food Technologies, Kyiv. *Scientific Works of NUFT 2015, Volume 21, Issue 4, S. 96.*

- V. Mykhaylenko, M. Hoffmann, G. Denafas, I. Alekseyevets, C. Ludwig, S. Ogorodnyk, G. Martin, 2012. Environmental Cooperation of Ukraine with Baltic Countries in Waste Management Projects. Conference Paper Linnaeus EcoTech-12, Kalmar, Sweden, November 2012.
- V. Mykhaylenko, I. Alekseyevets, G. Denafas, S. Shmarin, I. Luchko, 2012. Features of Municipal Solid Waste Generation in Ukraine, Proceedings of WasteEco-12, Kharkiv, Ukraine, 28 March, 2012. Online im Internet unter <https://waste.ua/eco/2012/municipal-waste/ukraine/> (nur in Ukrainisch), letzter Zugriff 22.03.2018.
- Nationale Abfallwirtschaftsstrategie der Ukraine bis 2030, verabschiedet vom Kabinett der Minister der Ukraine am 08.11.2017 (Dokument steht nur auf Ukrainisch zur Verfügung).
- PNNL 2004. Inventory of Methane Emissions in the Solid Waste Sector of Ukraine. Pacific Northwest National Laboratory (USA) and Agency for Rational Energy Use and Ecology (Ukraine), Kyiv, 2004. Online im Internet unter <http://www.globalchange.umd.edu/data/aisu/publications/14660.pdf>, letzter Zugriff 28.02.2018.
- Y. Podchashinskiy, I. Kotsiuba, T. Yelnikov 2017. Math modeling and analysis of the impact of municipal solid waste landfill leachate on the environment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Nr. 85, 1.10.2017
- O. Popovych, M. Malovanyy, A. Malovanyy, E. Plaza 2010. Hrybovychi municipal solid waste landfill reclamation and coherent pollution prevention in holistic approach, January 2010. Online im Internet unter https://www.seed.abe.kth.se/polopoly_fs/1.650941!/JPSU16p149.pdf, letzter Zugriff 28.02.2018.
- A. Pukhnyuk, Y. Matveev, E. Binner, M. Ritzkowski, M. Hubner-Humer 2014. Landfill gas generation and emission: Results of investigations at municipal solid waste disposal sites of the Ukraine. Deponietechnik 2014, Dokumentation der 9. Hamburger Abfallwirtschaftstage, 21.-22.01.2014, Hamburger Berichte 40, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- A. v. Schoenberg, I. Keggenhof 2017. Länderprofil zur Kreislauf- und Wasserwirtschaft in der Ukraine, 10.05.2017. uve GmbH für Managementberatung in Kooperation mit German RETech Partnership und German Water Partnership, Berlin.
- Sixth National Communication 2014. Sixth National Communication of Ukraine on Climate Change. Ukrainian Ministry of Ecology and Natural Resources, Ukrainian State Emergency Service, National Ukrainian Academy of Sciences, Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kyiv, 2014. Online im Internet unter <http://www.seia.gov.ua/seia/doccatalog/document?id=638134>, letzter Zugriff 28.02.2018.

- H. Skryhan, O. Khandogina, I. Shilova 2017. Municipal solid waste management in the cities of Belarus and Ukraine: Lost Soviet efficiency and weakness of modern governance instruments. Proceedings of Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinien, 2.-6.10.2017.
- D. Skrylnikov 2016. Addressing waste related challenges in Ukraine. Dmytro Skrylnikov, NGO Bureau of Environmental Investigation (BEI), Presentation at 24th OSCE Economic and Environmental Forum, Vienna. 25 – 26 January 2016.
- UNECE 2004. Environmental policy in transition: ten years of UNECE environmental performance reviews, 2004. United Nations Economic Commission for Europe. Online im Internet unter http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/epr/documents/0331979_eng.pdf, letzter Zugriff 28.02.2018.
- UKRSTAT 2017. Statistical Yearbook Environment of Ukraine 2016. State Statistics Service of Ukraine, Kyiv, 2017. Online im Internet unter <http://www.ukrstat.gov.ua/>, letzter Zugriff 28.02.2018.
- I. Winkler, G. Zharykov 2010. Solid municipal wastes in Ukraine: a case study of environmental threats and management problems of the Chernivtsi dump area. Presentation at NATO Science for Peace and Security Programme Workshop on Managing Global Environmental Threats to Air, Water and Soil, Ljubljana, Slovenia. Online im Internet unter https://www.fvv.um.si/nato_arw/documents/NATO%20ARW_presentation_Winkler.pdf, letzter Zugriff 05.03.2018.
- World Bank 2014. Ukraine Second Urban Infrastructure Project (Urban Infrastructure Project -2) Project Appraisal Document, 07.05.2015. World Bank, Washington D.C. Online im Internet unter <https://www.gtai.de/GTAI/Content/DE/Trade/Fachdaten/PRO/2014/08/Anlagen/PRO201408255002.pdf?v=1>, letzter Zugriff 22.02.2018.
- World Population Review 2016. World Population Review, Walnut, CA 91789, USA. Online im Internet unter <http://worldpopulationreview.com/countries/ukraine-population/>, letzter Zugriff 02.03.2018.
- EU Assoziierungsabkommen 2014. Assoziierungsabkommen zwischen der Europäischen Union und ihren Mitgliedstaaten einerseits und der Ukraine andererseits OJ L 161, 29.5.2014. Online im Internet unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.161.01.0003.01.DEU, letzter Zugriff 18.10.2018.

Nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2017. КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ РОЗПОРЯДЖЕННЯ від 8 листопада 2017 р. N 820-р, Київ, Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року. Online im Internet unter <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80>, letzter Zugriff 16.10.2018.

H. Zubko 2018. By 2030 Ukraine should manage waste the European way. Online im Internet unter <https://decentralization.gov.ua/en/news/9453>, letzter Zugriff 16.10.2018.

Abfallgesetz 1998. Про відходи, Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1998, N 36-37, ст.242, Online im Internet unter <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80>, letzter Zugriff 19.10.2018.

Twinning 2017. Twinning Project 'Introduction of a management system of waste electrical and electronic equipment (WEEE) and batteries in Ukraine'. Online im Internet unter <http://twinningweee.com.ua/en>, letzter Zugriff 21.10.2018.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|------------------|---|
| AOX | adsorbierbare organische Halogenverbindungen |
| BSB | biologischer Sauerstoffbedarf |
| CE-Kennzeichnung | Material entspricht den Harmonisierungsrechtsvorschriften |
| CSB | chemischer Sauerstoffbedarf |
| d.h. | das heißt |
| DepV | Deutsche Deponieverordnung |
| DIBt | Deutsches Institut für Bautechnik |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| D _{Pr} | Proctordichte |
| EBRD | European Bank for Reconstruction and Development / Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung |
| EBS | Ersatzbrennstoff |
| EDV | elektronische Datenverarbeitung |
| ELFM | Enhanced Landfill Mining |
| ENPI | European Neighbourhood and Partnership Instrument / Europäisches Nachbarschafts- und Partnerschaftsinstrument |
| etc. | und so weiter |
| EU | Europäische Union |
| Gew.% | Gewichtsprozent |
| GTAI | Germany Trade and Invest |
| GTD | Geosynthetische Tondichtungsbahn |
| ha | Hektar, 1 ha = 10.000 m ² |
| IFC | International Finance Corporation |
| KEA | kumulierter Energieaufwand |
| LAGA | Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Deutschland) |
| MAK | maximale Arbeitsplatz-Konzentration |
| mbar | Millibar, entspricht hPa |
| MVA | Müllverbrennungsanlage |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development |
| PE-HD | Polyethylen hoher Dichte |
| PE-HD-EL | Polyethylen hoher Dichte, elektrisch leitfähig |
| PP | Polypropylen |

| | |
|---------|--|
| PPK | Papier, Pappe und Kartonagen |
| RC | Recycling |
| SBS | Sekundärbrennstoff |
| SEI | State Ecological Inspectorate / Überwachungsbehörde der einzelnen Oblaste |
| t | Tonne, Maßeinheit für die Masse, 1 t = 1 Mg |
| TOC | Gesamter organischer Kohlenstoff |
| TS | Trockensubstanz |
| UAH | Griwna (Währung der Ukraine) |
| UKRSTAT | State Statistics Service of Ukraine / Amt für Statistik der Ukraine |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe / Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen |
| UV | ultraviolett |
| vgl. | vergleiche |
| Vol.% | Volumenprozent |
| z.B. | zum Beispiel |

PLANVERZEICHNIS

| | | |
|---------|--|-----------|
| Plan 1 | Übersichtsplan Map 1 und Map 2 | 1 : 1.000 |
| Plan 2 | Bestandslageplan 2017 | 1 : 1.000 |
| Plan 3 | Lageplan Map1 (Variante 1) | 1 : 1.000 |
| Plan 4 | Lageplan Map1 (Variante 2) | 1 : 1.000 |
| Plan 5 | Lageplan Map1 (Variante 3) | 1 : 1.000 |
| Plan 6 | Querschnitte Map1 (Variante 1-3)..... | 1 :1.000 |
| Plan 7 | Lageplan Map2 (Variante 1) | 1 :1.000 |
| Plan 8 | Lageplan Map2 (Variante 2) | 1 : 1.000 |
| Plan 9 | Lageplan Map2 (Variante 3) | 1 : 1.000 |
| Plan 10 | Lageplan Map2 (Variante 4) | 1 : 1.000 |
| Plan 11 | Querschnitt Map2 (Variante 1-4)..... | 1 :1.000 |
| Plan 12 | Bestandslageplan geplante Brunnenbohrungen | 1 :1.000 |

Plan 13 Längsschnitt durch Bohrung Sickerwasserhorizonte Brunnen 5-7 (Map 1) 1 :1.000
Plan 14 Querschnitt durch Bohrung Sickerwasserhorizonte Brunnen 5-7 (Map 1) 1 :1.000
Plan 15 Längsschnitt durch Bohrung Sickerwasserhorizonte Brunnen 1-3 (Map 2) 1 :1.000
Plan 16 Querschnitt durch Bohrung Sickerwasserhorizonte Brunnen 1-3 (Map 2) 1 :1.000

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1: Zusammenstellung der Städte mit mehr als 200.000 Einwohnern (aus dem Bericht von Andreas von Schoenberg Consulting)

Der Bericht der Studie umfasst inkl. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis 187 Seiten

DANKSAGUNG

Die Stadt Kyiv betreibt mehrere Deponien. Eine davon, die Deponie Nr. 5, wird bis heute als Hausmülldeponie betrieben und täglich mit Hausmüllmengen aus der Stadt Kyiv befüllt.

Als Ingenieurbüro BN Umwelt GmbH hatten wir zuerst im Jahr 2011 Kontakt und Einblick in die Deponie. Seitdem wurde der Deponiebetrieb deutlich professionalisiert und verbessert.

Die bestehende Problematik mit dem aufgestauten Sickerwasser in der Deponie und den Geruchsemmissionen wurden und konnten bis heute nicht nachhaltig bekämpft bzw. gelöst werden.

Dank der Exportinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) bestand und besteht die Möglichkeit, Projekte mit solchen und ähnlichen Fragestellungen durch Mittel der Bundesrepublik Deutschland fördern zu lassen.

Nach intensiver Abstimmung mit dem Bürgermeisteramt der Stadt Kyiv, über die dringendsten und ungelösten Fragen im Bereich der Abfallwirtschaft, wurde, zusammen mit der German RETech Partnership e.V. und Netzwerkpartnern der RETech, im Sommer 2017 der Fördermittelantrag für die „Machbarkeitsstudie zur nachhaltigen Sicherung der Deponie Nr. 5“ gestellt.

Der Fördermittelbescheid wurde mit Datum vom 05.10.2017 ausgestellt und im Rahmen einer feierlichen Übergabe im Bürgermeisteramt der Stadt Kyiv ausgehändigt. Von diesem Zeitpunkt an sind viele Seiten beschrieben, Pläne gezeichnet, Bohrungen niedergebracht und Gespräche geführt worden.

Die Projektvorstellung, im Rahmen einer Abschlusskonferenz in Kyiv, steht noch aus.

Trotzdem ist hier die passende Gelegenheit, sich für die geleistete Arbeit und Zusammenarbeit zu bedanken.

Natürlich gilt mein / unser Dank allen Kollegen der BN Umwelt GmbH, die sich tief in die Historie und den aktuellen Zustand der Deponie Nr. 5 hineingearbeitet haben. Unser Dank gilt auch allen Mitstreitern aus der Ukraine und Deutschland, die bei der Erstellung der Machbarkeitsstudie als Partner mitgewirkt haben.

Unser besonderer Dank gilt aber den Kollegen der „Kyivspetstrans“, ohne die die Zusammenstellung der Bestandsunterlagen und Darstellung der Bestandsdeponie

nicht möglich gewesen wäre und die uns bei allen Fragen zu der bestehenden Deponie, den aktuellen Deponiebetrieb und bei den erforderlichen Feldarbeiten unermüdlich zur Seite standen.

Ebenso gilt unser besonderer Dank dem Bürgermeisteramt der Stadt Kyiv, und hier namentlich Herrn Dr. Balosynovich, der uns bei der Vorbereitung und Umsetzung aller erforderlichen Termine im Rahmen dieses Projektes unschätzbare Hilfe zu teil werden ließ.

Unser größter Dank gilt jedoch dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, mit allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeitern, sowie der Frau Umweltministerin und dem ehemaligen Staatssekretär im BMU, Herrn Gunther Adler für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Umsetzung des Gesamtprojektes.

ERLÄUTERUNGSBERICHT

1 **Sicherungskonzept**

1.1 **Zustand der Deponien in der Ukraine**

1.1.1 ***Einleitung***

Im Rahmen des Projektes erfolgte die Ermittlung von Basisdaten über die Anzahl und den Zustand von Abfalldeponien jeder Art in der Ukraine. Ziel war es, den Handlungsbedarf bei Deponien, die mit der Deponie Nr. 5 in Kyiv vergleichbar sind, zu eruieren. In der ersten Stufe wurde eine Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Neben Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Publikationen, wurden Berichte von nationalen und internationalen Organisationen (UNECE, IFC, Global Methane Initiative u.a.) sowie Webseiten von deutschen und ukrainischen Firmen aus der Umwelttechnikbranche gesichtet. Die Ergebnisse sind in diesem Bericht nachfolgend zusammengefasst.

Anfangs werden die Siedlungsabfallmengen in der Ukraine dargestellt. In dem zweiten Abschnitt wird auf die Deponiemengen eingegangen und eine Aufteilung nach Region (Oblast) vorgenommen. Es folgen Abschnitte über die Anzahl der Deponien, die von diesen Anlagen in Anspruch genommenen Flächen und über den allgemeinen Zustand der Deponien. Darauf folgt die Zusammensetzung des Siedlungsabfalls und dessen hoher Anteil an Organik, sowie auf das Thema Gaserfassung- und Gasverwertung eingegangen. Zum Schluss folgen der Basisdatenermittlung Informationen zu einzelnen Deponien, die naturgemäß im Rahmen einer solchen Literaturrecherche Lücken aufweisen.

Generell kann festgestellt werden, dass viele ältere Deponien aus den 50ziger bis 80ziger Jahren des letzten Jahrhunderts noch betrieben werden. Dabei wurden kaum Vorkehrungen zum Schutz der Umwelt unternommen und viele sind überfüllt. Einige neuere Deponien verfügen über Deponiebasisabdichtungen und Sickerwassersammelsysteme. In den letzten Jahren wurden auf 13 Deponien in der Ukraine Gaserfassungs- und Gasverwertungsanlagen installiert.

Die meisten Daten, die im Rahmen dieser Literatur- und Internetrecherche zur Verfügung standen, beziehen sich auf größere Deponien im Umfeld von Städten mit mehr als 200.000 Einwohnern. Es werden kurze Informationen über 30 Deponiestandorte dargestellt, wobei sich drei auf der annektierten Krim Halbinsel befinden.

Darüber hinaus werden für die Region Transkarpatien die Ergebnisse einer Untersuchung aller Deponiestandorte zusammengefasst. Im Anhang (Anlage 1) werden 33 Städte mit mehr als 200.000 Einwohnern aufgelistet.

Die im Abschnitt 1.1.8 enthaltenen Angaben zu Deponiegrößen und Ablagerungsmengen erscheinen teilweise widersprüchlich, so dass die genannten Zahlen entsprechend kritisch zu verwenden sind.

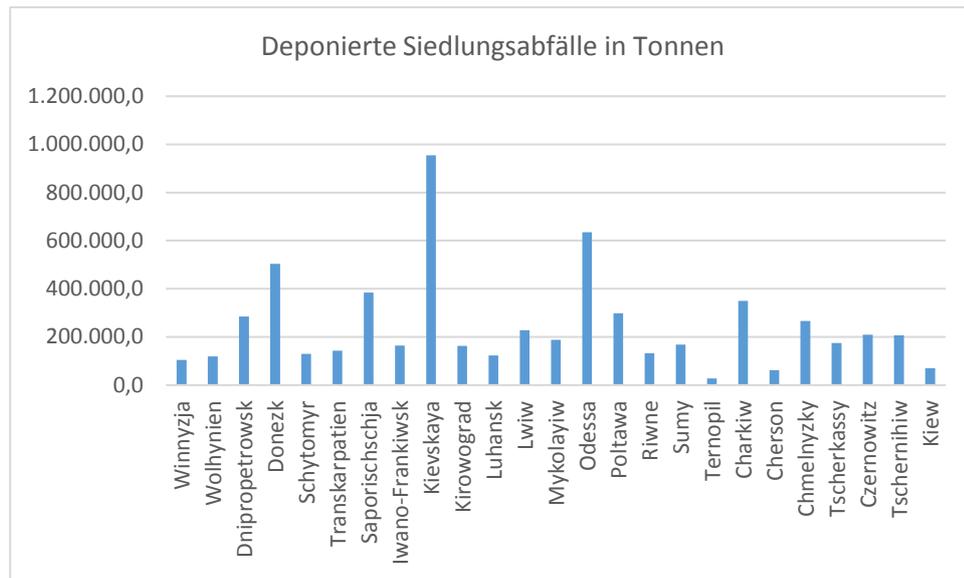
1.1.2 *Anfallmengen und Entsorgungswege für Siedlungsabfall*

Im Jahr 2016 fielen 11,6 Millionen Tonnen feste Siedlungsabfälle (Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle) in der Ukraine an. Jeder Bürger des Landes produzierte 2016 im Schnitt 255 kg Siedlungsabfall. 259.330 Tonnen wurden in Abfallverbrennungsanlagen thermisch behandelt. Dies entspricht 2,2% des Abfallaufkommens. Weniger als 1% der Siedlungsabfälle wurden verwertet. Etwa 97% aller Siedlungsabfälle wurden deponiert (UKRSTAT 2017).

1.1.3 *Menge der deponierten Abfälle*

Etwa 6.089.000 Tonnen Siedlungsabfall (53%) wurden auf genehmigten und kontrollierten Deponien abgelagert. Die folgende Abbildung gibt einen regionalen Überblick über diese Deponiemengen.

Abbildung 1: Deponierte Siedlungsabfälle pro Oblast (UKRSTAT 2017)



Die meisten Siedlungsabfälle wurden in den Oblasten Kiewskaya (954.653 t), Odessa (635.605 t), Donezk (503.592 t) und Charkiw (349.625 t) deponiert. In der Stadt Kyiv wurden in 2016, 257.313 t in der Müllverbrennungsanlage Enerhiia beseitigt.

Neben diesen Mengen wurden ca. 45% der gesamten Siedlungsabfälle in Höhe von 11,6 Millionen Tonnen auf nicht genehmigten Deponien oder wilden Kippen abgelagert.

1.1.4 Anzahl von Deponien und in Anspruch genommene Flächen

Es liegen eine Vielzahl von Daten und Schätzungen über die Anzahl der Deponien in der Ukraine vor, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Tabelle 1: Anzahl von Deponien in der Ukraine

| genehmigte Deponien | nicht genehmigte Deponien | Gesamt | Quelle |
|---------------------|---------------------------|--------|----------------------|
| k.A. | k.A. | 36.000 | Bloomberg 2017 |
| 7.773 | k.A. | k.A. | Intecus 2011 |
| 6.682 | 30.483 | 37.165 | Mostenska/Boiko 2015 |
| 6.700 | k.A. | k.A. | Makarenko/Budak 2017 |
| 6.700 | 30.000 | 36.700 | IFC 2015 |
| 6.000 | k.A. | k.A. | Pukhynuk et al 2014 |
| 6.000 | k.A. | k.A. | Skrylnikov 2016 |
| 6.000 | k.A. | k.A. | Business Sweden 2016 |

| | | | |
|-------|--------|--------|---|
| 5.470 | 27.000 | 33.470 | Nat. Abfallwirtschafts- strategie 2017 |
| 4.500 | 3.000 | 7.500 | InvestUkraine 2012 |
| 4.500 | k.A. | k.A. | Global Methane Initai- tive 2013 |
| 4.500 | k.A. | k.A. | Popovych et al 2010 |
| 4.157 | k.A. | k.A. | Al-Naber et al 2016 |

Anhand dieser Zahlen kann davon ausgegangen werden, dass ca. 6.000 – 7.000 genehmigte Deponien und 30.000 nicht genehmigte Deponien in der Ukraine existieren.

Auch bei den Flächenangaben gibt es unterschiedliche Daten. Die IFC spricht von einer Gesamtfläche von 10.000 ha bei den genehmigten Deponien und 2.000 ha bei den nicht genehmigten Deponien. Skrylnikov et al rechnen mit 9.000 ha bei den genehmigten Deponien. Mostenska et al, die sich auf offizielle Quellen beziehen und die genauesten Daten sowohl für die Anzahl der Deponien als auch für die beanspruchten Flächen präsentieren, kommen zu dem Ergebnis, dass alle genehmigten und nicht genehmigten Deponien 2013 eine Fläche von insgesamt rd. 12.324 ha oder 0,02% der gesamten Landfläche der Ukraine belegen.

Die hohe Anzahl der illegalen Deponien ist u.a. auf den Tatbestand zurückzuführen, dass 2013 nur 78% der Bevölkerung an die öffentliche Entsorgung angeschlossen war. So entstehen kleine Ablagerungsorte, in der Nähe von Siedlungen im ländlichen Raum. Hinzu kommt, dass die Deponiegebühren von ca. 45 – 50 UAH/T (1,45 – 1,60 €/t) bei den nicht genehmigten Deponien deutlich geringer, als bei den genehmigten Standorten sind, die in der Regel eine Annahmegebühr von 90 – 100 UAH/T (2,90 – 3,20 €/t) verlangen (Mostenska/Boiko 2015). Laut einer Bestandsaufnahme aus dem Jahr 2013 befinden sich allein in der Region Transkarpatien 350 nichtgenehmigte Deponien (ENPI 2011).

In der folgenden Karte werden die von Deponien belegten Flächen in den einzelnen Oblasten dargestellt. Hierbei handelt es sich um genehmigte und nicht genehmigte Siedlungsabfalldeponien.

Abbildung 2: Footprint der ukrainischen Siedlungsabfalldeponien (Makarenko/Budak 2017)



Das Ministerium für Ökologie und Natürliche Ressourcen hat eine interaktive Karte online gestellt, die den Bürgern des Landes die Möglichkeit bietet, Fotos und Informationen über illegale Ablagerungen einzusenden. Das Ministerium verspricht, dass diese Informationen unverzüglich an die lokalen Behörden weitergeleitet werden, die für ihre Räumung verantwortlich sind. Informationen über den Bearbeitungsstatus und die relevanten Aktivitäten der lokalen Behörden sind online einsehbar (Ecomapa 2018).

1.1.5 Zustand der ukrainischen Deponien

Die meisten Deponien wurden in den 50ziger bis 80ziger Jahren des letzten Jahrhunderts als Verfüllungen von natürlichen oder industriellen Gruben in Betrieb genommen. Es wurden kaum Vorkehrungen zum Schutz der Umwelt unternommen, obwohl einige Deponien auf Tonschichten, die als geologische Barriere dienen, er-

richtet wurden. Viele sind überfüllt, werden aber – aufgrund fehlender Genehmigungen und Finanzierungsmöglichkeiten für neue Standorte – weiter genutzt. Meistens liegen keine Informationen über den Betrieb der Deponien vor (z.B. Daten über die Art und Zusammensetzung der Abfälle, Zeitpunkt der Deponierung etc.).

Einige neuere Deponien, die in den 80ziger und 90ziger Jahren für die Entsorgung größerer Städte errichtet wurden, verfügen über Deponiebasisabdichtungen sowie Sickerwassersammelsysteme und -becken. Jedoch wurde und wird beim Betrieb der Anlagen gespart. Z.B. werden Deponiekörper nur unregelmäßig verdichtet und es werden kaum Zwischenabdeckungen aufgebracht. Methanemissionen werden nicht kontrolliert und es kommt häufiger zu Bränden. Auch die Sickerwassersammeleinrichtungen sind oft beschädigt. Zudem werden häufig Bauabfälle auf Hausmülldeponien abgelagert (Pukhnyuk et al 2014).

Laut einem älteren Bericht des Pacific Northwest National Laboratorys aus den USA, das gemeinsam mit der Agency for Rational Energy Use and Ecology aus der Ukraine die Methangasemissionen pro Oblast für das Jahr 2002 berechnet hat, werden 36,2% der Deponien geordnet betrieben. 58,2% der Deponien sind nicht genehmigte Deponien mit einer Tiefe von > 5m und weitere 5,6% nicht genehmigte Deponien mit einer Tiefe von < 5m. 387.000 Tonnen Methan wurden in der Ukraine in 2002 freigesetzt (PNNL 2004).

Gemäß einem Bericht der Global Methane Initiative befinden sich ca. 700 Deponien in der Nähe größerer Städte, wovon sich max. 50 für die Gewinnung und Verwertung von Deponiegas eignen. Ältere Deponien weisen folgende Eigenschaften auf:

- Steile Abhänge,
- große Arbeitsflächen mit geringer Abdichtung,
- erhöhter Sickerwasseraustritt und
- häufige Feuerereignisse (Global Methane Initiative, 2013).

Von den 5.470 genehmigten Deponien, die in der aktuellen Abfallwirtschaftsstrategie der Ukraine erwähnt werden, sind 305 (5,6%) überfüllt und 1.646 (30%) entsprechen nicht den Umweltvorschriften des Landes. In der Strategie wird auch erwähnt, dass 99% aller Deponien nicht die Umweltstandards der EU erfüllen (Nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2017).

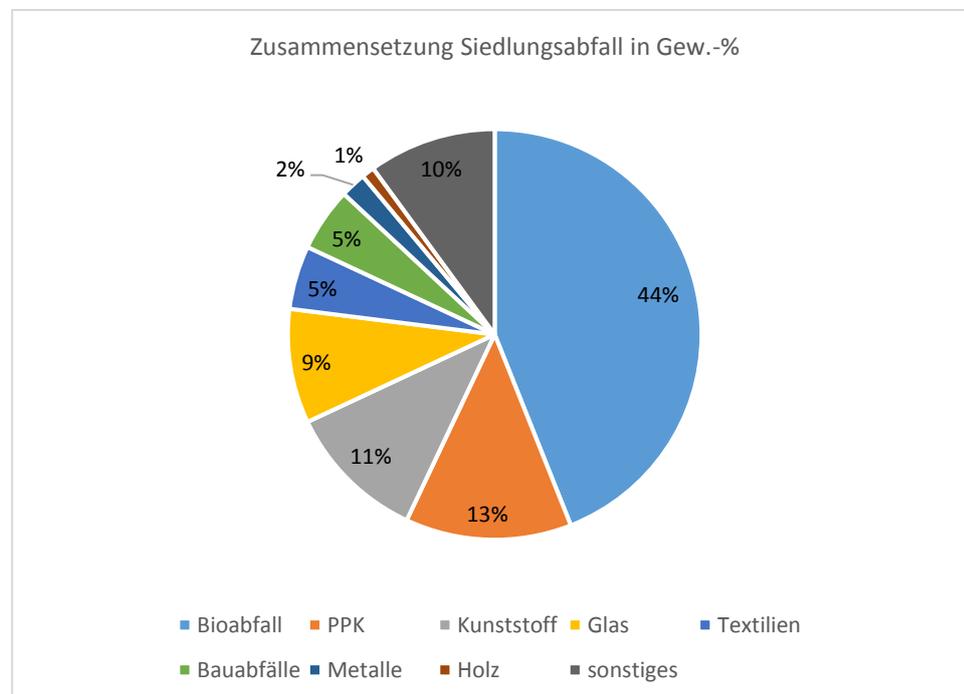
In einigen Berichten wird auf die Verunreinigungen von Gewässern und die daraus resultierenden Gesundheitsgefahren hingewiesen. Bei einigen Standorten wurden erhöhte Werte für u.a. CSB, BSB, Chlor und Schwermetalle festgestellt, z.B. in

Chernivtsi, Hryborachi/Lwiw, Myronivka oder Shytomyr (siehe Abschnitt 7 ‚Informationen zu einzelnen Deponien und Regionen‘).

1.1.6 **Zusammensetzung des Abfalls**

Laut dem 6. Nationalen Bericht zum Klimawandel besteht der Siedlungsabfall zu 35-50% aus Bioabfall, zu 10-15% aus PPK und zu 9-13% aus Altkunststoff. Metalle machen weitere 2% aus, Textilien 4-6%, Bauabfälle 5%, Holz 1% und andere Abfälle 10%.

Abbildung 3: Zusammensetzung des Siedlungsabfalls (Sixth National Communication 2014)



Aufgrund des hohen Anteils an organischem Material verursacht die Deponierung der Siedlungsabfälle erhebliche Methanemissionen. 2011 wurden mehr als 10 Mio. Tonnen CO₂e Methan emittiert (Sixth National Communication 2014).

Der Anteil gefährlicher Abfälle am Siedlungsabfall beträgt mindestens 0,1%. Es werden beispielsweise jährlich mehr als 4.500 Tonnen AA-Batterien (Mignonzellen) verkauft, die nach ihrem Ablauf auf den Deponien des Landes entsorgt werden. Der überwiegende Teil des anfallenden Elektro- und Elektronikschrotts des Landes wird deponiert (Demus/Zechkov 2014).

1.1.7 Deponieentgasung

Deponiegaserfassungssysteme wurden bis heute auf dreizehn Deponien installiert. Die Anlagen befinden sich in Aluschtscha, Boryspil, Brovary, Kremetschuk, Kyiv #5, Luhansk, Lwiw, Mariupol, Mikolajiw, Saporischschja, Schytomyr, Winnyzja und Yalta. Sie sind auf der folgenden Karte dargestellt.

Abbildung 4: Standorte der Deponien mit Gasfassung (eigene Recherchen, Karte Wikipedia)



Die französisch-ukrainische Ingenieurgesellschaft BETEN International schätzt, dass etwa 140 Deponien in der Ukraine für die Gewinnung und Verwertung von Deponiegas geeignet sind. Die wichtigsten Deponiestandorte, die Städte mit einer Bevölkerung von mehr als 200.000 Einwohnern bedienen, sind auf einer Karte auf der BETEN-Webseite dargestellt.

Abbildung 5: Deponiestandorte mit Gasverwertungspotenzial (BETEN 2018)



Die ukrainischen Städte mit einer Bevölkerung von über 200.000 Einwohnern sind im Anhang zu diesem Bericht (vgl. Anlage 1) aufgelistet.

1.1.8 Informationen zu einzelnen Deponien und Regionen

Alushta, Krim

0,8 Mio. Tonnen Abfall wurden seit der Betriebsaufnahme 1960 auf einer Fläche von 6,9 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 10,00 – 55,00 m (Pukhnyuk et al 2014).

Eine HOFGAS Ready 500 Gasfassungsanlage und Fackel von Hofstetter wurden 2008 installiert. Die Gasproduktion beträgt 300 – 500 m³/h (Gelethuka 2016).

Boryspil, Oblast Kyiv

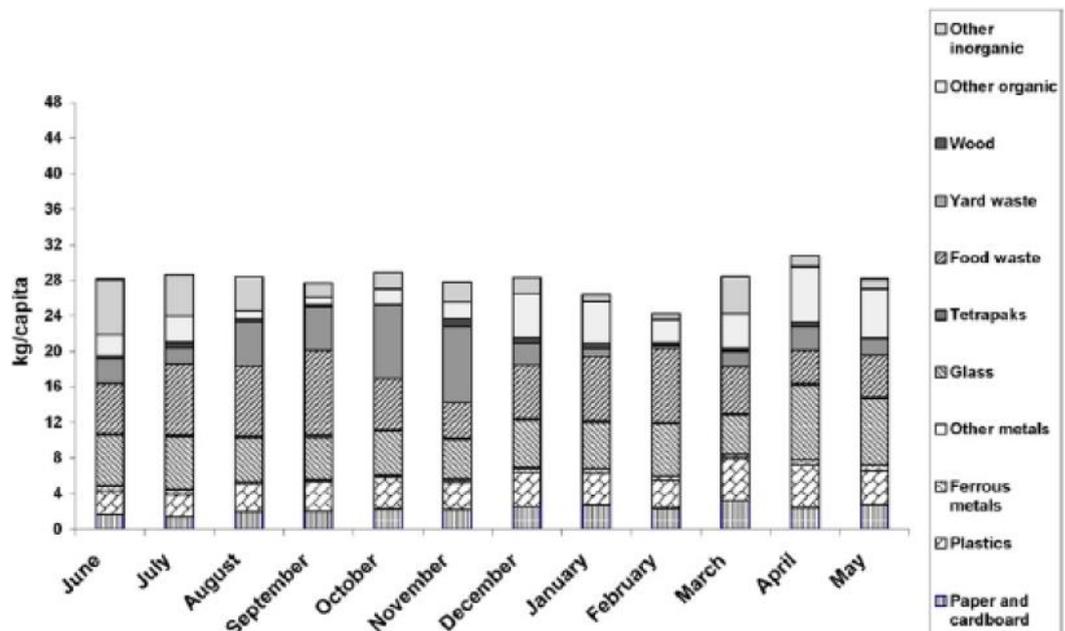
0,7 Mio. Tonnen Abfall wurden seit 2011 auf einer Fläche von 11 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 15,00 – 18,00 m. Eine Gasfassung und –verwertung, bestehend aus JGC 320 GS-LL GE Jenbacher Gasmotoren mit einer installierten Leistung von 1063 kW, wurde 2013 in Betrieb genommen. Investor LNK Energy (LNK 2018).

Für den Zeitraum Juni 2010 bis Mai 2011 wurde die mittlere Zusammensetzung des auf der Deponie abgelagerten Abfalls in Gew.% ermittelt:

PPK 8,3%, Kunststoff 12,5%, Tetra Pak 0,6%, Lebensmittelabfälle 22,9%, Gartenabfälle 12,1%, 1,5%, Gummi/Leder/Textilien 11,5%, Eisen 1,5%, Aluminium 0,2%, andere NE-Metalle < 0,1%, Glas 20%, Inertstoffe 8,8%, gefährliche Abfälle 0,1%. Im Vergleich zum Jahr 2000 haben sich die Lebensmittelabfälle verringert, während bei den Kunststoffen, Textilien, Gummi und Leder sowie beim Glas eine deutliche Zunahme zu verzeichnen war. 2011 betrug der Heizwert 8,4 MJ / kg (Mykhaylenko et al 2012).

In einem weiteren Bericht wurden saisonale Schwankungen in der Anfallmenge und Zusammensetzung des Abfalls im Zeitraum 2010-2011 untersucht. Die geringste Menge fiel im Februar an (24,3 kg/E) und die höchste im April (30,8 kg/E). Im Juli fielen 28,6 kg/E an und im Oktober 28,9 kg/E. Der Monatsdurchschnitt beträgt 28,0 kg/E (Denafas et al 2014).

Abbildung 6: Anfall und Zusammensetzung des auf der Deponie Boryspil entsorgten Abfalls Juni 2010 – Mai 2011 (Denafas et al 2014).



Brovary, Brovarskiy, Oblast Kyiv

JGC 320 GS-LL GE Jenbacher Gasmotoren mit einer Leistung von 1060 kW wurden installiert. Investor LNK (LNK 2018).

Cherkassy / Tscherkassy, Oblast Tscherkassy

Die Deponie wurde 1992 in Betrieb genommen. Bis 2007 wurden auf 9 ha 4,8 Mio. m³ Abfall abgelagert (Intecus 2011).

Chernivtsi / Czernowitz, Oblast Czernowitz

Die Deponie wurde von 1995 bis 2008 betrieben. Insgesamt wurden 0,9 Mio. Tonnen Abfall auf ca. 30 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers erreicht bis zu 10,00 m (Pukhnyuk et al 2014).

Der Grundwasserspiegel liegt in einer Tiefe von 6,50 – 7,50 m. Die nächsten Gebäude sind ca. 1 km entfernt. Durchschnittliche Abfallzusammensetzung: inertes Material 3-15%, Organik 20-50%, PPK und Holz 20-50%, Metalle 1-5%. Kunststoff 1-10%, Glas und Keramik 3-10%. Aufgrund von Beschwerden aus der Bevölkerung wurde angenommen, dass das Grundwasser kontaminiert ist. Anschließende Untersuchungen haben erhöhte CSB, BSB, Chlor, HCO₃, Ca₂, Mg₂, NO₂ etc. bestätigt. Auch die Schwermetallkonzentrationen sind zu hoch (Winkler/Zharykov 2010).

Chernigiv (Tschernihiv), Oblast Tschernihiv

4 Mio. Tonnen Abfall wurden seit 1961 auf ca. 39 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 10 – 15 m. Der Abfall besteht bis zu 20% aus inertem Material (Pukhnyuk et al 2014).

Derhachi / Derhachivskiy Deponie, Oblast Charkiw / Kharkiv

Die Stadt Derhachi mit 19.618 Einwohnern im Oblast Kharkiv liegt ca. 12 km nordwestlich der Stadt Kharkiv. Es fallen 288,4 kg/E Abfall und Jahr an. Das entspricht 5.658 Tonnen Siedlungsabfall im Jahr. Zusammensetzung des Abfalls: Organik 24%, PPK 6%, Kunststoffe 17%, Metalle 2%. Es gibt keine getrennte Wertstoffeffassung (nur über den informellen Sektor). Häufig werden Abfälle noch von den Hauseigentümern verbrannt. Eine Praxis, die in der Ukraine offiziell untersagt ist. Die Abfälle werden auf der Derhachivskiy Deponie abgelagert. Diese Deponie nimmt auch Abfälle der Stadt Kharkiv und anderer Orte im Rajon Derchachivskiy an. Eigentümer der Deponie ist die Abfallwirtschaftsgesellschaft der Stadt Kharkiv. Die Deponie ver-

fügt über eine Eingangswaage und Sickerwassererfassungs- sowie Aufbereitungssysteme. Der Abfall wird mit inertem Material abgedeckt. Die neueren Deponieabschnitte wurden gesetzeskonform errichtet. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung wurde durchgeführt. Alle Genehmigungsunterlagen liegen vor. Arbeitssicherheitsbestimmungen werden eingehalten. Es werden regelmäßig Gesundheitschecks bei Mitarbeitern durchgeführt (Skryhan/Khandogina/Shilovar 2017).

Dnipropetrovsk, Oblast Dnipropetrovsk

Ende der 90iger Jahre wurde eine moderne Deponie mit einer 2-mm HDPE Basisabdichtung in Dnipropetrovsk errichtet. Die Deponie wurde mit Sickerwassermess-einrichtungen ausgestattet. Eine zukünftige Gasfassung ist möglich. Die Deponie wird wöchentlich mit Ton abgedeckt (UNECE 2004).

Hrybovychi Deponie, Oblast Lviv / Lwiw

Die Deponie liegt 7 km von der Stadt Lviv (Lemberg), 500 m vom Dorf Velyki und 700 m von der Autobhan Lviv-Kyiv entfernt. Auf einer Fläche von 26,5 ha wurden zwischen 1959 und 2010 mehr als 6 Mio. Tonnen Abfall abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 5,00 – 40,00 m. Hrybovychi gilt als eine der Altlasten der Ukraine mit dem höchsten Gefährdungspotential. Bei Grundwasserproben in umliegenden Dörfern wurden Kontaminationen festgestellt. Sickerwasseranalysen liegen vor und zeigen ein erhöhtes CSB:BSD-Verhältnis sowie erhöhte Schwermetallkonzentrationen, besonders bei Chrom, Cobalt und Blei (Popovych et al 2010).

Über die Flüsse Poltva und Bug gelangt verunreinigtes Wasser aus der Deponie in die Ostsee (Mykhaylenko et al 2012).

Ein HOFGAS Ready 2000 Gasfassungs- und Fackelsystem wurde 2008 von Hofstetter Umwelttechnik installiert. Die Gasproduktion beträgt 1500 – 2000 m³/h (Gelethuka 2016).

Im Mai 2016 kam es zu einem großen Deponiebrand, bei dem vier Feuerwehrkräfte ums Leben kamen (Bloomberg 2017).

Aktuell bestehen Pläne, die Deponie zu sanieren und Sortier- und Kompostieranlagen in Lviv zu bauen. Durchführer der Projekte sind die Stadtverwaltung und das kommunale Unternehmen Green City. Das Gesamtvolumen des Projekts beträgt 35 Millionen € und erste Ausschreibungen laufen bereits. Die Projekte werden von der EBRD finanziert (GTAI 2017).

Ivano-Frankiwsk, Oblast Iwano-Frankiwsk

Die Deponie wurde 1992 in Betrieb genommen. Bis 2007 wurden auf 22,4 ha 3 Mio. m³ Abfall von 230.000 Einwohnern abgelagert (Intecus 2011).

Kharkiv / Charkiw Deponie, Oblast Kharkiv

2014 wurde eine Neuordnung der Entsorgung von Siedlungsabfällen in Kharkiv mit Mitteln der Weltbank geplant. 400.000 Tonnen Siedlungsabfälle fallen im Jahr an, die auf 2 Deponien – eine im Süden und eine im Norden der Stadt – entsorgt werden. Die südlich der Stadt gelegene Deponie, die etwa 5 km vom Flughafen entfernt liegt und sich in Privatbesitz befindet, sollte 2016 geschlossen werden. Hier wurden ca. 35% der Anfallmenge aus Kharkiv entsorgt. Auf der nördlichen Deponie, die sich im Besitz der Stadt befindet, wurden die restlichen 65% der Siedlungsabfälle entsorgt (900 m³/Tag). Die Gesamtfläche beträgt 13 ha, von denen 7 ha verfüllt sind. Die Stadt plant an dem nördlichen Standort eine Erweiterung um 34 ha, wovon etwa die Hälfte von der Weltbank finanziert werden soll. Auf den bestehenden 13 ha, als auch auf der Erweiterung von 17 ha, sollen Gasfassungs- und -verwertungsanlagen installiert werden. Es wird mit einer Gasmenge von 770 m³ pro Stunde gerechnet, was wiederum zur Erzeugung von 1,5 MWh Strom reicht. Zusätzlich soll neben der nördlichen Deponie eine Sortieranlage installiert werden. Die Investitionskosten liegen bei insgesamt 44 Mio. US\$, wovon 21 Mio. für den Deponieneubau, 10,4 Mio. für die Gasverstromung, 8 Mio. für die Sortieranlage und weitere 4,6 Mio. für Straßen, Wege und Landschaftsbaumaßnahmen vorgesehen sind (World Bank 2014). Präqualifiziert für das Projekt hatten sich MESOGEO S.A. aus Griechenland und die türkische Gesellschaft Gökşin (Mesogeos 2016).

Khmelnitsky, Oblast Khmelnytsky

Auf einer Fläche von 8,8 ha wurden bis 2007 14,8 Mio. m³ Abfall abgelagert (diese Angabe scheint fehlerhaft zu sein und sollte vor Ort überprüft werden). Die Deponie wurde 1956 in Betrieb genommen und dient der Entsorgung von Siedlungsabfällen von ca. 250.000 Einwohnern (Intecus 2011).

Kirovohrad / Kropywnyzkyj, Oblast Kirowohrad

Auf einer Fläche von 23 ha wurden bis 2007 10,9 Mio. m³ Abfall abgelagert. Die Deponie wurde 1949 in Betrieb genommen und dient der Entsorgung von Siedlungsabfällen von ca. 280.000 Einwohnern (Intecus 2011).

Krementchuk, Oblast Poltawa

Die Deponie wurde 1965 in Betrieb genommen. Bis 2007 wurden auf 28 ha 12,3 Mio. m³ Abfall von 245.000 Einwohnern abgelagert (Intecus 2011).

Eine Gasfassung mit 14 Gasbrunnen und einer Fackel wurde 2012 von der Fa. Haase installiert (Heers & Brockstedt 2018).

Kyiv Deponie #5, Pidhirtsi, Obukhiv, Kyiv

6,9 Mio. Tonnen Abfall wurden auf einer Fläche von 36 ha abgelagert. Eine Gasfassung und -verwertung ist seit 2012, mit Tedoma Cento 5x180 und JGC 320 GS-LL GE Jenbacher Gasmotoren, in Betrieb. Die Gasproduktion beträgt 1160 m³/h mit 51% CH₄ und die Stromerzeugung liegt bei 15.584 kWh. Investor: LNK Kyiv (LNK 2018).

Lugansk / Luhansk, Oblast Luhansk

2 Mio. Tonnen Abfall wurden auf einer Fläche von 11,6 ha abgelagert. Eine Gasfassung mit Fackel von Biogas Ltd UK wurde 2011 installiert. Gasmenge 200 – 600 m³/h (Gelethuka 2016).

Insgesamt werden Siedlungsabfälle der Region Lugansk auf 36 Deponien mit einer Gesamtfläche von 103 ha entsorgt. Die meisten dieser Deponien sind überfüllt. Die Popasna Industrieabfalldéponie in der Nähe des Dorfs Fuharivka wird als größtes ökologisches Risiko der Region Lugansk bezeichnet. Hier werden feste Industrieabfälle von Unternehmen aus der chemischen Industrie der Lysychansk-Rubizhne Gegend entsorgt (Luhansk Regional Military and Civil Administration 2016).

Lutsk / Luzk, Oblast Wolhynien

Die Deponie wurde 1991 in Betrieb genommen. Bis 2007 wurden auf 9,9 ha 3,6 Mio. m³ Abfall von 215.000 Einwohnern abgelagert (Intecus 2011).

Mariupol #1 und #2, Oblast Donetsk / Donezk

Die Deponien waren von 1967/1976 bis 2009/2011 in Betrieb. 120.000 Tonnen Siedlungsabfall wurden pro Jahr auf einer Fläche von 25 ha abgelagert. Die Höhe des

Deponiekörpers beträgt 15 – 30 m. Insgesamt wurden ca. 5,2 Mio. Tonnen Abfall abgelagert (Pukhnyuk et al 2014).

Aufgrund der Entsorgung industrieller Abfälle enthält der deponierte Abfall bis zu 40% inertes Material. Eine Deponiegasfassung ging 2010 in Betrieb und umfasst 52 Bohrungen, 3 Gasfassungspunkte und insgesamt 6,4 km Sammelleitungen. Eine HOFGAS Ready 800 Gaserfassungsanlage von Hofstetter wurde installiert. Die Gasproduktion beträgt 300 – 500 m³/h. Ein 170 kW Gasmotor zur Erzeugung von Strom kommt zum Einsatz (Gelethuka 2016).

Myronivka Deponie, Kyiv

Die Deponie liegt nordöstlich der Stadt Myronivka im Oblast Kyiv. Seit 1958 wurden 100.000 Tonnen Abfall auf einer Fläche von 4,7 ha abgelagert. Die Entfernung zur nächsten Siedlung beträgt ca. 800 m, zum Fluß Rosavka ca. 1400 m. Untersuchungen wurden im Zeitraum 2013 – 16 durchgeführt. Die Deponie liegt auf einer freien Grundwasserschicht (Aquifer). Die Tiefe des Grundwassers unterhalb der Deponie reicht von 3,60 bis 10,00 m. Boden-, Grundwasser- und Luftproben wurden analysiert. Die Bodenproben im Umfeld der Deponie wiesen Pathogene (Shigella Dysenteriae) auf, die Durchfall verursachen können (Ruhr). In den Luftproben wurden erhöhte Konzentrationen von Staub, Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Toluol gefunden. Die Grundwasserproben ergaben erhöhte Werte für Ammoniakstickstoff, BSB5, Schwebstoffe, Mineralöl, Nitrat, Phosphat, Chlorid etc. Die Trinkwasserqualität im benachbarten Dorf ist schlecht (Makarenko/Budak 2017).

Mykolaiv / Mikolayiw, Oblast Mikolayiw

JGC 320 GS-LL GE Jenbacher Gasmotoren mit einer Leistung von 1060 kW wurden installiert (Gelethuka 2016).

Riwne, Oblast Riwne

4,6 Mio. Tonnen Abfall wurden seit 1959 auf einer Fläche von 40 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 20,00 – 30,00 m (Pukhnyuk et al 2014).

Simferopol, Krim

1 Mio. Tonnen Abfall wurden seit 1981 auf einer Fläche von 10 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 10,00 – 12,00 m (Pukhnyuk et al 2014).

Storozhynets, Oblast Czernowitz

Storozhynets ist eine Kleinstadt mit 14.500 Einwohnern in der Nähe von Czernowitz im Südwesten der Ukraine. Die städtische Deponie wurde in den 90iger Jahren in Betrieb genommen und verfügt über keine Deponiebasisabdichtung, so dass es zu einer Kontaminierung des Grundwassers kam. Eine neue Deponie mit einer Fläche von 10 ha und einer Gesamtaufnahmekapazität von 263.000 m³ wurde geplant. Da in der Stadt Storozhynets ca. 14.500 m³ Siedlungsabfall pro Jahr anfallen, wurde mit einer Deponielaufzeit von 18 – 20 Jahren kalkuliert. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wurden noch keine Baumaßnahmen eingeleitet. In dem Artikel wird angeregt, die Planung zu überarbeiten, um moderne Sickerwasser- und Gaserfassungssysteme einzubeziehen (Choban/Winkler/Rogozynskyi 2012).

Oblast Zakarpattya / Transkarpatien

2010 wurde im Rahmen des ENPI-Programms der EU eine Bestandsaufnahme aller Deponien im Oblast Transkarpatien durchgeführt. Insgesamt bestehen 350 genehmigte und nicht genehmigte Deponien, von denen 268 (77%) in Betrieb und 68 (19%) außer Betrieb sind. Jedoch werden einige der Deponien, die offiziell als „nicht mehr in Betrieb“ klassifiziert werden, weiter illegal benutzt. 14 Deponien (4.0%) wurden von den zuständigen Kommunen geschlossen. Von den 350 Deponien sind 97 (28%) genehmigt und 253 (72%) nicht genehmigt. Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der Deponien pro Rajon (Verwaltungseinheit unterhalb des Oblasts):

Tabelle 2: Deponien im Oblast Transkarpartien (ENPI 2011)

| District Name | Total | Active | Inactive | Closed | Licensed | Unlicensed |
|---------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Berehove | 44 | 37 | 7 | - | 1 | 43 |
| Velyky | 26 | 26 | - | - | 1 | 25 |
| Vynohradiv | 37 | 14 | 23 | - | 2 | 35 |
| Volovets | 14 | 14 | - | - | 2 | 12 |
| Irshava | 33 | 20 | 6 | 7 | 1 | 32 |
| Mizhgirya | 24 | 1 | 23 | - | 1 | 23 |
| Mukachevo | 40 | 38 | 2 | - | 2 | 38 |
| Perechyn | 24 | 23 | 1 | - | 17 | 7 |
| Rakhiv | 17 | 16 | - | 1 | 15 | 2 |
| Svalyava | 10 | 4 | 1 | 5 | 10 | - |
| Tyachiv | 32 | 28 | 4 | - | 10 | 22 |
| Uzhgorod | 34 | 32 | 1 | 1 | 34 | - |
| Hust | 15 | 15 | - | - | 1 | 14 |
| TOTAL | 350 | 268 | 68 | 14 | 97 | 253 |

Abbildung 7: Karte der Deponien im Oblast Transkarpatien (ENPI 2011)



Vinnitsia / Winnyzja / Vinnica, Oblast Winnyzja

Auf einer Fläche von 10 ha wurden 3 Mio. Tonnen Siedlungsabfall aus Winnyzja, eine Stadt südwestlich von Kyiv mit ca. 370.000 Einwohnern, abgelagert. Eine Gasfassung mit 12 Gasbrunnen und einer Fackel wurden 2012 von der Fa. Haase installiert (Heers & Brockstedt 2018).

Als die Arbeiten an dem Projekt 2008 anfangen, war das Ziel, die Entgasung der Hausmülldeponie durchzuführen und CO₂ Zertifikate zu generieren. Zuerst wurden Gasanalysen und eine Projektstudie erstellt. Am 16.12.2008 wurde ein Rahmenvertrag mit der Stadt Vinnica unterschrieben. Im Jahre 2009 erhielt die Firma AEU den erforderlichen „Letter of Endorsement“ vom deutschen Umweltbundesamt und von der Nationalen Agentur für Investitionen der Ukraine. Im Jahre 2010 wurden 6 Gasbrunnen gebohrt und eine Probeentgasung durchgeführt. Aufgrund dieser wurde das Gasfassungssystem 2011 um 8 Gasbrunnen erweitert und mit der Generierung von CO₂ Zertifikaten begonnen. Bis zum 31.08.2016 konnten 10.437.316,00 m³ schädliches Deponiegas gefasst und verbrannt werden. Dabei betrug der Anteil von

Methan (CH₄) 4.850.989 m³. Dies entspricht 3.492,713 t CH₄. Auf Grund der internationalen politischen Situation verfiel der Zertifikatspreis, so dass eine wirtschaftliche Verwertung nicht mehr gegeben war. Im Juni 2014 führte die Ukraine den „Grünen Tarif“ auch für Deponiegas ein. Das Gasfassungssystem wurde abermals um 10 Gasbrunnen erweitert. Zudem wurde ein Blockheizkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1 MW aufgestellt. Die Gesamtinvestitionssumme betrug ca. 1,9 Millionen €. Ab Mai 2015 wird Strom erzeugt (AEU 2016).

Yalta, Krim

1,3 Mio. Tonnen Abfall wurden von 1973 bis 2010 auf einer Fläche von 5,7 ha abgelagert. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 40,00 – 50,00 m. 700 m³/h Deponiegas mit 45 Vol.% CH₄ wird erzeugt. Eine HOFGAS Ready 800 Gasfassungsanlage und eine Fackel wurden 2008 von Hofstetter installiert (Gelethuka 2016).

Zaporozhje / Saporischschja, Oblast Saporischschja

14 Tonnen Abfall wurden zwischen 1952 und 2012 abgelagert, seit 1974 sind es 3,2 Mio. Tonnen. Die Fläche beträgt 80 ha und die Höhe des Deponiekörpers 25,00 m (Pukhnyuk et al 2014).

Eine Gasfassung und Fackel wurden 2011 von Haase installiert (Gelethuka 2016).

AEU installiert BHKWs mit EBRD-Finanzierung (AEU 2016).

Zhytomyr / Schytomyr, Oblast Schytomyr

Auf der Deponie, die 1957 in Betrieb genommen wurde, wurden die Siedlungsabfälle von ca. 300.000 Einwohnern auf insgesamt 18,7 ha abgelagert – bis 2007 ca. 8 Mio. m³ (Intecus 2011).

Eine Deponieentgasungs- und Gasverwertungsanlage, mit JGC 320 GS-LL GE Jenbacher Gasmotoren mit einer Leistung von 1060 kW, wurde installiert (Gelethuka 2016).

Nach einem aktuellen Bericht aus dem Jahr 2017 wurden seit 1957 auf der Deponie, die sich auf der Andriivska Straße im nördlichen Teil der Stadt Schytomyr befindet, 12 – 15 Mio. m³ Abfall abgelagert. Mittlerweile nimmt das Gelände eine Fläche von 21,6 ha ein, wobei die reine Deponiefläche 18,7 ha beträgt. Die Höhe des Deponiekörpers beträgt 30 m. Das nächste Wohngebiet liegt nur 500 m entfernt. Die Abfallzusammensetzung wird folgendermaßen angegeben: Speisereste 33,1%, PPK 5,9%, Metall 3,3%, Kunststoffe 13,2%, Holz 4,1%, Glas 13,5%, Textilien 2%, Leder

und Gummi 1,4%, Bauabfälle 3,7%, Straßenkehricht 11% und sonstige Abfälle 8,8%. Die reine Siedlungsabfallmenge, die pro Jahr deponiert wird, beträgt 162.200 m³ oder 54.000 Tonnen, was einem spezifischen Gewicht von 333 kg/m³ entspricht. Der Feuchtegehalt entspricht 60 %, so dass etwa 32.400 m³ Wasser pro Jahr mitdeponiert werden. Hinzu kommen im Schnitt 105.094 m³ Regenwasser im Jahr. Die Verdunstung beträgt 86.020 m³ pro Jahr, so dass die Sickerwassermenge, die sich in der Deponie neu bildet, 51,470 m³ pro Jahr oder 141 m³/Tag entspricht. Das Sickerwasser wird in Becken gesammelt. Nach der Schneeschmelze oder schweren Regenfällen besteht die Gefahr, dass Sickerwasser austritt und in den nahegelegenen Kroshenka Fluß fließt. Sickerwasserproben wurden von einem Team der Technischen Universität Schytomyr entnommen und von der Überwachungsbehörde des Oblasts Schytomyr analysiert (SEI – State Ecological Inspectorate). Es wurden erhöhte Werte für Phosphate, Eisen, Cobalt, Cadmium, Blei, CSB, BSB, Alkalinität und Härte für den Zeitraum 2009 bis 2016 festgestellt (Podchashinskiy / Kotsiuba / Yelnikov 2017).

1.2 Rechtliche Grundlagen

1.2.1 *Ukrainisches Recht*

Assoziierungsabkommen mit der EU

Im Assoziierungsabkommen mit der EU (EU Assoziierungsabkommen 2014), das am 1.1.2016 in Kraft getreten ist, wird in Kapitel 6 Umwelt eine Zusammenarbeit bei Umweltthemen vereinbart, wobei Artikel 363 und Anhang XXX eine schrittweise Annäherung an die Umweltvorschriften der EU festlegen. Bezüglich der Abfall- und Kreislaufwirtschaft werden folgende Vereinbarungen getroffen:

- Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG in nationales Recht innerhalb von 3 Jahren und Erstellung von Abfallwirtschaftsplänen unter Berücksichtigung der fünfstufigen Abfallhierarchie (Vermeidung, Aufbereitung, Recycling, energetische Verwertung, Beseitigung). Innerhalb von 5 Jahren ist das Verursacherprinzip einzuführen, nach dem die Kosten der Abfallbewirtschaftung vom Abfallerzeuger oder -besitzer zu tragen sind. Die gleiche Frist gilt für die Einführung der erweiterten Herstellerverantwortung. Ein Genehmigungssystem für Betreiber von Abfallverwertungs- und Abfallbeseitigungsanlagen ist ebenfalls innerhalb von 5 Jahren einzuführen.

- Umsetzung der Richtlinie 1999/31/EC über Abfalldeponien einschließlich der Erstellung einer nationalen Strategie zur Reduzierung der biologisch abbaubaren Abfälle, die auf Deponien gelangen. Innerhalb von 6 Jahren sind Genehmigungsverfahren, Annahmekriterien, Kontroll- und Nachsorgeregeln für Deponien festzulegen. Weiterhin ist ein Nachrüstprogramm gemäß Artikel 14 der Deponierichtlinie für vorhandene Deponien einzuführen (siehe 1.2.2 EU-Recht unten).

Die nachfolgend erläuterte Nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2030 bezieht sich explizit auf das Assoziierungsabkommen von 2014 mit der EU.

Nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2030

Am 08.11.2017 hat die ukrainische Regierung eine neue nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2030 verabschiedet. Eine zentrale Forderung ist es, die Deponierung von Siedlungsabfällen erheblich zu senken – ein Ziel, dass mit der Einführung der getrennten Sammlung und Verwertung von Wertstoffen und dem Bau von thermischen Behandlungsanlagen erreicht werden soll. Die Umsetzung der Strategie erfolgt in drei Stufen: 2017 – 2018, 2019 – 2023 und 2024 – 2030. Es sind u.a. folgende Ziele vorgesehen:

| | Basiswert 2016 | 2017-2018 | 2019-2023 | 2024-2030 |
|--|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Anzahl Ortschaften mit getrennter Abfallsammlung | 575 | 800 | 2500 | 5000 |
| Anzahl E-Schrott-Verwertungszentren | k.A. | 25 | 100 | 250 |
| Anzahl Aufbereitungsanlagen für Sekundärrohstoffe | 65 | 100 | 250 | 800 |
| Anzahl Kompostieranlagen | 20 | 70 | 150 | 500 |
| Verwertungsquoten für Verpackungen in % | k.A. | k.A. | 60 | 65 |
| Anteil der Siedlungsabfälle, die verwertet werden in % | 3,04 | 5 | 15 | 50 |
| Anzahl Müllverbrennungsanlagen | 1 | 3 | 15 | 20 |
| Anteil der Siedlungsabfälle, die thermisch behandelt werden in % | 2,37 | 5 | 7 | 10 |
| Anzahl Siedlungsabfalldeponien | 6000 | 5000 | 1000 | 300 |

| | | | | |
|--|----|----|----|----|
| Anteil der Siedlungsabfälle, die deponiert werden in % | 95 | 80 | 50 | 30 |
| Anzahl EU-konformer Deponien gemäß Richtlinie 1999/31/EG | 0 | 5 | 25 | 50 |

Tabelle: Ziele der Nationalen Abfallwirtschaftsstrategie 2030 (Nationale Abfallwirtschaftsstrategie 2017)

Eine Vielzahl von organisatorischen, technischen und rechtlichen Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele sind vorgesehen. Auch in den Bereichen Bildung, Öffentlichkeitsarbeit und Forschung und Entwicklung sollen Projekte angestoßen werden. Auf der gesetzgebenden Ebene sind folgende EU-Richtlinien in nationales Recht aufzunehmen:

- Richtlinie 1994/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle
- Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien
- Richtlinie 2006/21/EG über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie
- Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren
- Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie)
- Richtlinie 2012/19/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Im Bereich der Siedlungsabfälle sind kostendeckende Abfallgebühren für Haushalte und Gewerbe sowie mehr Wettbewerb bei der Durchführung von Entsorgungsdienstleistungen einzuführen. Die landesweite Flächenabdeckung bei der Sammlung von Abfällen ist zu verbessern und die getrennte Sammlung von Wert- und Schadstoffen auszubauen. Ebenfalls sind Annahmestellen für Wert- und Schadstoffe sowie Sperrmüll und Bauabfälle zu errichten. Die Eigenkompostierung soll gefördert werden. Interkommunale Kooperationen sind zu vereinbaren, um optimale Gebietsgrößen für den Betrieb von Verwertungs- und Beseitigungsanlagen sicherzustellen. Für den Bau moderner Deponien wird ein Bevölkerungscluster von 400.000 Einwohnern konstatiert. Zudem sind Umschlagstationen zu planen, um die Transportwege und -kosten für Siedlungsabfälle möglichst gering zu gestalten. Falls es Bedarf seitens der Zementindustrie gibt, sollen Pilotprojekte zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen auf der Basis von mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen geplant werden. Auch die Anforderungen für die Zusammensetzung der Ersatzbrennstoffe sind festzule-

gen. Speziell für Verpackungsabfälle ist das Prinzip der erweiterten Produzentenverantwortung einzuführen. Im Zusammenhang mit den Entsorgungstarifen, ist ein Garantiemechanismus für die Erstattung der Kosten für Bau, Betrieb, Schließung, Rekultivierung und Nachsorge von Siedlungsabfalldeponien einzuführen. Die Regelungen für die Genehmigung, den Bau, den Betrieb bzw. Weiterbetrieb und die erforderlichen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen sind gemäß der EU-Richtlinie 1999/31/EG umzusetzen (siehe nachfolgenden Abschnitt 1.2.2 EU-Recht).

Zur Koordinierung der Umsetzung der nationalen Abfallwirtschaftsstrategie 2030 wurde im April 2018 ein Koordinierungsrat unter Leitung des Vizepremiers und Ministers für Regionalentwicklung, Bau, Wohnungswirtschaft und kommunale Dienstleistungen, Hennadii Zubko, ins Leben gerufen. Die Hauptaufgaben des Rats bestehen in der Koordinierung der zentralen und lokalen Staatsorgane bei der Erstellung und Verabschiedung von Abfallwirtschaftsplänen, in der Anpassung der ukrainischen Abfallgesetze an die entsprechenden EU-Richtlinien und in der Überwachung der Umsetzungsmaßnahmen (Zubko 2018).

Abfallgesetz

Das Abfallgesetz der Ukraine 1998 mit Änderungen aus den Jahren 2002, 2004, 2010, 2012, 2014, 2015, 2017 und 2018 ist ein umfassendes Regelwerk, das eine Vielzahl rechtlicher, organisatorischer und wirtschaftlicher Bestimmungen zur Vermeidung, Minimierung, Sammlung, Transport, Lagerung, Aufbereitung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen beinhaltet. Artikel 21 regelt die Aufgaben der lokalen Selbstverwaltungseinheiten. Darunter fallen u.a. die Organisation der Sammlung und Entsorgung von Siedlungsabfällen (Hausmüll und Gewerbeabfälle von kleineren Gewerbeeinheiten) einschließlich der getrennten Sammlung von Wertstoffen. Unautorisierte Deponien in ihrem Territorium sind zu entfernen. Auch die Genehmigung von Anlagen für die Lagerung und Entsorgung von Abfällen ist Aufgabe der lokalen Selbstverwaltung, obwohl es hier Überschneidungen mit den regionalen Stellen der Zentralverwaltung des Landes gibt. Anlagen, in denen Abfälle erzeugt, gelagert oder entsorgt werden, sind nach Artikel 29 von den regionalen Stellen der Zentralverwaltung zu überwachen – mit der Ausnahme der Städte Kiew und Sewastopol, die diese Aufgaben selbst zu erfüllen haben. Interessanterweise enthält Artikel 32 des Abfallgesetzes seit Anfang 2018 ein Deponierungsverbot für unbehandelte Abfälle. In Ar-

tikel 36 wird festgelegt, dass Deponien über Vorrichtungen zum Schutz des Grundwassers und zur Sammlung von Deponiegas und Sickerwasser verfügen müssen (Abfallgesetz 1998).

Gesetzesentwürfe für die Entsorgung und Verwertung von Elektronikschrott und Altbatterien

Im Rahmen eines EU-Twinning-Projektes wurden Gesetzesentwürfe für die Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräte und von Altbatterien und -akkumulatoren entwickelt. Vorgesehen ist die Einführung der erweiterten Produzentenverantwortung und die getrennte Erfassung beider Stoffströme, die zukünftig auch nicht mehr auf Siedlungsabfalldeponien beseitigt werden dürfen. Hersteller können entweder individuelle oder gemeinsame Rücknahmesysteme aufbauen. Sammel- und Verwertungsquoten sind festgelegt. (Twinning 2017)

1.2.2

EU-Recht

Rechtliche Einschätzung

– Abfalldeponien

Regelungen zu Genehmigungen von Deponien und zu deren Betrieb sind in der 1999 eingeführten Richtlinie 1999/31/EG (vgl.[38]) enthalten. Ziel der Richtlinie ist es, „durch die Festlegung strenger betriebsbezogener und technischer Anforderungen in Bezug auf Abfalldeponien und Abfälle Maßnahmen, Verfahren und Leitlinien vorzusehen, mit denen während des gesamten Bestehens der Deponie negative Auswirkungen der Ablagerung von Abfällen auf die Umwelt, insbesondere die Verschmutzung von Oberflächenwasser, Grundwasser, Boden und Luft, und auf die globale Umwelt, einschließlich des Treibhauseffekts, sowie alle damit verbundenen Risiken für die menschliche Gesundheit weitestmöglich vermieden oder vermindert werden.“

Es sind ebenso Regelungen über bestehende Deponien und Übergangsfristen für die ggf. erforderlichen Betriebsumstellungen ausgeführt. Bezüglich des Weiterbetriebs bestehender Deponien werden in Artikel 14 folgende Maßnahmen festgelegt: Die Betreiber haben innerhalb eines Jahres ab Inkrafttreten der Richtlinie ein Nachrüstungsprogramm zur Erfüllung der Anforderungen der Richtlinie vorzulegen. Anhand dieses Nachrüstungsprogramms entscheiden die zuständigen Behörden, ob ein Weiterbetrieb zulässig ist oder ob die Deponie stillgelegt werden muss. Bei Wei-

terbetrieb legen die zuständigen Behörden eine Durchführungsfrist für die erforderlichen Arbeiten fest, wobei alle vorhandenen Deponien spätestens innerhalb von acht Jahren die Anforderungen der Richtlinie zu erfüllen haben.

In der Richtlinie aufgeführte Begriffsdefinitionen sind auch in der Richtlinie über Abfälle (siehe folgenden Spiegelstrich) enthalten. Im Anhang I der Richtlinie sind Anforderungen an den Deponiestandort und notwendige Sicherungsmaßnahmen zusammengestellt. Anhang II enthält Regelungen zu Abfallannahmekriterien und -verfahren, Anhang III solche zu Mess- und Überwachungsverfahren während des Betriebs und der Nachsorgephase.

– Abfälle

Mit Inkrafttreten der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle (vgl. [39]) wurden folgenden Richtlinien aufgehoben:

- 75/439/EWG über Altölbeseitigung
- 91/689/EWG über gefährliche Abfälle (vgl. [40])
- 2006/12/EG über Abfälle (vgl. [41])

In der Richtlinie ist in 7 Kapiteln beginnend mit Begriffsbestimmungen der Umgang mit Abfällen geregelt. In 4 Anhängen der Richtlinie werden

- Beseitigungsverfahren
- Verwertungsverfahren
- Gefahrenrelevante Eigenschaften der Abfälle
- Beispiele für Abfallvermeidungsmaßnahmen nach Artikel 29

benannt. In einem Anhang V ist eine Entsprechungstabelle enthalten, in der auf die vorhergehenden Richtlinien Bezug genommen wird.

– Abfallverzeichnis

Im Mai 2000 hat die Kommission unter der Nummer 2000/532/EG eine Entscheidung über ein Abfallverzeichnis mit dem Aktenzeichen K(2000) 1147 bekannt gegeben (vgl. [43]). Auf der Seite von EUR-Lex¹ ist dazu angegeben, dass das Datum des Inkrafttretens wegen ausstehender Mitteilung unbekannt oder der Rechtsakt noch nicht in Kraft ist.

Diese Kommissionsentscheidung zum Abfallverzeichnis wurde in den Entscheidungen der Kommission unter

- a) 2001/118/EG (vgl. [47]),
- b) 2001/119/EG (vgl. [1]) sowie
- c) 2001/573/EG vgl. [45])

geändert. Für diese Änderungen wurden jeweils Termine für die Gültigkeit der Entscheidungen genannt. In einem Beschluss des Gemeinsamen EWR-Ausschusses (vgl. [46]) vom 01.02.2002 wurden die Entscheidungen über das Abfallverzeichnis und die Änderung unter Lit. a) und b) in den Anhang XX des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum aufgenommen.

In der Richtlinie 2008/98/EG (vgl. [39]) wird im Artikel 7 Abfallverzeichnis ausdrücklich Bezug genommen auf die Entscheidung 200/532/EG. Unter Berücksichtigung der Änderungen und der Nennung in der Richtlinie ist davon auszugehen, dass das Abfallverzeichnis für die Einordnung von Abfällen hinsichtlich der Einstufung in gefährlich oder nicht gefährlich zumindest genutzt werden kann.

2 Umweltgefahren durch eine Hausmülldeponie

2.1 Abfall und Zusammensetzung Hausmüll

2.1.1 Definition und Zusammensetzung Abfall

2.1.1.1 Definition

Abfall ist ursprünglich die Bezeichnung für alle Stoffe, die bei der Bearbeitung eines Rohlings oder der Zubereitung von Lebensmitteln herabfielen, die also nicht unmit-

¹ (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32000D0532>, letztmaliger Aufruf am 09.03.2018)

telbares Ziel der Tätigkeit waren. Da man sich dieser Stoffe entledigen wollte, wurden auch alle anderen Stoffe oder Sachen, der man sich nach Gebrauch entledigen wollte, sinngemäß als Abfall bezeichnet.

Abfälle sind also alle Stoffe oder Produkte, deren Herstellung nicht unmittelbares Ziel des Produktionsvorganges ist. Abfälle werden grundsätzlich unterschieden in gefährliche und nichtgefährliche Abfälle. Physikalisch wurde der Begriff Abfall zunächst auf feste Stoffe beschränkt, dann auf flüssige Abfälle erweitert. Dabei wurde stets zwischen Abwasser, das nach dem Wasserrecht zu beurteilen ist, und flüssigen Stoffen unterschieden.

Definition gemäß Richtlinie 1999/31/EG

„Artikel 2 Begriffsbestimmung

- a) „Abfälle“ sind alle Stoffe oder Gegenstände, die von der Richtlinie 75/442/EWG erfasst werden
- b) „Siedlungsabfälle“ sind Abfälle aus Haushalten sowie andere Abfälle, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus Haushalten ähnlich sind;
- c) „gefährliche Abfälle“ sind alle Abfälle, die unter Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 untergefährliche Abfälle fallen;
- d) „nicht gefährliche Abfälle“ sind Abfälle, die nicht unter Buchstaben c) fallen;
- e) „Inertabfälle“, sind Abfälle, die keinen wesentlichen physikalischen, chemischen oder biologischen Veränderungen unterliegen. Inertabfälle lösen sich nicht auf, brennen nicht und reagieren nicht in anderer Weise physikalisch oder chemisch, sie bauen sich nicht biologisch ab und beeinträchtigen nicht andere Materialien, mit denen sie in Kontakt kommen, in einer Weise, die zu Umweltverschmutzungen führen oder sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken können. Die gesamte Abbaubarkeit und der Schadstoffgehalt der Abfälle und die Ökotoxizität des Sickerwassers müssen unerheblich sein und dürfen insbesondere nicht die Qualität von Oberflächenwasser und/oder Grundwasser gefährden.“ [7]

2.1.1.2 Gefährliche Abfälle gemäß 91/689/EWG (nicht mehr gültig, ersetzt durch [8])

„Artikel 1

....

(4) Im Sinne dieser Richtlinie sind "gefährliche Abfälle":

- Abfälle, die in einem auf den Anhängen I und II der vorliegenden Richtlinie beruhenden Verzeichnis aufgeführt sind, das spätestens sechs Monate vor dem Beginn der Anwendung dieser Richtlinie nach dem Verfahren des Artikels 18 der Richtlinie 75/442/EWG zu erstellen ist. Diese Abfälle müssen eine oder mehrere der in Anhang III aufgeführten Eigenschaften aufweisen. In diesem Verzeichnis wird dem Ursprung und der Zusammensetzung der Abfälle und gegebenenfalls den Konzentrationsgrenzwerten Rechnung getragen. Das Verzeichnis wird in regelmäßigen Abständen überprüft und gegebenenfalls nach dem genannten Verfahren überarbeitet;
- sämtliche sonstigen Abfälle, die nach Auffassung eines Mitgliedstaates eine der in Anhang III aufgezählten Eigenschaften aufweisen. Diese Fälle werden der Kommission mitgeteilt und nach dem Verfahren des Artikels 18 der Richtlinie 75/442/EWG im Hinblick auf eine Anpassung des Verzeichnisses überprüft.“ [9]

Anmerkungen

1. Die Bezeichnung als "giftig" (und "sehr giftig"), "gesundheitsschädlich", "ätzend" und "reizend" erfolgt nach den Kriterien in Anhang VI Teil I.A und Teil II.B der Richtlinie 67/548/EWG des Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe (1), geändert durch die Richtlinie 79/831/EWG des Rates (2).

2. Zusätzliche Angaben zu den Bezeichnungen "krebserzeugend", "teratogen" und "mutagen" unter Berücksichtigung des derzeitigen Kenntnisstandes sind im Leitfa-den für die Einstufung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe und Zubereitungen in Anhang VI (Teil II.D) der Richtlinie 67/548/EWG, geändert durch die Richtlinie 83/467/EWG der Kommission (1), enthalten.

2.2 Umsetzungsprozesse in einer Hausmülldeponie

2.2.1 Anaerober Abbau

Der vollständige anaerobe Abbau von Kohlenhydraten, der Hauptmasse der abbaubaren Abfälle, endet in der Produktion von Biogas, ein Gemisch aus Kohlendioxid und Methan.

Eiweißverbindungen werden von Organismen als körpereigene Stoffe, durch Umbau der Kohlenhydrate und Einbau weiterer Stoffe, vor allem Stickstoff, Schwefel und Phosphor, gebildet und gelangen vor allem durch die Küchenabfälle sowie durch Abfälle der Lebensmittelindustrie auf Deponien.

Die Endstufen des anaeroben Eiweißabbaus sind vor allem Ammoniumverbindungen, und in Verbindung mit im Müll enthaltenen Metallen, ungelöste Sulfide und Phosphorverbindungen. So lange diese Verbindungen stabil sind, treten aus den Endstufen keine Gerüche auf.

Das Ammonium kann aber leicht aus der Verbindung verdrängt werden, z.B. durch Kalzium oder Kalkhydrat und gast dann als Ammoniak aus (ein stechend riechendes Gas). Entstehen während des Abbaus organische Säuren, bildet Schwefel u.a. das intensiv riechende und toxische Gas „Schwefelwasserstoff“. Daraus folgt, dass Eiweißverbindungen auch nach idealem anaeroben Abbau aus den Endprodukten Geruchsstoffe bilden, wenn nachträglich ungünstige Einflüsse auftreten.

Eiweißhaltige Abfälle enthalten deshalb ein höheres Geruchspotential, als die Kohlenhydrate. Sie sind jedoch als Aufbaustoffe der Mikroorganismen unverzichtbar, wenn diese die Kohlenhydrate abbauen sollen. Einer Abtrennung der eiweißhaltigen Abfälle und deren getrennte Behandlung durch Senkung des Geruchspotentials ist deshalb nur dort angebracht, wo diese Abfälle konzentriert angeliefert werden, zum Zeitpunkt der Anlieferung bereits intensive Geruchsemissionen abgegeben und zum Abbau des Mülls nicht gebraucht werden. Die gemeinsame Behandlung getrennt anfallender organischer Abfälle, z.B. Müll und Klärschlamm, ist daher sehr sinnvoll. Der Abbau der Abfälle verläuft über mehrere Zwischenschritte. Eine Übersicht über die Hauptabbauwege gibt Schobert in nachfolgender Abbildung. Hier unterscheidet er die 3 Hauptabschnitte: Hydrolyse, Säurebildung und Methanbildung.

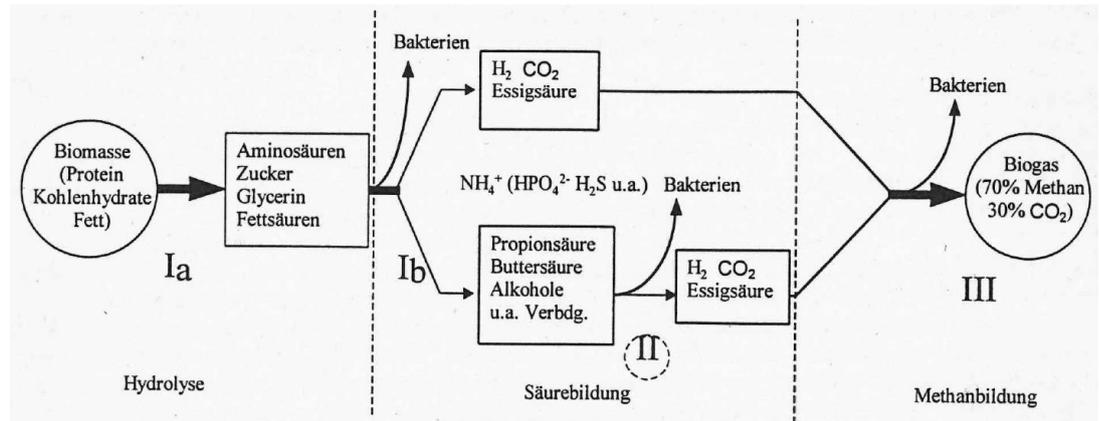


Abbildung 8: Hauptabwege der organischen Abfälle durch anaerobe Bedingungen (Schobert, 1978 [7])

Innerhalb der Säurebildung zur Essigsäure gibt es eine Verzweigung der Propion- und Buttersäure, Alkohole und andere Stoffe, die zusammen mit den Fettsäuren der erstgenannten Stoffe ein erhebliches Geruchspotential bilden. Das Schema zeigt auch, dass durch einen ungestörten, zügigen Abbau das Geruchspotential im großen Umfang verringert werden kann.

Die Abbildung 9 zeigt eine nach Oxidationswegen aufgeschlüsselte Systematik der Abbauwege.

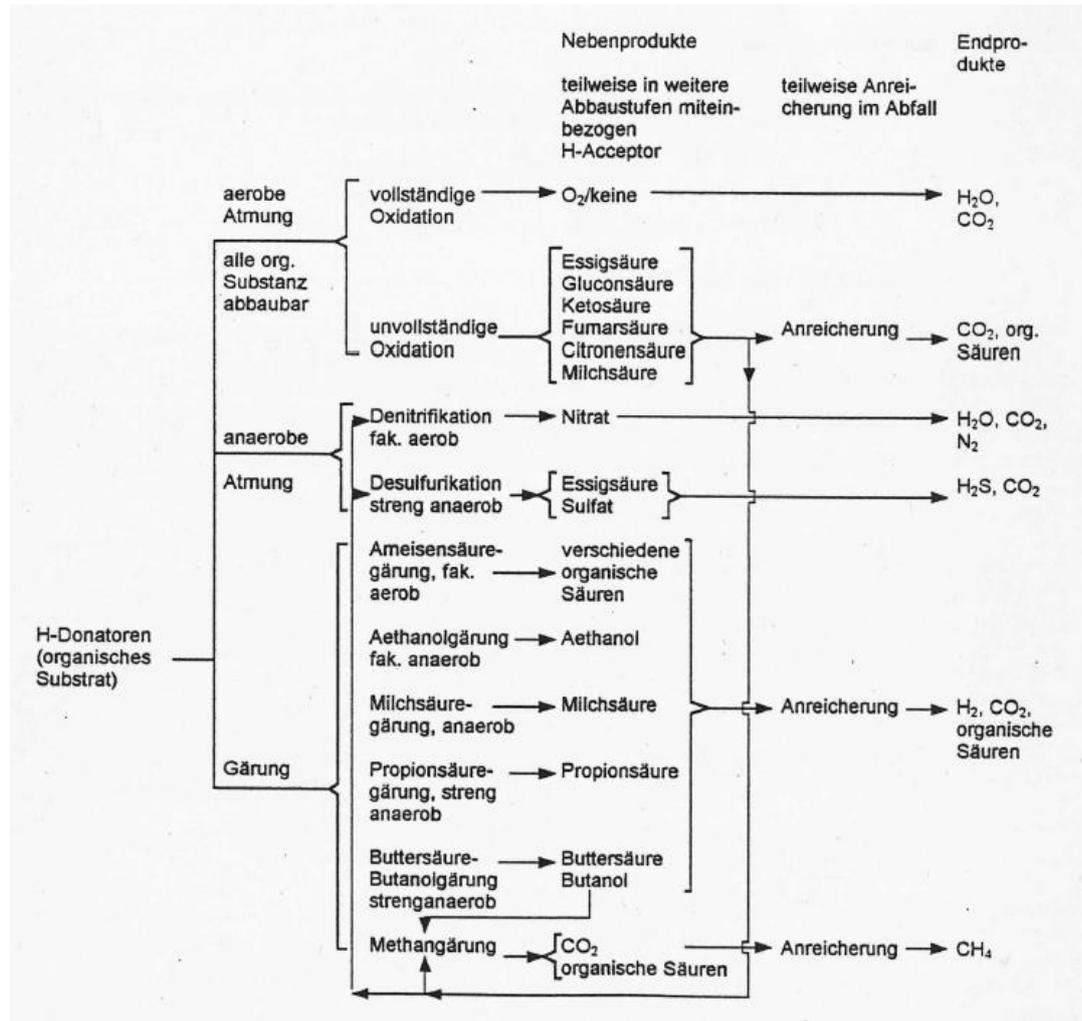


Abbildung 9: Systematik der Oxidationswege während des Abbaus organischer Abfälle (Battelle Institut, 1982 [8])

- Vollständige Oxidation von Luftsauerstoff: ohne stabile Zwischenprodukte, kein Geruch
- Vollständige Oxidation mit Sauerstoff: Bildung einfacher organischer Säuren
- unter günstigen Bedingungen weiterer Abbau der Säuren zu Kohlendioxid und Methan: kein Geruch
- oder Oxidation mit Sauerstoff aus Mineralverbindungen: kein Geruch bei Denitrifizierung
- Ammonium bei Ammonifizierung und Schwefelwasserstoff bei Desulfurikation, Bildung geruchsintensiver Gase

- Anaerober Atmung: Oxidation mit Sauerstoff durch Reduktion nach organischer Verbindung ohne vorausgehende Teiloxidation mit Luftsauerstoff: Geruchsbildung
- Gärung: Energiegewinn der Mikroorganismen durch Bildung energieärmerer Verbindung aus den großmolekularen Ausgangsstoffen, Oxidation des Kohlenstoffs zu CO₂ mit Sauerstoff aus organischer Substanz; über Säurebildung Abbau bis zum Methan möglich, wenn streng anaerob basisches Milieu herrscht, anderenfalls Entstehung konservierend wirkender organischer Säuren

In der nachfolgenden Übersicht sind Prozesse aufgeschlüsselt nach Ausgangsstoffen:

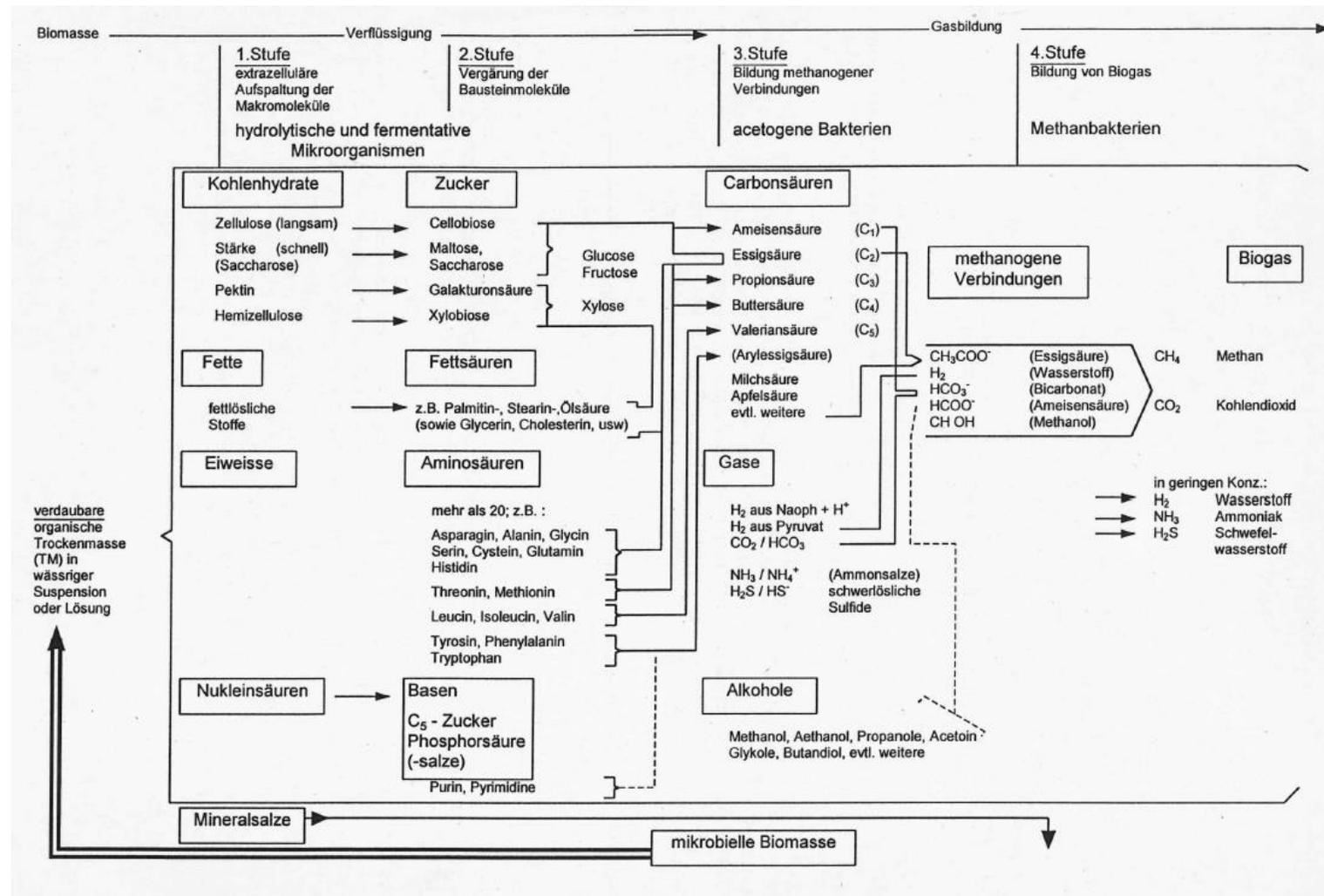


Abbildung 10: Hauptabbauwege unterschiedlicher Ausgangsstoffe nach deren Ablagerung (Maurer und Winkler, 1982 [9])

In der vorstehenden Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Zwischenprodukte der einfachen Kohlenhydrate wesentlich kürzer und problemloser im weiteren Abbau sind, als die der Fette und Eiweißverbindungen. Das Geruchspotential steigt danach eindeutig mit dem Fett- und Eiweißgehalt der Abfälle. Soweit noch Sauerstoff in die frische Müllschicht eindringen kann, findet ein kurzer unvollständiger anaerober Abbau statt, dem die Hydrolyse (saure Phase) folgt. Gekennzeichnet durch hohe CO_2 -Anteile und molekularen Wasserstoff.

Der weitergehende Abbau hängt davon ab, ob die höheren Konzentrationen konservierend wirkender Säuren soweit verdünnt werden bzw. mit dem Sickerwasser ablaufen, dass im basischen Milieu (Ammoniumentwicklung) der weitere Abbau bis zum Methan ablaufen kann. Der Verlauf der Fettsäureentwicklung und des Abbaus weist nach, dass erst in der IV. Phase (stabile Methanphase) die intensiven Geruchsstoffe weitgehend abgebaut sind. Die Dauer der einzelnen Phasen hängt von den Abbaubedingungen ab und ist sehr variabel.

Die Prozesse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

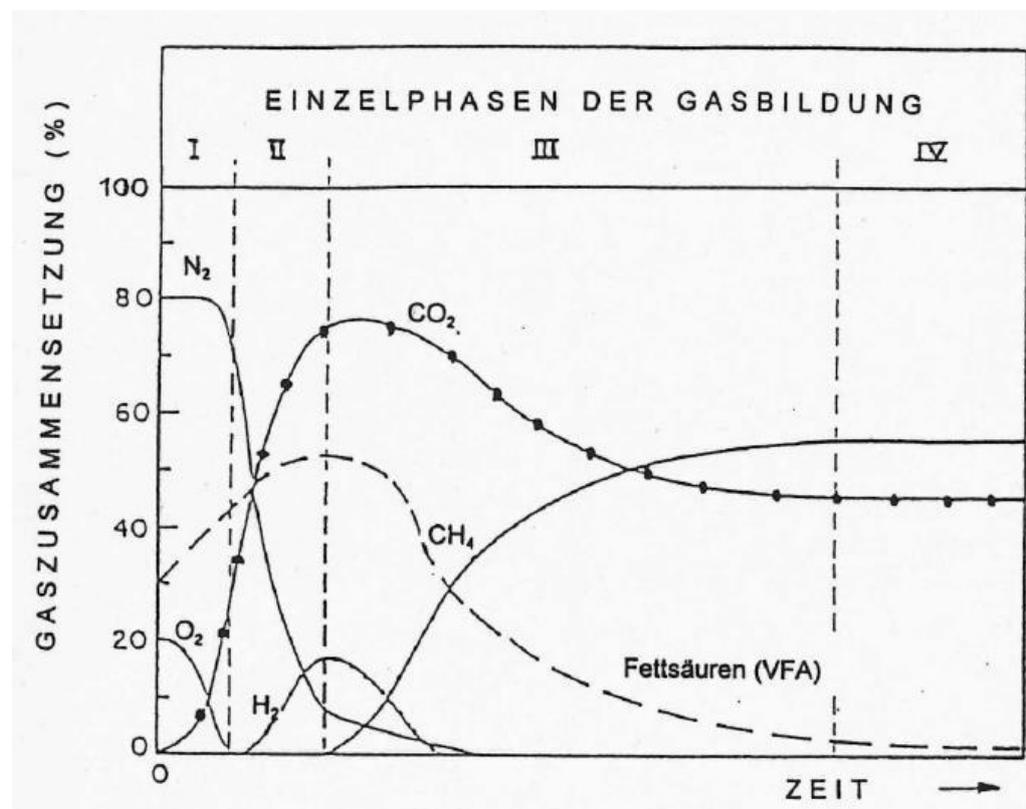


Abbildung 11: Auswirkung der unterschiedlichen Abbauphasen auf die Zusammensetzung der entstehenden Gashauptbestandteile (Farquhar und Roves, 1973 [10], ergänzt von Rees 1981 [11])

Die Darstellung der Gase der einzelnen Abbauschritte gilt nur für die Vorgänge in einem bestimmten begrenzten Abfallvolumen. In Deponien treten gleichzeitig unterschiedliche Abbauphasen auf. Die dabei entstehenden Gase werden in weiteren Abfallschichten weiter um- und abgebaut.

Für die Bewertung der Ausgasung ist zu beachten, dass auch toxische industrielle Gase in einem erheblichen Umfang enthalten sein können, so dass gleichzeitig mit der Frage der Geruchsbelästigung auch immer die Frage nach möglich toxischen Ausgasungen gestellt werden muss. Auch dann, wenn keine Geruchsbelästigung auftritt.

Weiter ist zu beachten, dass die Spannweite der Messwerte für alle Gase, als auch für die Hauptbestandteile wie CO₂, bei Null beginnt. Die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und der Betrieb der Deponie haben danach entscheidenden Einfluss darauf, ob z.B. ein sehr geruchsintensives Gas sowie Ethylmercaptan oder ein geruchsintensives und toxisches Gas, wie Schwefelwasserstoff, nahezu mit Null Volumenpromille oder aber mit 120 Volumenpromille im Gas enthalten ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entstehung geruchintensiver Gase auf sämtlichen Deponien nicht grundsätzlich verringert werden kann. Durch gezielte Verkürzung der sauren Gärung, ist deren Potential aber in großem Umfang reduzierbar. Die verbleibenden Gase sind durch Gasbehandlung zu beseitigen.

2.2.2 *Aerober Abbau*

Nach den grundlegenden Abbauvorgängen werden, unter vollständig aeroben Bedingungen, die organischen Kohlenhydrate zum geruchlosen Kohlendioxid und Wasser oxidiert. Schwefel, Stickstoff und Phosphor aus Eiweiß liegen oxidiert in geruchlosen Salzen wie: SO₄, NO₃ und PO₄ vor.

Danach müsste eine aerobe Mineralisierung der Abfälle ohne Geruchsbelästigung ablaufen. Die Geruchsentwicklung aus Kompostwerken beweist, dass aber auch dieser Abbauweg geruchintensive Zwischenprodukte liefert.

Der Unterschied zum anaeroben Abbau besteht darin, dass die in kleinen Mengen entstehenden typischen Geruchsstoffe des anaeroben Abbaus aerob weiter abgebaut werden können. Die dabei in kleinen Mengen entstehenden typischen Geruchsstoffe während des aeroben Abbaus sind kurzzeitig subjektiv akzeptabel.

2.3 Sickerwasser

2.3.1 Eintrag

Der Wassereintrag (die Differenz aus Niederschlag abzüglich Verdunstung) hängt ab vom Niederschlag, von der klimatisch möglichen Verdunstung und dem für die Verdunstung verfügbaren Wasservorrat an der Oberfläche der Abfälle. Aufgrund von durchgeführten Abflussmessungen an wassergesättigten Ablagerungen wurde festgestellt, dass unter durchschnittlichen mitteleuropäischen Bedingungen von unbewachsenen, verdichteten Mülloberflächen, von einer Oberfläche eines verdichteten Müll-Klärschlamm-Gemisches oder einer Bodenabdeckung nur maximal 18-20 mm des Niederschlagsereignisses in der folgenden Trockenperiode verdunsten. Für eine messbare hohe Verdunstung ist auch in langen Trockenperioden der kapillare Aufstieg zu gering. Der Wassereindrang in Deponien kann deshalb aus der klimatischen Wasserbilanz nach Haude abgeschätzt werden (Spillmann: [6]).

2.3.2 Speichkapazität im Müllkörper

Die Speicherkapazität von Abfall wird weitgehend von der faserhaltigen, organischen Substanz beeinflusst. Sie speichert etwa die gleiche Masse Wasser, die sie selbst trocken wiegt. Ihr Abbau verringert beträchtlich die Speicherkapazität. Im schlammfreien Müll sowie in wenig abgebauten aeroben Müll-Klärschlammgemischen wurden ca. 45% (auf das Gewicht bezogen) Wasser als Speicherkapazität gemessen. Das gerottete Müll-Klärschlammgemisch speichert dauerhaft etwa 40% (auf das Gewicht bezogen) Wasser.

Zur Zeit der Anlieferung enthält der Müll in der Regel ca. 25-30 Gewichtsprozent Wasser. Wird die Speicherkapazität durch eindringendes Niederschlagswasser gesättigt, nimmt 1 Tonne Müll-Trockensubstanz zusätzlich ca. 0,4 t bis 0,5 t Wasser auf.

Von den 0,4 t bis 0,5 t Wasser des gespeicherten Niederschlags fallen dann bis zu 0,25 t Wasser als Sickerwasser an, so dass effektiv nur 0,15 t bis 0,25 t Wasser je 1 t Müll-TS gespeichert werden.

Durch Konsolidation und hohe Auflasten kann ein weitgehend abgebauter und anschließend dünn-schichtig verdichteter Abfall sowohl mit, als auch ohne Schlamm, auf ca. 30 Gewichtsprozent entwässert werden. (Collins & Ranke 1986 [13]) Diese Möglichkeit besteht auch für die biologischen Ablagerungsmengen, wenn diese umgelagert und dünn-schichtig verdichtet werden oder wenn über alte Hausmüllablagerungen in großen Schichten Boden und Bauschutt abgelagert werden. „Die Reduktion des Wassergehaltes von 45 Gewichtsprozent auf 30 Gewichtsprozent setzt dann je Tonne Abfall bzw. Abfallgemisch 0,21 t Wasser frei.“ (Spillmann, [6])

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Müll zu Beginn der Ablagerung zwar eine hohe Speicherkapazität enthält, die aber durch Abbau verloren geht. Durch anschließende Konsolidierung wird mehr Wasser abgegeben, als vom feuchten Abfall anfangs als Anteil aus dem Niederschlag gespeichert werden kann. Wird der Abbau vor der Verdichtung gezielt durch aeroben Abbau mit Anfangstemperaturen über 70° C erzielt, wird das Wasser durch biochemische Oxidation zusätzlich zum Niederschlagsanteil von max. 20 mm je Ereignis verdunstet.

2.3.3 Schadstoffrückhalt durch Bindung im Abfall

Durch Untersuchung der organischen Substanz in Müll-Sickerwasser wurde nachgewiesen, dass durch den biochemischen Abbau huminstoffähnliche Substanzen entstehen, die mit fortschreitendem Abbau naturähnlicher werden. (Frimmel & Weis 1990 [14]).

Ein Kennzeichen der huminstoffähnlicher werdenden Abbauprodukte ist die zunehmende Komplexierungsfähigkeit für Schwermetalle. Das bedeutet, dass Schwermetalle mit zunehmendem Abbau fester an die organische Substanz gebunden werden. Der Austrag der Schwermetalle hängt davon ab, ob die metallbindende organische Substanz in der Deponie verbleibt oder abgebaut und mit dem Sickerwasser ausge-tragen wird. Wasser- und Feststoffhaushalt der Ablagerung beeinflussen deshalb

entscheidend den Austrag abgelagerter Schwermetalle. Zur Prognose von belasteten Abfallablagerung können aus den Untersuchungen von (Herklotz,1985 [15]) folgende Schlüsse gezogen werden:

- a) Die organische Substanz der Abfälle kann organische Chemikalien in großem Umfang absorbieren.
- b) Der Abbau der organischen Substanz erhöht die Sorptionsfähigkeit der verbleibenden Abbauprodukte, mindert deshalb nicht die Sorptionsfähigkeit der Abfallablagerung.
- c) Wird die organische Substanz durchströmt und sind die sorbierten Chemikalien bis dahin nicht abgebaut oder chemisch stabil festgelegt, ist deren Desorption möglich.

2.3.4 *Potentielle Belastung aus Siedlungsabfällen ohne industrielle Belastung*

2.3.4.1 *Organische Substanzen sowie natürliche Keime*

Für den praktischen Grundwasserschutz ist vor allem die Kenntnis der insgesamt zu erwartenden, weit transportierbaren Frachten maßgebend, die sich aus einer Fracht schwer abbaubarer Belastung ergeben. Summiert man die Frachten, die durch biochemischen Abbau beeinflussbaren Inhaltstoffe von infiltriertem Müllsickerwasser (organische Substanz, Ammoniumstickstoff, Nitratstickstoff, Sulfid, Sulfat und lösliches Eisen), über die Dauer des Versuches auf und errechnet daraus die mittlere Jahresfracht, so zeigt sich, dass die Konzentrationsspitzen im Müllsickerwasser, die in der Anfangsphase in Ablagerungen entstehen, nicht maßgebend für die Charakteristik der Dauerbelastung sind, da die organische Anfangsbelastung in der sauren Phase gut abbaubar ist.

Im Gegensatz zur organischen Belastung aus anaeroben Deponien, sind die organischen Stoffe aus biochemisch stabilisierten, permanent aeroben Deponien dadurch gekennzeichnet, dass sie einen signifikant hohen Anteil hochmolekularer, nicht wasserlöslicher Verbindungen enthalten, die natürlichen Huminstoffen weitgehend entsprechen. Das Spektrum der organischen Belastung aus aeroben Deponien entspricht bereits in weit größerem Maße dem der natürlichen Huminstoffe, als das Spektrum der organischen Substanz, die aus den Belastungen anaerober Deponien nach 100 m Fließstrecke neu gebildet wurde.

Für die langfristige Beurteilung organischer Grundwasserbelastung aus Deponien kann aus der differenzierten Charakterisierung der Ausgangsstoffe, deren Umwandlungsprodukte und der Neubildung gefolgert werden, dass die aus anaeroben Deponien ausgetragenen Stoffe zwar teilweise umgebaut werden (der CSB nimmt zunächst ab), dann aber durch Umbau und Neubildung organische huminstoffähnliche Substanzen entstehen (der CSB steigt wieder an), die auf kurzen Fließwegen nicht vollständig zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut bzw. zu unlöslichen Huminstoffen umgesetzt werden. Endprodukte sind Ausfällungen unlöslicher Huminstoffe am Korn, deren Bildung weit mehr Zeit und Fließstrecke erfordert, als der Abbau der Primärschubstanzen.

Aus Vorgenanntem folgt, dass für die Überwachungsbewertung von organischen Grundwasserbelastungen die Messung von Summenparametern, wie der des CSB notwendig sind, um die oxidierbar organische Masse der Belastung zu bestimmen, aber nicht hinreichend sind, die organische Grundwasserbelastung zu charakterisieren. Zur Beurteilung einer organischen Belastung sind außerdem sowohl die organischen Stoffe aus der wässrigen Phase, als auch die aus der Ablagerung am Korn so genau zu analysieren, dass deren Molekülaufbau mit dem natürlichen Huminstoff verglichen werden kann.

Die Indikatorkeime, repräsentativ für pathogene Keime, die z.B. aus Klärschlämmen nachweislich über das Müllsickerwasser hinaus das Grundwasser belasten können (Jung & Knoll, 1986 [16]), erreichen sowohl in unbelastetem als auch in belastetem Grundwasser Überlebenszeiten von mehr als 100 Tagen.

2.3.4.2 *Anorganische Stoffe*

Die Hauptbelastung des Grundwassers durch Salze, aus dem Abbau natürlicher organischer Substanzen, besteht aus löslichen Chloriden und Sulfaten in Korrespondenz zu unlöslichen Sulfiden sowie Ammonium in Korrespondenz zu Nitrat. Lösliches Eisen (Fe^{2+} -Ionen) wird zeitweilig als Belastung im Übergang von der sulfidischen zur unlöslichen dreiwertigen oxidischen (FeOOH) bzw. hydroxydischen Form ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) beobachtet. Eine weitere Belastung stellen die Eisen(II)-Ionen dar. Die Salzbelastung durch Chlorid in Müllsickerwasser der Deponien ist charakteristisch.

Stickstoff wird aus üblichen anaeroben Deponien als Ammonium ausgetragen. Aus permanent aeroben Deponien wird der Stickstoff fast vollständig als Nitrat ausgetragen. Hingegen ist aus permanent aeroben Ablagerungen die Fracht des löslichen Eisens als unbedeutend zu bilanzieren.

2.3.5 *Potentielle Belastungen aus industriellen Ablagerungen*

2.3.5.1 *Synthetische organische Verbindungen*

Zu nennen sind hier in erster Linie:

- Lösungsmittel,
- Holzschutzmittel und
- Pflanzenschutzmittel.

Bei den Lösungsmitteln erfolgt die Emission in erster Linie über die Gasphase. Der Abbau von Chlorphenolen (Holzschutzmittel) konnte in Müllsickerwasser aus einer aeroben Deponie mehrfach nachgewiesen werden.

Die Eliminationsleistung der einzelnen Pflanzenschutzmittel ist sehr unterschiedlich zu bewerten.

2.3.5.2 *Schwermetalle*

Es ist allgemein bekannt, dass die Schwermetallbelastung von Müllsickerwasser in der Regel zweitrangig, im Vergleich zur Belastung mit organischen Substanzen, ist.

2.4 *Deponiegas*

2.4.1 *Zusammensetzung (Haupt- und Spurengase in Deponien)*

Die nachfolgende Tabelle zeigt die sechs Hauptkomponenten und 15 der wichtigsten Spurengase von Deponiegas dar.

Tabelle 3 Haupt- und Spurengase in Deponie (LAGA-Merkblatt 1983 [17], Battelle-Inst. 1982 [8], Rettenberger, 1978 [18])

| Nr. | Komponente | chem. Formel | Konzentrationsbereich | | Bemerkung |
|-----|---|---|-----------------------|-----------|---|
| | | | | | |
| 1 | Methan | CH ₄ | 0 - 80 | Vol-% | |
| 2 | Kohlendioxid | CO ₂ | 0 - 80 | Vol-% | |
| 3 | Kohlenmonoxid | CO | 0 - 3 | Vol-% | |
| 4 | Wasserstoff | H ₂ | 0 - 3 | Vol-% | |
| 5 | Sauerstoff | O ₂ | 0 - 21 | Vol-% | |
| 6 | Stickstoff | N ₂ | 0 - 78 | Vol-% | |
| 7 | Ammoniak | NH ₃ | 0 - 100 | Vol-ppm | |
| 8 | Ethen | C ₂ H ₄ | 0 - 65 | Vol-ppm | |
| 9 | Ethan | C ₂ H ₆ | 0 - 30 | Vol-ppm | |
| 10 | Acetaldehyd | CH ₃ CHO | 0 - 150 | Vol-ppm | |
| 11 | Aceton | C ₂ H ₆ CO | 0 - 100 | Vol-ppm | |
| 12 | sonstige Kohlenwasserstoffe (ohne Aromaten) | C ₂ - C ₁₁ | je 0 - 50 | Vol-ppm | |
| 13 | Schwefelwasserstoffe | H ₂ S | 0 - 100 | Vol-ppm | in Einzelfällen höher |
| 14 | Ethylmercaptan | C ₂ H ₅ SH | 0 - 150 | Vol-ppm | Vermutliche Herkunft der Inhaltsstoffe aus abgelagerten Abfällen oder deren Spaltprodukte |
| 15 | Benzol | C ₆ H ₆ | 0 - 15 | Vol-ppm | |
| 16 | Toluol | C ₆ H ₅ CH ₃ | 0 - 15 | Vol-ppm | |
| 17 | Xylol | C ₆ H ₄ (GH ₃) ₂ | 0 - 15 | Vol-ppm | |
| 18 | Ethylbenzol | C ₆ H ₅ C ₂ H ₅ | 0 - 10 | Vol-ppm | |
| 19 | Vinylchlorid | C ₂ H ₃ Cl | 0 - 10 | Vol-ppm | |
| 20 | Halogenverbindungen (u.a. 1.1 Dichlorethen, Methylchlorid, Tetrachlorkohlenwasserstoff, Trichlorethen, Frigene) | | 0 - 100 | Vol-ppm | Inhaltsstoffe aus abgelagerten Abfällen |
| 21 | Wasserdampf | H ₂ O | i.d.R. | gesättigt | |

2.4.2 Einflussfaktoren auf den Gashaushalt

2.4.2.1 Milieubildung

Die Produktion von Deponiegas erfolgt überwiegend durch mikrobielle Abbaureaktionen. Nachfolgend genannte Faktoren sind wichtige Einflussgrößen bzgl. des Wachstums der Methanbakterien und somit auch für den Gashaushalt relevant:

1. Wassergehalt,
2. Temperatur,
3. Wassertransport,
4. Nährstoff-/ Substratangebot,
5. PH-Wert (Puffersystem),
6. toxische Stoffkonzentration und
7. Aufbau des Deponiekörpers.

Gastechnisch sind diese Faktoren an bestehenden Deponien bzw. Ablagerungen nur schwer zu ermitteln, da der Deponiekörper ein inhomogenes Stoffgemisch darstellt und repräsentative Ereignisse nicht zu erhalten sind.

1. Wassergehalt

In zahlreichen Versuchen wurde gezeigt, dass der Wassergehalt von Müll der wichtigste Einflussfaktor für die Methanbildung ist. In dem Bereich von 20-60 % Wassergehalt bewirkt eine Feuchtigkeitserhöhung um wenige Prozent eine deutliche Steigerung der Methanproduktion. Bei Gehalten über 60% ist die Methanbildung optimal. Aber in der Deponierealität kommen solch hohe Durchschnittsgehalte nicht vor. Der Grund liegt darin, dass die meisten Bakterien ein feuchtes Klima zum Wachstum benötigen. Hierzu ist eine Wasseraktivität von 0,9 bis 1,0 notwendig.

Die Wasseraktivität errechnet sich als Quotient aus dem Wasserdampfpartialdruck des Mülls zum Sättigungsdampfdruck über Wasser.

Das bedeutet, dass der Wasserdampfdruck im Gasraum einer Deponie mindestens 90% des Sättigungsdampfdrucks sein muss. Je nach Hygroskopizität (Hygroskopizität ist ein Synonym und beschreibt die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Umgebung, meist in Form von Wasserdampf, aus der Luftfeuchtigkeit zu binden) der Müllbestandteile sind die dazu notwendigen Wassergehalte unterschiedlich.

Ein inerter Müll wie Schlacke, Sand, Schrott usw. ist bei geringem Wassergehalt schon nass, während hygroskopischer Müll, mit hohem organischen Anteil oder salzhaltigen Abfällen noch bei einem hohen Wassergehalt trocken wirkt.

Im Normalfall hat der Deponiebereich oberhalb des Grundwasserspiegels Wassergehalte von 15-50%. Diese Gehalte unter 50% reichen zum Großteil nicht für eine optimale Methanproduktion aus. Dadurch ist der Wassergehalt ein ständig limitierender Faktor bei der Methanproduktion. In Ham, 1992 [19], werden Versuche beschrieben, die diese theoretischen Überlegungen bestätigen.

2. Temperatur

In Scharf, 1982 [20], Ham 1982 [19] und Dernbach 1982 [21] wird gezeigt, dass die Mülltemperatur die Methanbildung beeinflusst. Der überwiegende Teil der Methanbakterien zählt zur mesophilen Klasse, die einen maximalen Wachstumsbereich bei

10-45°C haben. Auch in der Praxis wurde unterhalb von 10°C und oberhalb 45°C keine Methanproduktion mehr festgestellt. Nach Spendlin, 1991 [36] liegt die Optimal-Temperatur für verschiedene Methanbakterien zwischen 30 und 40°C.

Durch die entstehende Wärme bei biologischen Prozessen kann der Müllkörper beträchtlich erwärmt werden. Bei ausreichend Wachstumsbedingungen sind in den Stufen II bis IV (vergleiche hierzu Kapitel 2.4.2.3) Erwärmungen von 15°C möglich, in der aeroben Stufe I sogar bis 30°C Erwärmung. Bis in 5m Tiefe herrschen normalerweise Temperaturen von 15-30°C und darunter 20-40°C. Es kommen aber durchaus sogenannte Hitzenester vor, in denen die Temperatur bis zu 55°C und mehr steigen kann.

3. Wassertransport

Auch die Wasserbewegung ist ein wichtiger Faktor. Die in der Stufe II (Vergleiche hierzu Kapitel 2.4.2.3) gebildeten organischen Säuren würden bei fehlender Wasserbewegung im Deponiekörper angereichert. Der entstehende Nährstoffüberschuss würde zu einer Veränderung einzelner Parameter (pH-Wert-Senkung) führen. Dies stellt eine Beeinflussung der Milieubedingungen der nachfolgenden Abbaustufen dar. Es kann grundsätzlich dadurch zu einer Abbauehemmung bis hin zum Stillstand des Abbauprozesses kommen.

4. Nährstoff- und Substratangebot

Die Zusammensetzung von Hausmüll, und besonders von Klärschlamm bietet überwiegend gute Wachstumsbedingungen für Bakterien. Bei Sonderabfall trifft das aber nicht zu. Die Kenntnis des Kohlenstoffgehaltes des abgelagerten Abfalls ist die wesentliche Voraussetzung für die Berechnung der Gasproduktion.

Entscheidend ist der Anteil, der auch tatsächlich von Bakterien abgebaut werden kann. Es muss sich um organisches Material handeln, das von den Bakterien der Stufe I oder Stufe II (Vergleiche hierzu Kapitel 2.4.2.3) angegriffen oder gespaltet werden kann.

Als Substrat kommen Küchenabfälle, Gartenabfälle, Papierproduktionsreste, tierische Abfälle, Textilien, Pilze, Schlämme aus Abwasserreinigung usw. in Frage. Bei anorganischem Müll ist kein Abbau möglich.

Auch das Nährstoffverhältnis muss in einem Rahmen gegeben sein. Die Komponenten N, P, S, O und einige Spurenelemente sind erforderlich, und das Verhältnis von CSB : N : P = 100 : 0,44 : 0,08 ist zum optimalen Abbau notwendig (Spillmann [6]). Hier ist oft der Phosphor limitierend.

Der Anteil an Hausmüll und Kohlenstoff kann näherungsweise durch Datenerhebung ermittelt werden. Alle Versuche, die einzelnen Müllanteile bzw. den abbaubaren Kohlenstoffanteil anhand von Proben an einer Altablagerung zu bestimmen, sind in Bezug auf die Repräsentanz kritisch zu beurteilen.

5. PH-Wert (Puffersystem)

Zur Bildung eines Puffersystems ist ein ausreichender Gehalt an CaCO_3 notwendig. Er erleichtert das Einhalten des pH-Wertes im Bereich von 6-8. Ein zu niedriger oder ein zu hoher pH-Wert ist für Bakterien toxisch. Außerdem besteht im sauren Milieu die Gefahr der Mobilisierung von Schwermetallen.

In der stabilen Methanphase (Stufe IV, vergleiche hierzu Kapitel 2.4.2.3) liegt der pH-Wert etwas über 7 und bei der sauren Gärung zwischen 6 und 7. Wenn die organischen Säuren aus Stufe II (vergleiche hierzu Kapitel 2.4.2.3) nicht regelmäßig durch Sickerwasser abtransportiert werden, kann durch die pH-Senkung der weitere Abbau der Stufe III gestört werden. Nach dem Abbrechen der Methanphase wird sich eine pH-Wert-Senkung feststellen lassen. Somit können Sickerwasser und Kondensatuntersuchungen in Ausnahmefällen wichtige Ergebnisse für die Gasproduktion liefern.

6. Toxische Stoffkonzentration

Einige niedrige Fettsäuren sind für die Bakterien giftig. Je nach Fachliteratur (Duarte & Anderson 1983 [22], Kapp 1984 [23]) wird ab einem Gehalt zwischen 6.000 und 15.000 mg/l an Gesamtfettsäuren das Wachstum der Methanbakterien gehemmt.

In Abbauversuchen von Sickerwasser wurden weitere wachstumshemmende Schwellenwerte festgestellt, welche wie folgt lauten:

| | |
|----------------------------|------------|
| NH ₄ Stickstoff | 2.500 mg/l |
| Gesamtschwermetalle | 0,1 mg/l |
| Sulfid-Schwefel | 200 mg/l |
| Spuren von freiem Ammoniak | |

Bei den Schwermetallen sind Hg (Quecksilber) und Cd (Cadmium) am giftigsten. Schwermetalle zeigen nur in gelöster Form eine hemmende Wirkung auf die Methangärung. Durch chemische physikalische Prozesse, die parallel zur Methangärung ablaufen, werden Metalle als Sulfide ausgefällt bzw. durch Komplexbildung festgelegt. Dies ist bei der Beurteilung von Schwermetallen zu berücksichtigen. Toxisch sind weiterhin Pestizide und einige Chloride und Kohlenwasserstoff (Poller, 1990 [24])

7. Aufbau des Deponiekörpers

Bei dem Betrieb einer neuen Deponie gibt es zahlreiche Techniken, die eine optimale Müllzersetzung gewährleisten. Bei einer alten Deponie lassen sich die Gegebenheiten wie z.B. Einbautechnik, Zerkleinerungszustand des Mülls und Art der oder die Porengröße des Gasraumes nicht verändern.

Über die gewählte Einbautechnik sind oft Informationen beim Betreiber vorhanden. Gerade bei dem Einbau über Kippkanten bzw. bei langanhaltenden Bränden während des Einbaus ist von einer verringerten Gasproduktion auszugehen, da der organische Kohlenstoff entsprechend verringert wurde.

2.4.2.2 Externe Faktoren

Alle Faktoren, die nur indirekt die Deponiegasentstehung und den Deponiehaushalt beeinflussen, sind externe Faktoren. Sie sind messtechnisch zu erfassen bzw. aus der Datenerhebung bekannt. Im Einzelnen sind von diesen Faktoren deutliche Beeinflussungen der Emissionssituation zu erwarten. Wie sich gezeigt hat, kann es zu erheblichen Fehleinschätzungen und Gefährdungssituationen kommen, wenn die externen Faktoren nicht berücksichtigt werden. Als externe Faktoren sind nachfolgende an dieser Stelle zu benennen:

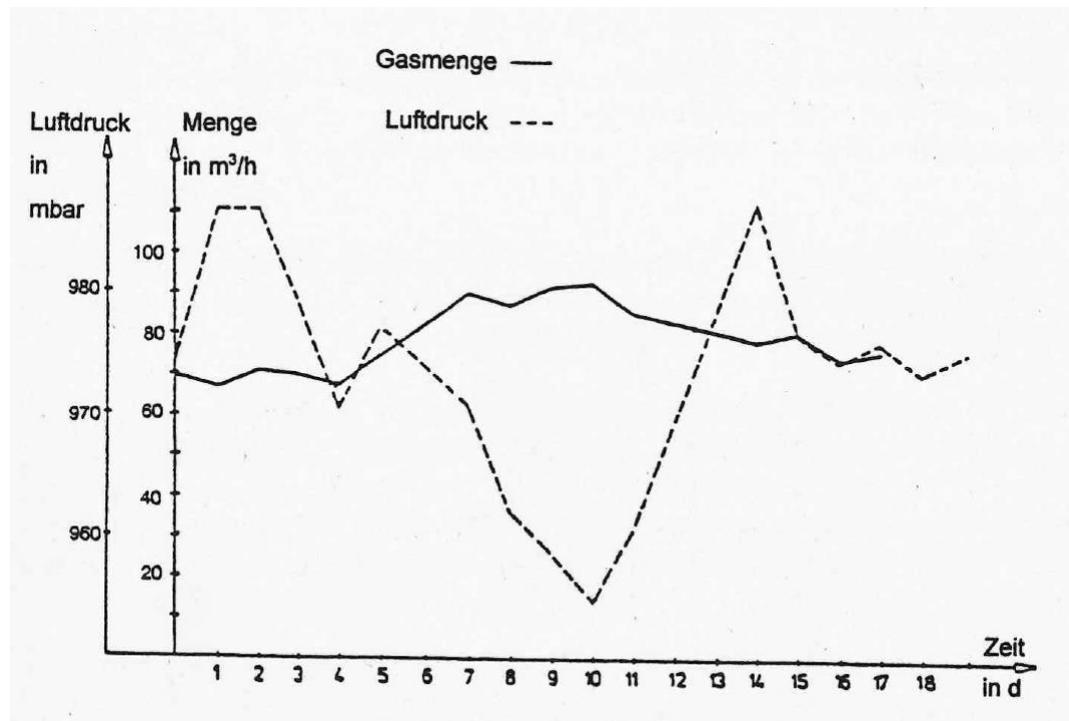
1. Luftdruck und Wind,
2. Niederschlag,
3. Außentemperatur,
4. Abdichtung / Abdeckung,
5. Grundwasserstand (Wasserzutritte) und
6. sonstige externe Faktoren

1. Luftdruck und Wind

Wichtig ist hier der Einfluss der Umgebungsluft. In zahlreichen Deponien konnte eine eindeutig negative Korrelation zwischen Emission und Luftdruck aufgezeigt werden.

Bei fallendem Luftdruck (Schwankungen zwischen 10 und 30 mbar sind normal), erhöht sich die Emission einer Deponie erheblich. Die nachfolgende Abbildung zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Emission, hier gemessen an einer künstlich geschaffenen Gasaustrittsöffnung (Betarohr), und dem Luftdruck. Bei einer Druckabnahme steigt die austretende Gasmenge an. Das bedeutet, dass bei konstanter Deponiegasproduktion durch äußere Bedingungen (hier fallender Luftdruck) Emissionen mit größerem Volumenstrom stattfinden.

Abbildung 12: Abhängigkeit der austretenden Gasmengen vom Luftdruck gemessen an einer künstlich geschaffener Gasaustrittsöffnung [Rettenberger at all 1982 [25]]



Dagegen ist der Einfluss von Wind auf dem Deponiekörper meist zu vernachlässigen. Die Tiefe, bis zu der ein Windeinfluss im Boden messbar ist, hängt von der Windgeschwindigkeit ab. Für eine Deponie mit einer Hangneigung von 1:3 ergibt sich bei starkem Wind (40 m/s) ein Saugdruck von 4 mbar. Bei 5 m/s Windgeschwindigkeit beträgt der Wert nur 0,06 mbar. Die Drücke nehmen in der Tiefe ab und betragen z.B. bei Sand in einer Tiefe von 5,00 m lediglich ein Zehntel des ursprünglichen Wertes. Somit ist der Einfluss nur bei sehr starkem Wind in oberflächennahem Bereich zu erwarten.

2. Niederschlag

Durch die erhöhte Niederschlagsmenge wird sowohl der Wassergehalt erhöht, was zu einer erhöhten Gasproduktion führt, als auch die Durchlässigkeit von mineralischen Oberflächenabdichtungen herabsetzt. Gasemissionen können nach Niederschlagsereignissen kurzzeitig verringert werden.

3. Außentemperatur

Die Beeinflussung bzw. Eindringtiefe der Witterung wird in Mitteleuropa 2,00 m nicht überschreiten. Bei geringem Wassergehalt des Substrates wird diese eher geringer sein.

Die Temperatur in ca. 2,00 m Tiefe ist dabei ungefähr gleich dem Jahresmittel der Lufttemperatur über dem Boden (8-10°C). Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass sich der typische Temperaturverlauf mit zunehmender Tiefe dem Jahresmittel der Lufttemperatur über dem Boden angleicht.

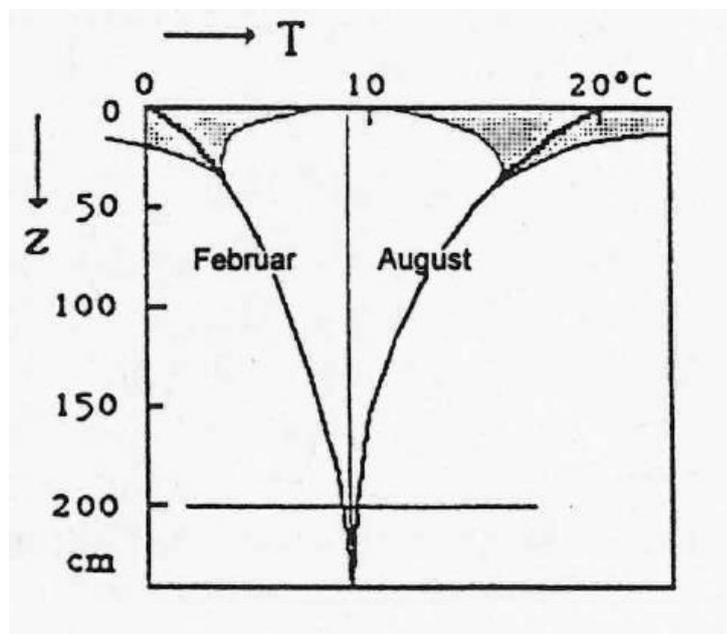


Abbildung 13: Charakteristische Temperaturprofile eines Brunnens im Februar und im August (Richter, 1986 [26])

4. Abdichtung / Abdeckung

Je nach Qualität der Oberflächenabdeckung bzw. -abdichtung, werden die gesamten Einflüsse der Umgebungsluft ausgeschaltet bzw. deutlich und maßgeblich reduziert.

Durch Abdichtungsmaßnahmen (Oberflächenabdichtung) wird die Gasumwandlung (Methanoxidation) reduziert und es kann zu einem Druckanstieg innerhalb des Deponiekörpers kommen. Dies kann in der Folge zu konzentrierten Austritten von Deponiegasen an Schadstellen der Abdichtung führen.

Die Beeinflussung des Wasserhaushaltes der Ablagerung ist durch Abdichtungsmaßnahmen nachgewiesen. Die Ausführungen zum Wassergehalt sind unter diesem Blickwinkel ebenfalls zu berücksichtigen. Für die Bewertung der gasförmigen Emissionen ist der Feuchtigkeitsgehalt der mineralischen Abdichtung zu berücksichtigen, da sich bei hohen Feuchtigkeitsgehalten der Abdeckung Emissionen verringern werden.

5. Grundwasserstand (Wasserzutritte)

Durch Grundwasserzutritte wird der Wassergehalt des Abfalls erhöht. Bedingt durch die Lage der Deponie könnten zusätzliche Wasserzutritte (z.B. Überschwemmungsgebiete, Hangwasserzutritte) erfolgen.

Ob sich die Gasproduktion dadurch erhöht, ist nicht eindeutig zu beurteilen, da andere Effekte wie Temperaturerniedrigung und Abführung von organischen Substanzen in diesem Kontext zu berücksichtigen sind. Eine Abschätzung dieser Faktoren ist nur im Einzelfall möglich.

6. Sonstige externe Faktoren

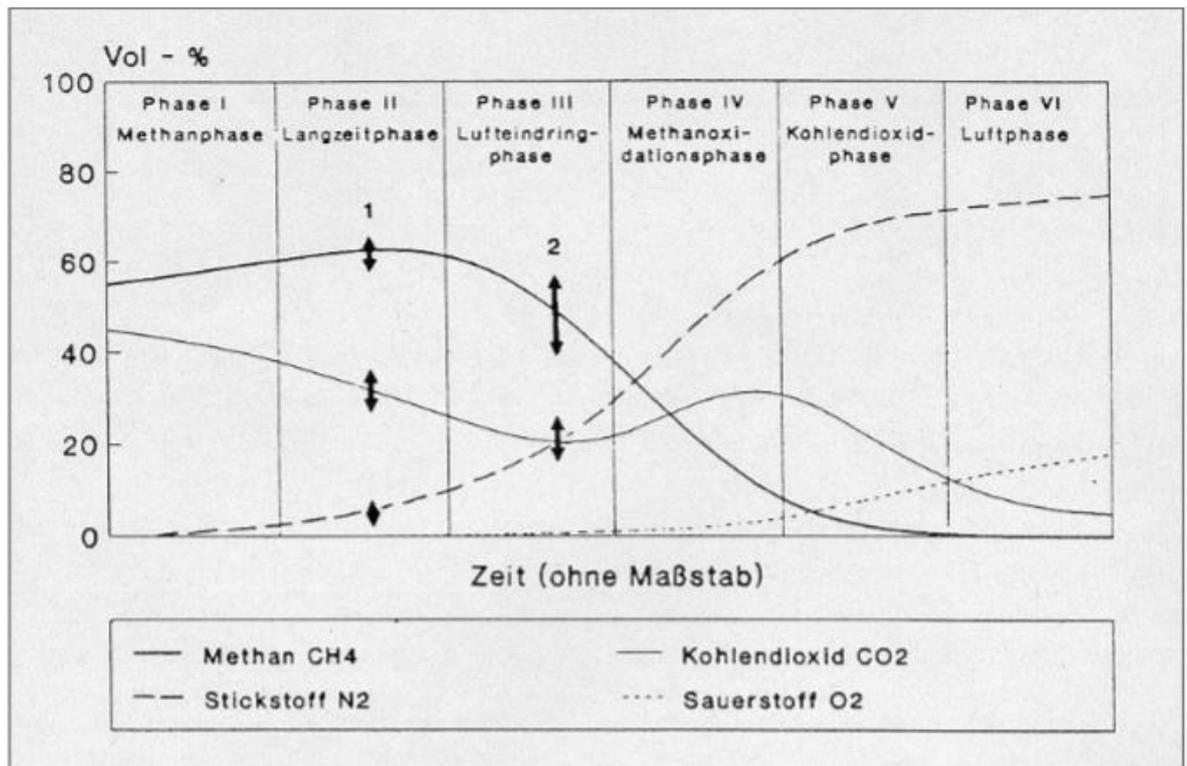
Das Verhältnis Oberfläche zu Volumen beeinflusst den Gashaushalt ebenso wie das umgebene Gestein.

Nur aus der Summe der o.a. Faktoren (1 bis 6) und unter Berücksichtigung der Besonderheiten, die jede einzelne Ablagerung aufweist, ist eine Beurteilung der Gasbildung im Einzelfall möglich.

2.4.2.3 *Langzeitverhalten der Deponiegasproduktion*

Bei Untersuchungen konnten typische Phasen erkannt und definiert werden. Diese Phasen sind, im Gegensatz zu den klassischen Abbaustufen nach Farquahar & Roves, 1973 [10], für das Langzeitverhalten bei Altdeponierungen anzuwenden.

Weitere Untersuchungen wurden von Christensen und Kjelsen, 1989 [27], durchgeführt. Das Problem der Inhomogenität der Porengaszusammensetzung stellt sich besonders nach Abbruch der Gasproduktion. Lokale Unterschiede der Gaskonzentration werden zwar durch Diffusionsvorgänge zum Teil ausgeglichen, können aber dennoch zu einer Fehleinschätzung führen. Die nachfolgend beschriebenen Phasen können nur in einer Richtung ablaufen. Die Phasen des Langzeitverhaltens der Deponiegasproduktion bei Altablagerung sind wie folgt eingeteilt:



1: Meßergebnisse Modellstandort Osterhofen: Absaugversuch Sept. 1990 (TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT Dez. 1990)

2: Meßergebnisse Modellstandort Mannheim: Gasmeßversuch Nr. 3 und 4; Aug. 1990 an Mehrfachgaspegeln. (RÖVER & Partner/TAUW Infra Consult Okt. 1990)

Abbildung 14: Deponiegas Langzeitkonzentrationsverlauf bei Altablagerung

Zu diesen Phasen ist Folgendes anzumerken:

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch Baumaßnahmen eine Veränderung von bestehenden Gleichgewichten verursacht wird. Dies ist vor allem bei nachträglich aufgebrachtten Oberflächenabdichtungen oder Versiegelungen zu erwarten. Hier wird der Ablauf von Austauschprozessen gestört und veränderte Porengaskonzentrationen verursacht, was eine neue Zuordnung bedeutet. Durch Wasserzugabe, zum Beispiel durch einen Grundwasseranstieg, ist es nach heutigen Kenntnissen theoretisch möglich, dass eine verstärkte Gasproduktion einsetzt. Inwieweit diese Fälle jedoch in der Praxis relevant sind, lässt sich bisher nicht eindeutig prognostizieren. Wie zuvor aufgeführt ist es möglich, dass die Zuordnung zu diesen Phasen für Teilbereiche der Altablagerungen in gewissen Grenzen differieren kann. Dies ist für die Gefährdungsabschätzung insofern zu berücksichtigen, dass diejenigen Phasen zu Grunde gelegt werden, die eine Einschätzung auf die sichere Seite ermöglicht. Es kann aus mehreren Gründen erforderlich sein, eine Altablagerung in gesonderte Teilbereiche zu unterteilen:

- Für große Altablagerungen ist es vorteilhaft, verschiedene Bereiche getrennt zu betrachten, da hier auch aufgrund der unterschiedlichen Ablagerungszeiträume mit verschiedenen Gaskonzentrationen zu rechnen ist.
- Bestimmte Teile einer Altablagerung wurden ausschließlich mit Bauschutt oder Erdaushub verfüllt und lassen sich abgrenzen.
- Altablagerungen mit ungewöhnlich langen Verfüllzeiten bzw. auffälligen örtlichen Gegebenheiten.

Phase I, stabile Methanphase:

Etwa 1-3 Jahre nach Ablagerung ist im Normalfall die stabile Methanphase erreicht. Von dieser Phase kann dann gesprochen werden, wenn im Deponiegas ein Verhältnis von 55 Volumenprozent CH₄ zu 44 Volumenprozent CO₂ ($\text{CH}_4 / \text{CO}_2 = 1,2$) erreicht ist. O₂ und N₂ sind nicht oder nur in Spuren im Deponiegas vorhanden. Altablagerungen in diesem Stadium ohne geeignete Oberflächenabdichtung und entsprechende Entgasungsmaßnahmen zeigen sehr hohe Emissionswerte an der Oberfläche.

Phase II: Langzeitphase

In dieser Phase steigt das CH₄ / CO₂ Verhältnis an (CH₄ / CO₂ Verhältnis > 1,5). Diese auch als Langzeitphase bezeichnete Phase ist dadurch charakterisiert, dass hohe Methanwerte im Deponiekörper gemessen werden können. Eine Erklärung für die hohen Methanwerte liegt in der Ausgangsgaszusammensetzung. Normalerweise entstehen aus Hausmüll Gase mit einem Gehalt von 55 Volumenprozent CH₄ und 44 Volumenprozent von CO₂. Je nach Ausgangsmaterial und Abbaugeschwindigkeit ist eine andere Gaszusammensetzung zu erwarten. Siehe hierzu nachfolgende Abbildung.

| Abbaugeschwindigkeit im Fermentationsprozeß | | |
|---|----------------------------|--|
| schnell ← | | → langsam |
| Stärke, Zucker Glykogen | Zellulose Hemizellulose | Lignin (verholztes Material) |
| Fettsäuren | Pentosane | |
| Eiweiß, Peptide | Pektin | ligninkrustierte Zellulose (Stroh) |
| Aminosäuren | Chitin | |
| Vitamine Antibiotika | Fette Öle | Keratin (Haare) Kutin Suberin (Korkstoff) Wachse |

Abbildung 15: Abbaugeschwindigkeit verschiedener Stoffe

Die Menge und die Zusammensetzung des bei vollständiger Zersetzung der organischen Substanzen erzeugten Gases hängt vom Verhältnis C:H:O:N in den abzubauenen Grundstoffen und von der Temperatur sowie anderen Faktoren ab.

Von den Gruppen organischer Stoffe produzieren Fette das Gas mit dem höchsten CH₄-Gehalt. Eiweißstoffe liefern geringere Gasmengen, aber mit ebenso hohem CH₄-Gehalten. Kohlenhydrate liefern verhältnismäßig wenig Gas mit geringem CH₄-Gehalt.

Die Abbaugeschwindigkeit dieser Stoffe ist für die Ausgangsgaszusammensetzung wichtig. Die Veränderung dieser Ausgangsgaszusammensetzung wird aber durch Transportvorgänge (z.B. Auswaschung) hervorgerufen. Bei 20°C ist die Löslichkeit von CO₂ im Wasser sehr viel höher als die Löslichkeit von CH₄. Dadurch kann CO₂ durch Wasserbewegungen ausgewaschen werden. Das Verhältnis CH₄ zu CO₂ verschiebt sich zu Gunsten zum CH₄.

Phase III - Lufteindringphase

In dieser Phase dringen O₂ und N₂ (Atmosphärenluft) ein, wobei das Verhältnis im Porenraum weit von dem von Luft abweicht. Das CH₄ / CO₂ Verhältnis nimmt wieder ab.

Die Ausgangsgaskonzentration wird durch den Luftzutritt verdünnt. Es sind Methan-gehalte zwischen 10 und 40 Volumenprozent messbar. Die CO₂ Gehalte liegen zwischen 5 und 30 Volumenprozent. Ein beträchtlicher Anteil an N₂ ist nachweisbar (10-30 Volumenprozent)

Diese Phase ist gekennzeichnet durch Verdünnung des Deponiegases. Dies ist kein Prozess, der homogen in allen Bereichen der Altablagerung stattfindet. Es ist z.B. denkbar, dass am Rand des Böschungsbereiches bzw. einer Oberflächenabdichtung schon die Phase IV erreicht wurde, während im Deponiekern noch die Phase III vorherrscht ist.

Phase IV – Methanoxidationsphase

Wegen der verringerten Gasproduktion dringt verstärkt Luft in den Deponiekörper ein. Methan wird oxidiert und es entsteht Kohlendioxid. Dieser Vorgang verschiebt das Verhältnis CH₄ zu CO₂ auf unter 1.

Methanoxidation wird von einer Reihe der Mikroorganismen ausgeführt, die als methylo-troph bezeichnet werden. Diese Organismen sind in der Lage, durch Oxidation von reduzierten Kohlenstoffkomponenten Energie zu gewinnen.

Über 100 Arten von methylo-trophen Bakterien sind bekannt und in der Natur verbreitet. Voraussetzung dafür ist das gleichzeitige Vorhandensein von Methan und Sauerstoff. Der Sauerstoff der Luft wird verbraucht und es tritt relativ viel zusätzlicher Stickstoff auf. Eine typische Gaszusammensetzung in dieser Phase ist wie folgt:

- CH₄ 20 Volumenprozent,
- CO₂ 30 Volumenprozent,
- N₂ 45 Volumenprozent und
- O₂ 5 Volumenprozent.

In dieser Phase finden normalerweise keine Emissionen in dem Luftraum mehr statt.

Phase V – Kohlendioxidphase

Hier geht Methan gegen Null. Es ist noch relativ viel Kohlendioxid vorhanden. In den Bereichen, die noch ein anaerobes Milieu aufweisen, wird das Methan fast vollständig abgebaut. Dadurch wird der Kohlendioxidgehalt gegenüber der normalen Bodenluftzusammensetzung erhöht. Durch aeroben Abbau der restlichen organischen Materialien entsteht ebenso Kohlendioxid.

In dieser Phase sind im Deponiekern die Methangehalte sehr gering (max. 2 bis 5 Volumenprozent). Die CO₂-Gehalte liegen zwischen 5 und 20 Volumenprozent. Neben erhöhten N₂-Gehalten (> 60 Volumenprozent) sind gegenüber unbeeinflusster Bodenluft erniedrigte O₂-Gehalte messbar (< 15 Volumenprozent).

Phase VI – Luftphase

Nimmt der Kohlendioxidgehalt noch mehr ab und geht dieser gegen wenige Volumenprozent und nimmt der Sauerstoffgehalt zu (rd. 20 Volumenprozent), so ist die Luftphase erreicht und eine Beeinflussung der Bodenluft bzw. des Porenbereichs in der Deponie durch Deponiegase ist abgeschlossen.

Der Sauerstoffgehalt in der Bodenluft ist oft geringer als in der Atmosphäre, weil die bei Langzeitvorgängen aller Arten im Boden verbrauchten Sauerstoffmengen nur relativ langsam aus der atmosphärischen Luft ersetzt werden. Die O₂-Gehalte sind also in entschiedenem Maße abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, d.h. von der Durchlässigkeit gegenüber der Atmosphäre. Die typischen Gaszusammensetzungen dieser Phase sind wie folgt:

- CH₄ 0 Volumenprozent,
- CO₂ 4 Volumenprozent,
- N₂ 78 Volumenprozent und
- O₂ 18 Volumenprozent.

2.4.3 Bewertung potentiell toxisch wirkender Gase

2.4.3.1 Toxikologische Rahmenbedingungen

Methan hat ein Treibhauspotential von 21, das heißt besitzt (1 Tonne Methan hat einen Treibhauseffekt äquivalent von 21 Tonnen CO₂)². Deponiegas ist somit ein relevantes Treibhausgas.

Die zu schützenden Lebensvorgänge laufen in Körperzellen und damit in wässrigen Lösungen ab. Wird der direkte Kontakt mit Schadstoffen ausgeschlossen, können trotzdem die mobilen Stoffe, also Gase und Stäube, über die Atmung in Lösung gehen und auf diesem Weg auf Lebewesen wirken.

Die Schutzmaßnahmen für die unmittelbar Betroffenen konzentrieren sich deshalb auf den Schutz vor Gasen und Stäuben. Toxische Flüssigkeiten, sofern sie nicht ausgasen, erreichen den Menschen mittelbar nur über Gewässer.

Die wesentlichen Schwierigkeiten bei der Festlegung von Maßnahmen zum Gesundheitsschutz bestehen darin, dass in der Regel nicht alle ausgasenden Stoffe, und vor allem nicht deren Wirkung, bekannt sind. Das gilt selbst dann, wenn alle abgelagerten Stoffe auch durch Analysen dokumentiert wurden, da deren Abbauprodukte oft unbekannt sind und weit giftiger sein können, als die Ausgangsstoffe, z.B. Vinylchlorid aus dem Abbau chlorhaltiger Kohlenwasserstoffe. Selbst wenn es gelänge, alle jeweils vorhandenen Stoffe analytisch zu bestimmen, kann über deren Wirkung kein zuverlässiges Urteil abgegeben werden.

² <http://www.oekosystem-erde.de/html/treibhausgase.html>

Nicht von allen möglichen Stoffen sind die Wirkungen bekannt und in ungünstigen Fällen potenzieren Stoffkombinationen die Wirkung der Einzelstoffe.

Die Belastungsgrenzen des Arbeitsschutzes gelten nur für gesunde und erwerbstätige Personen, die der Belastung voraussichtlich 8 Stunden ausgesetzt sind und deren Gesundheitszustand regelmäßig untersucht wird. Anders verhält es sich mit Anwohnern, zu deren Personenkreis auch Kleinkinder, alte Menschen und Kranke gehören und auf denen die Belastung ganztätig einwirkt. Hierfür gelten wesentliche strengere Immissionskonzentrationswerte.

2.4.3.2 *Gase aus dem Abbau natürlicher organischer Substanz*

Wird eine natürliche organische Substanz biochemisch abgebaut, entstehen vor allem aus Eiweißverbindungen Zwischenprodukte, die teilweise für den Menschen auch toxisch sind. Dazu zählen z.B. Schwefelwasserstoff, toxische Blausäure, usw.. Der Mensch verfügt deshalb mit seinem Geruchsinn über ein sehr empfindliches Warnsystem, das bereits auf geringe Spuren gasförmiger Abfallprodukte, vor allem aus der Anfangsphase des anaeroben Abbaus, anspricht und heftigen Widerwillen auslöst.

Diese Reaktion tritt bei den meisten dieser Gase schon weit unter deren Toxizitätsgrenze auf. Die Geruchsstoffe des anaeroben Abbaus, einschließlich der toxischen Verbindung, sind aerob abbaubar, wenn sie durch biochemisch abgebautes organisches Material mit biochemisch aktiver Besiedelung (z.B. Kompostfilter) geleitet werden. Sie sind weitgehend vermeidbar, wenn der Abbau der organischen Substanz auf aeroben Weg abläuft.

Die Geruchsschwelle der dabei auftretenden Zwischenprodukte liegt erheblich höher als bei den anaeroben Produkten und löst deutlich geringeren Widerwillen aus. Sie sind nicht toxisch und kurzzeitig zumutbar. Bei fortgeschrittenem Abbau tritt der Geruch als frische Erde auf, der in der Regel als angenehm empfunden wird. Die störenden Anfangsprodukte können durch Kompostfilter leichter abgebaut werden, als die des anaeroben Abbaus. Die Emission toxischer Gase aus biochemischem Abbau ist deshalb generell durch thermophilen aeroben Betrieb mit Kompostfiltern vermeidbar.

2.4.3.3 Leicht flüchtige synthetische toxische Stoffe

Synthetische Kohlenwasserstoffe werden von üblichen Deponien, trotz aktiver Entgasung, emittiert. Von den leicht flüchtigen synthetischen Stoffen fallen vor allem die weit verbreiteten kettenförmigen chlorierten Kohlenwasserstoffe auf, deren Anteil im Rohgas der Deponie die thermische Nutzung des Methans oft erschwert oder einschränkt.

Auch hinsichtlich des Arbeitsschutzes sind Kohlenwasserstoffe nicht zu vernachlässigen. Poller hat in seiner Dissertation 1990 [24] nachgewiesen, dass die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Gruppen der Stoffe in nahezu allen Deponien anzutreffen sind. Darüber hinaus wurden vielfältige, nach Standorten unterschiedliche Stoffgemische gefunden, die auch krebserregende und stark toxische Spurengase, typisch z.B. Phenylchlorid, enthalten können.

Tabelle 4: Häufige Chlorkohlenwasserstoffe in Deponiegas (Poller 1990 [24])

| Komponente | Meßwerte | (Angaben in mg/m ³) | | | |
|--|----------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | | X _{min} | X _{max} | X _Ø | δ _n |
| Dichlordifluormethan R12 | 8 | 10,3 | 111,0 | 51,5 | 36,1 |
| Dichlormethan R30 | 7 | 0,01 | 57,3 | 27,0 | 19,7 |
| Chlordifluormethan R22 | 8 | 1,9 | 30,7 | 13,4 | 9,8 |
| cis-1, 2-Dichlorethen | 5 | 2,4 | 14,7 | 6,7 | 4,2 |
| Trichlorfluormethan R11 | 7 | 0,3 | 35,0 | 9,7 | 11,2 |
| Vinylchlorid | 8 | 0,3 | 5,7 | 3,4 | 1,9 |
| Dichlortetrafluorethan R114 | 8 | 2,3 | 8,9 | 4,1 | 2,0 |
| Dichlorfluormethan R21 | 7 | 0,7 | 28,0 | 11,8 | 9,9 |
| Tetrachlorethen | 8 | 0,5 | 10,5 | 3,3 | 3,5 |
| Trichlorethen | 8 | 0,04 | 8,6 | 2,3 | 3,1 |
| 1,1,1-Trichlorethan | 6 | 0 | 2,4 | 0,7 | 0,8 |
| 1,1,2-Trichlortrifluorethan | 6 | 0,07 | 1,7 | 1,0 | 1,1 |
| Trichlormethan R20 | 5 | 0 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Summe von org. Chlor aus Einzelkomponenten | | | Σ Cl = 79,4 mg/m ³ | | |
| Summe von org. Fluor aus Einzelkomponenten | | | Σ F = 27,4 mg/m ³ | | |

2.4.3.4 Schwer flüchtige potentiell toxische Stoffe

Als schwer flüchtig sollten hier alle Verbindungen bezeichnet werden, die aus diffuser Belastung mit den in den Ablagerungen erzielbaren Temperaturen von 70°C nicht weitgehend ausgetrieben werden können, deren Spurengase aber sowohl die

Anlieger als auch das Deponiepersonal belasten können. Als potentiell toxisch werden hier die Stoffe bezeichnet, die in der Atemluft im Normalfall nicht vorhanden sind und deren Unschädlichkeit auch in Kombinationswirkung nicht bewiesen ist. Sie können als Zwischenprodukte des natürlichen Abbaus, vor allem des unvollständigen anaeroben Abbaus, entstehen, z.B. Phenole. Sie sind dann aber nur in geringem Umfang vorhanden, aerob weiter abbaubar und nach biologisch weitgehender aerober Mineralisierung als Gas toxikologisch unbedeutend.

Nicht chlorierte Industrieprodukte dieser Stoffgruppe sind oft, aufgrund der einseitigen Stoffzusammensetzung in hoher Konzentration, nicht abbaubar. Chlorierte Verbindungen sind auch unter günstigen Bedingungen einseitig aerob biochemisch nicht abbaubar.

Der Unterschied zu den leicht flüchtigen Stoffen besteht darin, dass der nichtabbaubare Anteil der schwerflüchtigen Stoffe zum Zeitpunkt der Verdichtung noch in vollem Umfang vorhanden ist. Die Stoffe gasen an der Oberfläche der zu verdichtenden Abfälle aus. Da dieser Arbeitsschritt unvermeidlich ist, erfordert der Arbeitsschutz, dass an der Einbaustelle die MAK-Werte eindeutig unterschritten werden.

Nach heutigen Erkenntnissen des biochemischen Abbaus sind selbst noch hoch chlorierte Phenole zügig biochemisch abbaubar, wenn das geeignete Milieu eingestellt wird und die Nährstoffzusammensetzung für den Abbau geeignet ist.

2.4.4 Modellhafte Beschreibung der Gasproduktion

Die Gasproduktion in ihrem zeitlichen Verlauf ist der entscheidende Faktor zur Aufstellung einer Prognose über das Langzeitverhalten. Eingangs interessiert die Gasmenge, die aus den abgelagerten Stoffen entstehen kann. Die Gasmenge ist in erster Linie eine Funktion des im Abfall enthaltenen abbaubaren Kohlenstoffs. Dies wird in der Regel mit dem Begriff Gaspotential bezeichnet.

Vorwiegend werden folgende Ansätze zur Gasmengenabschätzung herangezogen:

- Man kann von der theoretischen Gasproduktion aufgrund der Müllzusammensetzung ausgehen, wobei der Gesamtkohlenstoffgehalt des Mülls

analytisch bestimmt und daraus die maximale Gasmenge errechnet wird. Die Berechnung liefert in der Regel zu hohe Gaserträge.

- Realistische Werte bekommt man aus Vollversuchen mit Hausmüll. Aus Laborversuchen ist bekannt, dass pro Tonne trockenen Hausmülls die insgesamt produzierte Gasmengen zwischen 150 und 235 m³ liegt. Siehe hierzu nachfolgende
- Tabelle 5.

Tabelle 5: *Literaturlauswertung zur Messung produzierter Gasmengen für Hausmüll*

| Quelle | Gasmenge [m ³ /t Hausmüll] |
|--|---------------------------------------|
| Pfeffer (1987) | 185 |
| Klein (1987) | 235 |
| Hielte (1987) | 204 |
| Stegmann (1987) | 120 bis 150 |
| Ehrig (1986) (feuchter Müll, Wassergehalt 30%) trockener Müll | 111 151 bis 271 |
| Dogge (1987) | 250 bis 300 |
| Tabasaran (1976) Messungen an Deponien | 60 bis 180 |
| Doedens (1985) (Testzellen+trockener Müll) | 50 bis 114 |
| Ham (1979) | 190 bis 240 |

Diese Gasmenge ist über einen sehr langen Zeitraum aus der abgelagerten Müllmenge zu erwarten. Bei Laborversuchen wurde erkannt, dass der zeitige Verlauf der Gasmengenentwicklung auf eine Reaktionskinetik erster Ordnung schließen lässt.

Die Gasmengenabschätzung wird in Teilprozesse untergliedert, für die sich Gesetzmäßigkeiten finden lassen. Das Ergebnis eines solchen Abstrahierungsvorganges wird normalerweise mathematisch formuliert und als Modell bezeichnet. In der Praxis haben sich eine Reihe von Modelltypen als hilfreich herausgestellt:

- Mathematische Modelle, z.B. Black-Box-Modelle, bei denen durch eine mathematische Manipulation eines Eingangssignals ein Ausgangssignal erzeugt wird, ohne dass der physikalische Vorgang im Einzelnen beschrieben wird,

- physikalisch deterministische Modelle und
- stochastische Modelle (z.B. Gastheorie).

Unter der Voraussetzung, dass die Gasentwicklung als Reaktion erster Ordnung verläuft, gibt Tabasaran (1976, [28]) folgenden Ansatz zur Beschreibung der Entwicklung der Gasproduktion:

$$g_t = g_0 * e^{-k*t} \quad [m^3/(t*a)]$$

nach Integration

$$G_t = G_{pot} * (1 - e^{-k*t}) \quad [m^3/(t*a)]$$

| | | |
|-------------|--|---------------|
| g_t : | Gasproduktion zur Zeit t | $[m^3/(t*a)]$ |
| k : | Abbaukonstante | $[d^{-1}]$ |
| G_t : | Gassumme zum Zeitpunkt t | $[m^3/t]$ |
| G_{pot} : | maximal erzielbare Gasmenge (Gaspotential) | $[m^3/t]$ |
| g_0 : | $k * G_{pot}$ | $[m^3/(t*a)]$ |

Dieses Modell wird in der nachfolgenden Abbildung 16 veranschaulicht.

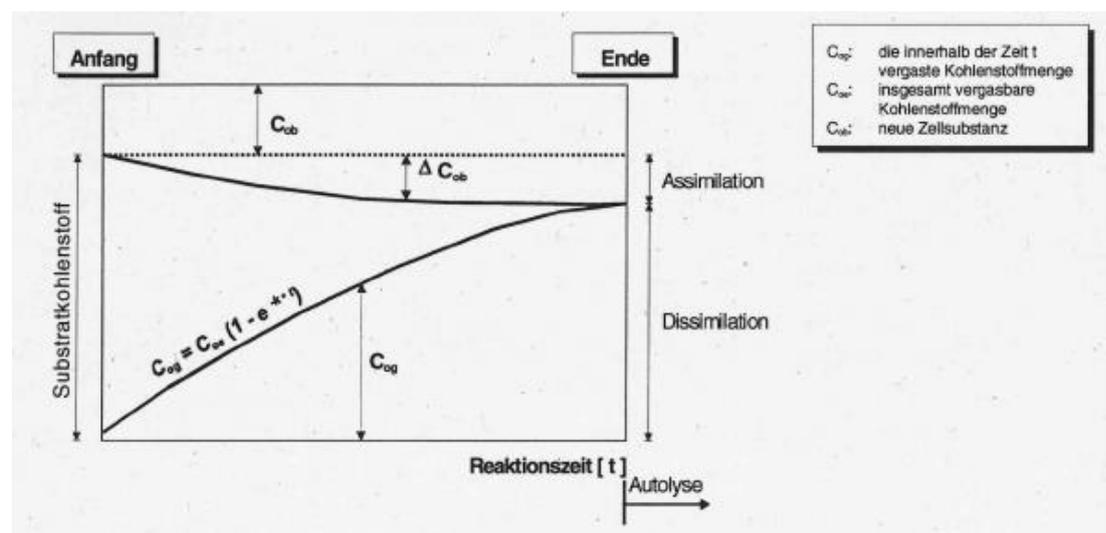


Abbildung 16: Modell für den Verlauf des anaeroben Abbaus bezogen auf den Parameter organischer Kohlenstoffe Tabasaran (1976) [28]

Durch die Halbwertszeit $T_{1/2}$ wird das Abbauverhalten der organischen Anteile im Abfall bestimmt. Sie ist unmittelbar abhängig von den Faktoren, die durch Planung und/oder Betrieb der Deponie beeinflusst werden können. Als Durchschnittswerte für $T_{1/2}$ werden häufig 5-8 Jahre angegeben. Leicht abbaubare Abfallanteile wie Nahrungsmittel, können mit $T_{1/2}$ von einigen Monaten bis zu 2 Jahren angenommen werden, wohin gegen bei schwer abbaubare Anteile wie Textilien, Holz, Papier $T_{1/2}$ von Jahrzehnten auszugehen ist.

Unter der Annahme, dass die Gasbildung eine Reaktion erster Ordnung ist, verhält sich die Umsetzungsgeschwindigkeit direkt proportional zur aktuell vorhandenen Substratkonzentration. Diese Proportionalität beschreibt die Abbaukonstante k . Analog zum Zerfallsgesetz wird diese durch $T_{1/2}$ ausgedrückt:

$$k = - \ln 2 / T_{1/2}$$

$T_{1/2}$ bestimmt die Krümmung der Gasproduktionskurve und damit die Gasmenge pro Zeiteinheit. Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Literaturlauswertung für $T_{1/2}$ und Abbaukonstanten im Hausmüll nach (Drees Dissertation 2000 [29]).

Tabelle 6 *Literaturoswertung für $T_{1/2}$ und Abbaukonstanten im Hausmüll nach (Drees Dissertation 2000 [29])*

| Literaturquelle | k-Werte für | | $T_{1/2}$ [a] |
|---|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | $k = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ | $k = \frac{\log 2}{T_{1/2}}$ | |
| TABASARAN (1976) | 0,07 | | 10 |
| RETTENBERGER (1978) | 0,228 | | 2,4 |
| TABASARAN, RETTENBERGER, (1987) allgemeine Angaben Messungen an Deponien | | 0,025 bis 0,05 0,035 bis 0,04 | 12 bis 6 8,6 bis 7,5 |
| HOEKS (1983) | 0,0365 | | 19 |
| ROVERS (1983) leicht abbaubar mäßig abbaubar schwer abbaubar | 0,693 0,139 0,046 | | 1 5 15 |
| HOEKS (1980) Messungen an Deponien | 0,1 | | 7 |
| STEGMANN (1978/79) leicht abbaubar mäßig abbaubar | | | 1,5 25 |
| MOOLENAAR (1981) leicht abbaubar mäßig abbaubar schwer abbaubar | | | 1 bis 5 5 bis 25 20 bis 100 |
| BOWERMANN (1976) leicht abbaubar mäßig abbaubar schwer abbaubar | 1,84 1,15 0,115 | | 0,4 bis 1 0,6 bis 2 6 bis 20 |
| HAM (1979) leicht abbaubar mäßig abbaubar andere Werte zitiert: leicht abbaubar mäßig abbaubar | | | 1 15 0,5 bis 10 2 bis 25 |
| EHRIG (1986) | 0,198 bis 0,347 | | 3,5 bis 2 |
| WEBER (1989) | 0,05 bis 0,15 | | 6 bis 10 |

Tabasaran stellte zur Einschätzung der langfristig gebildeten Gasmengen nachfolgende mathematische Beziehung für die Reaktion vom organischen Kohlenstoff zu Methan und Kohlendioxid auf.

$$\frac{dC_{og}}{(C_{oe} - C_{og})} = k dt$$

mit:

C_{og} : die innerhalb der Zeit t vergaste Kohlenstoffmenge

t : Reaktionszeit

k : Reaktionskoeffizient

C_{oe} : insgesamt vergasbare Kohlenstoffmenge

Nach Erkenntnissen aus den o.g. Ansätzen der Gasmengenabschätzung formulierten Tabasaran & Rettenberger (1987, [37]) nachfolgende Modellgleichungen:

$$G_t = G_e * (1 - 10^{-kt}) \quad [\text{m}^3 \text{ Deponiegas/t Abfall}]$$

mit:

G_t : bis zur Zeit t gebildete spezifische Deponiegasmenge $[\text{m}^3/\text{t}]$

G_e : die in langen Zeiträumen gebildete Gasmenge $[\text{m}^3]$

k : Abbaukonstante $[1/\text{a}]$

t : Zeit $[\text{a}]$

$$G_e = 1,868 * C_0 (0,014 * T + 0,28) \quad [\text{m}^3/\text{t Abfall}]$$

mit:

C_0 : Gesamtmenge des organischen Kohlenstoffs im Abfall $[\text{kg}/\text{t Abfall}]$

T : Temperatur $[^\circ\text{C}]$

Der zeitliche Verlauf der Deponiegasproduktion hängt jedoch auch entscheidend vom Deponiebetrieb ab. Unter dieser Berücksichtigung formulierte Weber nachfolgendes Gleichungsmodell:

$$Q_{a,t} = 1,868 * M * TC * f_{a0} * f_a * f_0 * f_s * k * e^{-k*t}$$

mit:

- $Q_{a,t}$: tatsächliche fassbare gesamte Gasproduktion zum Zeitpunkt t [m³/a]
M: jährlich angelieferte Abfallmenge [kg]
TC: Kohlenstoffgehalt des Abfalls [kg/t]
 f_{a0} : Anfangszeitfaktor; Berücksichtigung der Gasverluste im ersten Jahr nach erfolgter Ablagerung durch aerobe Umsetzung
(0,95 [-] für Kippkantenbetrieb; 0,8 [-] für Dünnschichteinbau)
 f_a : Abbaufaktor; Verhältnis von unter optimalen Bedingungen vergasbarem zum gesamten Kohlenstoffgehalt
(Ca. 30% des TC (z.B. Lignin und Teile des Kunststoffs sind für biochemische Umsetzung nicht zugänglich))
 f_0 : Optimierungsfaktor; Verhältnis von unter praktischen Deponiebedingungen umgesetztem Kohlenstoff zu unter optimalen Laborbedingungen vergasbarem Kohlenstoff (anaerober Abbau in der Deponie nicht optimal wegen örtlich begrenzter trockener Nester, Hemmung durch bestimmte Stoffe, Unterversorgung mit Nährsalzen und Spurenelementen)
 f_s : systembedingter Fassungsgrad; Verhältnis der unter Deponiebedingungen in Abhängigkeit vom Entgasungssystem gefassten zur tatsächlich produzierten Gasmenge
k: Abbaukonstante; $k = \ln 0,5/T_{1/2}$ [1/a]
 $T_{1/2}$: Zeit, in der 50% des Kohlenstoffs umgesetzt sind
t: betrachteter Zeitabschnitt (t=0 bezeichnet nicht den Beginn der Ablagerung, sondern den Beginn der Gasproduktion unter anaeroben Bedingungen [a])

Tabelle 7: Faktoren für die Berücksichtigung betriebstechnischer Einflussgrößen einer Deponie (Weber, 1990, [30])

| Faktor | f_{a0} | f_a | f_0 | f_s |
|--------|-------------|-------|-------|-----------|
| | [-] | [-] | [-] | [-] |
| | 0,80 – 0,95 | 0,7 | 0,7 | 0,0 – 1,0 |

Eine Übersicht über die Black-Box Modelle hinsichtlich Abbau und Gasbildungsprozesse mit Hilfe mathematisch formulierter Abläufe in Kombination mit empirischen Faktoren zeigt die nachfolgende Abbildung 17:

| Modell | Vorgaben der Autoren |
|---|---|
| Tabasaran-Rettenberger-Modell ¹⁾ $G_p = 1,868 \cdot \text{TOC}_{\text{ab}} \cdot (0,014 \cdot T + 0,28) = \text{m}^3/\text{t}$ $G_{(t)} = G_p \cdot (1 - 10^{-(t/k)}) = \text{m}^3/\text{t}$ Deponiegas | $k = 0,04 \text{ a}^{-1}$ $\text{TOC}_{\text{ab}} = 170\text{-}200 \text{ kgC/t}$ $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Schweizer-Modell ²⁾ $G_{(t)} = A \cdot (1 - e^{-(k_1 t)}) \cdot e^{-(k_2 t)} = \text{m}^3/(t \cdot \text{a})$ Deponiegas | $A = 13,61 \text{ m}^3/(t \cdot \text{a})$ $k_1 = 1,1 \text{ a}$ $k_2 = 15,72 \text{ a}$ |
| Ehrig-Modell ³⁾ $G_{(t)} = G_{\text{max}} \cdot e^{-k_1(t-t_1)} = \text{m}^3/(t \cdot \text{a})$ Deponiegas $\bar{G}_{(t)} = G_{\text{max}} \cdot e^{-k_1(t-t_1)} = \text{m}^3/(t \cdot \text{a})$ Deponiegas | $G_{\text{max}} = 100 - 180 \text{ m}^3/\text{t}; \phi 120$ $k = 0,139 \text{ a}^{-1}$ $G_{\text{max}} = (G_{\text{max}} \cdot k) = 13,9 - 25,0 \text{ m}^3/(t \cdot \text{a})$ $k_1 = 3,0 \text{ a}^{-1} / t_1 = 3 \text{ a}$ |
| Hoeks-Oosthoeks-Modell ⁴⁾ $G_{(t)} = \sum 0,8 P_i \cdot (1 - e^{-(k_i t)}) = \text{m}^3/\text{t}$ Deponiegas | $k_a = 0,693 \text{ a}^{-1}; t_{1/2} = 1 \text{ a}$ $k_b = 0,04 \text{ a}^{-1}; t_{1/2} = 15 \text{ a}$ |
| Marticoarena-Modell ⁵⁾ $MP_{(t)} = MP_{(0)} \cdot e^{-(k_2 t)} = \text{m}^3/\text{t}$ Deponiegas | |

Abkürzungen:

- A = Maximale Gasproduktionsrate [$\text{m}^3/(t \cdot \text{a})$]
- k = Geschwindigkeitskonstante [a^{-1}]
- t = Ablagerungszeit [a]
- G_{max} = Maximale Deponiegasmenge [m^3/t]
- G_{max} = Maximale Gasbildungsrate [$\text{m}^3/(t \cdot \text{a})$]
- t_1 = Zeitpunkt der maximalen Gasproduktion
- k_1 = Zeitkonstante (ansteigender Ast) [a]
- k_2 = Zeitkonstante (abfallender Ast) [a]
- k_a = Geschwindigkeitskonstante (leicht abbaubar) [a^{-1}]
- k_b = Geschwindigkeitskonstante (schwer abbaubar) [a^{-1}]

- $MP_{(0)}$ = Deponiegasbildungspotential [m^3/t]
- $MP_{(t)}$ = Deponiegasbildungspotential zur Zeit t [m^3/t]
- P_1 = Anteil leicht abbaubarer Kohlenstoff [kgC/t]
- P_2 = Anteil schwer abbaubarer Kohlenstoff [kgC/t]
- G_p = Gaspotential [m^3/t]
- G_t = gebildete Deponiegasmenge [m^3/t]
- TOC_{ab} = biologisch abbaubarer Anteil Kohlenstoff [kgC/t]
- T = Temperatur [$^\circ\text{C}$]
- FS = Feuchtsubstanz

- 1) TABASARAN, RETTENBERGER, 1987
- 2) BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1982
- 3) EHRIG, 1986
- 4) HOEKS & OESTHOEKS, 1991
- 5) MARTICORENA ET AL., 1993

Abbildung 17: Modelle zur Berechnung der Deponiegasbildung (Zusammenstellung nach Baumeler, et al, 1998 [31])

2.4.5 Gasableitung

Es ist davon auszugehen, dass zunächst das gesamte entstandene Gas nahezu unverändert als Emission aus der Deponie austritt. Das im Deponiekörper entstehende Gas breitet sich in verschiedene Richtungen aus, und zwar im Wesentlichen durch Druckdifferenz und Konzentrationsdifferenzen (Diffusion). Eine Ausbreitung aufgrund von Druckdifferenz entsteht durch Druckgradienten, in welchen sich das Gas aus Bereichen mit hohem Gasdruck in Bereichen mit geringem Druck bewegt. Durch den höheren Gasdruck in der Deponie, als Folge der Gasproduktion, überwiegt der Transport durch Druckdifferenz. Das Druckgefälle entsteht z.B. durch Gasproduktion, barometrische Druckänderung oder Temperaturänderung. Dichte Schichten oder wasser-gesättigte Bereiche beeinflussen diese Ausbreitung.

Bei der Diffusion breitet sich das Gas aus Bereichen höherer Konzentration zu Bereichen niedriger Konzentration hin aus. Der Gastransport durch Diffusion ist nur dann möglich, wenn sich die Partikeldrücke bzw. die Konzentrationsabnahme über den gesamten Diffusionsweg erstreckt. Dichte Schichten im Deponiekörper, bzw. im umgebenden Erdreich, beeinflussen den Gasaustritt entscheidend. Je dichter die Schicht, desto geringer ist der Gastransport. Auch Wasser stellt beispielsweise eine fast vollständige Barriere für die Diffusionsströmung dar, da der Diffusionskoeffizient für Wasser nur etwa 1:10.000 des Wertes für Luft beträgt.

Die Diffusion hört zwischen Deponiekörper und dem umgebenden Medium dort auf (Luftraum oder gasverfügbare Hohlräume in dem umgebenden Boden), wo keine Konzentrationsunterschiede herrschen, was theoretisch erst nach Abschluss der Gasproduktion oder aber nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes (Gasproduktion = Gasumwandlung + Gasabsorption) erreicht ist.

2.4.6 Gasumwandlung

Damit ist die Umwandlung von Methan durch chemisch biologische Vorgänge gemeint. Der Effekt der Methanoxidation setzt die gleichzeitige Anwesenheit von Sauerstoff und Methan voraus. Während der Betriebsphase mit hoher Gasproduktion ist dies nur in der obersten Müllschicht der Fall (bis etwa 1m Tiefe unter dem Einbauhorizont). Durch abnehmende Gasproduktion, und dadurch in den Deponiekörper eindringende Luft, verlagert sich dieser Zustand auch in tiefere Abfallschichten. Die Zufuhr von Sauerstoff/ Bodenluft erfolgt durch Konvektion (z.B. Wind) und Diffusion

ausschließlich aus der Atmosphäre. Es treten also wieder aerobe Verhältnisse auf, bei denen verbliebenes und zuströmendes Methan oxidiert wird. Der Abbau von Methan kann nach Mancinelli und Mc Kay, 1985 [32], bis 10% der gesamten Methanproduktion einer Deponie betragen.

2.4.7 Gasadsorption / Gasabsorption

Neben der Gasumwandlung ist die Gasadsorption eine weitere Größe für die Bilanz des Gashaushaltes. Jedoch ist die Gasadsorption in der Regel so gering, dass sie bei der Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Grundsätzlich ist zwischen der Anlagerung an Feststoffen (Adsorption) und eine Lösung von Gasen in Flüssigkeiten (Absorption) zu unterscheiden. Die Absorption von Methan und Kohlendioxid kann nur auf trockenen Abfall bezogen werden. Da im Allgemeinen ein bestimmter Wassergehalt für die Methanbildung vorausgesetzt werden muss, ist nur die Lösung von Methan und Kohlendioxid in Wasser zu betrachten. Bei 20°C beträgt die maximale Löslichkeit von Methan in Wasser, 24 mg/l. Für Kohlendioxid beträgt die maximale Löslichkeit bei 20°C, 1.685 mg/l.

Bei hoher Gasproduktion ist der Anteil der Gasabsorption für die Bilanzierung nicht relevant. Das Gas wird überwiegend als Emission in den Luftraum die Deponie verlassen. Bei Nachlassen der Gasproduktion wird der Anteil des absorbierenden Kohlendioxids so groß, dass die Zusammensetzung des Deponiegases verändert wird. Durch die gute Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser, wird ein beträchtlicher Teil des Kohlendioxids mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Der Anteil an abgeführtem Kohlendioxid an der aktuellen Gasproduktion schwankt zwischen 0,01% und 10% je nach Gasproduktion und Wasserbewegung.

2.4.8 Gasfassung

Eine funktionierende Deponiegasfassung ist erforderlich, um von der Deponie ausgehende gasförmige Emissionen, soweit wie technisch möglich, zu minimieren und des weiteren Brand- und Explosionsgefahren sowie eine Beeinträchtigung der Deponieumgebung zu verhindern.

Eine effektive Gasfassung lässt sich nur mit Hilfe einer aktiven Entgasung erreichen. Eine passive Entgasung, bei der das Deponiegas durch Eigendruck entweicht, ist überhaupt nur bei Altdeponien mit sehr geringem Gasaufkommen in Betracht zu ziehen.

Es gibt unterschiedliche Konzepte der aktiven Deponiegasfassung. Mit welchem Konzept im Einzelfall die beste Wirkung erzielt werden kann, ist auf Grund von Untersuchungen der aktuellen Situation auf der betreffenden Deponie, ggf. auch in Verbindung mit Probebetrieben, Absaugversuchungen etc., durch Sachverständige und Gutachter zu verifizieren. Neben Fragen der Sicherheit und des Umweltschutzes, sind auch wirtschaftliche Aspekte der Energie- und Abwärmenutzung hierbei von besonderer Bedeutung.

Das gängigste Verfahren besteht darin, dass Deponiegas mit geringem Unterdruck abzusaugen (etwa 30 mbar). Alternativ kann bei bestimmten Gegebenheiten ein Gasfassungskonzept der Tiefenabsaugung mit größeren Unterdrücken in Frage kommen. Zwischen Art und Umfang der Deponieabdichtung, Größe, Alter und Zusammensetzung des Abfalls sowie dem Entgasungsbetrieb besteht eine enge Wechselwirkung. Deponieentgasungsanlagen müssen deshalb auf das jeweilige Konzept der Deponiegasfassung abgestimmt, sorgfältig geplant und betrieben werden.

Die einzelnen Einrichtungen der Deponiegasfassung sind so auszulegen, dass sie voneinander getrennt gesteuert werden können. Bereiche, in denen mit überwiegend hohem Deponiegaspotential (Gutgas) und Bereiche, in denen mit Deponiegas einer schlechteren Qualität (Schlechtgas) zu rechnen ist, können bei Bedarf getrennt geregelt werden.

Grundsätzlich wird zwischen vertikalen und horizontalen Gasfassungssystemen unterschieden. Beide kommen zur Anwendung. Die horizontalen Gasfassungssysteme werden parallel im Zuge der Abfalleinlagerung eingebaut. Zu beachten ist jedoch, dass vertikale und horizontale Gasfassungselemente oftmals mit unterschiedlichen Unterdrücken betrieben werden.

Vertikale Gasbrunnen werden in der Regel durch das Abtäufen von Bohrungen hergestellt. Im Anschlussbereich an die Sammelleitungen durchdringen die Rohre des

Fassungssysteme (z.B. Brunnen), die Oberflächenabdichtung. Diese sind mit elastischen bzw. beweglichen Rohrdurchführungen auszubilden.

Die Fassungselemente werden an Sammelleitungen angeschlossen, die oberhalb der Oberflächenabdichtung angeordnet werden und zu Gassammelstationen geführt werden. Von den Gassammelstationen wird das Gas letztendlich zu Gasabsaugstationen transportiert. Die Gassammelstationen stehen in der Regel im Randbereich, aber außerhalb des eigentlichen Deponiekörpers. In ihnen werden mittels eines Gassammelbalkens 5 bis 12 Gasbrunnen angeschlossen.

Zur Vermeidung von Lunkenbildung sind in setzungsempfindlichen Bereichen die gas- und kondensatführende Leitungen mit einem Gefälle von mindestens 5% oberhalb der Dichtung zu verlegen. In setzungsunempfindlichen Randbereichen sollte ein Mindestgefälle von 2 % realisiert werden. Bei Sammelleitungen sollte der Rohrinwendurchmesser größer DN 100 sein, um Druckverluste zu begrenzen. Gegen das Einfrieren von Gasfassungs- und Transportsystemen sind entsprechende Maßnahmen z.B. Überdeckungen mit Boden etc. auszuführen.

Allgemeine Anforderungen an das Gasfassungssystem

Es sollten nachfolgende allgemeine Anforderungen an die Fassungssysteme definiert werden:

- Vorrangiges Ziel der Entgasung ist die Verhinderung von Schadstoffemissionen und die Abwehr von Gefahren, sowie von Belästigungen durch Deponiegas.
- Zur Optimierung der Verwertung des Deponiegases kann eine Trennung des Fassungssystems in Schutzentgasungssysteme - mit höherem Luftanteil - und Nutzentgasungssysteme sinnvoll sein.
- Fassungssysteme müssen stets sicher entwässerbar sein. Wasser in den Fassungselementen macht diese teilweise oder vollständig wirkungslos, da in allen Bereichen des Deponiekörpers, in dem Gas strömt, auch mit Wasser zu rechnen ist, muss hinsichtlich der Fassungselemente eine Ableitung des Wassers möglich sein.
- Fassungssysteme müssen bei geringer Wartungsbedürftigkeit betriebssicher sein. So sind beispielsweise in freiem Gefälle entwässernde Fassungselemente und Entwässerungselemente betriebssicherer als solche, bei denen das Wasser durch Abpumpen entfernt werden muss.

- Fassungssysteme dürfen die Abdichtungssysteme nicht beeinträchtigen, insbesondere bei Fassungssystemen mit vertikalen Erfassungselementen besteht die Gefahr, dass bei Setzung des Deponiekörpers die Basis der Oberflächenabdichtungssysteme durch die starren Fassungselemente belastet werden. Hier sind entsprechende Maßnahmen zu treffen, die eine schädliche Belastung verhindern.
- Fassungssysteme müssen sicher gegen Lufteinbrüche abgedichtet sein. Lufteinbrüche können zu explosiven Gemischen führen. Die noch im Bau befindlichen Fassungselemente müssen, ebenso wie die fertiggestellten Elemente, gegen Luftzutritte abgesichert werden. Das Material der Fassungssysteme muss den zu erwartenden physikalischen, chemischen und biologischen Belastungen dauerhaft Stand halten. Physikalische Belastungen ergeben sich hauptsächlich aus der Auflast, verbunden mit hohen Temperaturen (bis zu 70°C). Chemische Belastungen sind aus den Gas- und Sickerwasserinhaltsstoffen, biologische Belastungen u.U. durch die den Abfall abbauenden Mikroorganismen zu erwarten.
- Die Ausbildungen und Anordnung der Fassungssysteme muss die aktive Entgasung auch der Betriebsflächen ermöglichen. Hierfür ist vor allem eine Leitungsführung, die den Einbaubetrieb nicht stört, sowie eine sichere Verhinderung von Lufteinbrüchen erforderlich.
- Die Sickerwasserdrainagesysteme dürfen nicht mit zur aktiven Entgasung herangezogen werden. Durch aktive Entgasungsmaßnahmen ändern sich in den Entwässerungsschächten u.a. die Temperatur- und Druckgradienten, die Sickerwasserströmungsverhältnisse und das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Sickerwassers, so dass es zu verstärkten Inkrustations- und Verstopfungserscheinungen kommen kann.

Beanspruchung der Gasfassungssysteme

Gemäß (E2-18 [34]) unterliegen die im Deponiekörper eingebauten Gasfassungselemente (Rohre, Leitungen und sonstige Ausrüstungen) nachfolgend genannten Beanspruchungen:

- Chemische und biologische Angriffe durch Deponiegaskondensat und Sickerwasser.
- Thermische Beanspruchung durch die im Deponiekörper über lange Zeiträume herrschenden hohen Temperaturen, die in Folge chemischer und/ oder biologischer Umsetzungsprozesse entstehen können und die

- mechanische Beanspruchung durch die vertikalen, horizontalen bzw. räumlich unterschiedlichen Verformungen des Abfallkörpers (Setzung, Sackung etc.).

Diese Verformungen können als:

- Stauchung,
- Dehnung,
- Biegung und das
- Abscheren

der eingebauten Teile wirksam werden. Aus o.g. Gründen werden Deponiegasbrunnen teleskopartig ausgeführt. Gasfassungsrohre sollten mit einem Mindestdurchmesser DN 200 ausgeführt werden.

Kondensatabscheidung

Das wasserdampfgesättigte Deponiegas scheidet im Leitungssystem Kondensat aus. Das Kondensat ist regelmäßig zu untersuchen. Als Bemessungsgrundlage für die Kondensatmenge ist die Wassermenge anzusetzen, die beim Abkühlen des Gases von 45°C auf 20°C entsteht (entspricht ca. 100 g/m³ Deponiegas) (TA Siedlungsabfall [33]). Durch geeignete Maßnahmen ist sicherzustellen, dass über die Kondensatabscheider keine Luft in das Leitungssystem eingesaugt werden kann (z.B. Siphonlösungen oder Wasservorlagen, in Behältern oder Rohren, etc.). Kondensat ist kontaminiertes Wasser und somit nach dem jeweiligen Stand der Technik zu entsorgen. In der Regel wird es zusammen mit dem Sickerwasser behandelt.

Anforderung an die Gestaltung und Konstruktion von Gasfassungselementen

Rohrleitungen sind möglichst so anzuordnen, dass sie durchgehend gereinigt und kontrolliert werden können. Die Gasbrunnen selbst müssen über Gasbrunnenköpfe und die wichtigen Leitungen über Schächte oder an den Gasstationen zugänglich sein. Schächte, Brunnenköpfe und Gassammelstationen sind so anzuordnen, dass sie von Fahrzeugen erreicht werden können, um Wartung und Instandhaltungsmaßnahmen durchführen zu können.

Dränmaterial

Als Dränmaterial eignen sich natürliche Kiesel- und Mineralgemische. In den Gasdrainagen soll langfristig ein Wasserdurchlässigkeitswert von $k \geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s erhalten

bleiben. Im Einbauzustand sollte deshalb ein Material mit einem Wert $k \geq 1 \cdot 10^{-2}$ m/s verbaut werden. Das Material sollte kalkfrei sein, um eine Versinterung durch Reaktionen mit dem in dem Deponiegas enthaltenen Kohlendioxid zu vermeiden.

Anforderungen an Rohrleitungsmaterial

Als Material der Rohre sind Kunststoffe mit einer breiten Beständigkeitsskala gegen organische und anorganische Inhaltsstoffe geeignet. Bei der Auswahl sind außerdem die zu erwartenden physikalischen Beanspruchungen (Druck, Zug, Biege- und Scherkräfte), sowie Temperatureinwirkungen zu berücksichtigen. Bei Temperatureinwirkungen bis 40°C sind beispielsweise PE-HD Rohrleitungen mit einer vorgesehenen Lebensdauer von 100 Jahren geeignet. Falls höhere Temperaturen und/ oder besondere chemische Einwirkungen auftreten können, werden zur Gewährleistung der Funktionalität unter Langzeitaspekten andere Werkstoffe erforderlich werden. Für Dränleitungen der Gasfassungselemente sind gelochte Rohre geeignet. Die Löcher sollen gleichmäßig auf der gesamten Rohroberfläche verteilt sein. Der Lochdurchmesser ist auf die Körnung des umgebenden Dränmaterials abzustimmen. Die Rohrverbindungen selbst sollten mittels Schweißung stoff- und formschlüssig mit einander verbunden werden. Beim Schweißen entstandene Schweißwülste dürfen das Einführen von Reinigungs- und Kontrollgeräten (z.B. Kamerainspektionen) sowie das Absenken von Tauchpumpen zur Entwässerung von Gasbrunnen nicht behindern.

Gasbrunnen

Überschlägig werden auf einem Hektar Deponie, 3 bis 4 Stück Gasbrunnen bei einem Normalabsaugungsbetrieb (Unterdruck ca. 30 mbar) realisiert. Die Brunnenabstände betragen hier ca. 50 bis 70 m. Je geringer der Unterdruck, desto geringer die Abstände zwischen den Gasbrunnen.

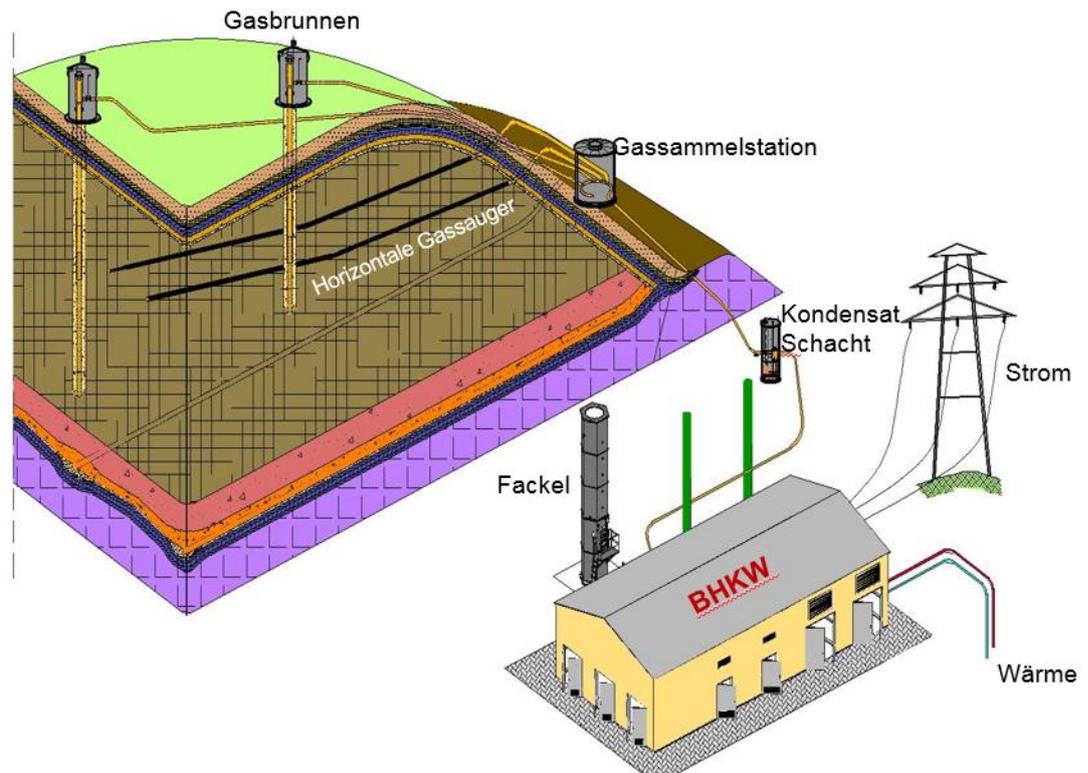
Bei Gasbrunnen mit geringen Ausbautiefen können, bei entsprechender Standfestigkeit des Abfallkörpers, unverrohrte Greiferbohrungen abgetäuft werden. Bei größeren Bohrtiefen sind verrohrte Bohrungen erforderlich. Dabei ist der Bohrlochdurchmesser auf den geplanten Ausbau mit Gasfassungselementen abzustimmen. Für Gasbrunnen mit Rohrdurchmessern von ca. 200 mm haben sich Bohrlochdurchmesser von 800-900 mm bewehrt. Bei Systemen der Tiefenabsaugung, die mit höheren Unterdrücken arbeiten und mit kleineren Rohrdurchmessern ausgestattet

sind, können auch geringere Bohrlochdurchmesser zwischen 400 – 600 mm ausgeführt werden. Gasbrunnen dürfen die Basisabdichtungen einer Deponie nicht beeinträchtigen. Sie müssen deutlich oberhalb, in der Regel mit einem Mindestabstand von 2 m, enden. Nach Einbau des Dränrohres wird der Ringraum der Brunnenbohrung mit Drainagematerial verfüllt und im oberen Bereich mit nichtgasgängigem Material (z.B. Lehm) abgedichtet. Der obere Abschluss des Brunnens kann als freistehender Gasbrunnenkopf oberirdisch in einem Schacht (Brunnenstube) ausgeführt werden. Die Konstruktionen oberhalb der Dichtung sind in elektrisch leitfähiger Form auszuführen (z.B. PE-HD-EL). Die Durchdringungsbereiche der Gasbrunnen durch die Abdichtungskomponenten sind die potentiellen Schwachstellen der Oberflächenabdichtung und für die Gasfassung als solche auch. Aufgrund von Setzungen im Gasbrunnenbereich kann es zu Bewegungen zwischen Gasbrunnenkopf und Filterrohr kommen, die zur Ablösung einer oder beider Abdichtungskomponenten vom Rohr führen können. Der Anschluss des Gasbrunnenkopfes und die Anbindung an das Oberflächenabdichtungssystem sind daher verformungstolerant auszubilden.

Horizontale Gasdrainagen (Rigolen)

Horizontale Gasdränagen sind eine Alternative zu den zuvor beschriebenen Gasbrunnen. Diese werden in Rigolen werden parallel zueinander in versetzter Anordnung über die einzelnen Verfüllbereiche im Zuge der Abfallablagerung eingebaut. Achsabstände sind hier in der Regel zwischen 25 und 20 Metern. Horizontale Gasdränagen können mit quadratischen, rechteckigen oder trapezförmigen Rigolenquerschnitten (Breite und Tiefe sollte > 1,00 m sein) ausgeführt werden. Mittig im Rigolenquerschnitt wird eine mit Dränmaterial umhüllte Drainageleitung eingelegt. Der gesamte Rigolenquerschnitt ist auf ganzer Länge mit Dränmaterial vollständig aufzufüllen. Zwischen Drainagematerial und umgebendem Abfall besteht oftmals die Notwendigkeit des Einbaus eines Trennvlieses, um die Filterstabilität zu ermöglichen. Zur Entwässerung sollten Dränageleitungen mit den Rigolen mit einem Gefälle von ca. 5 bis 10% ausgeführt werden. An den Tiefpunkten der Rigolen sollten Drainagekammern zur Entwässerung mit einem Volumen > 10m³ ausgeführt werden. Zur Vermeidung von Lufteintritten von außen, sollten auf einer Länge von mindestens 6 m im Durchdringungsbereich Vollrohre angeordnet werden. Die Abfallüberdeckung sollte mindestens 5 m betragen.

Sind auf einer Deponie kombinierte Gasfassungsanlagen in Form von horizontalen Rigolen und vertikalen Gasbrunnen angeordnet, so ist darauf zu achten, dass zwischen den unterschiedlichen Systemen keine „Kurzschlussverbindungen“ möglich ist. Entsprechende Abstände sind zwischen horizontalen und vertikalen Systemen zwingend erforderlich.



2.4.9 **Konzept einer aktiven Deponieentgasung**

2.4.9.1 *Beschreibung des Verfahrens der aktiven Deponieentgasung*

Über die im Müllkörper niedergebrachten vertikalen Gasbrunnen und deren gezieltes Besaugen, wird auf dem gesamten Deponiekörper ein leichter Unterdruck mit Hilfe des Gasverdichters erzeugt. Dieser Unterdruck bewirkt, dass das Deponiegas einem Zwangsweg in die Gasbrunnen folgt.

Der Prozess muss so eingestellt werden, dass an jedem Gasbrunnen möglichst ein Druck von -30 mbar (Saugdruck) anliegt. Gleichzeitig muss verhindert werden, dass durch zu starkes Besaugen unkontrolliert atmosphärische Luft in den Deponiekörper eingesogen wird. Dies würde zu einem Lufteinbruch in dem gesamten Entgasungs-

system, und folglich zu möglichen explosiven Gasgemischen innerhalb des Entgasungssystems führen. Aus diesem Grund sind um die Gasbrunnen wirkungsvolle Dichtungskegel aus bindigem Material herzustellen, die das Eindringen von Umgebungsluft und das Ausbreiten von Deponiegas aus dem Bereich der Gasbrunnen verhindern.

Durch den Einsatz geeigneter Messtechnik innerhalb der Gasverdichterstation, sowie durch konstruktive Maßnahmen an der Anlagentechnik / Rohrleitungstechnik, muss sichergestellt werden, dass die Bildung von explosiven Gasmischungen bzw. deren Auswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert wird (konstruktiver Explosionsschutz).

Das im Gasbrunnen gefasste Gas wird über die Gassammelleitung zur Gassammelstelle geführt. Die Gasgeschwindigkeit innerhalb der Gassammelleitungen soll hierbei < 10 m/s betragen. Aufgrund von Setzungen des Deponiekörpers infolge der Abbauprozesse kommt es zu Spannungen und Verformungen, welche zu Muldenbildungen in setzungsempfindlichen Bereichen führen können. Um daraus resultierende Wasseransammlungen in den Rohrleitungen zu vermeiden, müssen sämtliche unterirdisch verlegten gas- und kondensatführenden Rohrleitungen mit einem Gefälle von $> 5\%$ ausgeführt werden.

In der Gassammelstelle können für jeden angeschlossenen Gasbrunnen über geeignete Messstellen an den jeweiligen Gasmessstrecken die Gasqualität (CH_4 -, O_2 , CO_2 -Gehalt), sowie die Parameter Saugdruck, Gastemperatur und die Gasmenge gemessen werden.

Ausgefallenes Gaskondensat läuft strömungsrichtig ebenfalls in den Gassammelbalken der Gassammelstation und von hier in einen außerhalb der Gassammelstelle positionierten Kondensattiefpunkt (Kondensatschacht). Durch die an den Gasmessstrecken vorgesehenen Zwischenbauklappen kann der Gasstrom jedes Gasbrunnens separat reguliert werden.

Die Gassammelstelle selbst ist frostfrei und auf ausreichend tragfähigem Boden zu gründen. Für sämtliche innerhalb der Gassammelstelle befindlichen Ausrüstungen, Lüftungsgitter, Rohrleitungen, etc. ist ein wirkungsvoller Potentialausgleich (Sicherheitstechnik) zu schaffen, der an eine Außenerdung der Gassammelstelle anzuschließen ist. Der Ableitwiderstand darf in der Summe 1 Ohm nicht überschreiten.

Über den Gassammelbalken und weiter über die Gasansaugleitung wird das Deponiegas zur Gasförderstation weitertransportiert. Auf dem Transportweg ausgeschiedenes Deponiegaskondensat wird in einem am Leitungstiefpunkt befindlichen Kon-

densatschacht abgeschieden und gesammelt. Das Deponiegas gelangt in die Gasförderstation, wo sich die Messgasentnahme für die permanent arbeitende Gasanalytik befindet.

2.4.9.2 *Gasanalyse und Sicherheitssystem*

Der an der Messgasentnahme abgezogene Teilgasstrom wird der Gasanalyse zugeführt und hinsichtlich seiner CH₄- und O₂-Gehalte analysiert. Die Explosionsgrenzwerte für CH₄ betragen 12,5 Vol% bzw. für O₂ 11,6 Vol%. Um zu verhindern, dass unter Umständen explosionsfähige Gasgemische in den Deponiegasverdichter gelangen, erfolgt bei den Werten von CH₄ mit 30 Vol% bzw. O₂ mit 3 Vol% eine optische und akustische Alarmierung. Bei analysierten Werten von 25 Vol% CH₄ bzw. 6 Vol% O₂ erfolgt eine sofortige Anlagenabschaltung mit einer parallelen optischen und akustischen Alarmierung.

Diese Gasanalyse erfolgt permanent und ist redundant im Sinne des Sicherheitstechnischen Anlagenkonzepts (konstruktiver Explosionsschutz), da bei einem möglichen Luftsauerstoffeinbruch in das saugseitige Gasfassungssystem zunächst der O₂-Wert ansteigen würde und hier einen Alarm bzw. eine Abschaltung auslöst.

Bei Versagen dieser Messlinie würde in der Folge der CH₄-Wert im Deponiegasstrom kontinuierlich weiter absinken, so dass dann der Voralarm bzw. der anschließende Alarm über den CH₄-Kanal zu einer Anlagenabschaltung führt. Gleichzeitig wird mit einer in der saugseitigen Gasleitung installierten Schnellschlussarmatur der weitere Zustrom von explosionsfähigem Gasgemisch in die Gasförderstation verhindert.

Das Deponiegas durchströmt einen Kondensatabscheider mit einem innenliegenden Demisterpaket. Im Kondensatabscheider, der mit einer deutlich reduzierten Fließgeschwindigkeit von < 2m/s durchströmt wird und durch die deutliche Erweiterung der Querschnitts- und Wandfläche, an der das Deponiegas weiter abkühlt und erneut weiter getrocknet wird. Das abgeschiedene Deponiegaskondensat gelangt über eine mit Gefälle verlegte Ablaufleitung in den außerhalb der Gasverdichtung befindlichen Kondensatschacht.

Das Deponiegas fließt weiter durch die saugseitigen Gasrohrleitungen. Hier werden die Gastemperatur und der Saugdruck gemessen. Durch eine saugseitige installierte Flammendurchschlagsrichtung strömt das Deponiegas weiter in den Deponiegasverdichter. Der Deponiegasverdichter bewirkt eine Erwärmung des Deponiegases

durch die Kompression um ca. 250 mbar auf Temperaturen $> 40^{\circ}\text{C}$. Mit durchschnittlich 1,15 mbar Überdruck wird das Deponiegas durch die druckseitig installierte Flammendurchschlagsicherung und weiter in das druckseitige Rohrleitungssystem (Gastransportleitung) zu den Gasbehandlungs- (Deponiegasfackel) bzw. Gasverwertungseinrichtungen (Blockheizkraftwerk) gedrückt. Auf der Druckseite des Deponiegasverdichters werden der Förderdruck und die Gastemperatur gemessen.

2.4.9.3 *Explosionsschutz*

Beide, saug- und druckseitig, installierten Flammendurchschlagsicherungen haben eine eigene, sicherheitsrelevante Temperaturüberwachung (konstruktiver Explosionsschutz).

Im eher unwahrscheinlich Fall, dass explosionsfähiges Deponiegasgemisch, trotz vorhandener redundanter, den Deponiegasverdichter gelangt und durch die im Verdichter verrichtete Arbeit entzündet werden könnten, könnte unter Umständen innerhalb des Verdichters eine Explosion ausgelöst werden. Diese würde dazu führen, dass sich der Explosionsdruck und die Explosionsflamme in Richtung „frischen“ Gasstromes ungehindert in beide Rohrleitungsrichtungen ausbreiten. Insbesondere der durch Unterdruck vorherrschende Weg zurück in den Deponiekörper würde zu massiven, irreversiblen Schäden innerhalb des Deponiekörpers bis hin an die Gasbrunnen zur Folge haben, bei denen Leib und Leben der Beschäftigten der Deponie, ebenso wie nahegelegene Bauwerke gefährdet wären.

Druckstoß und Explosionsflamme auf der Druckseite innerhalb der Gastransportleitung würde im Falle der angeschlossenen und betriebenen Deponiegasfackel zu einer in Richtung Austrittsöffnung der Fackel gerichteten massiven Explosionswirkung führen, die in der Regel zu einer irreversiblen Zerstörung der Fackel und zur erheblichen Gefährdung von Leib und Leben der Beschäftigten der Deponie, ebenso wie nahegelegene Bauwerke führt.

Beide Flammendurchschlagsicherungen verhindern durch ihre konstruktive Auslegung wirkungsvoll das „Durchschlagen“ der Explosionsflamme und der weiteren Ereignisse in der vorbeschriebenen Weise. Das explosive, entzündete Gasgemisch brennt zwischen saug- und druckseitiger Flammendurchschlagsicherungen. Die Temperaturüberwachungen beider Flammendurchschlagsicherungen messen die Gastemperatur zwischen den Flammendurchschlagsicherungen und dem Verdich-

ter. Bei Überschreitung einer voreingestellten Grenztemperatur wird die Deponiegasförderstation sofort abgeschaltet und die weitere Gaszufuhr durch die saugseitig installierte Schnellschlussarmatur unterbrochen.

Im normalen Betriebsfall strömt das Deponiegas mit Überdruck durch die Gastransportleitung weiter zu einem Deponiegasbrenner und weiter über den Querschnitt verteilt, in den Brennraum. Durch Zumischen von atmosphärischer Luft (im Naturzugprinzip bzw. über Zwangsförderung durch ein Lüftungsgebläse) wird ein brennfähiges Deponiegas-Luftgemisch erzeugt, welches mit Luftüberschuss, $\lambda > 1$) bei Brenntemperaturen von $\geq 1.000^\circ\text{C}$ schadstoffarm verbrannt wird.

2.5 Sickerwasserbehandlung

2.5.1 *Biologisches Reinigungsverfahren*

Die biologische Reinigung umfasst Anlagen zur Kohlenstoff- und Stickstoffeliminierung, wobei die Kohlenstoffeliminierung und Nitrifikation als Teilschritt der Stickstoffeliminierung in einem Reaktor/Becken erfolgen. Hierbei übersteigt die Stickstoffbelastung des Sickerwassers die Kohlenstoffbelastung um ein Vielfaches, so dass die Auslegung der Behandlungsanlage unter dem Gesichtspunkt einer gesicherten bzw. weitergehenden Nitrifikation und Denitrifikation erfolgt.

Die Denitrifikation kann einerseits räumlich getrennt von der Nitrifikation vor- oder nachgeschaltet in einem separaten Reaktor oder andererseits im gleichen Reaktor/Becken simultan oder intermittierend erfolgen. Letztgenannte Verfahren erfordern den Einsatz aufwendiger Mess- und Regelungstechnik und sind daher für Sickerwasserreinigungsanlagen, auch in Bezug auf stoßweise Belastungen, nur bedingt geeignet. Eine nachgeschaltete Denitrifikation kann sich bei einer ohnehin notwendigen Kohlenstoffzudosierung positiv auswirken. Die vorgeschaltete Denitrifikation ist die am häufigsten eingesetzte Verfahrenstechnik, wobei Rücklaufschlamm mit einer hohen Rezirkulationsrate in dem Nitrifikationsbecken mit dem Rohsickerwasser vermischt wird.

2.5.1.1 *Belebtschlammverfahren*

Bei dem in der Sickerwasserbehandlung am häufigsten verwendeten Verfahren handelt es sich um die vorgeschaltete Denitrifikation, entsprechend dem in der kommunalen Abwassertechnik angewendeten Verfahren.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Ausnutzungsmöglichkeit des im Zulauf enthaltenen Kohlenstoffes für die Denitrifikation. Ähnlich der kommunalen Abwassertechnik, erfolgt mit Hilfe der vorgeschalteten Denitrifikation eine fast vollständige Stickstoff- und Kohlenstoffelimination. Dagegen werden biologisch schwer abbaubare Substanzen nicht oder nur unwesentlich eliminiert.

2.5.1.2 *Festbettbiologie*

Entsprechend dem Verfahren der konventionellen Biologie, erfolgt auch hier eine Stickstoff- und Kohlenstoffelimination.

Bei diesem System werden sessile, d.h. immobilisierte Mikroorganismen eingesetzt, und nicht wie bei konventionellen Anlagen suspendierte, d.h. im Abwasser frei bewegliche Bakterienmasse. Durch Einsatz geeigneter Trägermaterialien, die in die Belebungsbecken eingebracht werden, kommt es zum Ansiedeln bestimmter Mikroorganismen auf diesen Trägermaterialien und damit zu einer Erhöhung der Trockensubstanz, was sich wiederum günstig auf die erforderlichen Beckenvolumina auswirkt. Durch entsprechende Verfahren (Festbett und Rotationstauchtropfkörper) ist es möglich, zu nitrifizieren und zu denitrifizieren.

2.5.1.3 *Kompaktbiologie mit Ultrafiltration*

Auch hier erfolgt entsprechend den anderen beiden Verfahren eine Nitri- und Denitrifikation. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass zum Einen der Rückhalt der belebten Masse weder über eine Nachklärung noch über eine normale Filtration geschieht, sondern mittels einer Ultrafiltration (sehr feine Filtration) bewerkstelligt wird und das gesamte System unter Druck steht. Darüber hinaus liegt der Vorteil in wesentlich höheren Schlammgehalten (bis 30 g/l), was durch sehr lange

Aufenthaltszeiten der Mikroorganismen im Reaktor durch Verminderung der Ausschwemmrate bedingt ist, und zum Anderen in der besseren Sauerstoffausnutzung infolge der Druckbelüftung. Zudem begünstigen die so erzielten Schlammaufenthaltszeiten den Abbau biologisch schwer abbaubarer Stoffe.

2.5.2 Nachgeschaltete Filtration

2.5.2.1 Sandfiltration

Sandfiltration in offener und geschlossener Bauweise und in ein- oder mehrschichtigem Aufbau ist das in der Wasserver- und -entsorgung am häufigsten angewendete System der Filtration. Der Rückhalt der zu entfernenden Schweb-, Feinst- und zum Teil auch der gelösten Stoffe (Suspensa) erfolgt durch die Raumwirkung des Filterbettes und durch die Siebwirkung der oberen Filterschicht.

Der Siebvorgang erfolgt durch das Filterbett, i.d.R. von oben nach unten, in dessen Folgen die zu entfernenden Teilchen, bedingt durch verschiedene physikalische Vorgänge, im Filter verbleiben. Daher muss eine Rückspülung des Filters erfolgen, um zu vermeiden, dass dieser verstopft und somit nicht mehr betriebsfähig ist. Die Leistungsgrenze eines Sandfilters liegt in dem verwendeten Filtermaterial, d.h. im verwendeten Korngemisch im Filter.

Für den Einsatz in der Sickerwasseraufbereitung kommen zumeist einschichtige Schnellfilter mit Quarzsandfüllung zum Einsatz. Der erreichbare TS-Gehalt im Ablauf der Anlage hängt dann speziell vom verwendeten Filtermaterial ab. Zu erwarten ist jedoch, dass sämtlich nachgeschaltete Anlagenteile von schädlichen Feststoffen freigehalten werden können.

2.5.2.2 Ultrafiltration

Ultrafiltration ist ein Membrantrennverfahren zur Abtrennung von hoch- und niedermolekular gelösten Stoffen. Es erfolgt hier, im Gegensatz zur herkömmlichen Filtration, der Rückhalt wesentlich kleinerer Teilchen durch spezielle Membranen. D.h. mittels Druck wird das zu reinigende Sickerwasser durch diese Membrane leitet, um somit eine Trennung der Inhaltstoffe von der gelösten Phase zu erreichen.

Um ein vorzeitiges Verstopfen der Membranen zu vermeiden, strömt bei der Ultrafiltration das zu reinigende Sickerwasser seitlich an der Membrane vorbei und verhindert somit ein direktes Verblocken der Membranen.

2.5.2.3 *Trommelfiltration*

Der Wirkungsgrad der Trommelfiltration entspricht etwa dem der konventionellen Filtration. Es handelt sich hierbei um ein rein mechanisches Verfahren. Ein sich drehendes Sieb, oder aber ein feinmaschiges Netz, wird von innen von dem zu reinigenden Abwasser durchflossen, welches dann durch den Filter zwischen den einzelnen Stäben nach unten bzw. zur Seite hin abfließen kann.

Das Rechengut verbleibt hierbei innerhalb der Trommel und gelangt über die Drehbewegung an den oberen Scheitelpunkt der Trommel, von wo über eine Rinne abtransportiert werden kann.

Hervorzuheben ist der kontinuierliche Betrieb der Trommelfiltration, da ständig das Rechengut entleert wird und somit eine ständige Regeneration des Siebes stattfindet. Es handelt sich jedoch hierbei um eine reine Absiebung, so dass im Wesentlichen keine gelösten Stoffe aus dem Sickerwasser entfernt werden.

Die Steuerung der Ablaufqualität ist mit Hilfe der Maschenweite und der Umlaufgeschwindigkeit der Trommel sowie dem Zufluss zur Anlage möglich.

2.5.3 ***Chemisch-physikalische Stufe***

Die sich notwendigerweise an die biologische Stufe anschließende physikalisch-chemische Behandlung dient hauptsächlich dem Rest-CSB- und AOX-Abbau. Folgende Verfahrenstechniken kommen dabei zum Einsatz:

- zweistufige Umkehrosmoseanlagen mit anschließender Konzentrateindampfung und -trocknung sowie optional einer Granulierung,
- Adsorption an Aktivkohle oder Adsorberharzen, der sich optional eine Fällungs- und Flockungsstufe anschließen kann oder

- nasschemische Oxidation mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder Ozon (O_3) mit Ultraviolett (UV)-Bestrahlung (Katalysator) oder als neuestes Verfahren mit einem Festbettkatalysator in Verbindung mit Ozon (O_3).

2.5.3.1 *Nasschemische Oxidation*

Das Prinzip der nasschemischen Oxidation liegt in der Aufoxidation der Sickerwasserinhaltsstoffe mittels des im Reaktionsmittel enthaltenen Sauerstoffes. Im Vergleich zur biologischen Oxidation handelt es sich bei der chemischen Oxidation um ein sehr schnelles Oxidationsverfahren, bei dem außer den theoretischen Endprodukten H_2O und CO_2 keine weiteren Reststoffe anfallen. Im Gegensatz zur biologischen Oxidation, die bei komplex zusammengesetzten Verbindungen sehr langsam bzw. gar nicht stattfindet, erfolgt bei der nasschemischen Oxidation eine sehr weitgehende Destruktion der Sickerwasserinhaltsstoffe.

Ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz dieses Verfahrens liegt besonders im Anschluss bzw. in Verbindung mit einer biologischen Behandlung, da dort die biologisch abbaubaren Substanzen auf wirtschaftlichem Wege schon abgebaut werden können und somit eine nachgeschaltete Oxidation entlastet wird.

2.5.3.2 *H_2O_2 / UV-Verfahren*

Bei diesem Verfahren wird Wasserstoffperoxid (H_2O_2) als Oxidationsmittel eingesetzt. Des Weiteren kommt zur Katalyse dieser Reaktion UV-Lichtbestrahlung zum Einsatz.

Wasserstoffperoxid ist durch die zusätzliche Einbindung eines Sauerstoffatoms von normalem Wasser zu unterscheiden. Es lässt eine sehr leichte Übertragbarkeit eines Sauerstoffatoms auf andere Gruppierungen zu. Die Hauptwirkung dieses Verfahrens, wie das aller nasschemischen Oxidationsverfahren, beruht in der Elimination bzw. der Destruktion des CSB und AOX, d.h. also der biologisch schwer abbaubaren, höhermolekularen Kohlenstoffverbindungen.

Zur optimalen H_2O_2 -Ausbeute muss eine pH- Einstellung auf etwa 4 bis 5 erfolgen. Die erforderliche Chemikalienmenge sowie der H_2O_2 -Verbrauch und somit der CSB-Abbau sind auf experimentellem Wege festzustellen.

Wasserstoffperoxid wird bei diesem Verfahren als wässrige Lösung, in lagerbarer Form, vorgehalten und dann in einem Reaktionsbehälter dem Sickerwasser zugegeben.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in der verfahrenstechnisch günstigen Durchführbarkeit, dem geringen apparativen Aufwand und in der vollständigen Destruktion der Sickerwasserinhaltsstoffe sowie in der Reststofffreiheit.

Als Nachteil ist bei diesem Verfahren, wie bei allen chemischen Oxidationsverfahren, der hohe Energieaufwand zu nennen.

2.5.3.3 *O₃/UV-Verfahren*

Als Oxidationsmittel kommt bei diesem Verfahren Ozon (O₃) in Verbindung mit UV-Lichtbestrahlung zum Einsatz.

Der Unterschied zu dem Wasserstoffperoxidverfahren liegt in dem erhöhten apparativen Aufwand, da Ozon (O₃) aufgrund seines relativ schnellen Selbstzerfalls nicht lagerbar ist. Dadurch bedingt, ist die Vorortzeugung des Ozons, und zusätzlich der Betrieb einer solchen Anlage unter Druck zur besseren Ausnutzung des dann im Sickerwasser gelösten Ozons, apparativ aufwendiger zu gestalten. Zur weiteren Ausnutzung wird zusätzlich ein behandelter Abwasserstrom und nicht verbrauchtes Ozon im Kreislauf gefahren. Das Verfahren erfordert einen hohen apparativen Aufwand, den Einsatz spezieller Werkstoffe zur Beherrschung der Korrosionsproblematik sowie einer umfassenden Mess- und Regeltechnik zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen.

3 Deponiesicherungsverfahren

3.1 Oberflächenabdichtung

3.1.1 Allgemein (EU-Norm)

Mit dem Inkrafttreten des Assoziierungsabkommen zwischen der EU und der Ukraine (Association Agreement between the European Union and its Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part) seit dem September 2017 sind die Richtlinien der EU für die Sicherung der Deponie zu berücksichtigen.

Im Anhang I der Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien (vgl. [38]) sind Allgemeine Anforderungen für alle Deponiekategorien formuliert. Die Anforderungen zum Schutz des Bodens und des Wassers beinhalten, dass für den Fall einer Abwägung der zuständigen Behörde diese zu der Auffassung gelangt, dass der Bildung von Sickerwasser vorgebeugt werden muss, eine Oberflächenabdichtung vorgeschrieben werden kann (Abschnitt 3.3 des Anhangs I der Richtlinie [38]). In Abhängigkeit von der Deponieklasse werden die in der nachstehenden Tabelle 8 aufgeführten Oberflächenabdichtungen empfohlen. Unter bestimmten Voraussetzungen (Abschnitt 3.4 des Anhangs I der Richtlinie [38]) können die Anforderungen an die Oberflächenabdichtungen herabgesetzt werden.

Tabelle 8: Oberflächenabdichtungen von Deponien nach Anhang I in [38]

| Deponieklasse | nicht gefährlich | gefährlich |
|--|--------------------|--------------------|
| Deponiedrainageschicht | erforderlich | nicht erforderlich |
| Künstliche Abdichtungsschicht | nicht erforderlich | erforderlich |
| Undurchlässige mineralische Abdichtungsschicht | erforderlich | erforderlich |
| Drainageschicht > 0,5 m | erforderlich | erforderlich |
| Oberbodenandeckung >1 m | erforderlich | erforderlich |

Anmerkung des Verfassers (BN Umwelt GmbH) zur vorstehenden Tabelle 8

1. Grundsätzlich wird die Wirksamkeit einer Abdichtung nach der Wassermenge, die unter definierten Randbedingungen durch eine „dichtende“ (hemmende) Schicht

hindurchtritt, bewertet. Es gibt keine **undurchlässigen** mineralischen Abdichtungsschichten. Die wissenschaftliche Kenngröße der Dichtigkeit ist die Permittivität. Das ist die Wassermenge, die pro Zeiteinheit, Höhendifferenz und Fläche durch eine Schicht hindurchtritt. Die mineralischen Baustoffe, welche im Grund- und Deponiebau zu Abdichtungszwecken zum Einsatz kommen, sind durch eine geringe Permittivität bzw. geringe Durchlässigkeit, den sogenannten k oder k_f -Wert, gekennzeichnet.

2. Die Notwendigkeit einer in Tabelle 1 genannten Deponiedrainageschicht (unterhalb der Dichtung) steht in keinem funktionalen Kontext, ob die darunterliegenden Abfälle gefährlich oder nicht gefährlich sind. Die Notwendigkeit, und vor allem deren Gestaltung, wird durch die Art der Dichtung (in erster Linie der Baustoff), das Gaspotential und die Homogenität der unmittelbar darunter eingelagerten Abfallstoffe bestimmt. Der Sinn und Zweck einer Gasdränschicht liegt darin, den Gasandrang (Druck) auf die Dichtungsfläche zu vergleichmäßigen. Darüber hinaus kann bzw. sollte die Gasdrainschicht, Trag- und Ausgleichsfunktionen der Stoffpaarung Abfall / Dichtungsschicht übernehmen. Die Eigenschaften werden hier im Wesentlichen durch das Dichtungselement bestimmt.

3.1.2 Planungsgrundsätze Ukrainische Baunorm - Deponien für feste Siedlungsabfälle

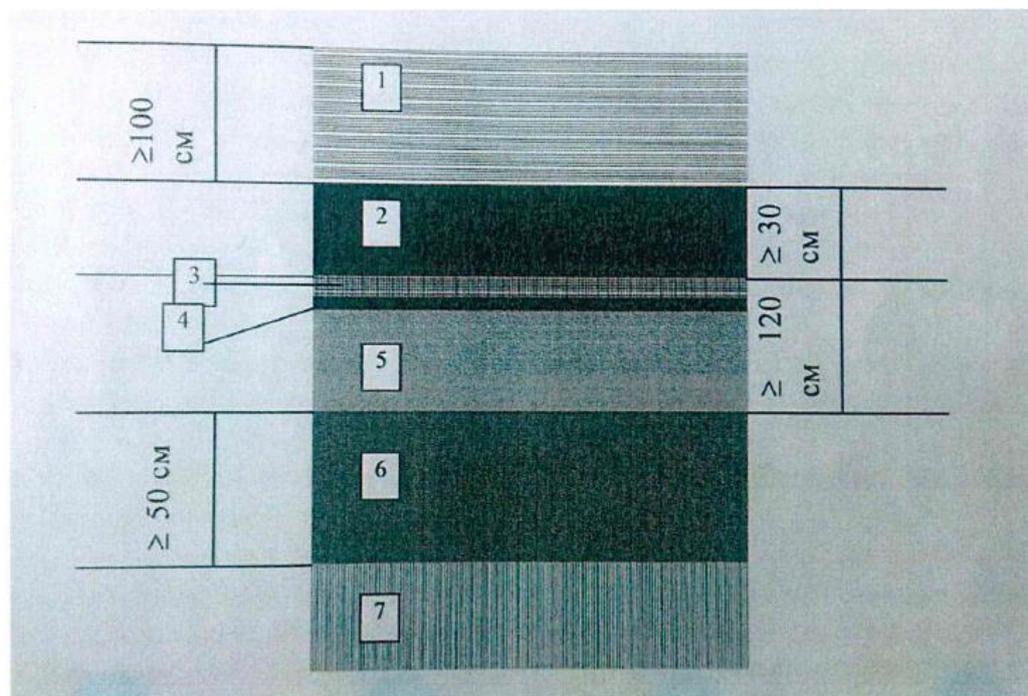
In der Ukrainische Baunorm [35] für Deponien für feste Siedlungsabfälle werden nachfolgende Planungsgrundsätze, in Form eines Regelaubaus mit entsprechenden Anforderungskriterien an die einzelnen Komponenten, benannt (Angabe von oben nach unten):

- Rekultivierungsschicht, nicht unter 1,0 m dick, samt fruchtbarem Boden 30 -50 cm dick;
- Drainageschicht, nicht unter 30 cm dick,
- feinsandige Schutzschicht, nicht unter 20 cm dick,
- polymere Dichtungskomponente (Konvektionssperre), nicht unter 3,0 mm stark, resistent gegen chemische und biologische Einwirkungen und gegen Schädigung durch Nageltiere (Konvektionssperre, Polymer, PE-HD-Dichtungsbahn),

- mineralische Dichtungsschicht, bestehend aus nicht weniger als 2 Schichten des verdichteten Tons mit der Gesamtdicke von 1,0 m und.
- Ausgleichsschicht und Gasdrainage mit einer Gesamtdicke von nicht weniger als 0,50 m. Zur Sammlung und Ableitung von Deponiegas durch die Ausgleichsschicht ist eine weitere Schicht einzubauen, die die Funktion der Gasdrainage erfüllt. Die Mindestdicke der Gasdrainage aus natürlichen Materialien hat 0,30 m nicht zu unterschreiten. Der Anteil an Kalziumkarbonat im Material der Gasdrainage darf 10 % der Masse nicht übersteigen.

Gemäß [35] hat der Gesamtbeiwert der Durchsickerung der Dichtungsschichten (synthetisch und mineralisch) 1×10^{-9} m/s nicht zu übersteigen.

Der ukrainische Regelaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



1. Rekultivierungsschicht.
2. Drainageschicht.
3. Schutzschicht.
4. Synthetische Dichtung (Konvektionssperre, polymer).
5. Mineralische Dichtung (Mineralische Dichtung).
6. Ausgleichschicht und Gasdrainage.
7. Fester Siedlungsabfall.

Abbildung 18: Regelaufbau gemäß [35]

3.1.3 Potentielle Oberflächenabdichtungsvarianten

3.1.3.1 Einleitung

Für die sichere und nachhaltige Abdichtung und Sicherung einer Deponieoberfläche gibt es verschiedene Einzelmaterialien und Materialsysteme, die je nach der Exposition der Deponie und den zur Verfügung stehenden natürlichen vorkommenden Materialien (Ton, Mineralgemische) zur Anwendung kommen können. Im Folgenden

soll ein Überblick der verschiedenen gängigen Oberflächenabdichtungssysteme gegeben werden, der mit einer technisch neutralen Wartung der Systeme endet.

3.1.3.1.1 Beschreibung Variante 1 - „Ton“- Dichtung (ukrainischer Regelaufbau)

Bei der Variante 1 handelt es sich um den klassischen konservativen Oberflächenabdichtungstyp mit natürlichem Bodenmaterial, wie Tone oder Lehme. Neben der Konvektionssperre, der PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,0$ mm, stellt bei der „Ton“-Dichtung eine mineralische Schicht mit einer Mindestdicke von 100 cm aus bindigem Material die zweite Dichtungskomponente dar. Eine Wasserdurchlässigkeit von $k \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s der Dichtungskomponente ist zu gewährleisten. Das Dichtungssystem ist augenscheinlich dem deutschen „TASI“-System (TASI = Technische Anleitung Siedlungsabfall, vgl. [33]) sehr ähnlich. Bei der deutschen Variante sind jedoch nur 50 cm mineralische Dichtungsschicht mit einer Wasserdurchlässigkeit von $k \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s erforderlich.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 1 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach oben):

- 50 cm kombinierte Trag,- Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- 100 cm mineralische Dichtung, 4-lagig, $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.
- $\geq 3,0$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 30 cm Entwässerungsschicht der Körnung 2/8 mm ($k > 1 \times 10^{-3}$ m/s).
- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,00 m Rekultivierungsschicht.

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

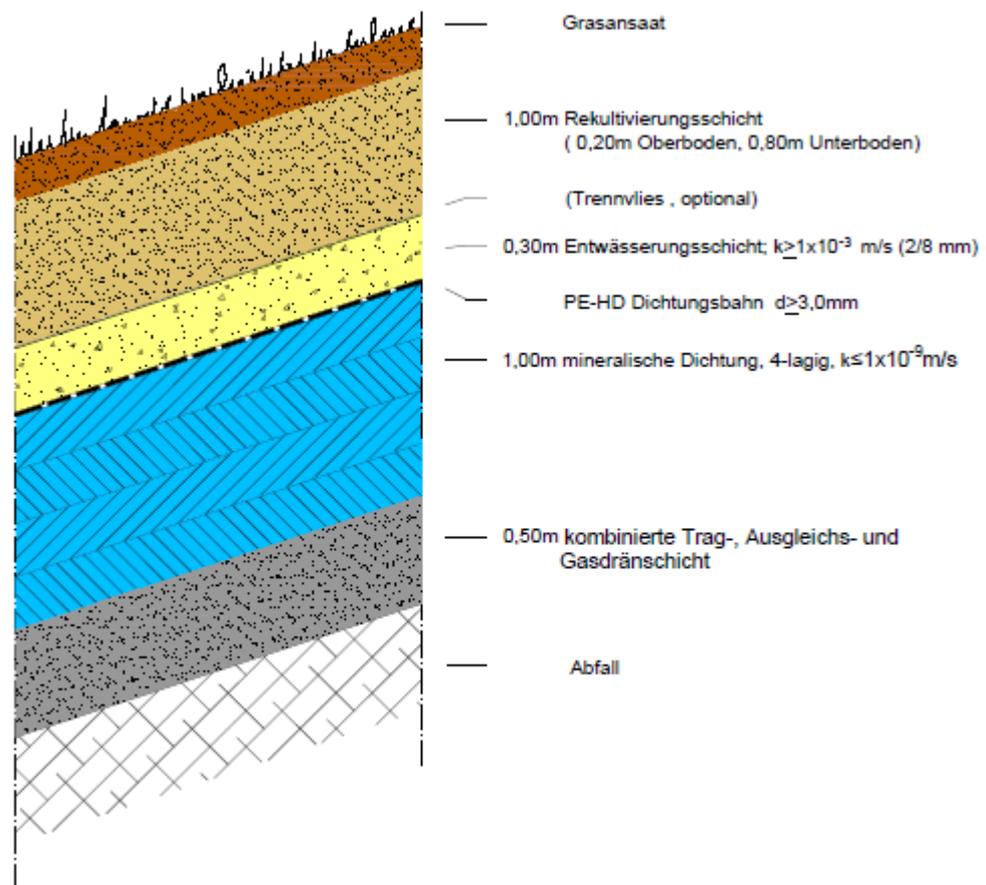


Abbildung 19 OFD-Variante 1 - „Ton“-Dichtung

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50$ m (im verdichteten Zustand).
- Ebenheit 0/+5 cm bei 4 m-Richtscheit.
- Kalziumkarbonat < 10 % (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
- $D_{Pr} \geq 93$ %.

Oberhalb der 30 cm starken kombinierten Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht wird die mineralische Dichtungsschicht eingebaut. Der Einbau erfolgt in 4 Schichten mit jeweils mindestens 25 cm Stärke, so dass eine Gesamtmächtigkeit der Tondichtung von $d \geq 100$ cm sichergestellt wird. Eine Wasserdurchlässigkeit von $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s der Dichtungskomponente ist zu gewährleisten. Das verwendete Material muss in seiner Zusammensetzung gut verdichtbar sein und die Herstellung einer sehr gleichmäßigen und glatten Oberfläche (ohne Fremdkörper) gestatten. Beim

Einbau ist darauf zu achten, dass größere Steine (max. 80 mm) aus dem Baufeld entfernt werden.

Folgende Anforderungen werden an die mineralische Dichtungsschicht gestellt:

- bindiger Boden mit einer Durchlässigkeit $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.
- Einbau vierlagig mit einer Verdichtung, $D_{Pr} \geq 95$ %.
- Mindestdicke ≥ 100 cm zul. Toleranzen: - 0 cm/+5 cm.
- Oberfläche muss den Anforderungen der PE-HD-Dichtungsbahnen Genüge tragen.
- Weitere Anforderungen sind im Rahmen der Genehmigungsphase zu definieren bzw. zu präzisieren.

Als Konvektionssperre (zweite Hauptabdichtungskomponente) wird oberhalb der mineralischen Dichtung eine mindestens 3,0 mm PE HD-Dichtungsbahn, beidseitig rau, verlegt und flüssigkeitsdicht verschweißt. Der Einbau der Kunststoffdichtungsbahn erfolgt durch einen Fachbetrieb. Das eingesetzte Personal muss über die entsprechenden Schweißzulassungen verfügen.

Oberhalb der PE-HD-Dichtungsbahn wird eine 30 cm dicke Entwässerungsschicht mit einem k-Wert $> 1 \times 10^{-3}$ m/s.

Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht wird mit nachfolgend aufgeführten Eigenschaften geliefert und eingebaut:

- Kies der Körnung 2/8 mm.
- frei von organischen Beimengungen.
- Durchlässigkeitsbeiwert von $k \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s ist zu gewährleisten.
- Reibungswinkel: gemäß Anforderung des Standsicherheitsnachweises.
- Mindestdicke ≥ 30 cm.
- Unebenheiten unter einer 4 m langen Messstrecke: ≤ 4 cm.
- Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht sollte eine natürliche Filterstabilität zum Material der Rekultivierungsschicht aufweisen (Nachweis durch den Auftragnehmer (AN), z.B. über die Filterregel nach Terzaghi, UBSR, USCE, Ziemss, etc. bzw. alternativ mittels projektspezifischer Laborversuche). Kann keine Filterstabilität nachgewiesen werden, ist ein PP-Trennvlies oder alternativ eine 10 cm Sandfilterschicht einzubauen.

Oberhalb der mineralischen Entwässerungsschicht wird eine insgesamt 1,00 m dicke Rekultivierungssicht aufgebracht. Der Einbau der Unterbodenschicht, Gesamtdicke 0,80 m, erfolgt zweilagig. Oberhalb des Unterbodens wird eine 0,20 m starke Oberbodenschicht aufgebracht.

An den Unterboden werden nachfolgend Anforderungen gestellt:

- schwachbindiger nährstoffarmer Boden gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- $TOC \leq 3,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,80 m.

Für die Lieferung und den Einbau der Oberbodenschicht werden folgende Anforderungen definiert:

- Oberboden, gemischtkörnig, gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- $TOC \leq 7,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,20 m.

Eine nutzbare Feldkapazität $n_{FK} \geq 100$ mm bezogen auf die gesamte Rekultivierungsschicht (Unter- und Oberbodenschicht) ist einzuhalten.

3.1.3.1.2 Beschreibung Variante 2 - TRISOPLAST®-Dichtung

Der künstlich hergestellte Baustoff TRISOPLAST® stellt bei der Variante 2, neben der Konvektionssperre PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,0$ mm, die zweite mineralische Dichtungsschicht dar.

Die Dichtungskomponente besitzt in Deutschland eine gültige Eignungsbeurteilung durch die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“. Bei TRISOPLAST® handelt es sich um ein patentrechtlich geschütztes mineralisches Abdichtungssystem, bestehend aus:

- Sand < 89,1 Masse-%.
- Bentonit < 10,7 Masse-%.
- Polymer < 0,2 Masse-%.

Die einzelnen Komponenten werden in einer Mischanlage bei geringer Wasserzugabe gemischt und auf dem trockenen Ast der Proctorkurve eingebaut. Die Wirkungsweise von TRISOPLAST® beruht darauf, dass durch Wasserzutritt der Bentonit in dem Material aufquillt und somit das Porenvolumen des Sand-Korngerüstes füllt. Dabei ist die vorhandene Bentonitmenge so groß, dass nur ein kleiner Teil des potenziellen Quellvolumens des Bentonits für die Porenfüllung in Anspruch genommen wird. Gleichzeitig verklebt und verkettet das Polymer die einzelnen Bentoniteilchen. Mit TRISOPLAST® kann so eine mineralische Abdichtung hergestellt werden, die sich durch eine sehr geringe Durchlässigkeit, hohe rissfreie Verformbarkeit, günstiges Austrocknungsverhalten und Altersbeständigkeit auszeichnet.

Die hydraulische Wirksamkeit einer $> 8,00$ cm starken TRISOPLAST®-Dichtung ist mit der einer 100 cm starken mineralischen Abdichtung mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k < 5 \times 10^{-10}$ m/s vergleichbar.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 2 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach oben):

- $50,00$ cm kombinierte Trag- Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- $8,00$ cm TRISOPLAST®-Dichtung.

- $\geq 3,00$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 30,00 cm Entwässerungsschicht der Körnung 2/8 mm ($k > 1 \times 10^{-3}$ m/s).
- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,00 m Rekultivierungsschicht

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

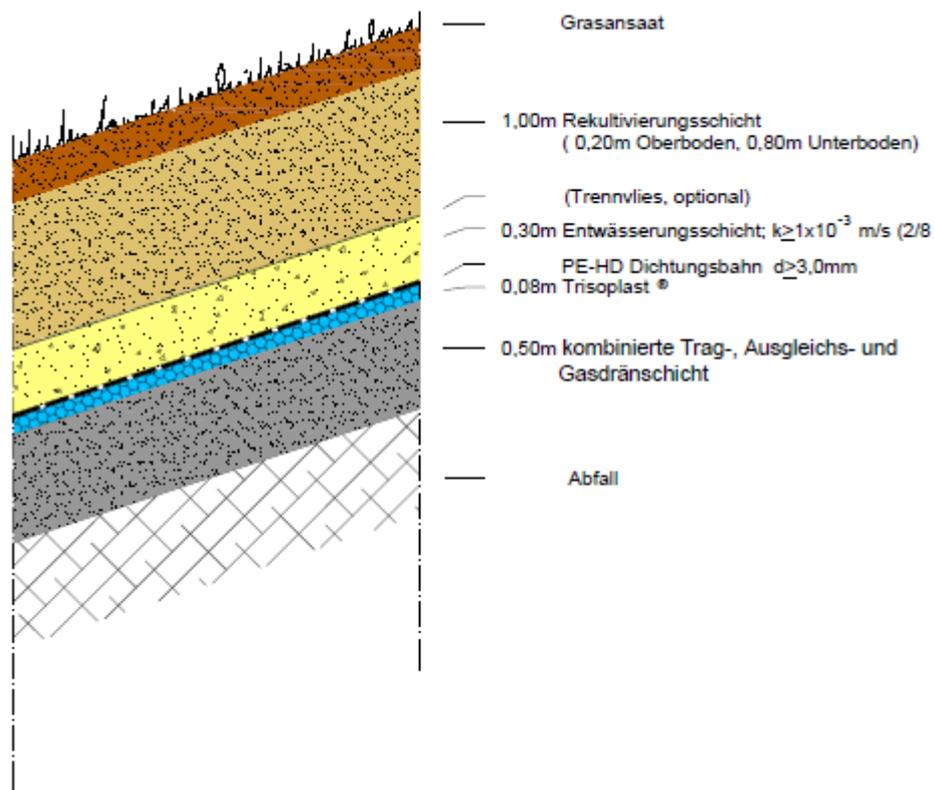


Abbildung 20 OFD-Variante 2 - TRISOPLAST®-Dichtung

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50$ m (im verdichteten Zustand)
- Ebenheit 0/+5,00 cm bei 4,00 m-Richtsheit.
- Kalziumkarbonat < 10 % (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
- $D_{Pr} \geq 93$ %.

Nachfolgend wird der Dichtungsaufbau hinsichtlich Herstellung und Qualitätsansprüchen an die Produkte und des Einbaus, im Kontext zu den geltenden Vorschriften und Normen, welchen den derzeitige Stand der Technik widerspiegeln, näher beschrieben:

Oberhalb der 50,00 cm starken Trag- Ausgleichs- und Gasdränschicht wird die mindestens 8,00 cm dicke TRISOPLAST®-Dichtung einlagig aufgebracht.

Folgende Anforderungen werden an die TRISOPLAST®-Dichtung gestellt:

- Wasserdurchlässigkeit an der Einbaustelle bei einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$, $k < 3 \times 10^{-11}$ m/s.
- Minstdicke 8,00 cm.
- Einhaltung des Merkblattes TRISOPLAST® Qualitätsmanagement.
- Oberfläche muss den Anforderungen der PE-HD-Dichtungsbahnen Genüge tragen.

Als Konvektionssperre (zweite Hauptabdichtungskomponente) wird oberhalb der mineralischen Dichtung eine mindestens 3,00 mm PE HD-Dichtungsbahn, beidseitig rau, verlegt und flüssigkeitsdicht verschweißt. Das Verlegen der Kunststoffdichtungsbahn erfolgt durch einen Fachbetrieb. Das eingesetzte Personal muss über die entsprechenden Schweißzulassungen verfügen.

Oberhalb der PE-HD-Dichtungsbahn wird eine 50,00 cm dicke Entwässerungsschicht mit einem k-Wert $> 1 \times 10^{-3}$ m/s eingebaut.

Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht wird mit nachfolgend aufgeführten Eigenschaften geliefert und eingebaut:

- Kies der Körnung 2/8 mm.
- frei von organischen Beimengungen.
- Durchlässigkeitsbeiwert von $k \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s ist zu gewährleisten.
- Reibungswinkel: gemäß Anforderung des Standsicherheitsnachweises.
- Minstdicke $\geq 30,00$ cm.
- Unebenheiten unter einer 4,00 m langen Messstrecke: $\leq 4,00$ cm.
- Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht sollte eine natürliche Filterstabilität zum Material der Rekultivierungsschicht aufweisen

(Nachweis durch den Auftragnehmer (AN) z.B. über die Filterregel nach Terzaghi, UBSR, USCE, Ziem, etc. bzw. alternativ mittels projektspezifischer Laborversuche). Kann keine Filterstabilität nachgewiesen werden, ist ein PP-Trennvlies oder alternativ ein 10,00 cm Sandfilterschicht einzubauen.

Oberhalb der mineralischen Entwässerungsschicht wird eine insgesamt 1,00 m dicke Rekultivierungsschicht aufgebracht. Der Einbau der Unterbodenschicht, Gesamtdicke 0,80 m erfolgt zweilagig. Oberhalb des Unterbodens wird eine 0,20 m starke Oberbodenschicht aufgebracht.

An den Unterboden werden nachfolgend Anforderungen gestellt:

- schwachbindiger nährstoffarmer Boden gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- TOC $\leq 3,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,80 m.

Für die Lieferung und den Einbau der Oberbodenschicht werden folgende Anforderungen definiert:

- Oberboden, gemischtkörnig, gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- TOC $\leq 7,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,20 m.

Eine nutzbare Feldkapazität $n_{FK} \geq 100 \text{ mm}$, bezogen auf die gesamte Rekultivierungsschicht (Unter- und Oberbodenschicht), ist einzuhalten.

3.1.3.1.3 Beschreibung Variante 3 - Geosynthetische Tondichtungsbahn

Bei der Variante 3 bildet eine Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) neben der Konvektionssperre, PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,0 \text{ mm}$, die zweite mineralische Dichtungsschicht.

Geosynthetische Tondichtungsbahnen sind industriell gefertigte Geokunststoffprodukte. Die Verbundsysteme bestehen aus Geotextillagen und einer oder mehrerer pulverförmigen oder granulierten Bentonitschicht(en).

Grundsätzlich bestehen GTD aus:

- Einem unten liegenden Trägergeotextil (PP-Bändchengewebe oder vernadelter PP-Verbundstoff (Bändchengewebe + Vliesstoff)).
- Einem oben liegenden Deckgeotextil (PP-Bändchengewebe oder vernadelter PP-Vliesstoff).
- Einer dazwischen angeordneten Schicht aus aktiven Bentonitpulver (Natrium-Bentonit oder Calcium-Bentonit).
- Der schubkraftübertragende Verbund der Einzelkomponenten erfolgt über eine Vernadelung oder über eine Vernähung.

Die Verbundstruktur der Geosynthetischen Tondichtungsbahn verhindert eine Umverteilung des Bentonits durch äußere mechanische Einwirkungen im Verarbeitungs- und Gebrauchszustand. Der verwendete Bentonit ist industriell aufbereiteter spezieller Ton. Je nach Art der Kristallstruktur austauschfähiger gebundener Ionen, werden Natrium- oder Calciumbentonite unterschieden. Ihre dichtende Eigenschaft erlangen Geosynthetische Tondichtungsbahnen durch Quellung des Bentonits bei Wasserzutritt unter Auflast und unter der Geotextil-Verbundwirkung.

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit von Geosynthetische Tondichtungsbahn bei fachgerechtem Einbau auf deutschen Deponiestandorten wurde an verschiedenen Testfelder, wie Lemförde, Aurach, etc. erfolgreich unter anderem durch MÜLLER-KIRCHENBAUER, HENKEN-MELLIES, ALEXIEW, WEISS und ZEPP nachgewiesen.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 3 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach Oben):

- 50,00 cm kombinierte Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD).
- $\geq 3,0$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 30,00 cm Entwässerungsschicht der Körnung 2/8 mm ($k > 1 \times 10^{-3}$ m/s).

- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,00 m Rekultivierungsschicht.

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

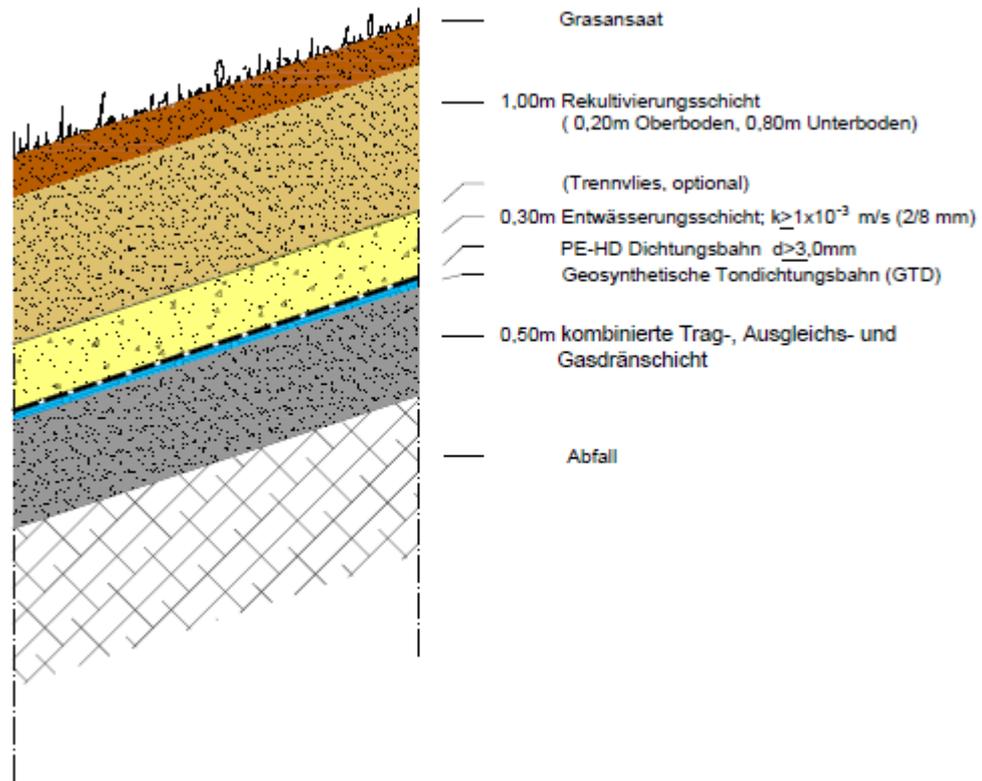


Abbildung 21 OFD-Variante 3 - GTD-Dichtung

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50$ m (im verdichteten Zustand).
- Weitgestuftes Material ($U \geq 6$).
- Ebenheit 0/+5,00 cm bei 4 m-Richtsicht.
- Walzkanten $\leq 2,00$ cm.
- Kalziumkarbonat < 10 % (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
- $D_{Pr} \geq 93$ %.
- Größtkorn 20,00 mm.

Nachfolgend wird der Dichtungsaufbau hinsichtlich Herstellung und Qualitätsansprüchen an die Produkte und des Einbaus, im Kontext zu den geltenden Vorschriften und Normen, welchen den derzeitigen Stand der Technik widerspiegeln, näher beschrieben:

Oberhalb der 50,00 cm starken Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht wird eine Geosynthetische Tondichtungsbahn durch eine Fachverlegefirma aufgebracht. Für die zum Einsatz kommende Geosynthetische Tondichtungsbahn muss eine Eignungsbeurteilung vorliegen.

Folgende Anforderungen werden an die Geosynthetische Tondichtungsbahn gestellt:

- Vorlage einer Eignungsbeurteilung.
- Permittivität nach ASTM 5887 bei 35 kPa Auflast und einem hydraulischen Gradienten von $i = 150$: $\Psi \leq 2,7 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.
- Reibungswinkel zu angrenzenden Schichten: gemäß Anforderung des Standsicherheitsnachweises.

Alle weiteren Kennwerte der Geosynthetischen Tondichtungsbahn sind produktabhängig und können erst nach Auswahl des Produkts festgeschrieben werden.

Als Konvektionssperre (zweite Hauptabdichtungskomponente) wird oberhalb der mineralischen Dichtung eine mindestens 3,00 mm PE HD-Dichtungsbahn, beidseitig rau verlegt und flüssigkeitsdicht verschweißt. Das Verlegen der Kunststoffdichtungsbahn erfolgt durch einen Fachbetrieb. Das eingesetzte Personal muss über die entsprechenden Schweißzulassungen verfügen.

Oberhalb der PE-HD-Dichtungsbahn wird eine 30,00 cm dicke Entwässerungsschicht mit einem k-Wert $> 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ eingebaut.

Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht wird mit nachfolgend aufgeführten Eigenschaften geliefert und eingebaut:

- Kies der Körnung 2/8 mm.
- Frei von organischen Beimengungen.

- Durchlässigkeitsbeiwert von $k \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s ist zu gewährleisten.
- Reibungswinkel: gemäß Anforderung des Standsicherheitsnachweises.
- Mindestdicke $\geq 30,00$ cm.
- Unebenheiten unter einer 4,00 m langen Messstrecke: $\leq 4,00$ cm.
- Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht sollte eine natürliche Filterstabilität zum Material der Rekultivierungsschicht aufweisen (Nachweis durch den Auftragnehmer (AN) z.B. über die Filterregel nach Terzaghi, UBSR, USCE, Ziemss, etc. bzw. alternativ mittels projektspezifischer Laborversuche). Kann keine Filterstabilität nachgewiesen werden, ist ein PP-Trennvlies oder alternativ ein 10,00 cm Sandfilterschicht einzubauen.

Oberhalb der mineralischen Entwässerungsschicht wird eine insgesamt 1,00 m dicke Rekultivierungsschicht aufgebracht. Der Einbau der Unterbodenschicht, Gesamtdicke 0,80 m erfolgt zweilagig. Oberhalb des Unterbodens wird eine 0,20 m starke Oberbodenschicht aufgebracht.

An den Unterboden werden nachfolgend Anforderungen gestellt:

- Schwachbindiger nährstoffarmer Boden gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10$ %.
- TOC $\leq 3,0$ %.
- Bauteilmächtigkeit 0,80 m.

Für die Lieferung und den Einbau der Oberbodenschicht werden folgende Anforderungen definiert:

- Oberboden, gemischtkörnig, gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10$ %.
- TOC $\leq 7,0$ %.
- Bauteilmächtigkeit 0,20 m.

Eine nutzbare Feldkapazität $n_{FK} \geq 100$ mm, bezogen auf die gesamte Rekultivierungsschicht (Unter- und Oberbodenschicht), ist einzuhalten.

3.1.3.1.4 Beschreibung Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht

Bei der Variante 4 ersetzt die Wasserhaushaltsschicht die mineralische Dichtungskomponente der Oberflächenabdichtung. Die PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,0$ mm bildet wie bei den Varianten 1 bis 3 und 5 auch hier die Konvektionssperre als Dichtungselement.

Wird die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht ausgeführt, sind folgende Anforderungen zu definieren:

1. Die Mindestdicke muss 1,50 m betragen.
2. Die nutzbare Feldkapazität muss wenigstens 220,00 mm, bezogen auf die Gesamtdicke betragen.
3. Im fünfjährigen Mittel darf die Durchsickerung höchstens 10 % von dem langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60,00 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach der Herstellung betragen.

Der Jahresniederschlag liegt im Umkreis des Standortes der Deponie bei ca. 650 bis 700 mm. Damit befindet sich der Deponiestandort in keiner niederschlagsarmen Region (Jahresniederschlag kleiner 600 mm), welche für das System einer Wasserhaushaltsschicht bevorzugt sind.

Neben den klimatischen Parametern, sind im Besonderen auch die bodenkundlichen und vegetationskundlichen Parameter für die Auslegung einer Wasserhaushaltsschicht entscheidend. Die Materialanforderungen für die einzusetzenden Böden, hinsichtlich der erforderlichen Wasserspeicherkapazität, ergeben sich aus der Bemessung der Wasserhaushaltsschicht. Die Bemessung erfolgt mit einer Simulationen von Wasserhaushaltsmodellen und Ergebnissen von Feldversuchen.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 4 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach oben):

- 50,00 cm kombinierte Trag- Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- $\geq 3,00$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 30,00 cm Entwässerungsschicht der Körnung 2/8 mm ($k > 1 \times 10^{-3}$ m/s).
- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,50 m bis 2,00 m Rekultivierungsschicht (in Abhängigkeit des Bodenmaterials).

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

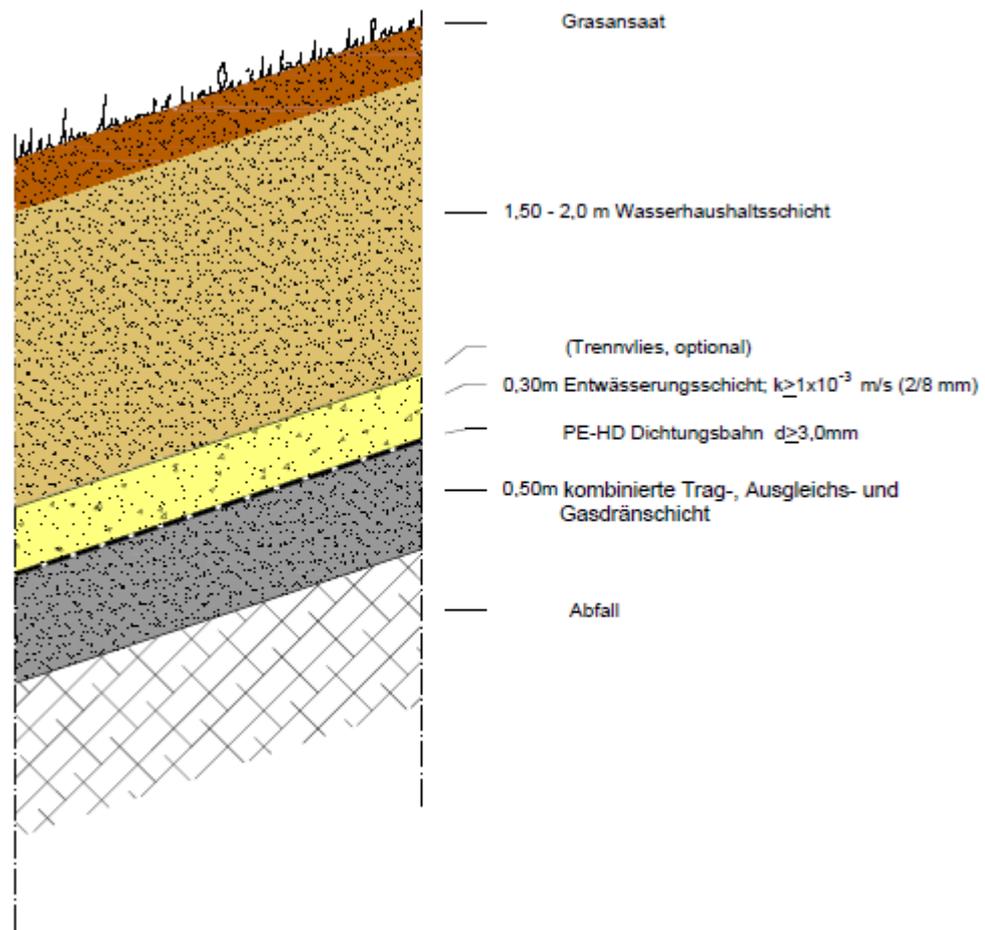


Abbildung 22 OFD-Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50 \text{ m}$ (im verdichteten Zustand).
- Weitgestuftes Material ($U \geq 6$).
- Ebenheit $0/+5,00 \text{ cm}$ bei $4,00 \text{ m}$ -Richtsicht.
- Walzkanten $\leq 2,00 \text{ cm}$.
- Kalziumkarbonat $< 10 \%$ (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.
- $D_{Pr} \geq 93 \%$.
- Größtkorn $20,00 \text{ mm}$.

Nachfolgend wird der Dichtungsaufbau hinsichtlich Herstellung und Qualitätsansprüchen an die Produkte und des Einbaus, im Kontext zu den geltenden Vorschriften und Normen, welchen den derzeitigen Stand der Technik widerspiegeln, näher beschrieben.

Oberhalb der 50,00 cm starken Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht wird die PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,00$ mm beidseitig rau, durch einen Fachverleger aufgebracht. Die Bahnen werden flüssigkeitsdicht verschweißt.

Oberhalb der PE-HD-Dichtungsbahn wird eine 50,00 cm dicke Entwässerungsschicht mit einem k-Wert $> 1 \times 10^{-3}$ m/s eingebaut.

Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht wird mit nachfolgend aufgeführten Eigenschaften geliefert und eingebaut:

- Kies der Körnung 2/8 mm.
- Frei von organischen Beimengungen.
- Durchlässigkeitsbeiwert von $k \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s ist zu gewährleisten.
- Reibungswinkel: gemäß Anforderung des Standsicherheitsnachweises.
- Mindestdicke $\geq 30,00$ cm.
- Unebenheiten unter einer 4,00 m langen Messstrecke: $\leq 4,00$ cm.
- Das Material der mineralischen Entwässerungsschicht sollte eine natürliche Filterstabilität zum Material der Rekultivierungsschicht aufweisen (Nachweis durch den Auftragnehmer (AN) z.B. über die Filterregel nach Terzaghi, UBSR, USCE, Ziemss, etc. bzw. alternativ mittels projektspezifischer Laborversuche). Kann keine Filterstabilität nachgewiesen werden, ist ein PP-Trennvlies oder alternativ ein 10,00 cm Sandfilterschicht einzubauen.

Oberhalb der mineralischen Entwässerungsschicht wird eine insgesamt 1,00 m dicke Rekultivierungssicht aufgebracht. Der Einbau der Unterbodenschicht, Gesamtdicke 0,80 m erfolgt zweilagig. Oberhalb des Unterbodens wird eine 0,20 m starke Oberbodenschicht aufgebracht.

An den Unterboden werden nachfolgend Anforderungen gestellt:

- schwachbindiger nährstoffarmer Boden gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- TOC $\leq 3,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 1,30 bis 1,80 m (Dicke in Abhängigkeit der Bodenart).

Für die Lieferung und den Einbau der Oberbodenschicht werden folgende Anforderungen definiert:

- Oberboden, gemischtkörnig, gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- TOC $\leq 7,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,20 m.

Eine nutzbare Feldkapazität $n_{FK} \geq 200 \text{ mm}$, bezogen auf die gesamte Rekultivierungsschicht (Unter- und Oberbodenschicht), ist einzuhalten

3.1.3.1.5 Beschreibung Variante 5 - Kapillarsperre mit mineralischem Kapillarblock und Kapillarschicht

Neben der Konvektionssperre, der PE-HD-Dichtungsbahn, $d = 3,0,0 \text{ mm}$, stellt bei der Variante 5 die Kapillarsperre, bestehend aus einem mineralischem Kapillarblock und einer mineralischen Kapillarschicht, die zweite Dichtungskomponente dar.

Die Kapillarsperre ist eine Abdichtungskomponente, deren Wirksamkeit nicht durch den Durchlässigkeitsbeiwert beschrieben werden kann. Die Kapillarsperren können gemäß DepV eingesetzt werden, wenn sie im fünfjährigen Mittel einen Durchfluss von nicht mehr als $20,00 \text{ mm/a}$ bei Einsatz in Deponien haben.

Die Wirkung der Kapillarsperre beruht auf einem Sprung in der Korngrößenverteilung an der Schichtgrenze der Kapillarschicht zu dem Kapillarblock. Die oben liegende Kapillarschicht (feinkörniges Material) nimmt das einsickernde Wasser auf und hält es durch die Wirkung der Kapillarkräfte innerhalb dieser Schicht. Ab einem gewissen Sättigungsgrad der Kapillarschicht, hervorgerufen durch lang anhaltende Niederschläge und entsprechender Infiltration wird das Wasser der Schwerkraft folgend, durch die Porenräume der Kapillarschicht zum Böschungsfuß abgeleitet. Aufgrund der unterschiedlichen Kapillarkräfte, die in der Kontaktfuge zwischen Kapillarschicht

und Kapillarblock aufeinander treffen, wird verhindert, dass das Wasser in ein Kapillarblock eindringt. Das feinkörnigere Material der Kapillarschicht hat eine größere Kapillarwirkung als das gröbere Material des Kapillarblocks. Kann das in die Kapillarschicht eindringende Wasser, z.B. aufgrund enormer Regenspenden, mangelnder Wasserdurchlässigkeit des Materials oder unzureichender Neigung, nicht abgeführt werden, kommt es zum sogenannten Durchbruch der Kapillarsperre, d.h. Wasser dringt in den Kapillarblock ein.

Kapillarsperren bestehen aus einer feinkörnigen Kapillarschicht (z.B. Grobsand 0/2) und einem unterlagernden grobkörnigen Kapillarblock (z.B. Feinkies 2/5).

Für die Kapillarschicht ist ein relativ gleichkörniges Material ($U \leq 2,5$) mit einem möglichst geringen Feinkornanteil ohne quellfähige Bestandteile einzusetzen. Die Mächtigkeit der Kapillarschicht beträgt 0,30 m.

Im bautechnologisch bedingten mindestens 0,20 m dicken Kapillarblock werden gewaschene Kiessande oder RC-Materialien (z.B. Glasgranulate) verwendet.

In Abhängigkeit von den gewählten Materialien, den gewählten Schichtmächtigkeiten und den vorhandenen Böschungslängen sollte eine Mindestneigung von 1:7 in der Kapillarsperre nicht unterschritten werden.

Infolge der hohen inneren Scherfestigkeiten der Materialien, sind Kapillarsperren auch in Böschungen mit Neigungen steiler 1:3 einsetzbar. Bei durchzuführenden Standsicherheitsberechnungen ist die Durchströmung der Kapillarschicht zu berücksichtigen.

Die Dränableitkapazität einer Kapillarsperre ist vorrangig von der Böschungsgeometrie, der Schichtmächtigkeit und der Kornverteilungskurve des Kapillarschichtmaterials abhängig.

Die Dimensionierung der Kapillarschicht erfolgt in Abhängigkeit von der Höhe der zu erwartenden Dränspende aus der Rekultivierungsschicht. Die Dränspenden sind mittels Simulationsmodelle (z.B. HELP) anhand des einzusetzenden Rekultivierungsbodens zu ermitteln. Zur Reduzierung der Schichtmächtigkeiten werden bei großen Böschungslängen, böschungsparell Dränleitungen in der Kapillarschicht

verlegt, über die das gefasste Wasser abgeleitet werden kann. Auch am Deponiefuß wird das in der Kapillarschicht abfließende Wasser über Drainageleitungen, die in Kunststoffdichtungsbahn-Verwahrungen verlegt sind, von der Deponieoberfläche abgeleitet.

Das „Hydrologic Evaluation of Landfill Performance“ (HELP)-Modell ist vermutlich das weltweit am häufigsten eingesetzte Simulationsmodell für den Wasserhaushalt und die Wasserflüsse von Deponieabdichtungssystemen. Das HELP-Modell wurde ursprünglich für die US-amerikanische Umweltbehörde als Werkzeug für Planer und Genehmigungsbehörden entwickelt. Mit ihm sollte der Wasserhaushalt unterschiedlich aufgebauten Varianten von Abdichtungssystemen – insbesondere von Oberflächenabdichtungssystemen – unter dem Klima des jeweiligen Standorts simuliert werden, um unter Berücksichtigung der Kosten eine optimale Lösung finden zu können. Eine Alternative hierzu ist das von der TU Freiberg (Deutschland) entwickelte Wasserhaushaltsmodell BOWAHALD

Eine zuverlässige Berechnung der Leistungsfähigkeit der lateralen Ableitkapazität der Kapillarschicht ist weder mit empirischen noch mit numerischen Methoden möglich. Mit den tatsächlich zum Einsatz kommenden Baustoffen, wie Rekultivierungsboden, dem Kapillarschichtmaterial und dem Kapillarblockmaterial, sind daher im Vorfeld der jeweiligen Baumaßnahmen Laborversuche mit Kipprinnen zur Ermittlung der Drainageeigenschaften in Form einer Eignungsprüfung durchzuführen. In diesen Versuchen wird an den baustellenspezifischen Materialien, nach der Einstellung stationärer Verhältnisse, so lange Wasser der Kapillarschicht zugeführt, bis ein Durchbruch im Kapillarblock erfolgt. Anschließend wird zur Festlegung der genauen Abschlagslängen, unter Berücksichtigung vom Temperatureinflussfaktor und von Sicherheitsbeiwerten Berechnungen durchgeführt, um abschließend daraus die resultierende Lage von Zwischenentwässerungen zu planen.

In den Eignungsnachweisen und Versuchen ist nachzuweisen, dass in dem Kapillarblock im fünfjährigen Mittel ein Durchfluss von weniger als 20,00 mm /Jahr auftritt. Mit den Ergebnissen der Eignungsprüfung und Bemessung der Kapillarsperre mit dem durchzuführenden Kipprinnenversuchen und deren Auswertung wird der Qualitätsmanagementplan, sowie die Lage und die Ausführung, der Zwischenentwässerungen angepasst.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 5 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach Oben):

- 50,00 cm kombinierte Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- $\geq 3,00$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 20,00 cm mineralischer Kapillarblock.
- 30,00 cm mineralische Kapillarschicht.
- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,00 m Rekultivierungsschicht.

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

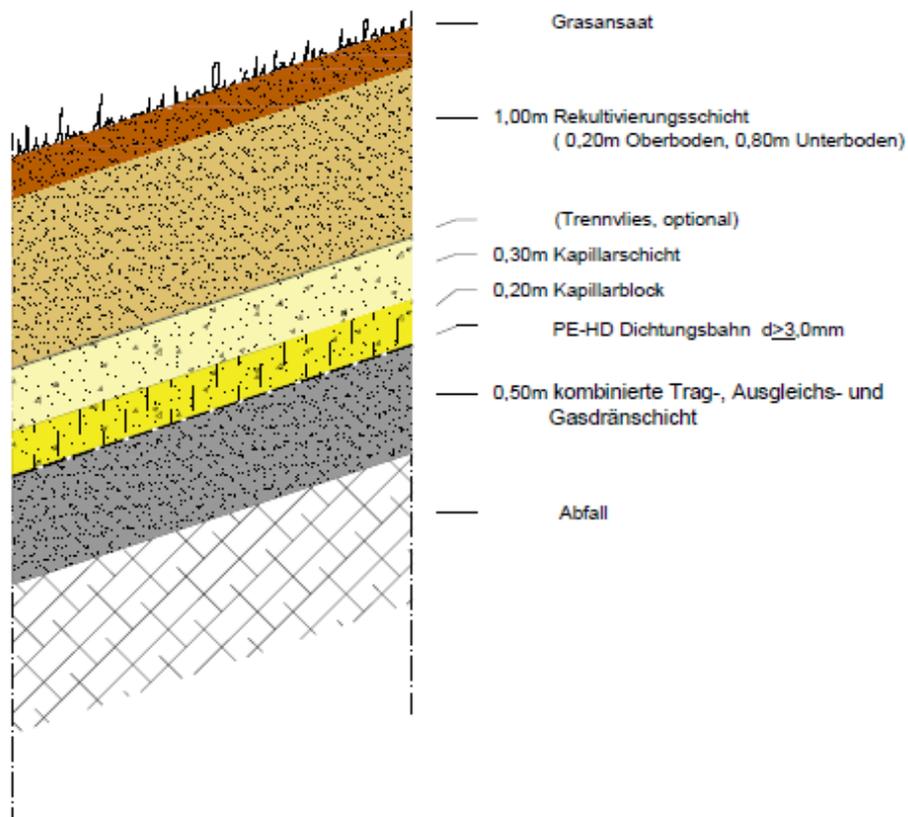


Abbildung 23 OFD-Variante 5 - Kapillarschicht mit mineralischem Block

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50$ m (im verdichteten Zustand).

- Weitgestuftes Material ($U \geq 6$).
- Ebenheit 0/+5,00 cm bei 4,00 m-Richtscheit.
- Walzkanten $\leq 2,00$ cm.
- Kalziumkarbonat < 10 % (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
- $D_{Pr} \geq 93$ %.
- Größtkorn 20,00 mm.

Nachfolgend wird der Dichtungsaufbau hinsichtlich Herstellung und Qualitätsansprüchen an die Produkte und des Einbaus, im Kontext zu den geltenden Vorschriften und Normen, welchen den derzeitigen Stand der Technik widerspiegeln, näher beschrieben:

Oberhalb der 50,00 cm starken Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht wird die PE-HD-Dichtungsbahn, $d \geq 3,00$ mm beidseitig rau, durch einen Fachverleger aufgebracht. Die Bahnen werden flüssigkeitsdicht verschweißt.

Oberhalb der PE HD-Dichtungsbahn wird eine Kapillarsperre, bestehend aus einem mindestens 20,00 cm dicken Kapillarblock und einer mindestens 30,00 cm starken Kapillarschicht, hergestellt.

An den Kapillarblock und die Kapillarschicht werden nachfolgende allgemeine Anforderungen gestellt:

- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 20$ Masse-%.
- Organische Bestandteile ≤ 5 Gew.%.
- Filterstabilität für die Materialkombination Kapillarblock / Kapillarschicht.

Die konkreten Materialeigenschaften werden erst im Rahmen der durchzuführenden Kipperinnenversuche durch die Eigen- und Fremdprüfung definiert.

Oberhalb der mineralischen Entwässerungsschicht wird eine insgesamt 1,00 m dicke Rekultivierungssicht aufgebracht. Der Einbau der Unterbodenschicht, Gesamtdicke 0,80 m erfolgt zweilagig. Oberhalb des Unterbodens wird eine 0,20 m starke Oberbodenschicht aufgebracht.

An den Unterboden werden nachfolgend Anforderungen gestellt:

- Schwachbindiger nährstoffarmer Boden gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- $TOC \leq 3,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,80 m.

Für die Lieferung und den Einbau der Oberbodenschicht werden folgende Anforderungen definiert:

- Oberboden, gemischtkörnig, gemäß DIN 18915 und DIN 19731 oder gleichwertig.
- Kalkgehalt $V_{CA} \leq 10 \%$.
- $TOC \leq 7,0 \%$.
- Bauteilmächtigkeit 0,20 m.

Eine nutzbare Feldkapazität $n_{FK} \geq 100 \text{ mm}$, bezogen auf die gesamte Rekultivierungsschicht (Unter- und Oberbodenschicht), ist einzuhalten.

3.1.3.1.6 Beschreibung Variante 6 - Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn und mineralischer Kapillarschicht

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 6 ist bis auf den Kapillarblock identisch mit der Variante 5. Statt eines 20,00 cm mächtigen mineralischen Kapillarblocks wird eine Kapillarblockbahn auf der PE-HD-Dichtungsbahn eingebaut, welche die Funktion des Kapillarblocks übernimmt. Die Kapillarblockbahn der Herstellerfirma z.B. G quadrat Geokunststoffgesellschaft mbH besitzt eine Eignungsbeurteilung der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“.

Die Kapillarblockbahn der Herstellerfirma z.B. G quadrat Geokunststoffgesellschaft mbH besteht aus einer etwa 2,00 cm starken Kiesfüllung der Körnung 2/5 mm, welche durch eine obere und untere Lage aus beschichtetem PE-HD-Gewebe eingeschlossen wird. Die beiden Gewebelagen werden durch ein ca. 20,00 mm langes eingewebtes Abstandsbändchen kraftschlüssig miteinander verbunden. Die Kapillarblockbahn ersetzt im Gesamtsystem Kapillarsperre den herkömmlich, lose geschütteten Kapillarblock. Die Wirkungsweise der Kapillarsperre bleibt erhalten, wobei in den ersten Jahren nach Herstellung des beschichteten Bändchengewebes der

Kapillarblockbahn, diese wie eine zusätzliche Dichtung wirkt und bei Überschreitung der lateralen Dränkapazität das Wasser entsprechend einer Dränagewirkung in die Kapillarschicht gesättigt ableitet.

Das Oberflächenabdichtungssystem der Variante 6 besitzt im Wesentlichen nachfolgend dargestellten Aufbau (von unten nach oben):

- 50,00 cm kombinierte Trag-, Ausgleichs- und Gasdränschicht.
- $\geq 3,00$ mm PE-HD Dichtungsbahn (CE-Kennzeichnung, Zulassung DIBt-Zulassung oder gleichwertig).
- 20,00 cm Kapillarblockbahn.
- 30,00 cm mineralische Kapillarschicht.
- Optional: Trennvlies, 300 - 400 g/m² (CE-Kennzeichnung).
- 1,00 m Rekultivierungsschicht.

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den Aufbau des Oberflächenabdichtungssystem.

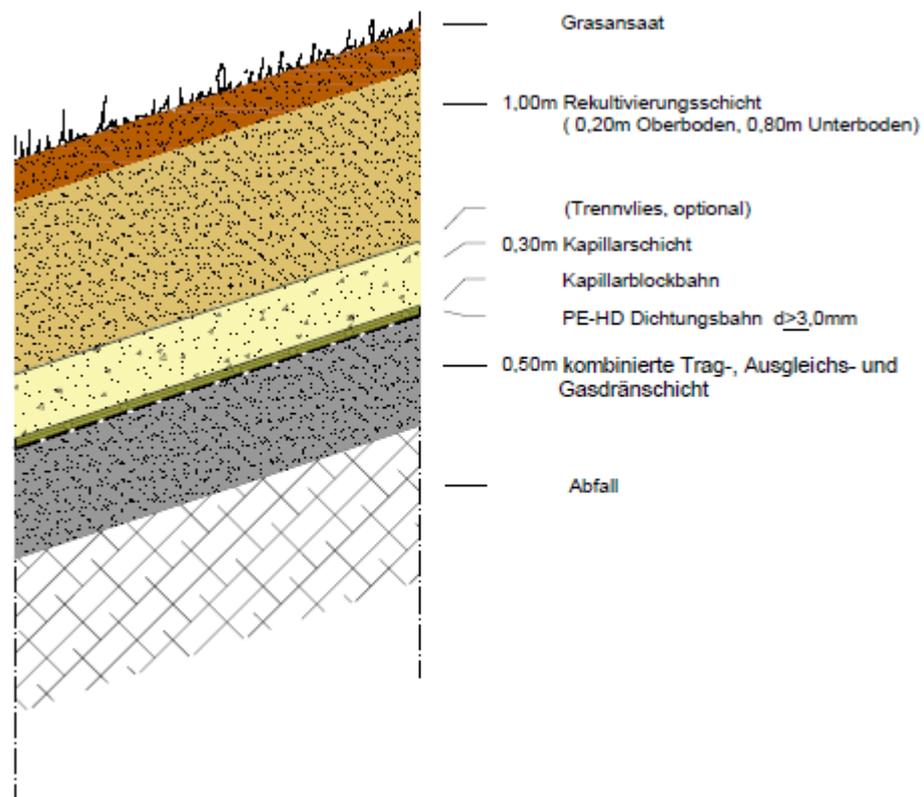


Abbildung 24 OFD-Variante 6 - Kapillarsperre mit Blockbahn

An die mineralische Gasdränschicht werden nachfolgend aufgeführten Anforderungen gestellt:

- $d \geq 0,50$ m (im verdichteten Zustand).
- Weitgestuftes Material ($U \geq 6$).
- Ebenheit 0/+5,00 cm bei 4,00 m-Richtscheit.
- Walzkanten $\leq 2,00$ cm.
- Kalziumkarbonat < 10 % (Masse).
- $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
- $D_{Pr} \geq 93$ %.
- Größtkorn 20,00 mm.

Alle Oberflächenabdichtungskomponenten, wie Gasdränschicht, PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn, Geotextile Trennvliese, Rekultivierungsschicht mit rekultivierungsfähiger Oberbodenschicht und Rasenansaat, werden hinsichtlich ihrer Materialanforderungen und Mächtigkeiten gegenüber Variante 5 nicht verändert.

3.2 Dichtwände als Umschließung der Deponie

3.2.1 Dichtwände

Für den Fall, dass eine Deponie nicht über ein wirksames Basisabdichtungssystem verfügt und Grundwasserverunreinigungen durch einsickerndes Deponiesickerwasser befürchtet bzw. festgestellt werden, kann eine Sicherung für das Grundwasser durch vertikale Umschließung der Ablagerungsbereiche mit einer Dichtwand erfolgen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn die Basis der Deponie innerhalb des Schwankungsbereiches des Grundwasserstandes liegt und die Deponie damit einen „nassen Fuß“ hat. Die Herstellung von Dichtwände für eine Deponieumschließung ist kein alleiniges Sicherungsverfahren. Es ist vielmehr in Kombination mit einer Oberflächenabdichtung zu sehen, da andernfalls innerhalb der Umschließung zu große Wassermengen anfallen, die gereinigt werden müssen.

Die vertikale Umschließung einer Deponie muss mindestens von der Geländeoberfläche bis in die Schicht einbinden, die für den Grundwasserleiter, in den das Sickerwasser aus dem Deponiekörper einsickert, die stauende Schicht darstellt. In Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen und der Tiefenlage des Grundwasserstauers, können große Tiefen für die Dichtwand erforderlich werden und für diese Art der Deponiesicherung hohe Kosten verursachen.

Es sind verschiedene Möglichkeiten zu einer Umschließung des Ablagerungsbereiches gegeben. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens hängt von unterschiedlichen Rahmenbedingungen ab, die zum Teil konträr sein können. So sind Kenntnisse über die Lage des Grundwasserstauers erforderlich, um die Länge der Dichtwand festlegen zu können. Die Aggressivität des einzukapselnden Wassers hat ebenso Einfluss auf die Auswahl der Materialien der Dichtwand wie z. B. Grundwasserfließgeschwindigkeit, Gefälle des Grundwasserspiegels und die Körnung des im Grundwasserleiter anstehenden Bodens. Weiterhin kann die erwartete Dauer der Umschließung Einfluss auf die Auswahl des Dichtwandsystems haben.

Nachfolgend werden einige mögliche Verfahren für die Dichtwand dem Grunde nach vorgestellt. Einzelheiten zu einigen Verfahren können [5] entnommen werden.

a) Spundwände

Spundwände bestehen aus Stahlprofilen (sog. Spundbohlen), die mit geeigneten Geräten in den Baugrund gerüttelt (vibriert), gerammt oder gepresst werden. Die Profile sind mit Schlössern untereinander verbunden, die mit speziellen Dichtungen versehen sein können.

Die Stahlspundbohlen können unter Berücksichtigung der im Untergrund herrschenden Milieubedingungen beschichtet oder aus Spezialstählen hergestellt werden. Die Herstellung von Spundwänden ist ein gängiges Verfahren (auch für die Herstellung von Baugrubensicherungen). Die Einbindetiefe hängt von den anstehenden Bodenarten ab, Tiefen von 10,00 bis 15,00 m sind meist unproblematisch, unter günstigen Randbedingungen können bis 25,00 m erreicht werden. Zudem ist der Einsatz von Einbringhilfen (Vorbohrungen, Spülungen) möglich.

Bei der Herstellung von Spundwänden für eine Dichtwand sind zur Gewährleistung einer hohen Qualität folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Enthält der Untergrund dicht gelagerte Kiese, Steine und/oder Gerölle.
- Dichtigkeit der Schlossverbindungen.
- Ggf. Schwierigkeiten beim Einbringen der Spundbohlen durch Rammhindernisse (z. B. Abweichen vom Lot, Schlosssprengungen).
- Einzelne Bohlen können möglicherweise nicht bis in die vorgesehene Tiefe eingebracht werden.
- Mögliche Unsicherheiten bei der Einbindetiefe, da der Stauhorizont wellig/geneigt verläuft.

b) Schmalwände

Schmalwände sind, wie der Name sagt, wenige Zentimeter schmale Dichtungswände aus einer Dichtwandsuspension, bestehend aus Bentonit, hydraulischem Bindemittel (z.B. Zement), mineralischen Füllstoffen, Wasser und ggf. Zusatzmitteln. Sie werden durch Bodenverdrängung hergestellt.

Die Herstellung erfolgt Profilweise. Zunächst wird ein Verdrängungsprofil (auch Mehrfachprofile sind möglich), z.B. Stahlprofil, zusammen mit einem Verpressrohr in den Boden eingebracht. Das Einbringverfahren (Rammen, Rütteln, Pressen) richtet sich nach den anstehenden Bodenverhältnissen und erforderliche Einbringtiefen (vgl. a). Nach dem Erreichen der Solltiefe wird das Profil wieder gezogen und während des Ziehvorgangs durch das Verpressrohr die Dichtwandsuspension in den hinterlassenen Hohlraum gefüllt (verpresst). Das nächste anschließende Profil wird durch Überschneidung mit der zuvor hergestellten Schmalwand niedergebracht.

Die Herstellung von Schmalwänden stellt hohe Anforderungen an die Bauausführung. So können z.B. Ungenauigkeiten beim Einbringen der Verdrängungsprofile durch Hindernisse (Ableitung von der vorgesehenen Rammlinie/Vertikalität) zu Undichtigkeiten in den Überschneidungsbereichen führen. Auch können:

- Schwierigkeiten an der Misch- und Verpressanlage,
- Nennenswerte Anteile (> wenige %) an Kiesen und Steinen,
- Stark heterogen Untergrund (Weichböden/festere Böden) oder
- Unsicherheiten bei der Einbindung in den stauenden Horizont (welliger Verlauf)

zu Beeinträchtigungen in der Wirksamkeit der Dichtwand nach sich ziehen.

c) Bohrpfahlwände

Verrohrte Bohrpfähle können mit Durchmessern zwischen 60 und 200 cm hergestellt werden. Dabei können Tiefen > 50,00 m erreicht werden. Ausgeführt als überschnittene Pfähle kann aus Bohrpfählen auch eine Dichtwand hergestellt werden. Zum Einbringen der Bohrpfähle wird eine Bohrschablone verwendet. Die Bohrpfähle werden so angeordnet, dass bei einer seitlichen Abweichung von 0,50 % der Bohrtiefe noch eine Wanddicke von mindestens 40,00 cm gewährleistet ist. Die Herstellung einer Dichtwand aus Bohrpfählen hat gegenüber allen anderen Verfahren den Vorteil, dass beim Einbringen der Pfähle die vorhandene Bodensituation (Lage des Grundwasserstauers) beim Fördern des Bohrgutes erfasst werden kann.

Bei der Herstellung der Bohrpfahlwand ist auf einen ordnungsgemäßen Einbau des Pfahlmaterials (Beton/ Dichtwandmaterial) zu achten.

d) Einphasenschlitzwände

Schlitzwände können in Breiten bis zu 1,50 m und bis in große Tiefen (bis zu 100,00 m) hergestellt werden. Mit Schlitzwandgreifern oder Fräsen werden die Erdschlitzte (an der Oberfläche durch zuvor hergestellte Leitwände) in Lamellen ausgehoben. Die Schlitzte werden dabei mit einer Suspension (der Dichtwandmasse) gestützt (Stützmaterial = Dichtwandmasse, sogenannte Einphasenschlitzwand). Die Lamellen haben in Längsrichtung im allgemeinen Abmessungen von ca. 2,80 bis 4,50 m. Die Abbindeigenschaften der Dichtwandsuspension haben einen erheblichen Einfluss auf die Herstellung der Wände. Die Einfüllung der Dichtwandsuspension ist sehr sorgfältig vorzunehmen, damit der erdstatistische Druck nicht zu Fehlstellen in der Dichtwand führt.

Die Suspension der Dichtwand besteht üblicherweise aus Bentonit, hydraulischem Bindemittel (z.B. Zement), mineralischen Füllstoffen und Wasser sowie ggf. Zusatzmitteln. Sie ist u.a. abhängig vom anstehenden Boden und der zu erwartenden Belastung. Die Herstellung unterliegt dem Eignungsnachweis.

Die Qualität von Einphasenschlitzwänden ist von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Steine und Blöcke im Untergrund.
- Vorhandene Weichschichten (bindige Böden weicher Konsistenz, organische Böden etc.).
- Schichten mit enggestuften Kiesen.
- Erfassung der Vertikalität und Lagegenauigkeit der Stiche und Lamellen.
- Lage und Verlauf des Stauhorizonts (z. B. wellig / geneigt) und daraus möglicherweise resultierende Unsicherheiten hinsichtlich der wendigen Einbindetiefe der Wand.
- Vermeidung von Brückenbildungen im Dichtwandbaustoff
- Anbindung von Lamellen an deutlich ältere (>4–6 Monate) Wandabschnitte.
- Einfluss von chemischen Belastungen auf das Abbindeverhalten der Dichtwandmasse.

e) Zweiphasenschlitzwände

Die Herstellung der Zweiphasenschlitzwand ist grundsätzlich ähnlich der bei der Einphasenwand. Der Unterschied besteht darin, dass während des Aushubs der Schlitzwand eine reine Stützflüssigkeit (aus quellfähigen Tonen und Wasser sowie Füllstoffen) eingebracht wird. Diese wird anschließend (nach dem Erreichen der Endteufe) durch Einbringen der Dichtwandsuspension im Kontraktorverfahren verdrängt. Dazu muss die Dichtwandsuspension eine höhere Dichte aufweisen (mindestens $0,5 \text{ g/cm}^3$).

f) Kombinationswände

Die unter den vorstehenden Punkten beschriebenen Schlitzwände können durch Einbringung von Spundwänden oder Kunststoffdichtungsbahnen zu Kombinationswänden ergänzt werden. Diese werden in die noch flüssige Dichtwandmasse eingebracht. Die bei der Herstellung einer einfachen Schlitzwand möglichen Probleme der Dichtung können durch diese zusätzlichen Elemente verringert werden.

g) Injektionswände

Zur Herstellung von Injektionswänden werden Lanzen in den Untergrund bis zur Solltiefe eingebracht, durch die dann während des Ziehvorgangs die Dichtwandsuspension unter Hochdruck in die Poren des anstehenden Bodens gepresst wird. Durch diese Maßnahme wird die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens reduziert und ein Dichtwandschleier hergestellt. Bei stark wechselndem Baugrund ist die Dosierung des Dichtwandmaterials schwierig und damit eine gleichbleibende Qualität der Dichtwand äußerst anspruchsvoll.

In besonderen Fällen, z.B. bei ungünstigen geohydraulischen Verhältnissen, kann eine Ausführung als sogenannte Kammerdichtwand erforderlich werden. Die Dichtwand wird dann parallel als doppelte Wand mit einer Abteilung in einzelne Abschnitte ausgeführt. Mit der Bewirtschaftung der einzelnen Kammern können die hydraulischen Verhältnisse auch in den einzelnen Abschnitten gezielt gesteuert werden.

Auf die Möglichkeit zur Einrichtung von **reaktiven Wänden** durch das Einbringen von z. B.:

- partikulärem Eisen (Fe^0).
- Aktivkohle.
- Mineralien (z. B. Zeolite).
- Organischem Material (z. B. Kompost).
- Eisenoxid.

sowie von **biologischen in-situ-Verfahren** soll hier nicht näher eingegangen werden.

3.2.2 *Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt*

Die Installation von den Deponiekörper im Grundwasserleiter umschließenden Dichtwänden hat Einfluss auf den natürlichen Grundwasserhaushalt. So ist auf der Anstromseite, wegen der stauenden Wirkung der Dichtwand, mit einem Anstieg, hingegen auf der Abstromseite, mit einem Absinken des Grundwasserspiegels zu rechnen. Dies kann ggf. dazu führen, dass das Grundwasser auf der Anstromseite abzusenken und zu erfassen und auf Abstromseite wieder zu verrieseln ist, um nach Installation der Dichtwand außerhalb der eingekapselten Deponie einen annähernd natürlichen Grundwasserhaushalt zu haben. Hierzu sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich, zudem können derartige Maßnahmen erhebliche Kosten über einen langen Zeitraum verursachen.

Die Einkapselung der Deponie mit einer umschließenden Dichtwand verursacht erhebliche Sicherungskosten. In Abhängigkeit von der Lage des Grundwasserstauers und der Art der Dichtwand sowie der Länge des Deponieumfangs können erhebliche Herstellungskosten und ggf. über die Dauer des Betriebes Unterhaltungskosten anfallen. Innerhalb der Einkapselung sind Brunnen zu installieren, über die für die Dauer der Deponienachsorgephase das aus der Deponie in den Untergrund sickende belastete Wasser entnommen werden kann. Dabei ist innerhalb der Einkapselung grundsätzlich ein geringerer Wasserstand zu halten als im umgebenden Grundwasser, um einen hydraulischen Gradienten in Richtung der Einkapselung zu haben. Eine zu starke Absenkung ist jedoch, wegen des dadurch auf die Dichtwand zunehmenden hydrostatischen Drucks in Abhängigkeit des Materials der Dichtwand, zu vermeiden. Das über die Brunnen entnommene Wasser ist einer Sickerwasserreinigung oder -entsorgung zuzuführen. Die zu fördernde Wassermenge wird durch

den Einbau eines Oberflächenabdichtungssystems verringert, das idealerweise mit der Dichtwand eine komplette Einhausung ergibt.

Weitere Folgekosten können sich aus der ggf. erforderlichen Bewirtschaftung des Grundwassers (wie beschrieben) außerhalb der Einkapselung ergeben. Die zu erwartenden Gesamtkosten einer solchen Einkapselungsmaßnahme sind einer ggf. möglichen Beräumung/Umlagerung der Deponie mit Wertstoffgewinnung (vgl. Abschnitt 3.3) gegenüberzustellen.

3.3 Landfill Mining

Das Landfill Mining ist eine Unterdisziplin des sogenannten Urban Minings, das allgemein für die Erschließung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagerstätten steht. Urban Mining umfasst die (Rück-)Gewinnung von Stoffen aus verbauten und/oder abgelagerten Materialien als Sekundärrohstoff oder Wertstoff. Damit soll der Verbrauch von begrenzten und knappen Rohstoffen durch Wiederverwendung eingeschränkt werden. Es wird zwischen kurzfristigem (Gewinnung aus kurzfristigen Konsum- und Produktionsgütern wie z. B. Elektrogeräten, Verpackungen etc.) und langfristigem (aus langfristigen Konsum- und Produktionsgütern wie z. B. Infrastruktureinrichtungen, Gebäuden etc.) Urban Mining unterschieden.

Das Landfill Mining ist Teil der Gewinnung von langfristigen Gütern. Hinsichtlich des Landfill Minings wird vielfach noch unterschieden in den reinen Rückbau von Deponien und dem zur Gewinnung von Wertstoffen motivierten Rückbau, der dann vielfach als Enhanced Landfill Mining (ELFM) bezeichnet wird (vgl. [3]). Dieser Begrifflichkeit wird sich hier angeschlossen.

Die zu gewinnenden Wertstoffe können im weiteren Sinne auch andere positive Auswirkungen erreichen, sie können somit verschiedene Ausprägung haben:

- In den auf Deponien und Altlasten abgelagerten Materialien sind **Wert- und Sekundärrohstoffe** in z.T. größerem Umfang (z.B. auch Ersatzbrennstoffe) enthalten.
- Durch Aussortierung und Nutzung der Wertstoffe, und damit Reduzierung der Gesamtmenge des Deponats, kann entweder wieder **Deponievolumen** geschaffen oder die zu sichernde Deponiefläche verkleinert und damit die Kosten für die Sicherung reduziert werden.

- Im günstigsten Fall kann der Gesamtrückbau der bestehenden Deponie/Altablagerung mit einer anderweitigen Nutzung der **frei werdenden Fläche** erreicht werden.
- Es können durch Gewinnung von Sekundärrohstoffen **natürliche Ressourcen** geschont und damit Umweltauswirkungen reduziert werden.
- Durch den Rückbau, insbesondere von Anlagen ohne vorhandene (Basis-)Dichtungssysteme und ggf. mit „nassem Fuß“ (vgl. Abschnitt 3.2) und deshalb mit erheblichen Gefährdungen für die Schutzgüter Boden, Wasser, Luft, können die Auswirkungen reduziert und somit positive **ökologische Gesichtspunkte** erreicht werden.

Im Hinblick auf die Durchführung von ELFM sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

- Rechtlicher Status der Deponie/Altablagerung.
Der Status der Anlage hat ggf. erheblichen Einfluss auf die Möglichkeit zur Durchführung des ELFM bzw. die Kosten.

- Situation der Deponie/Altablagerung:

- Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle.

Hier ist eine Analyse erforderlich, welche Stoffe beim Rückbau der Deponie gewonnen werden:

- Ist die Deponie bereits gesichert (dann wären die bereits aufgebrachten Mittel für die Sicherung und deren Rückbau zusätzliche Kosten) oder sind Sicherungsmaßnahmen noch auszuführen.
- Sind Behandlungskapazitäten für die Bearbeitung der rückgebauten Stoffen vorhanden.

- Ökonomische Belange:

- Welche Maßnahmen sind zur Sicherung der Deponie über welchen Zeitraum erforderlich, die einem Rückbau entgegengesetzt werden können.

Die Herstellung von Sicherungsmaßnahmen wie Oberflächenabdeckungen (temporär und/oder endgültig), ggf. aufwendigen Dichtwänden etc. verursachen erhebliche Kosten, die durch das ELFM reduziert werden bzw. entfallen

können. Weiterhin können ggf. reduzierte Kosten für die Nachsorgeaufwendungen (Sickerwasser- und Gasbehandlungen, Kontroll- und Wartungsmaßnahmen etc., deren Gesamtaufwand erheblich von der Dauer der Nachsorgephase beeinflusst wird) das ELFM wirtschaftlich werden lassen.

- Marktsituation für die gewonnenen Sekundärrohstoffe.

Beim Fehlen von z. B. geeigneten Verbrennungsanlagen ist die Gewinnung von Ersatzbrennstoffen nicht sinnvoll. Wie sind die zu erzielenden Erlöse (Sekundärrohstoffe, Deponievolumen, frei werdende Flächen).

- Kosten für die Durchführung des ELFM.

In diesem Punkt sind Vorbereitungskosten (Erkundungen, Planungen) neben den eigentlichen Baukosten ebenso zu berücksichtigen, wie Maßnahmen zur Sicherung (Arbeitssicherheit, Arbeiten auf kontaminierten Standorten, Depo-niegas), Transport der Materialien zu den Behandlungsanlagen und die Aufbereitung selbst (Vorkonditionierung, Sortierung) sowie die Entsorgung verbleibender Reststoffe.

- Kann ggf. die Reduzierung von Deponiegas und damit Treibhausgas mit einem entsprechenden CO₂-Äquivalent positiv berücksichtigt werden.

– Ökologische Gesichtspunkte:

Bei den ökologischen Gesichtspunkten sind Aspekte wie Reduzierung der Treibhauseffekte (Methanbelastung, CO₂-Äquivalent), des Versauerungspotenzials (SO₂-Äquivalente), des Terrestrischen Eutrophierungspotenzials (PO₄-Äquivalente; die Verringerung der Nährstoffzufuhr in Gewässern und Böden) und des kumulierten fossilen Energieaufwandes (KEA fossil) zu betrachten.

In [3] wurden für verschiedene Szenarien der Verwertung des aufgenommenen Deponats, die ökologischen und ökonomischen Aspekte am Beispiel der Deponie Pohl-sche Heide (Deutschland, Nordrhein-Westfalen) ausgewertet. Die unterschiedlichen Szenarien setzen eine Vorkonditionierung und Stoffstromtrennungen (in dem für die weitere Verarbeitung notwendigen Umfang) voraus.

- Szenario 1: mit geringem Aufbereitungsaufwand.

Das Szenario 1 umfasst die Verwertung der Grobfraktion in einer MVA mit Schlacke-Aufbereitung mit einer Wiedereinlagerung der Feinfraktion in den Varianten a) ohne und b) mit vorheriger biologischer Behandlung.

Dieses Szenario erfüllt noch nicht die in [3] beschriebene Definition des ELFM, sondern wird als reines Landfill Mining betrachtet.

- Szenario 2: mit mittlerem Aufbereitungsaufwand.

Das Szenario 2 wird als ELFM bezeichnet. Untervariante 2a entspricht im Wesentlichen dem Szenario 1, es wird jedoch die Feinfraktion einer Nass-mechanischen Feinkornaufbereitung unterzogen. Die heizwertreichen Materialien können als Ersatzbrennstoff (EBS) einem entsprechenden Heizkraftwerk mit Schlacke-Aufbereitung zugeführt werden.

In Variante 2b wird ergänzend zu 2a durch eine erweiterte Vorkonditionierung die Metallausbringung verbessert, das gewonnene Material der thermischen Verwertung zugeführt.

- Szenario 3: mit hohem Aufbereitungsaufwand.

Im Szenario 3 (ebenfalls in den Varianten a und b und als ELFM eingestuft) werden die Materialien durch unterschiedliche Vorkonfektionierung so aufbereitet, dass auch aufwendige Verwertungsverfahren genutzt werden können. Die Behandlung erfasst in den Feinfraktionen die nassmechanische Feinkornaufbereitung in dem Umfang, dass auch Sekundärbrennstoff gewonnen werden kann. Die Grobfraktionen werden MVA und EBS-Kraftwerken (mit Schlacke-Aufbereitung) und thermischen Verwertungsanlagen zugeführt. Die Variante 3 a unterscheidet sich von 3b darin, dass keine SBS-Gewinnen und Nutzung in Zementwerken erfolgt.

Hinsichtlich der ökonomischen Betrachtung wird in [3] ausgeführt, dass das ELFM bei Vorhandensein von entsprechenden Anlagen unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich sein kann. Eine pauschale Abschätzung, ob ein ELFM vorteilhaft gegenüber einer Deponiesicherung ist, wird jedoch nicht gegeben, da es eine Vielzahl von Einflussfaktoren (Art und Umfang von Abdeckungen, Nachsorgemaßnahmen etc.) gibt, die für jeden Einzelfall konkret abgeschätzt werden müssen.

Die Durchführung von ELFM kann aus ökologischen Gründen durchaus sinnvoll sein. Dies hängt jedoch vom Vorhandensein von Anlagen mit hohen energetischen

Wirkungsgraden ab, dann sind die aufwendigeren Szenarien den einfacheren Verfahren überlegen. In [3] wird abschließend zusammengefasst:

„Abschließend zeigen die intensiven ökologischen Analysen, dass in zahlreichen Fällen ein ELFM dem Verbleib des Deponats in der Deponie überlegen sein kann. Je höher die Methanemissionen der Deponie, die Metallgehalte im Deponat und die energetischen Wirkungsgrade der zur Verfügung stehenden Anlagen zur energetischen Nutzung der heizwertreichen Bestandteile, umso eher lohnt sich ein ELFM aus ökologischer Sicht.“

Im Einzugsgebiet der Deponie Nr. 5 sind, soweit bekannt, keine ausreichend große Anlagen zur energetischen Verwertung vorhanden, so dass die wirtschaftliche und ökologische Möglichkeit des ELFM nach heutigen Gesichtspunkten nicht gegeben ist.

4 Planung der Oberflächenabdichtung

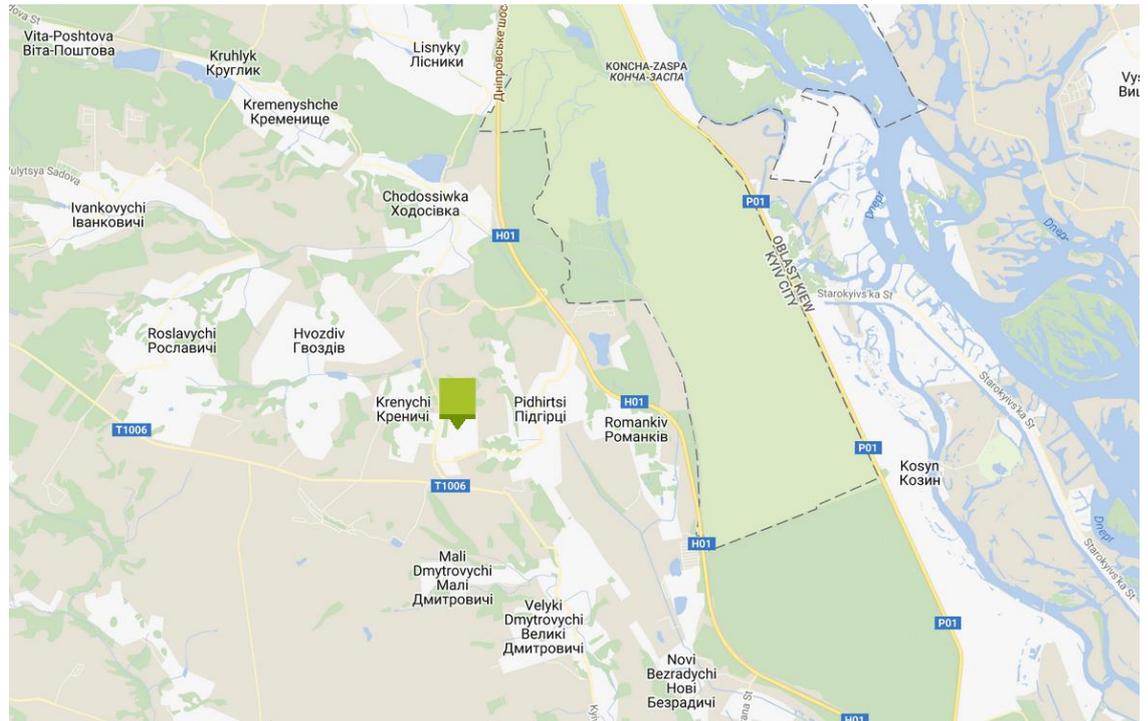
4.1 Grundlagenermittlung (Bestandspläne, Vermessung, Grundwasserbrunnen, Gasmigrationsmessung)

4.2 Ist-Situation Deponie Nr. 5

4.2.1 Lage

Die Deponie Nr. 5 liegt ca. 30 km südlich des Stadtzentrums der Hauptstadt Kyiv, westlich des südlichsten Ausläufers des Stadtgebietes in der Region (Oblast) Kyiv, dort im nordwestlichen Bereich des Kreises (Rajon) Obuchiw, dessen Verwaltungszentrum in der gleichnamigen kreisfreien Stadt Obuchiw ansässig ist. Die zur Deponie nächstgelegenen Ortschaften sind Pidhirtsi (ca. 1,2 km östlich der Deponie) und Krenychi (ca. 700 m westlich der Deponie).

Abbildung 25: Lage der Deponie Nr. 5 im Oblast Kyiv, südlich der Stadt Kyiv



Quelle: Falk.de

4.2.2 Klima

Kyiv liegt in einer Zone mit kontinentalem Klima. Die wesentlichen Klimadaten für den Bereich der Stadt Kyiv sind in der folgenden Tabelle 9 enthalten. Die Daten stammen von World Meteorological Organization (vgl. [2]).

Tabelle 9: Klimadaten für Kyiv nach Angaben WMO

| Monat | T _{min,mit} [°C] | T _{max,mit} [°C] | N _{mit} [mm] | Anz N |
|-------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------|
| Jan | -8,2 | -2,6 | 47,7 | 16,7 |
| Feb | -6,8 | -1,1 | 46,0 | 14,2 |
| März | -2,1 | 4,3 | 38,9 | 12,9 |
| Apr | 4,8 | 13,6 | 48,3 | 11,6 |
| Mai | 10,7 | 20,5 | 52,5 | 11,8 |
| Jun | 13,8 | 23,5 | 72,5 | 13,1 |
| Jul | 15,1 | 24,5 | 88,0 | 13,3 |
| Aug | 14,4 | 24,0 | 69,2 | 10,8 |
| Sep | 10,0 | 19,1 | 46,7 | 10,2 |

| Monat | $T_{min,mit}$ [°C] | $T_{max,mit}$ [°C] | N_{mit} [mm] | Anz N |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|
| Okt | 4,8 | 12,3 | 35,1 | 9,9 |
| Nov | 0,0 | 4,8 | 51,3 | 14,8 |
| Dez | -4,6 | 0,1 | 51,7 | 17,4 |

Quelle: World Meteorological Organization [2]

Erläuterungen: $T_{min,mit}$ = mittlere tägliche Minimumtemperatur

$T_{max,mit}$ = mittlere tägliche Maximumtemperatur

N_{mit} = mittlere Niederschlagsmenge

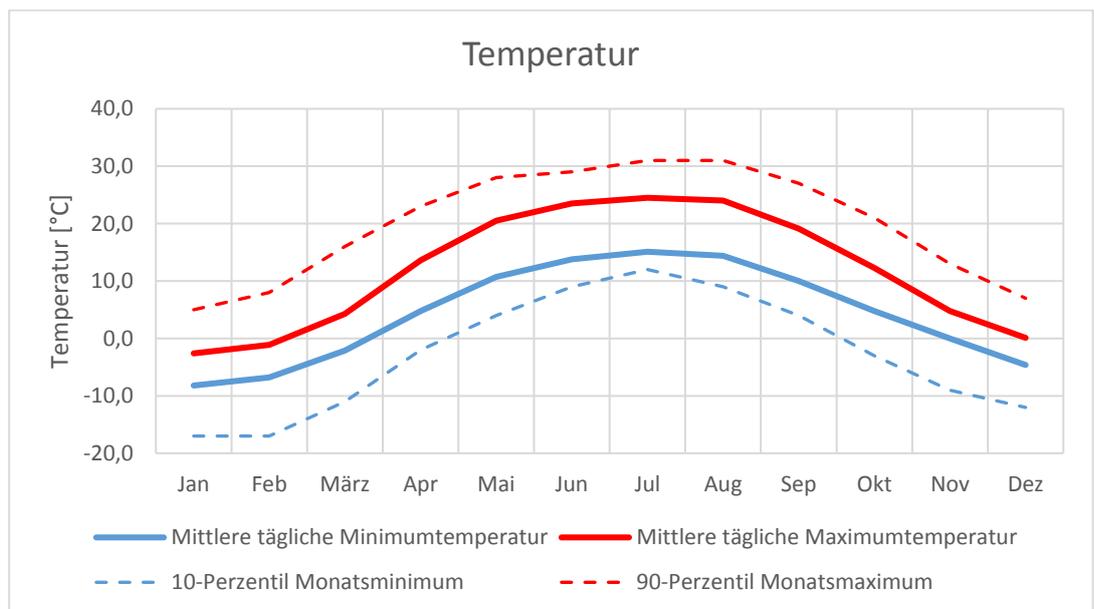
Anz N = mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag

In den Monaten Juni bis August sind regelmäßig mittlere Tagestemperaturen über 15°C, in den Monaten Dezember bis Februar unter 0°C zu erwarten.

Die in der vorstehenden Tabelle 9 enthaltenen Daten der mittleren Tagestemperaturen sind in der Abbildung 26 grafisch dargestellt. Ergänzt wurden die Werte um die 10- und 90-Perzentile der Temperaturen (Quelle: <https://de.weatherspark.com>, aus dem Zeitraum 1. Januar 1980 bis zum 31. Dezember 2016).

In 90 % der Fälle liegt die maximale Tagestemperatur demnach bei unter 31°C, die Minimaltemperatur in nur 10 % der Fälle unter -17°C. Frosttage können im Rahmen dieser Grenzen von Oktober bis April herrschen.

Abbildung 26: Mittlere tägliche Minimum- und Maximumwerte der Temperaturen in Kyiv

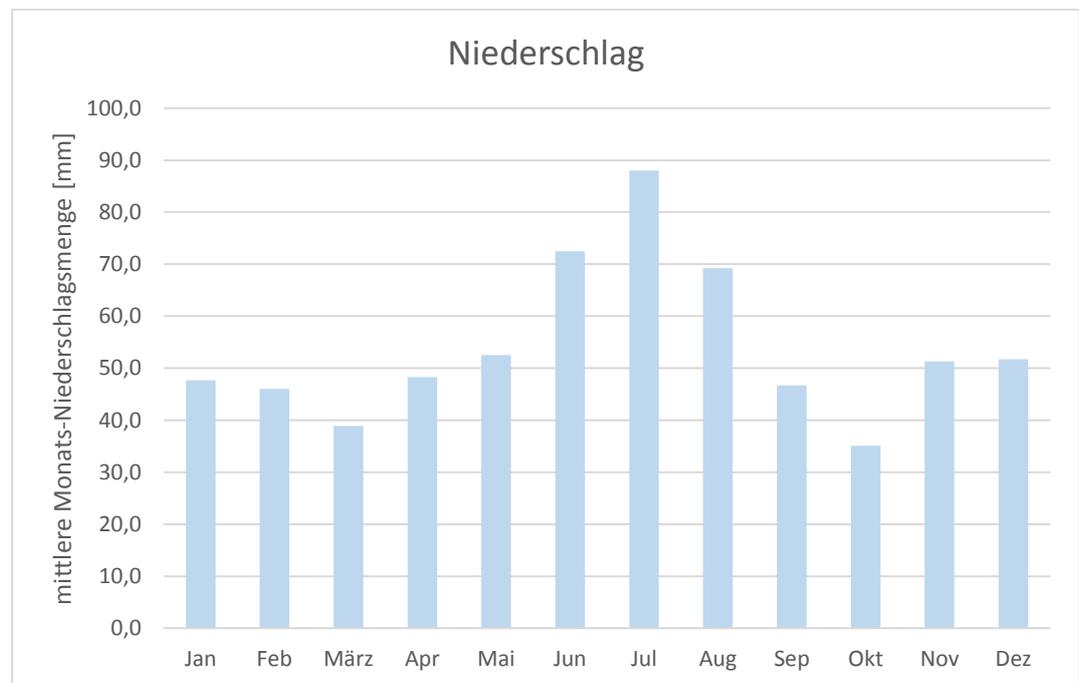


Auswertung der Daten aus Tabelle 9, ergänzt um Perzentilwerte aus weatherspark.com

Im Bereich von Kyiv ist mit einem mittleren Jahresniederschlag von rd. 648 mm zu rechnen. Die niederschlagsreichsten Monate sind üblicherweise Juni, Juli und August, mit zusammen etwa 35 % der Jahresniederschlagsmenge (allein im Juli rd. 13,6 % der Jahresmenge). In den Monaten März und Oktober fallen mit jeweils 5-6 % der Jahresmenge die geringsten Niederschläge, in allen anderen Monaten sind im Schnitt jeweils etwa 7-8 % der Jahresmenge zu verzeichnen.

Die Abbildung 27 enthält die graphische Darstellung der mittleren Niederschlagswerte für die einzelnen Monate aus Tabelle 9.

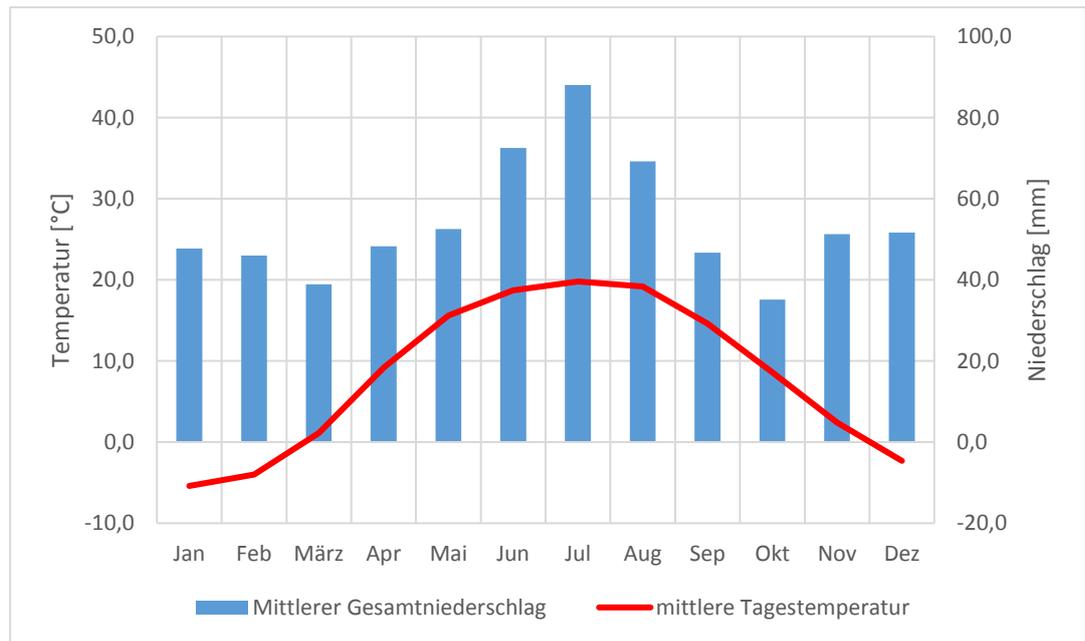
Abbildung 27: Mittlere Monatsniederschlagsmengen in Kyiv



Auswertung der Daten aus Tabelle 9

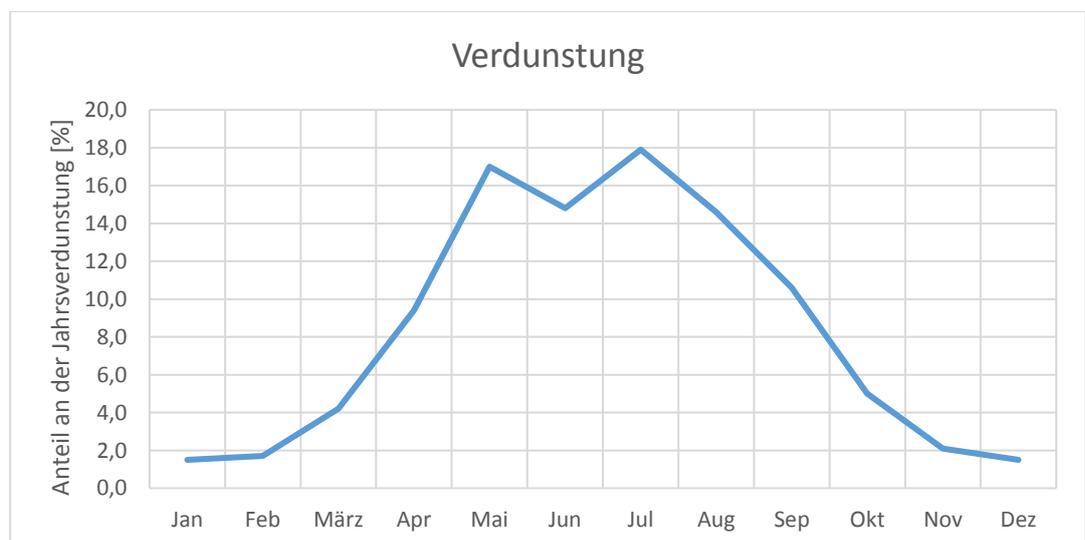
Die Niederschlags- und mittleren Temperaturwerte sind im folgenden Walter/Lieth-Klimadiagramm gegeneinander aufgetragen (vgl. Abbildung 28). Daraus ist ersichtlich, dass Kyiv das gesamte Jahr über in einem humiden Klimabereich liegt. Im Mittel der Werte aus den vergangenen Beobachtungszeiträumen ist die Temperaturkurve in keinem Monat über den Niederschlagswerten.

Abbildung 28: Walter/Lieth-Klimadiagramm (hygrothermisch) für Kyiv



Der mittleren Niederschlagsmenge von jährlich rd. 648 mm steht eine theoretische mittlere potentielle Verdunstung von rd. 48 cm (Quelle: Handbuch Der Klimatologie; Verlag: BoD – Books on Demand, 2012) gegenüber. Diese verteilt sich theoretisch monatlich als Anhaltswert etwa wie in Abbildung 29 dargestellt (Quelle: Lehrbuch der kosmischen Physik: Erster Band; Verlag: BoD – Books on Demand, 2012). Die stärkste Verdunstung erfolgt in den Monaten Mai bis August. In den Monaten November bis Februar ist die Verdunstungsrate gering.

Abbildung 29: Anhaltswerte zur Verteilung der potentiellen Verdunstung über das Jahr im Bereich der Stadt Kyiv



4.2.3 ***Deponie***

Die Deponie Nr. 5 befindet sich im Eigentum der Stadt Kyiv und wird betrieben von der Kievspetstrans. Sie umfasst ein Gelände mit einer Gesamtfläche von rd. 63 ha (Angabe des Betreibers). Auf dem Gelände befinden sich folgende Betriebsteile:

- Zufahrt mit Annahme.
- Betriebshof.
- Zwei Ablagerungsbereichen.
- Technischen Anlagen zur Sickerwasser- und Gasbehandlung.

Die Betriebsteile sind auf dem Plan 2 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

4.2.3.1 ***Zufahrt mit Annahme***

Die Annahme für die angelieferten Abfälle befindet sich ca. 80,00 m hinter dem Tor zum Deponiegelände (im südwestlichen Bereich des Geländes) (vgl. Abbildung 30). Es handelt sich hier um eine Halle (Länge rd. 23,80 m, Breite rd. 19,90 m), in der zwei Fahrzeugwaagen, Länge jeweils 15,00 m, unterbracht sind. Zwischen den Fahrzeugwaagen liegt das Annahmebüro, in dem die angelieferten Abfälle mittels EDV-Anlage registriert werden.

Abbildung 30: Annahmehalle in der Deponiezufahrt



In dem Annahmehbereich erfolgt zudem eine Kontrolle der Abfallarten. Vom Annahmehbereich führt eine ca. 10,00 m breite, mit Asphalt befestigte Straße in Richtung Osten zum Betriebshof bzw. zum aktuellen Ablagerungsbereich.

4.2.3.2 *Betriebshof*

Der Betriebshof der Deponie liegt ca. 450,00 m nordöstlich der Annahmehalle zwischen den beiden Ablagerungsbereichen. Er umfasst eine Fläche von rd. 20.000,00 m². In dem Bereich sind Verwaltungsgebäude, Werkstattgebäude, Abstellflächen etc. untergebracht.

Abbildung 31: Betriebshof der Deponie vom östlichen Ablagerungsbereich gesehen



4.2.3.3 Sickerwasserbehandlung

Auf der Deponie ist eine Sickerwassererfassung mit Behandlungsanlage installiert. Zur Sickerwassererfassung gehören an der Basis der Ablagerungsbereiche verlegte Rohrleitungen (über die keine genaueren Angaben vorliegen), die Zuleitungen zu den Pumpstationen und die von dort zur Behandlungsanlage führenden Druckleitungen. Die eigentliche Sickerwasserbehandlungsanlage befindet sich ca. 250 m nördlich des Betriebshofes zwischen den Ablagerungsbereichen. Zur Behandlungsanlage gehören die Speicherbecken, in denen das Konzentrat zum weiteren Verbleib (vorgesehene Verdunstung) bereitgestellt wird.

Das an der Basis der Ablagerungsbereiche erfasste Sickerwasser wird durch Rohrleitungen den jeweils nördlich des Ablagerungsbereiches vorhandenen Pumpstationen zugeführt. Von den Pumpstationen kann das erfasste Wasser

- der jeweils anderen Pumpstation oder
- der Sickerwasserbehandlungsanlage zugeführt werden oder
- auf den Deponiekörper zurückgeführt werden (Kreislaufführung).

Die Behandlung des Sickerwassers erfolgt in einer Anlage der Fa. Rochem (Hamburg, Deutschland). Es handelt sich um eine Permeationsanlage mit einer Leistung von 200 m³/d (Stand Dezember 2017), bei einem Betrieb von 24 h/d. Die Anlage wurde 1990 auf der Deponie in Betrieb genommen und ist seitdem, mit einem Ausfall von 2011 bis 2015, betrieben.

Die Anlage ist so ausgelegt, dass von der zugeführten Rohsickerwassermenge im Betrieb 80 % als gereinigt in die Vorflut abgegeben werden können, 20 % bleiben

als Konzentrat zurück. Aktuell können nach Angaben des Deponiebetreibers jedoch nur 70 % Permeat in die Vorflut eingeleitet werden.

Mit Stand Dezember 2017 wurde eine Erweiterung der Anlage zur Montage angeliefert, womit die Reinigungsleistung auf insgesamt 300 m³/d erhöht werden soll.

Das in der Behandlungsanlage gereinigte Wasser (Permeat) wird über Leitungen und offene Gerinne der Vorflut nördlich des Deponiegeländes zugeführt. Das bei der Behandlung entstandene Konzentrat (Retentat) gelangt in 2 offene Speicherbecken. Im Zuge einer Begehung im Dezember 2017 hatten die Becken eine Füllung bis nahezu Böschungsoberkante. Auf dieser Höhe haben die Becken eine Fläche von zusammen etwa 14.300 m² und ein Speichervolumen von rd. 50.400 m³. Das Wasser unterliegt in den Becken der natürlichen Verdunstung. Da die Becken offen sind, wird es wegen der Niederschlagsmengen über das Jahr gesehen kaum zu einer Verringerung der konzentrierten Sickerwassermenge kommen. Die Leistung der vorhandenen Anlage reicht, auch nach deren vorgesehenen Erweiterung, nicht aus, um die auf der offenen Gesamtablagerungsfläche anfallende jährliche Sickerwasserneubildung zu kompensieren (vgl. Abschnitt 4.2.3.7). Insbesondere auch zur Verringerung der im Deponiekörper vorhandenen Sickerwassermengen bedarf es einer Erhöhung der Behandlungskapazität.

Inwieweit die Rückführung von Sickerwasserkonzentrat auf die Ablagerungsbereiche (Kreislaufführung) zu einer Erhöhung der Belastungen des der Reinigungsanlage zufließenden Sickerwassers, und damit möglicherweise zu einer Verringerung der Reinigungsleistung der Anlage führen, kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Grundsätzlich wäre eine anderweitige Entsorgung des Konzentrates (ggf. mit Eindampfung und Verbrennung in Kombination mit einer Deponiegasbehandlung/-verwertung) vorteilhaft.

4.2.3.4 *Verdunstungsanlage*

Auf dem Deponiegelände ist eine Verdunstungsanlage installiert. In dieser Anlage soll das aus der Sickerwasserbehandlung stammende Konzentrat verdunstet werden. Nach Angaben des Deponiebetreibers ist die Anlage jedoch nie in Funktion gewesen.

4.2.3.5 *Gasverwertung*

Auf dem Deponiegelände ist eine Verwertungsanlage für erfasstes Deponiegas vorhanden. Es wird elektrische Energie erzeugt. Über den Umfang der verwerteten Gasmengen und der erzeugten Energie liegen seitens des Betreibers keine Angaben vor. Im Rahmen der Unterlagenrecherche zum Zustand der Deponie in der Ukraine (vgl. Abschnitt 1.1.8) wurden Angaben zu Deponiegasmengen der Deponie Nr. 5 gefunden (vgl. Seite 16).

4.2.3.6 *Ablagerungsbereich*

Der Ablagerungsbereich umfasst 2 Teilflächen. Das so genannte Map 1 hat eine Ablagerungsfläche von rd. 18 ha, das Map 2 von rd. 17 ha (Angaben des Betreibers). Die Ablagerungsbereiche sind auf dem Plan 2 dargestellt.

a) Map 1

Der Ablagerungsbereich Map 1 befindet sich östlich des Betriebshofes. Unterlagen zu der Deponiebasis vor Ablagerungsbeginn liegen nach Angaben des Betreibers nicht vor. Zur Einschätzung der in diesem Bereich abgelagerten Abfallmenge wurde eine mögliche Deponiebasis in Anlehnung an die für Map 2 vorliegenden Unterlagen konstruiert. Ausgehend von einer wahrscheinlichen Höhe am nördlichen Rand der Deponie wurde eine mit 1 % nach Süden hin ansteigend geneigte Deponiebasis angesetzt. Die angenommenen Höhen der Deponiesohle bewegen sich damit auf Höhen zwischen ca. 131,50 m und 135,60 m. Vom Umring der Ablagerungsfläche (der ausgehend von dem Bestandsplan 2017 angenommen ist und auf Höhen zwischen minimal 159,00 m und maximal 178,00 m liegt; der Umring des Ablagerungsbereiches ist als Grundlage für weitere Planungen genau zu erkunden) wurde mit einer Böschungsneigung von 1:4 bis auf die angenommene Sohle gerechnet. Mit der so konstruierten Deponiebasis und dem Vermessungsplan von 2017 wurde eine Differenzvolumenermittlung durchgeführt, mit der die auf Map 1 eingelagerte Abfallmenge auf rd. 6,0 Mio. m³ eingeschätzt wird.

Der Ablagerungsbereich Map 1 wird aktuell mit Abfällen beschickt. Das Einbauplateau liegt mit Stand 2017 auf Höhen zwischen 180,00 m und 185,00 m. Im südlichen Bereich des Plateaus befindet sich auf einer Höhe von rd. 180,50 m (Wasserspiegel) ein Sickerwassersee, der eine Ausdehnung von etwa rd. 17.000 m² hat (Sickerwassersee 1-1, vgl. Plan 2). Angaben zur Tiefe des Sees

liegen nicht vor. Die Oberfläche des Sees ist mit Abfällen bedeckt, die Fläche ist nicht begehbar.

Der nördliche Teil des Map 1 könnte am ehesten, auch kurzfristig, mit einer funktionierenden Oberflächenabdeckung versehen werden. Der südliche Teil, mit dem darin enthaltenen Sickerwassersee, bedarf jedoch noch einiger Formgebung.

Am westlichen Deponiefuß tritt im Bereich des Sickerwassersees Sickerwasser in den Deponierandgraben aus.

b) Map 2

Map 2 befindet sich nördlich des Zufahrtsbereiches mit Waage und westlich des Betriebshofes. Zu dem Map 2 liegen Unterlagen über die Planung zur Herstellung der Deponiebasis vor dem Beginn der Ablagerung vor, die jedoch ohne Koordinatenbezug zu aktuellen Bestandsunterlagen sind. Die alten Planunterlagen wurden, soweit möglich, in die aktuellen Bestandspläne eingepasst. Diese Einpassung ist mit Unsicherheiten behaftet.

Nach den alten Planungsunterlagen liegt die Basis des Ablagerungsbereiches etwa auf Höhen zwischen ca. 137,00 m und 150,00 m. Der die Ablagerungsfläche umgrenzende Weg liegt südlich der Fläche auf einer Geländehöhe von rd. 179,00 m, am nördlichen Rand der Fläche auf rd. 154,00 m, fällt somit von Süden in nördliche Richtung um rd. 25,00 m. Insbesondere an der südlichen Grenze liegen keine Angaben zur Lage des Deponiefußes vor, er wurde auf Basis des Bestandsplanes von 2017 (vorhandener Zaun) eingeschätzt. Die Lage des Deponiefußes (äußere Umschließung des Ablagerungsbereiches) ist als Grundlage für weitere Planungen genau zu erkunden.

Weiterhin ist der Bereich auf dem Bestandsplan von 2017 abgebildet. Das Map 2 teilt sich grob in zwei Bereiche (vgl. Plan 2). Der südliche Teil liegt mit Höhen zwischen 171,00 m und 177,00 m über dem die Fläche umgebenden Weg. Die Fläche hat kein nach außen geneigtes Gefälle, vielmehr ist dort noch eine Vertiefung im zentralen Teil ausgebildet. Im nördlichen Teil des Maps 2 wird eine auf etwa 155,00 m tief liegende Fläche (Größe ca. 2,5 ha, Ablagerungsmächtigkeit über der Sohle ca. 15,00 m) östlichen und nördlich mit Flächen mit Ablagerungshöhen von 173,00 bis 160,00 m eingegrenzt.

Aus den vorliegenden Unterlagen wurden digitale Geländemodelle zur wahrscheinlich hergestellten Basis und der vorhandenen Oberfläche erstellt. Diese Geländemodelle sind Basis u.a. für die Einschätzung des im Bereich des Map 2 eingelagerten Abfallvolumens. Aus der Volumenermittlung mittels Verschneidung der beiden Modelle ergibt sich ein Ablagerungsvolumen von rd. 1,8 Mio. m³.

Im südlichen Bereich des Map 2 (vgl. Plan 2) ist auf einer Höhe von 170 m der Wasserspiegel eines rd. 22.000,00 m² großen Sickerwasserteiches (SwT 2-1) vorhanden. Ein weiterer Sickerwassersee (SwT 2-2) von mindestens rd. 10.000,00 m² befindet sich im tiefliegenden Teil des nördlichen Bereiches auf einer Höhe von rd. 151,00 m. Die genaue Ausdehnung dieses Sees ist anhand der Bestandsunterlagen nicht einzugrenzen. Beide Seen sind an der Oberfläche mit Abfällen bedeckt und nicht begehbar. Über die Tiefe der Seen liegen keine Angaben vor.

Der Ablagerungsbereich Map 2 ist insgesamt weit von einer Form entfernt, auf der ein funktionierendes Oberflächenabdeckungssystem aufgebracht werden könnte.

4.2.3.7 *Sickerwassermenge*

Es wurde in dem vorstehenden Abschnitt erläutert, dass in den Ablagerungsbereichen Sickerwasserseen vorhanden sind. Die Gesamtfläche dieser Seen hat eine Größe von rd. 49.000 m², dies entspricht einem Anteil von etwa 14 % an der Gesamtgrundfläche der Ablagerungsbereiche. Nach Angaben des Deponiebetreibers werden im Deponiekörper insgesamt Sickerwassermengen von 600.000 bis 1,5 Mio. m³ vermutet. Eine Ursache für das im Deponiekörper vorhandene Stauwasser ist der im Abschnitt 4.2.3.3 beschriebene Ausfall der Sickerwasserbehandlung im Zeitraum von 2011 bis 2015. Hinzu kommt, dass die Kapazität der vorhandenen Anlage wahrscheinlich nicht ausreichend ist, die auf der Gesamtablagerungsfläche jährlich sich bildende Sickerwassermengen zu reinigen.

Im Bereich der Deponie ist mit mittleren jährlichen Niederschlagsmengen von rd. 650 mm zu rechnen, bei einer potentiellen Verdunstung von rd. 480,00 mm. Ein Oberflächenabfluss ist von der Deponie nicht zu betrachten, da dieser am Deponiefuß erfasst wird. Die tatsächliche Verdunstungshöhe über der Deponie liegt unter

dem Wert der potenziellen Verdunstung, genaue Angaben sind hier jedoch nicht möglich.

Bei dem Ansatz unterschiedlicher Verdunstungsraten liegt die Sickerwasserneubildung zwischen:

- minimal rd. 170,00 mm (26 % des Niederschlags, bei 100 % potentieller Verdunstung) und einem angenommenen
- Maximalwert von rd. 410,00 mm (63 % des Niederschlags), wenn der Ansatz, dass keine Verdunstung stattfindet und damit der mittlere Niederschlag auch der Sickerwasserneubildungsrate entspricht.

In der folgenden Tabelle 10 wird die jährliche Sickerwasserneubildung auf den Ablagerungsbereichen von rd. 35 ha bei mittlerer Niederschlagsmenge eingeschätzt:

Tabelle 10: Einschätzung der Sickerwasserbildungsrate

| | | Keine Verdunstung | 1/3 der Verdunstung | Hälfte der Verdunstung | 2/3 der Verdunstung | Maximale Verdunstung |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| Niederschlag | mm | 650 | 650 | 650 | 650 | 650 |
| Verdunstung | mm | 0 | 160 | 240 | 320 | 480 |
| Sickerwasser | mm | 650 | 490 | 410 | 330 | 170 |
| | %N | 100 | 75 | 63 | 51 | 26 |
| | m ³ /a | 227.500 | 171.500 | 143.500 | 115.500 | 59.500 |
| | m ³ /d | 623,3 | 469,9 | 393,2 | 316,4 | 163,0 |

Anmerkungen: Sickerwasserneubildung bei offener Deponiefläche von insgesamt rd. 35 ha.

Mit den Werten aus der vorstehenden Tabelle sind über den Zeitraum des Ausfalls der Sickerwasserbehandlung von 4 Jahren auf der gesamten Deponieablagefläche von rd. 350.000,00 m², bei mittlerer Niederschlagsmenge zwischen minimal 238.000,00 m³ (eher zu geringer Wert, da dies eine maximale Verdunstung voraussetzt) und maximal 910.000,00 m³ (keine Verdunstung) Sickerwasser entstanden, die aus dem Deponiekörper nicht entnommen werden konnten. Bei Ansatz eines

mittleren Verdunstungswertes beträgt die Sickerwasserbildung über die 4 Jahre etwa 574.000,00 m³. Hinzu kommen die Wassermengen, die in den offenen Sickerwasserkonzentratbecken (zusammen ca. 1,5 ha) angefallen sind und auf die Ablagerungsbereiche gefördert werden mussten, was bei einem Ansatz von mittleren Niederschlags- und Verdunstungswerten über 4 Jahre rd. 25.000,00 m³ entspricht.

Der Tabelle 10 ist weiterhin zu entnehmen, dass die vorhandene Sickerwasserbehandlungsanlage mit einer Kapazität von maximal 200,00 m³/d, bei durchgehendem Betrieb, für die Sickerwasserneubildung auf dem gesamten Ablagerungsbereich offensichtlich nicht ausreichend dimensioniert ist. Mit der Maximalleistung ist sie lediglich in der Lage ist, eine Jahresmenge von 73.000,00 m³ (entspricht etwa 32 % der mittleren Jahresniederschlagswassermenge) zu behandeln. Davon werden aktuell dann aber auch nur 70 % (also 51.100,00 m³; möglich nach Angaben des Betreibers max. 80 %, das entspricht 58.400 m³) als gereinigt in die Vorflut abgegeben, der Rest wird im Kreislauf auf die Deponie zurückgeführt. Daraus ergibt sich, dass die vorhandene Anlage nach ihrer Erweiterung maximal in der Lage ist, etwa die Sickerwasserbildungsrate zu behandeln, die bei der maximalen jährlichen potenziellen Verdunstung entsteht (bei durchgehendem Betrieb, ohne Wartungsarbeiten etc.). Die Anlage ist damit unterbemessen.

Wie im Abschnitt 4.2.3.3 beschrieben war vorgesehen, die Kapazität der Sickerwasserbehandlung auf insgesamt rd. 300,00 m³/d zu erhöhen. Mit dieser Leistung kann dann jährlich max.109.500,00 m³ behandelt werden. Unter zusätzlicher Berücksichtigung, dass davon 20 % wieder auf die Deponie zurückgeführt werden, ist die Anlage auch nach Erweiterung der Kapazität nicht in der Lage, die Sickerwasserneubildung auf dem gesamten Ablagerungsbereich von 35 ha zu kompensieren. Damit die jährlich anstehende Sickerwasserneubildung gereinigt werden kann, ist es unbedingt erforderlich:

- Die Kapazität der Sickerwasserbehandlung deutlich zu erhöhen (insbesondere vor dem Hintergrund, dass im Deponiekörper erhebliche Sickerwassermengen vorhanden sind, die zusätzlich gereinigt werden müssen) und
- die offene Deponiefläche und damit die Sickerwassersneubildung zu reduzieren.

Im Mai 2018 wurden im MAP1 und MAP 2 jeweils 3 Stück Brunnen bis ca. 5,00 m über angenommener Deponiebasis abgeteuft.

Ziel der Bohrungen war zum Einen die Entnahme von Sickerwasserproben, zum Anderen aber im Besonderen zur Ermittlung der Sickerwassereinstauhöhe über dem Deponielängsschnitt.

Die Ergebnisse bestätigen die Vermutungen des Deponiebetreibers, dass die Deponie zu einem Großteil mit Sickerwasser eingestaut ist.

Die Einstauhöhe beträgt in MAP 1 rd. 90,00 % der Deponiehöhe, im MAP 2 schwankt die Einstauhöhe zwischen rd. 50,00 % bis rd. 75,00 % der Deponiehöhe.

Das tatsächliche Volumen des eingestauten Sickerwassers lässt sich bei der vorliegenden Datenlage nicht ausreichend genau abschätzen.

Es ist aber von einem Sickerwasservolumen von 1.000.000,00 bis zu 1.500.000,00 m³ sicher auszugehen.

4.2.3.8 *Deponieform (Kontur)*

Am Map 1 wurden im Dezember 2017 Profilierungsarbeiten an den Böschungen des Deponiekörpers ausgeführt. Die Böschungen des nördlichen Bereiches wurden in einer Neigung von 1:4 hergestellt und mit Boden abgedeckt. Der Deponiebetreiber erhofft sich von dieser Maßnahme eine Verringerung der Geruchsemissionen.

Der nördliche Teil des Map 1 könnte am ehesten so profiliert werden, dass dort eine Oberflächenabdeckung aufgebracht werden kann. Im südlichen Teil muss vor einer weiteren Formgebung zunächst der dort vorhandene Sickerwassersee beseitigt werden.

Insbesondere Map 2 kann in der bestehenden Form jedoch derzeit nicht gesichert und gedichtet werden. Mit den vorhandenen Senken ist das Aufbringen eines funktionierenden Abdichtungssystems nicht möglich. Um mit den vorhandenen Abfallmengen eine an der Oberfläche zu entwässernde Form herstellen zu können wären erhebliche Umlagerungsarbeiten erforderlich, die die Menge von 500.000,00 m³ sicher überschreiten werden. Unabhängig davon müssen in jedem Fall die vorhandenen Sickerwasserseen vor derartigen Arbeiten beseitigt werden (vgl. Abschnitt 4.3.1).

4.2.4 **Abfallmengen**

Auf Basis der zuvor beschriebenen Rekonstruktion der Deponiebasis vor Beschickungsbeginn und der Bestandsvermessung aus dem Jahr 2017 wurde eine Abschätzung der insgesamt eingelagerten Abfallmengen vorgenommen. Hierzu wurden die digitalen Geländemodelle der beiden Geländezustände (rekonstruierte Deponiebasis und Bestand 2017) einer Differenzvolumenermittlung unterzogen. Daraus ergibt sich, dass die in der folgenden Tabelle 11 zusammengestellten Mengen abgelagert worden sein können.

Tabelle 11: Ergebnisse der Abschätzung der eingelagerten Abfallmengen

| Ablagerungsbereich | Volumen [m³] |
|---------------------------|--------------------------------|
| Map 1 | 6.021.000 |
| Map 2 | 1.825.000 |
| Summe | 7.846.000 |

Basis: rekonstruierte Deponiebasis und Bestand 2017

Die in der o.g. Tabelle abgebildeten Zahlen basieren auf der nachträglich konstruierten Deponiebasis von MAP 1 und MAP 2.

Aus verschiedenen anderen Quellen sind auch sehr unterschiedliche und teilweise nicht nachvollziehbare Angaben zu der eingelagerten Abfallmenge und den eingelagerten Abfalltonnagen zu entnehmen.

Nachvollziehbare und belastbare Zahlen sind wahrscheinlich nicht mehr herzuleiten.

Nach Angaben des Deponiebetreibers wurden im Map 1 im Jahr 2017 rd. 400.000 m³ Abfall eingelagert.

4.2.5 **Abfallarten/Deponieklasse**

Auf der Deponie Nr. 5 dürfen nach Angaben des Deponiebetreibers ausschließlich nicht gefährliche Abfälle angenommen und eingelagert werden. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass in der Vergangenheit gefährliche Abfälle angenommen und eingelagert worden sind und auch noch heute werden.

4.2.6 **Deponiesickerwasseranalytik**

Vom Deponiebetreiber wurde ein Bericht aus 2014 vorgelegt, in dem Analyseergebnisse aus Grundwassermessstelle und einer Messstelle auf der Deponie enthalten sind (vgl. [4]). Für die Messstelle auf der Deponie (фильтра́та) ist in dem Bericht eine quartalsweise Messreihe von 2010 bis 2014 enthalten. Für die Messungen 08/2011 und 12/2011 sind jedoch identische Werte angegeben. Weiterhin sind die in der Reihe angegebenen Werte für Nitrit, Chlorid, Sulfat, Hydrogencarbonat und Phosphat teilweise nicht plausibel, sodass eine zeitliche Betrachtung über den Zeitraum nicht möglich ist.

Aus der Untersuchung von 03/2014 liegen Ergebnisse für folgende Parameter vor:

Tabelle 12: Untersuchte Parameter Sickerwasser mit Grenzwerten

| Parameter | | | EU-TrWVO | Anhang 2 | AbwV-Anh.51 |
|---------------|------------------|-------------------------------|----------|----------|-------------|
| ukrainisch | englisch | Zeichen | mg/l | mg/l | mg/l |
| Сухий залишок | Dry residue | | | | |
| | calcium | Ca ⁺⁺ | - | - | |
| | magnesium | Mg ⁺⁺ | - | - | |
| | sodium | Na ⁺ | 200,0 | 200,0 | |
| | potassium | K ⁺ | - | 100,0 | |
| | ammonium | NH ₄ ⁺ | 0,5 | 0,5 | |
| | nitrate | NO ₃ ⁻ | 50,0 | 50,0 | |
| | nitrite | NO ₂ ⁻ | 0,5 | 0,5 | |
| | nitrite-N | NO ₂ -N | - | - | 2,0 |
| | nitrogen | N _{ges} | - | - | 70,0 |
| | chloride | Cl ⁻ | 250,0 | 250,0 | |
| | sulphate | SO ₄ ⁻ | 250,0 | 250,0 | |
| | hydrocarbonate | HCO ₃ ⁻ | - | | |
| | silicon dioxide | SiO ₂ | - | | |
| | phosphate | PO ₄ ⁻ | 6,7 | | |
| | phosphorus | P _{ges} | - | | 3,0 |
| окис-нювашть | Oxydizing agents | | | | |
| Жорсткість | | | | | |
| | pH | | 6,5-9,5 | 6,5-8,5 | |

4.2.7 **Grundwasseranalytik**

Hinsichtlich der Grundwasseruntersuchungen wurde vom Betreiber der Deponie ein Untersuchungsbericht von 2014 vorgelegt (vgl. [4]). Danach sind im Umfeld der Deponie diverse Grundwasserbeobachtungsstellen vorhanden. In dem Bericht sind insgesamt 32 Messstellen aufgeführt (Tabelle 1 in [4]), von denen 22 in der folgenden

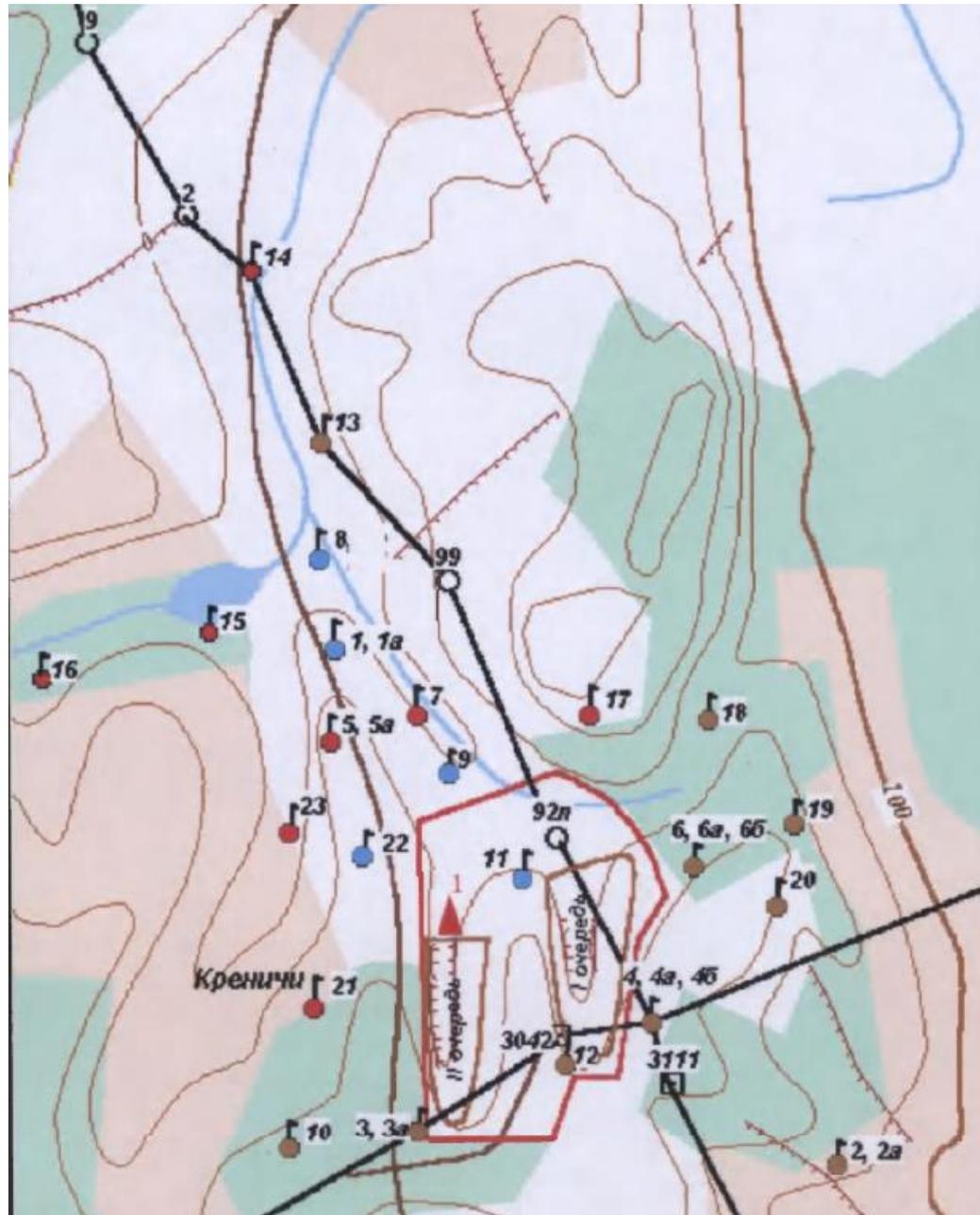
Abbildung dargestellt sind. Diverse Messstellen sind gemäß Darstellung in dem Bericht nicht mehr nutzbar.

Für die Untersuchung im März 2014 konnten noch:

- Brunnen 11 (liegt auf dem Deponiegelände),
- Brunnen 9, 1 und 8 (liegen im Grundwasserabstrom unterhalb der Deponie
- Brunnen 22, liegt nordwestlich der Deponie außerhalb des eigentlichen Grundwasserabstroms

genutzt werden (vgl. Abbildung 32).

Abbildung 32: Übersicht Grundwassermessstellen



Die Wasserproben wurden auf die in Tabelle 12 aufgeführten Parameter untersucht. Gemessen an dem jeweils niedrigsten Grenzwert (Trinkwasserverordnung, Anhang 51 der Abwasserverordnung, bzw. Anhang 2 im Bericht [4]) wurden, soweit Grenzwerte vorhanden, Überschreitungen in folgenden Parametern ermittelt:

- Ammonium (Brunnen 1, 9 und 11)
- Chloride (Brunnen 11)

- ОКИС-НЮВАШТТЬ (Brunnen 11)
Oxidationsmittel

Abbildung 33: Verlauf der Ammonium-Konzentrationen im Grundwasser

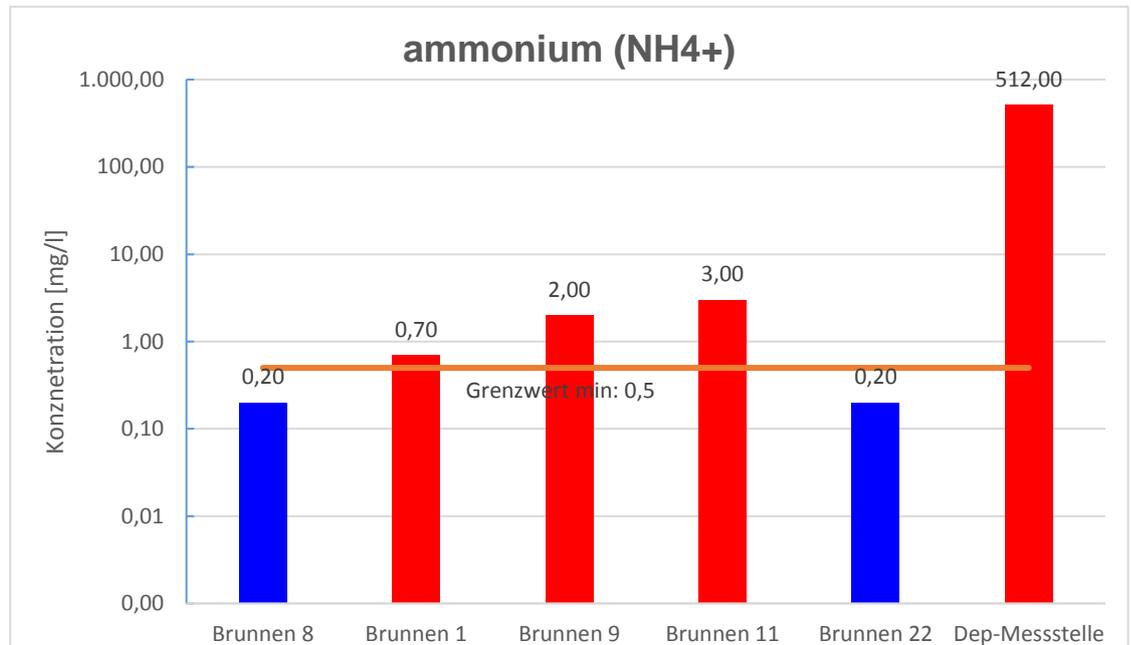
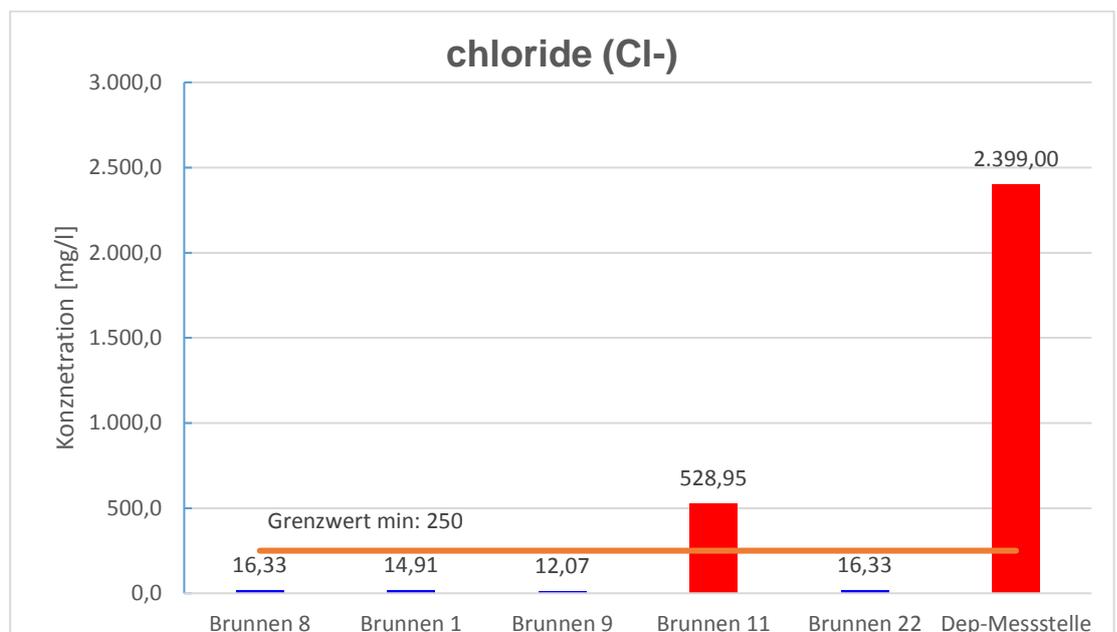


Abbildung 34: Verlauf der Chlorid-Konzentrationen im Grundwasser



4.2.8 Dimensionierung eines Entgasungssystem (Theoretische Abschätzung)

4.2.8.1 Deponietechnische Grundlagen

Bekannte Deponie-Betriebsdaten:

Die gesamte Deponie besteht aus 2 Deponiekörpern.

MAP 1

- Industrie und Hausmüll
- Verfüllter Altbereich
- Befüllung 1986 bis 1997
- Abmessungen ca. 18,00 ha
- eingelagertes Müllvolumen von ca. 4.000.000,00 bis 6.000.000,00 m³
- Deponiekörper ist mit Bauschutt und Lehmboden in einer Höhe von ca. 2,00 m abgedeckt.

MAP 2

- Hausmüll
- aktueller Schüttbereich
- Beginn der Einlagerung 1998 bis heute
- Abmessungen ca. 17,00 ha
- eingelagertes Müllvolumen von ca. 2.000.000,00 bis 4.000.000 m³
- jährlich eingelagertes Müllvolumen 400.000 m³

Abfall

- unkompaktiert (nur mit Raupe), d.h. Verdichtung liegt bei ca. 0,7 – 0,8 t/m³.
(kompaktierter Mülleinbau führt zu Verdichtungen von 0,9 t/m³ bis 1,1 t/m³)

gewählt: 0,7 t/m³

4.2.8.2 MAP 1

Ermittlung eingebauter Abfallmengen:

4.000.000,00 m³ Abfall entsprechen aktuell **2.800.000 t Müll** eingebaut

4.2.8.2.1 Ermittlung Deponiegasproduktion

Theoretischer Ansatz zur überschlägigen Ermittlung der Gasproduktion

Grundlagen:

Literaturwerte für feuchten Hausmüll: 150 – 250 m³ Gas/ t Hausmüll
(Quelle: TA Siedlungsabfall)

Annahme:

Industrie- und Hausmüll: max. **200 m³ Gas/ t Müll**

Ermittlung:

| | |
|--|--|
| 2.800.000 t Müll „x“ 200 m ³ Gas/t Müll → | 560.000.000 m ³ Gas |
| „/“ 35 Jahre Zersetzungsperiode von Abfällen | 16.000.000 m ³ /Jahr |
| „/“ 365 Tage | 43.800 m ³ /Tag |
| „/“ 24 Stunden | <u>1.826 m³/Stunde</u> |

d.h., pro Stunde werden, vereinfacht angenommen, über den gesamten Ablagerungszeitraum bei 2.800.000 t Müllablagerung ca.1.826 m³/ h Deponiegas gebildet (→ Gasbildungsrate).

4.2.8.2.2 Erfassungsgrad und fassbare Gasmenge

Erfassungsgrad bezeichnet die Menge an Deponiegas, die mithilfe der technischen Installation (Entgasungssystem für aktive Deponieentgasung) aus dem Deponiekörper abgesaugt und der thermischen Verwertung zugeführt werden kann.

Grundlagen:

Literaturwerte für gedichtete Deponien: 0,80 – 1,00

Erfahrungswerte für ungedichtete Deponien: 0,30 – 0,60

Annahme:

Deponie wird mit einer bündigen Lehmschicht abgedeckt. max. **0,80**

Ermittlung fassbarer Gasmenge:

Deponiegasmenge: 1.826 m³/Stunde x 0,60 → **1.100 m³/h**

d.h., pro Stunde können, vereinfacht angenommen, über den gesamten Ablagerungszeitraum **max. ca. 1.100 m³/h** Deponiegas von der gesamten Menge des im Deponiekörper entstehenden Deponiegases erfasst und einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

4.2.8.2.3 Ermittlung Anzahl erforderlicher Gaskollektoren

Grundlagen:

fassbare Gasmenge: 1.100 m³/h

durchschnittliche Ablagerungshöhe Müll: ca. 26,00 m

davon:

→ verfügbare max. Gasfilterlänge / Gaskollektor: ca. 20 lfdm

Literatur- und Erfahrungswerte:

absaugbare Gasmenge pro lfdm Gasfilterrohrleitung: 1 – 2 m³/h / lfdm

Annahme:

2 m³/h Deponiegas / lfdm Gasfilterrohrleitung

Ermittlung Anzahl Gaskollektoren:

1.100 m³/h „/“ 2 m³/h /lfdm

→550 lfdm Gasfilterrohrleitung

550 lfdm „/“ 20 lfdm/ Gaskollektor

→ **max. 27 Stück**

d.h., es werden zur Absaugung der 1.100 m³/h Deponiegas/ Stunde max. 27 Gaskollektoren mit einer verfügbaren Gasfilterrohlänge von ca. 20 lfdm / Gaskollektor, notwendig.

Die Standorte für die 27 Gaskollektoren werden vor Ort, anhand der örtlichen Gegebenheiten, individuell festgelegt

Pro Gaskollektor strömen im Idealfall ca. 40 m³/h.

4.2.8.3 MAP 2

Unter der Annahme, im Deponieabschnitt MAP 2 sind ebenfalls 4.000.000,00 m³ ± 2.800.000 t Abfall eingelagert, ergeben sich theoretisch die gleichen Gasmengen, wie im MAP 1.

4.2.8.4 *Gasertragsmenge*

Nach dieser überschlagenden Ermittlung können in den bestehenden Deponieteilkörper MAP 1 und MAP 2 rd. 88.000,00 m³/d Gas entnommen und über Blockheizkraftwerke verstromt werden.

4.3 **Maßnahmen vor der Abdichtung**

4.3.1 ***Leerung der Sickerwasserseen***

Im Abschnitt 4.2.3.7 wurde dargelegt, dass in den vorhandenen Ablagerungsbereichen Sickerwasserseen vorhanden sind. Dort wurden auch die möglicherweise zu erwartenden Sickerwassermengen abgeschätzt. Eine Profilierung der Ablagerungsbereiche entsprechend den Anforderungen einer funktionierenden Oberflächenabdeckung (mit Entwässerung) ist bei Vorhandensein dieser Sickerwasserteiche nicht möglich. Ihre Verfüllung würde zu einer Verdrängung des Wassers und zu unkontrolliertem Abfluss führen. Vor der Profilierung der Deponiekörper, zumindest in den Bereichen der Sickerwasserseen, ist deren Leerung zwingende Voraussetzung. Ohne die weitgehende Entwässerung der Deponiekörper wird eine Sicherung der Deponie nicht möglich sein. Dafür sind in jedem Fall zusätzliche Kapazitäten für die Sickerwasserbehandlung vor Ort erforderlich.

Die Leerung der Sickerwasserseen wird einige Zeit in Anspruch nehmen. Sie ist abhängig von der dafür bereitgestellten zusätzlichen Behandlungskapazität und der möglichen Erfassung des Wassers im Deponiekörper (Durchlässigkeit, Erfassungsanlagen).

Das im Deponiekörper enthaltene Sickerwasser wird üblicherweise in den Entwässerungsleitungen an der Basis erfasst. Die vor Ort vorhandenen Anlagen sind noch in Funktion, da derzeit Wasser aus dem Deponiekörper der Behandlung zugeführt wird. Da die von Sickerwasserseen existieren, muss derzeit jedoch davon ausgegangen werden, dass die vorhandenen Entwässerungsanlagen an der Deponiebasis allein nicht ausreichen, um den Deponiekörper schnellstmöglich zu entwässern.

Eine Möglichkeit der zusätzlichen Erfassung von Sickerwasser aus dem Deponiekörper ist die Installation von Vertikalbrunnen, die nach der Entwässerung des Deponiekörpers als Gasfassungsbrunnen genutzt werden können. Diese Brunnen kön-

nen für die Entwässerung mit Tauchpumpen oder Druckluftpumpen ausgerüstet werden. Die mögliche Erfassungsmenge in vertikalen Brunnen ist abhängig von der Durchlässigkeit des abgelagerten Abfalls.

Unter der Annahme, dass die vorhandene Sickerwasserreinigungsanlage die Menge an Sickerwasser reinigen kann, die durch die aktuelle Neubildung entsteht, muss für die Reinigung des im Körper stehenden Wassers eine zusätzliche Reinigungskapazität installiert werden.

In der folgenden Tabelle 13 sind für verschiedene Sickerwassermengen bei unterschiedlichen Kapazitäten einer zusätzlichen Reinigungsanlage die erforderlichen Zeiten für die Entsorgung der Sickerwassermengen zusammengestellt. Die dort genannten Zeiträume setzen jedoch voraus, dass:

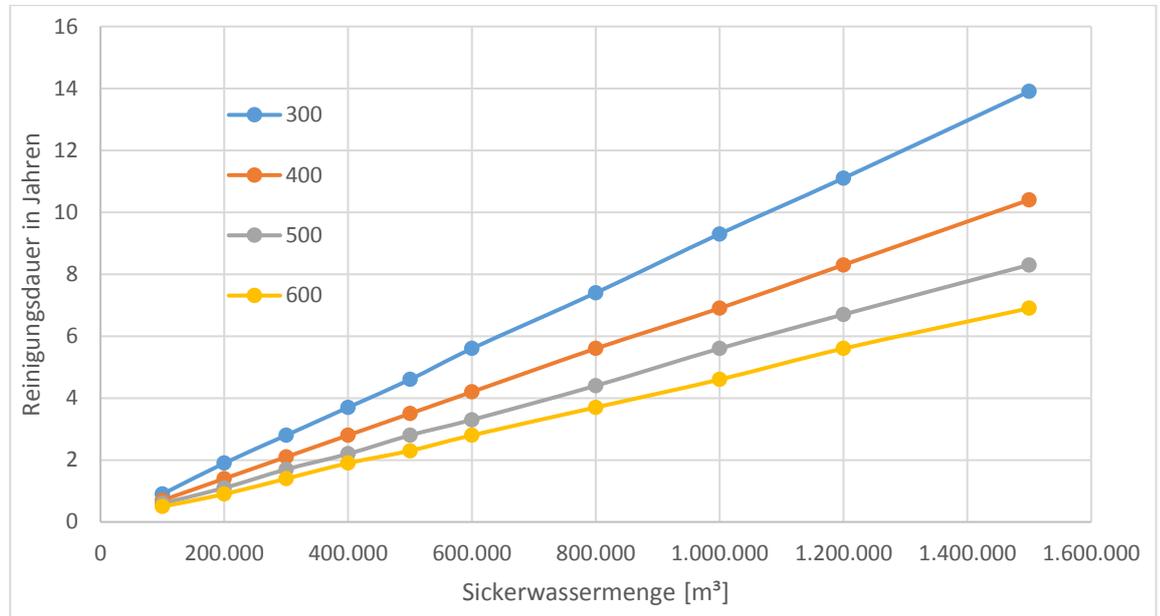
- die Reinigungskapazität tatsächlich zu 100 % zur Verfügung steht; eine Rückführung eines Teils des erfassten Wassers (z. B. als Konzentrat) auf den Deponiekörper würde die Zeiträume verlängern,
- die genannte Reinigungsmenge auch tatsächlich erfasst werden kann; dies ist u. a. abhängig von der Durchlässigkeit des Abfalls und der Art und Menge der Erfassungsanlagen,
- die Neubildung von Sickerwasser durch die vorhandene Anlage verhindert werden kann.

Tabelle 13: Mindestdauer der Entleerung der Sickerwasserseen bei unterschiedlichen Reinigungskapazitäten unter idealen Bedingungen

| Sickerwassermenge [m ³] | Behandlungsdauer in Jahren bei Reinigungskapazität [m ³ /d] | | | |
|--|---|------|-----|-----|
| | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 100.000 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 500.000 | 4,6 | 3,5 | 2,8 | 2,3 |
| 1.500.000 | 13,9 | 10,4 | 8,3 | 6,9 |

Die in der Tabelle 13 enthaltenen Daten sind in der folgenden Abbildung nochmals grafisch dargestellt:

Abbildung 35: Mindestdauer der Entleerung der Sickerwasserseen bei unterschiedlichen Reinigungskapazitäten unter ideellen Bedingungen



Anmerkung: Reinigungsdauer in Abhängigkeit von der Reinigungsleistung von 300 bis 600 m³/d

Tatsächlich wird es mit vertikalen Entwässerungsbrunnen nicht möglich sein, dauerhaft die Wassermengen zu erfassen, die die Kapazität der Reinigungsanlage voll ausfüllen. So wird mit fallendem Wasserspiegel im Deponiekörper die Erfassung in einem Brunnen sinken. Damit ist es auch nicht möglich, die Dauer der Entleerung des Deponiekörpers durch eine Verdoppelung der Reinigungskapazität zu halbieren. Die Entleerung des Deponiekörpers wird somit tatsächlich länger dauern als in der Tabelle 13 angegeben.

Die Kapazität einer Reinigungsanlage für das Sickerwasser im Körper kann nicht beliebig erhöht werden. Neben den mit fallendem Wasserspiegel sinkenden Erfassungsmengen sind weiterhin die möglichen Einleitungsmengen in einen Vorfluter zu berücksichtigen.

Es ist davon auszugehen, dass bis zur weitgehenden Entwässerung der Deponiekörper einige Jahre vergehen werden. Inwieweit mit der Profilierung der Deponiekörper bereits vorher, d. h. bei bestimmten Wasserspiegeln im Körper, begonnen werden kann, ist im Rahmen von weiteren Untersuchungen und von den sich im Körper einstellenden Bedingungen abhängig. Dabei spielen unter Anderem Standsicherheitsbetrachtungen des Deponiekörpers eine wichtige Rolle. Zudem ist

zu erwarten, dass bei einer Belastung des Körpers durch Profilierungsarbeiten (Aufbringung von zusätzlichen Lasten) nach einer ersten Entwässerung wieder Sickerwasser zu den Entwässerungsanlagen gepresst wird.

4.3.2 Deponiekontur/Restvolumen

Das Schließen einer Deponie bedarf zur Aufbringung und ordentlichen Funktionsweise einer Oberflächenabdichtung der Konturgebung für den Deponiekörper. So ist für die Entwässerung der Oberfläche und Ableitung des überschüssigen, d.h. in der Abdeckungsschicht (Rekultivierungsschicht) versickernden Anteils des Niederschlagswassers, ein Mindestgefälle des Plateaus der Deponie von 1:20 (entspricht 5 %) zu empfehlen. Dieses Gefälle soll nach dem Abklingen der Setzungen im Deponiekörper (die bis zu 20 % der Abfallmächtigkeit betragen können) mindestens noch vorhanden sein. Aus diesem Grunde wird für die Profilierung der Oberfläche üblicherweise ein Mindestgefälle von 1:15 (entspricht 6,7 %) gewählt. Weiterhin muss die Standsicherheit der Böschungen und der aufzubringenden Abdichtung gewährleistet sein. In Abhängigkeit von Dichtungssystem sollten Maximalneigungen von 1:3 (entspricht 33,3 %) bis 1:4 (entspricht 25 %) nicht überschritten werden. Für die Bemessung der im Abdichtungssystem vorzusehenden Entwässerungsschicht sind die zu entwässernden Böschungslängen, die Niederschlagsmengen und die Durchlässigkeit des Materials der Rekultivierungsschicht zu berücksichtigen.

Grundsätzlich kann fast jeder Deponiekörper, ohne die Annahme und Einlagerung von zusätzlichen Abfällen, jederzeit geschlossen werden. Die erforderlichen Randbedingungen zur Profilierung müssen dann jedoch durch Verkleinerung der Grundflächen und Umlagerung bereits abgelagerter Abfallmengen oder mit erheblichen Bodenmengen umgesetzt werden. Bei der letztendlichen Konturgebung sind jedoch folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Gefährdungspotential der Deponie: Erfordert die Lage eine sofortige Schließung um eine akute Gefährdungslage zu entschärfen?
- Wirtschaftliche Gesichtspunkte: Sind ausreichende Mittel für die Schließungsmaßnahmen (Abdichtung und ggf. erhebliche Umlagerung) vorhanden oder ist durch zusätzlich Abfallannahme die Erwirtschaftung der Mittel erst erforderlich?
- Entsorgungssituation: Ist die Entsorgungssicherheit nach dem Schließen des Deponiekörpers gegeben?
- Landschaftsbildliche Betrachtungen und

- technische Gesichtspunkte (Standssicherheit der maximal geneigten Böschung und der Deponiehöhe (Untergrund), Entwässerung der Oberfläche (dadurch ggf. eingeschränkte Böschungslängen)).

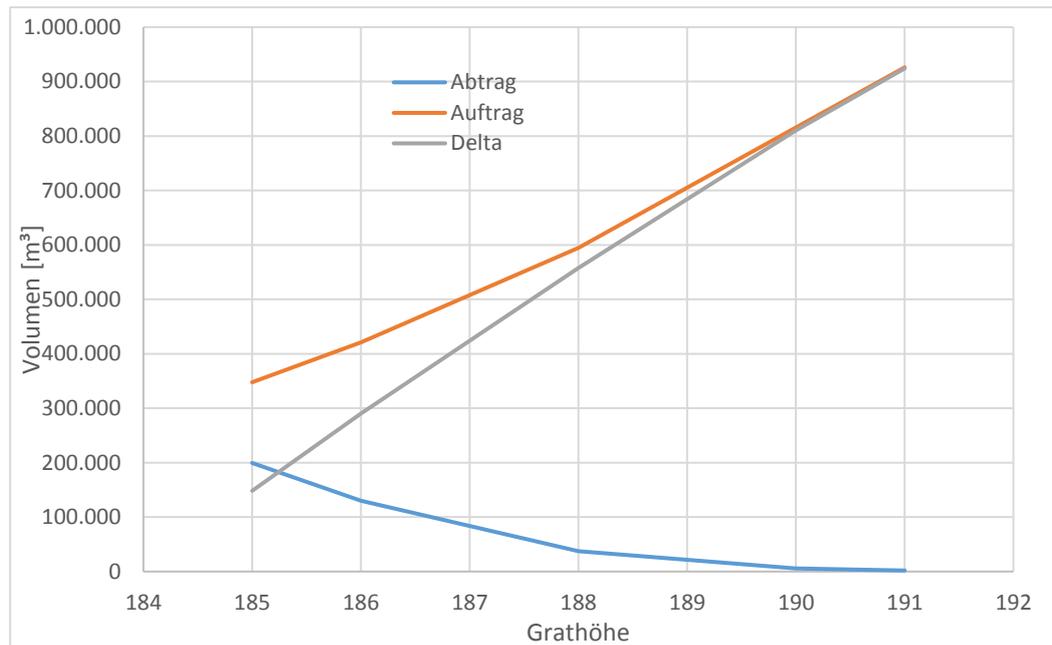
Insbesondere im Fall der Deponie Nr. 5 ist die Situation des Deponiekörpers mit dem darin enthaltenen Sickerwasserstand ein wichtiger Gesichtspunkt. Eine sofortige Schließung mit Umlagerung ist, wie bereits dargelegt, nicht möglich, da die Gefahr des unkontrollierten Abflusses von verdrängtem Sickerwasser besteht. Vor einer endgültigen Profilgebung in großen Teilen des Deponiekörpers ist zumindest eine erhebliche Verringerung des Sickerwasserstandes erforderlich. Eine partielle Profilierung mit Abdichtung hinterließe in den Bereichen mit den Sickerwasserseen größere Fehlstellen. Deren Schließung nach einer Entwässerung der Körper erforderte dann zusätzlich Umlagerungsarbeiten (auch von bereits abgedeckten Bereichen) oder die Anlieferung erheblicher Profilierungsmaterialien. Unter diesen Randbedingungen erscheint ein Weiterbetrieb der Deponie bis zur Entwässerung der Sickerwasserseen sinnvoll.

Für die beiden Deponieteile wurden Betrachtungen hinsichtlich möglicher Profilierungen angestellt, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Es handelt sich dabei um eine Einschätzung auf Grundlage der vorliegenden Daten mit einer entsprechenden Unsicherheit (so kann z. B. das Volumen der Sickerwasserseen nicht eingeschätzt werden), die in den weiteren Planungsmaßnahmen eingegrenzt werden muss. Zu Beginn der weiteren Konturplanung muss zunächst die Lage des Deponieumrings möglichst genau ermittelt werden. Die für die folgenden Konturvarianten zu Grunde liegenden Umringe beruhen auf Annahmen basierend auf dem Bestandsplan von 2017.

4.3.2.1 *Map 1*

Für das Map 1 wurde ausgehend von einem etwa in der Mitte liegenden, in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Grat mit unterschiedlichen Höhen nach Osten und Westen eine Plateauneigung von 1:15 angelegt. Dieses Plateau wurde mit Böschungen (Neigungen von 1:4), ausgehend von der Umgrenzung des Ablagerungsbereiches, verschnitten. Für unterschiedliche Grathöhen wurden jeweils aus einer Differenzvolumenermittlung mit den Deponiebestand von 2017 die Auf- und Abtragsmengen zur Herstellung der Kontur ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 36 grafisch dargestellt.

Abbildung 36: Ab- und Auftragsmengen für Map 1 bei unterschiedlichen Grat-Höhen



Der Abbildung 36 ist zu entnehmen, dass bei einer maximalen Deponiehöhe am Grat von 191,00 m noch ein Einlagerungsvolumen von rd. 900.000,00 m³ zur Verfügung steht, Umlagerungen sind in diesem Fall kaum erforderlich. Sollte der Grat auf einer Höhe von etwa 186,00 m angeordnet werden, müssen etwa 130.000,00 m³ abgelagerter Abfall umprofiliert werden. Für diese Höhe ist dann noch ein Netto-Volumen von rd. 300.000,00 m³ vorhanden.

Eine Extrapolation der Ergebnisse zu einer geringeren Höhe führt dazu, dass bei einer Grat-Höhe im Map 1 von etwa 184,00 m die umzulagernden Mengen von rd. 280.000,00 m³ das Restvolumen ausgleichen und somit kein Netto-Volumen mehr zur Verfügung stünde. Eine Extrapolation anhand der Plateaufläche nach oben ergibt, dass auf dem Map 1 bis zu einer Grat-Höhe von rd. 200,00 m noch rd. 1,5 Mio. m³ abgelagert werden könnten.

4.3.2.2 Map 2

Im Abschnitt 4.2.3.8 wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Ablagerungsbereich Map2 keine Deponiekontur hat, die mit einer Oberflächenabdeckung versehen werden kann. Es sind Senken vorhanden, die zunächst verfüllt werden müssen. Auf die mögliche Variante der Umlagerung vorhandener abgelagerter Abfallmengen wurde an dieser Stelle verzichtet. Wegen der bisherigen Zersplitterung der Ablagerung in einen südlichen, recht kompakten Teil, in dem ein Sickerwassersee vorhan-

den ist, und einen nördlichen Teil, der zum südlichen Bereich ein größeres Tal einschließt, müssten zur Herstellung eines abzudeckenden Körpers erhebliche Mengen aufgenommen und neu eingebaut werden müssten, die wahrscheinlich ein Drittel der Gesamtmenge des Map 2 ausmachen würden. Es wurden innerhalb des Umringes des Ablagerungsbereiches (vgl. Plan 2) verschiedenen Konturen entwickelt und die dafür möglichen Verfüllvolumen ermittelt und in Tabelle 14 zusammengestellt.

– Variante 1 (vgl. Plan 7):

Herstellung von einer maximalen Böschungsneigung von 1:3 beginnend auf der Höhe des vorhandenen Deponieumrings. Der Plateaubereich ist in einer gestuften Form vorgesehen. Der südliche Teil hat eine maximale Höhe von 193,00 m, der nördliche von 181,00 m. das Plateau ist mit 1:15 nach Osten und Westen geneigt.

– Variante 2 (vgl. Plan 8) :

Die Böschung ist hier mit einer maximalen Neigung von 1 : 4 vorgesehen. Das Plateau, ebenfalls mit einer nach Osten und Westen unter 1 : 15 geneigten Fläche, ist wieder mit einer gestuften Ausführung gezeigt. Der südliche Teil erhält eine Höhe von 195,00 m, der nördliche von 181,00 m.

– Variante 3 (vergl. Plan 9):

Diese Variante ist eine Variation zur Variante 3. Der nördliche Plateauteil erhält hier eine nach Norden geneigte Fläche, die von der Höhe des südlichen Plateaus (195,00 m) auf 165,00 m am nördlichen Ende fällt.

– Variante 4 (vergl. Plan 10):

In der Variante 4 ist der untere Böschungsteil mit 1 : 8 sehr flach geneigt. Das verbleibende Plateau (Neigung 1 : 15) hat Höhen zwischen 186,00 m (im Süden) und 176,00 m (im Norden).

In der folgenden Tabelle 14 sind für die dargestellten Varianten die noch zur Verfügung stehenden Restvolumen zusammengestellt.

Tabelle 14: *Mögliche Restvolumen Map 2*

| Vari- ante | Kurzbeschreibung | Restvolu- men [m³] |
|-----------------------|--|--|
| 1 | Höhe des Grates Süd 193, Nord 181 m, Böschung 1:3 | 2,30 Mio. |
| 2 | Höhe des Grates Süd 195, Nord 181 m, Böschung 1:4 | 2,28 Mio. |
| 3 | Höhe des Grates Süd 195, Nord geneigt 165 m, Bö- schung 1:4 | 2,30 Mio. |
| 4 | Böschung 1:8 | 1,44 Mio. |

Die dargestellten Varianten zeigen, dass im Besonderen im Map 2 noch erhebliche Reserven an Abfallvolumen vorhanden sind. Es ist insbesondere für diesen Bereich, unter Berücksichtigung der genannten Rahmenbedingungen (Gefährdungspotential, Entsorgungssicherheit, technische Machbarkeit), eine Planung zur Deponiekon-
tur und Deponieabdeckung erforderlich.

4.4 Bewertung der Oberflächenabdichtungssysteme

4.4.1 Definition der Bewertungskriterien

Um eine möglichst dicht an die Objektivität heranreichende Beurteilung der Varianten durchzuführen, wurde eine Bewertungsmatrix erstellt. In ihr werden funktionale, technische und wirtschaftliche Kriterien anhand ihrer Priorität gewichtet. Die daraus abgeleitete Bewertungszahl soll als Entscheidungshilfe bei der Auswahl des anzuwendenden Oberflächenabdichtungssystems dienen.

Die Wertungsmatrix basiert auf den Gegebenheiten Mitteleuropas / Deutschlands, sind aber in der grundsätzlichen Aussage auf die Anforderungen der ukrainischen Deponien anwendbar.

Die Kriterien für eine Bewertung sind:

- Herstellungskosten,
- systembedingte Folgekosten,
- Funktionssicherheit / Genehmigungsfähigkeit,
- Bauzeit und
- technische Umsetzbarkeit.

Herstellungskosten

Die Herstellungskosten beinhalten die Bauhauptkosten sowie die Baunebenkosten für den einzusetzenden Fremdprüfer für die mineralischen und polymeren Baustoffe und Objekt- (Ingenieurbauwerke) und Fachplanungskosten (Vermessung und Landschaftsplanung). Die Herstellungskosten erhalten mit dem Faktor 4 den zweithöchsten Wichtungsfaktor.

Grundsätzlich sind alle vorgestellten Oberflächenabdichtungssysteme gemäß der geltenden Gesetze und Vorschriften umsetzbar.

Systembedingte Folgekosten

Als „systembedingte Folgekosten“ werden zusätzliche technische Einrichtungen definiert, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen. Der Wichtungsfaktor für die systembedingten Folgekosten wird mit dem Faktor 3 definiert.

Funktionssicherheit

Unter dem Kriterium „Funktionssicherheit“ ist in diesem Kontext zu verstehen, in wie weit ein System im technischen Sinne nach der Fertigstellung ohne Nachbesserungen, Reparaturen und Sanierungen funktionssicher ist. Es handelt sich hierbei um eine Risikoabwägung. (Grundsätzlich sind alle vorgestellten Oberflächenabdichtungssysteme gemäß der geltenden Gesetze und Vorschriften umsetzbar). Die Funktionssicherheit erhält mit dem Faktor 5 den höchsten Wichtungsfaktor.

Bauzeit

Das Kriterium „Bauzeit“ beinhaltet die Zeitspanne zwischen Baubeginn und Fertigstellung des Bauwerkes. Die einzelnen Oberflächenabdichtungsvarianten unterliegen unterschiedlichen verfahrensbedingten und bautechnologischen Abläufen. Hinsichtlich der Bautechnologie wird hier die reine Zeitkomponente bewertet. Eine Berücksichtigung der Technikkomponenten erfolgt im nachfolgenden Kriterium. Der Wichtungsfaktor für die Bauzeit wird mit dem Faktor 2 gewertet.

Technische Umsetzbarkeit

Unter dem Wertungskriterium „technische Umsetzbarkeit“ sind hier beispielsweise folgende Einzelkriterien wie: Witterungsempfindlichkeit der Baustoffe, Untersuchungsaufwand der Baustoffe im Vorwege und beim Bau, einzuhaltende Einbaugenaugigkeit, Materialtoleranzbereiche, Komplexität bei der Herstellung, technisches Restrisiko etc. zusammengefasst. Der Wichtungsfaktor für die technische Umsetzbarkeit wird mit dem Faktor 3 gewertet.

4.4.2 Gegenüberstellung und Wertung der Oberflächenabdichtungssysteme

Die nachfolgenden Übersichten (Abbildung 37 und Tabelle 15) zeigen eine Bewertungsmatrix für die vorgestellten Varianten und die ausgewählten Kriterien. Die Wichtung ist berücksichtigt, indem die einzelnen Prioritäten mit dem Wert multipliziert wurden.

Die Bewertung wurde nach dem inversen Schulnotensystem von 1 bis 5 vorgenommen. Die höchste Gesamtpunktzahl zeigt somit das beste Ergebnis, die niedrigste das schlechteste.

Tabelle 15: Wertungsmatrix Vergleich der Oberflächenabdichtungsvarianten

|  | Herstellungskosten | | | Systembedingte Folgekosten | | | Funktionssicherheit | | | Bauzeit | | | Technologische Umsetzbarkeit | | | Gesamtsumme |
|---|--------------------|----------|----|----------------------------|----------|----|---------------------|----------|----|---------|----------|----|------------------------------|----------|----|-------------|
| | Wertung | Wichtung | Σ1 | Wertung | Wichtung | Σ3 | Wertung | Wichtung | Σ4 | Wertung | Wichtung | Σ5 | Wertung | Wichtung | Σ6 | |
| OFD-System | | | | | | | | | | | | | | | | |
| "Ton-Dichtung" d = 1,0 m | 1 | 4 | 4 | 5 | 3 | 15 | 5 | 5 | 25 | 3 | 2 | 6 | 4 | 3 | 12 | 62 |
| TRISOPLAST, d ≥ 8 cm | 1 | 4 | 4 | 5 | 3 | 15 | 5 | 5 | 25 | 3 | 2 | 6 | 3 | 3 | 9 | 59 |
| GTD | 3 | 4 | 12 | 5 | 3 | 15 | 5 | 5 | 25 | 5 | 2 | 10 | 4 | 3 | 12 | 74 |
| Kapillarsperre (mineralischer Block) | 5 | 4 | 20 | 4 | 3 | 12 | 1 | 5 | 5 | 3 | 2 | 6 | 2 | 3 | 6 | 49 |
| Kapillarsperre (Blockbahn) | 4 | 4 | 16 | 4 | 3 | 12 | 2 | 5 | 10 | 4 | 2 | 8 | 2 | 3 | 6 | 52 |
| Wasserhaus- haltsschicht | 4 | 4 | 16 | 5 | 3 | 15 | 3 | 5 | 15 | 5 | 2 | 10 | 5 | 3 | 15 | 71 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

Wertung:

- 1 schlechte Lösung
- 2 ausreichende Lösung
- 3 befriedigende Lösung
- 4 gute Lösung
- 5 beste Lösung

Wichtung

- 1 geringer Einfluß
- 2 weniger bedeutend
- 3 bedeutend
- 4 wichtig
- 5 sehr groß

VARIANTENVERGLEICH

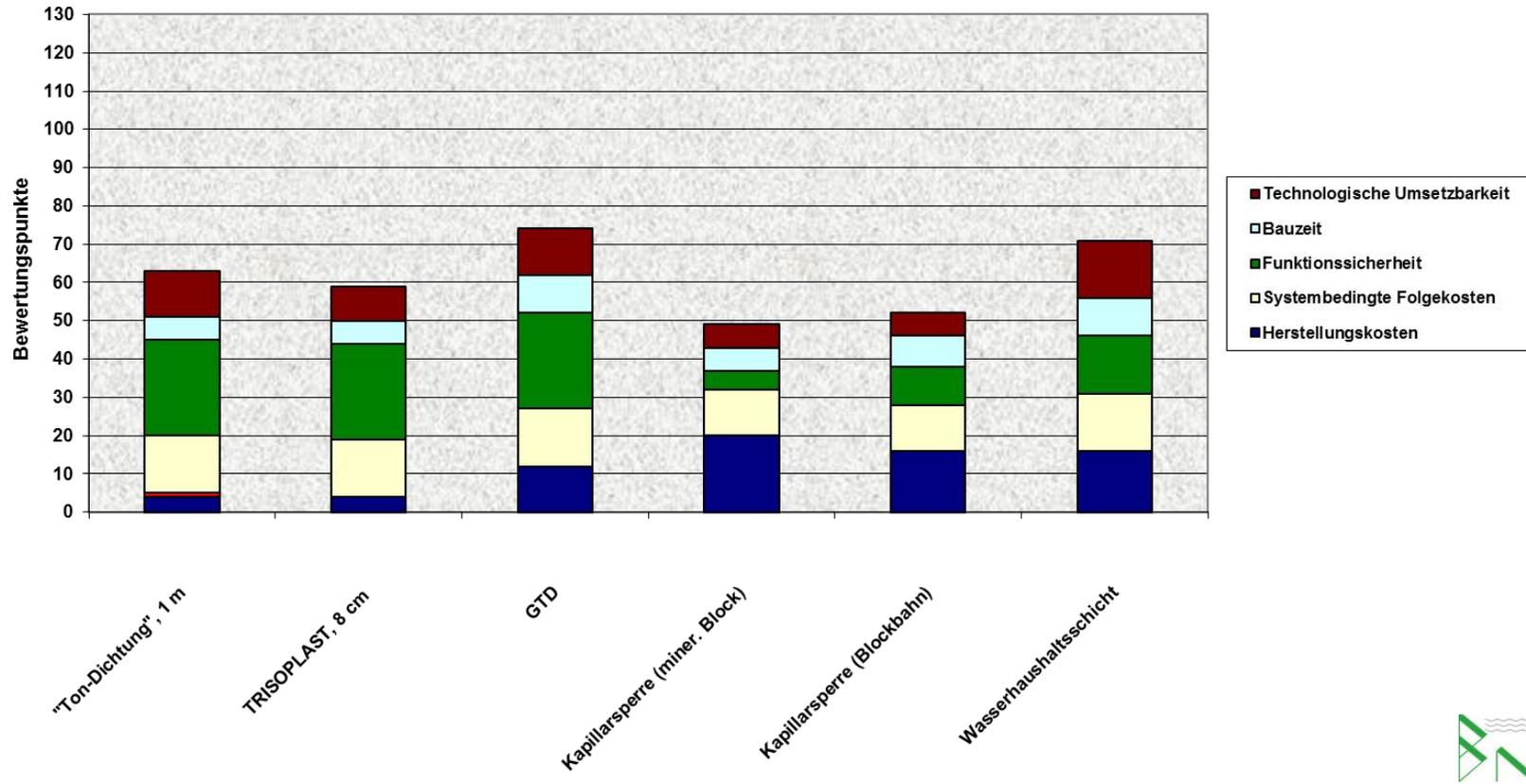


Abbildung 37: grafischer Vergleich der Oberflächenabdichtungsvarianten



4.4.3 Bewertung Variante 1 - „Ton“- Dichtung, $d = 1,0\text{ m}$

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 1 betragen ca. **63,00 €/m²**. Unter Berücksichtigung der weiteren Leistungen (Vorarbeiten, Wegebau, Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung) ergeben sich ca. 76,00 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 1 - „Ton“- Dichtung für den Standort Kyiv eine teure Lösung (Rang 6) im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Hinsichtlich des Kriteriums Funktionssicherheit kann die Variante 1 mit der möglichen Höchstpunktzahl bewertet werden. Es handelt sich um ein konservatives und bewehrtes Abdichtungssystem mit einer hinreichenden Dichtwirkung.

Systembedingte Folgekosten sind nicht zu erwarten, da keine zusätzlichen technischen Einrichtungen erforderlich sind, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen.

Die durch das Dichtungssystem bedingte erforderliche Bauzeit ist gegenüber den anderen Varianten als mittellang bis lang einzustufen. Die mögliche Tagesleistung beim Einbau der 100,00 cm dicken vierlagigen mineralischen Dichtungskomponente liegt unter 800,00 m²/Tag für eine Baukolonne.

Die Witterungsempfindlichkeit des Baustoffes, der Untersuchungsaufwand der Baustoffe im Vorwege und beim Bau, die einzuhaltende Einbaugenaugkeit, die Komplexiertheit bei der Herstellung und das technische Restrisiko sind als gering mit der Wertungsnote 4 zu bewerten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

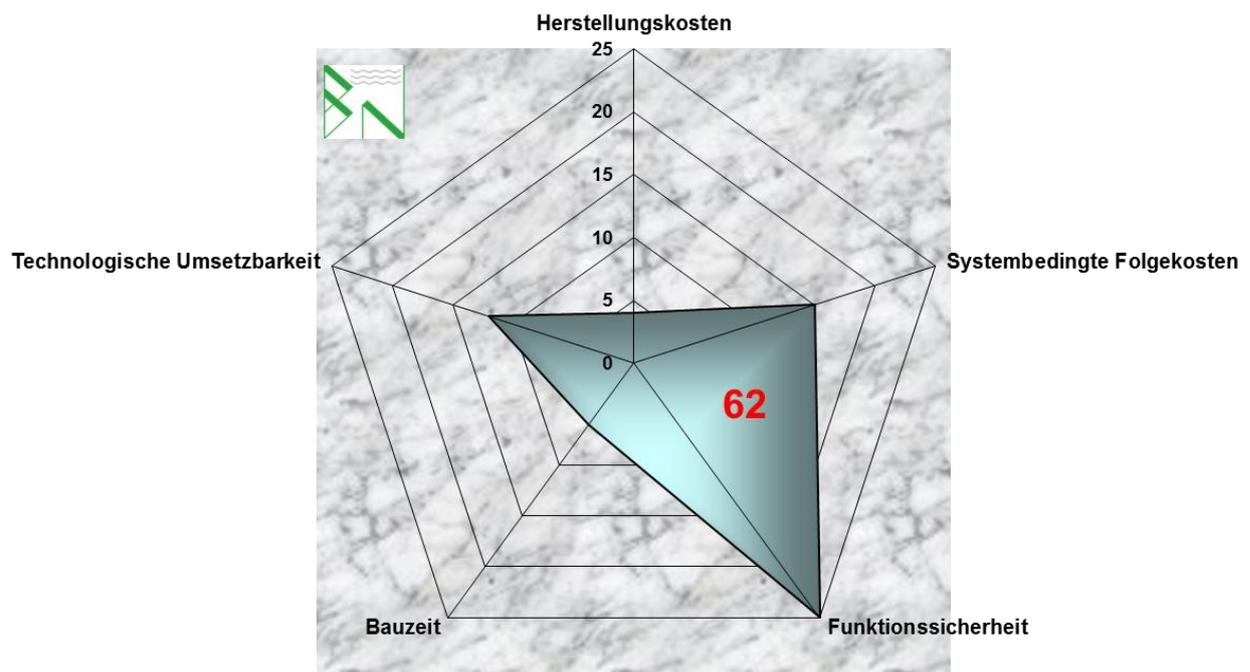


Abbildung 38: Wertungsdiagramm Variante 1

Die Variante 1 „Ton“- Dichtung erreicht eine Gesamtpunktzahl von 62 Punkten und belegt damit Platz 3 im Variantenvergleich.

4.4.4 Bewertung Variante 2 - TRISOPLAST®- Dichtung (Dicke 8 cm)

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 2 betragen ca. 62,00 €/m². Unter Berücksichtigung der Leistungen Vorarbeiten, Wegebau, Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung ergeben sich ca. 75,50 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 2 - TRISOPLAST®-Dichtung für den Standort Kyiv die zweit teuerste Lösung im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Hinsichtlich des Kriteriums Funktionssicherheit kann die Variante 2 mit der möglichen Höchstpunktzahl bewertet werden. Es handelt sich um ein bewehrtes Abdichtungssystem mit einer guten Dichtwirkung.

Systembedingte Folgekosten sind nicht zu erwarten, da keine zusätzlichen technischen Einrichtungen erforderlich sind, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen.

Die durch das Dichtungssystem bedingte erforderliche Bauzeit ist gegenüber den anderen Varianten als mittel lang bis lang einzustufen. Die mögliche Tagesleistung beim Einbau der 8 cm dicken Dichtungskomponente liegt unter anderem bedingt auch durch die Vorbereitungszeit (Rüstzeit) deutlich unter 1.000,00 m²/Tag für eine Kolonne.

Die technische Umsetzbarkeit ist bedingt durch die relativ hohe Witterungsempfindlichkeit und den hohen Anspruch hinsichtlich der Einbautechnologie mit der Wertungsnote 3 zu bewerten. Das technische Restrisiko ist bei fachkundiger Ausführung als gering zu bewerten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

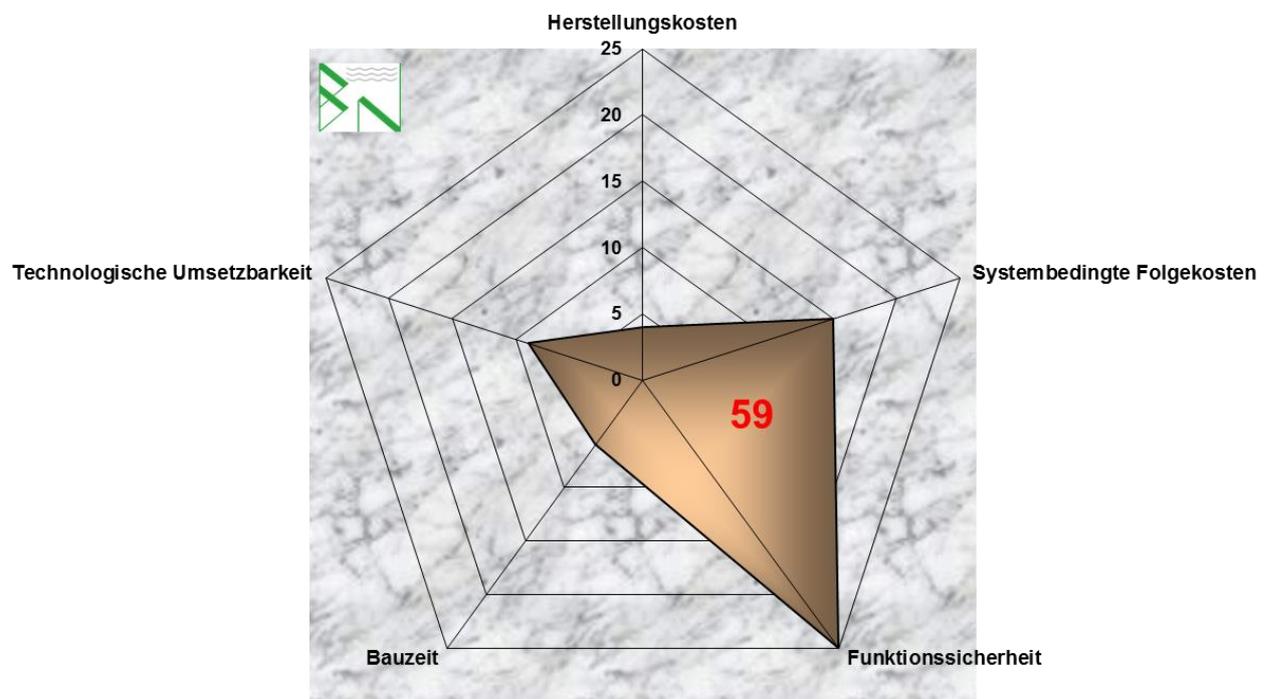


Abbildung 39: Wertungsdiagramm Variante 2

Die Variante 2 TRISOPLAST®-Dichtung erreicht eine Gesamtpunktzahl von 59 Punkten und belegt damit Platz 4 im Variantenvergleich.

4.4.5 Bewertung Variante 3 - Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD)

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 3 betragen ca. 58,00 €/m². Unter Berücksichtigung der Leistungen Vorarbeiten, Wegebau,

Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung ergeben sich ca. 72,00 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 2 - GTD- Dichtung für den Standort Kiev eine mittelteure Lösung (Rang 4) im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Hinsichtlich des Kriteriums Funktionssicherheit kann die Variante 3 mit der möglichen Höchstpunktzahl bewertet werden. Es handelt sich um ein bewehrtes Abdichtungssystem mit einer in Teilen der Fachwelt bescheinigten hervorragenden Dichtwirkung. Ein weiterer Vorteil ist, bedingt durch die industrielle Fertigung, die homogenen Produkteigenschaften. Außerdem sind Geosynthetische Tondichtungsbahnen weniger frostempfindlich als natürliche „Tondichtungen“.

Systembedingte Folgekosten sind nicht zu erwarten, da keine zusätzlichen technischen Einrichtungen erforderlich sind, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen.

Die durch das Dichtungssystem bedingte erforderliche Bauzeit ist gegenüber den anderen Varianten als kurz einzustufen. Die mögliche Tagesleistung beim Einbau der Geosynthetischen Tondichtungsbahnen liegt, unter anderem bedingt auch durch die kurze Vorbereitungszeit (Rüstzeit) bei über 1.400 m²/Tag.

Das technische Restrisiko ist bei fachkundiger Ausführung als gering zu bewerten. Der Untersuchungsaufwand des Baustoffes im Vorwege und beim Bau sowie die einzuhaltende Einbaugenauigkeit sind ebenfalls als gering anzusehen. Die Verlegung erfolgt durch einen Fachverleger und gestaltet sich deutlich einfacher als der Einbau von mineralischen Schüttgütern. Die Witterungsempfindlichkeit beim Einbau ist deutlich geringer als bei den Varianten TASI“- Dichtung und TRISO- PLAST®- Dichtung. Somit ist das Kriterium technische Umsetzbarkeit mit 4 zu bewerten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

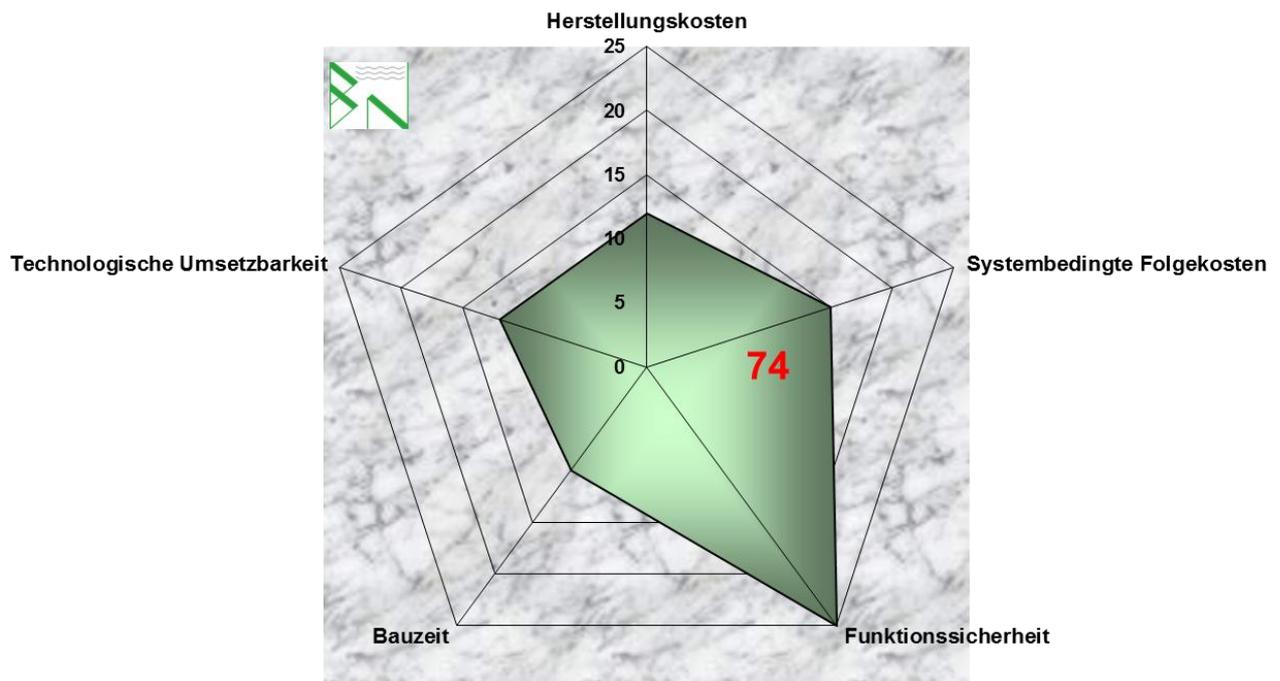


Abbildung 40: Wertungsdiagramm Variante 3

Die Variante 3 GTD- Dichtung erreicht eine Gesamtpunktzahl von 74 Punkten und belegt Platz 1 im Variantenvergleich.

4.4.6 Bewertung Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 4 betragen ca. 55,00 €/m². Unter Berücksichtigung der Leistungen Vorarbeiten, Wegebau, Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung ergeben sich ca. 70,00 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 4 - Wasserhaushaltsschicht für den Standort Kiev eine günstige Lösung (Rang 2) im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Die Funktionalität, bedingt durch einen mittelintensiven Jahresniederschlag ca. 600,00 bis 700,00 mm, ist grundsätzlich noch gegeben. Dennoch besitzt dieses System keine Dichtwirkung wie die Varianten 1 bis 3. Ggf. wären Messfelder zur Überprüfung der Funktionalität erforderlich. Entsprechende Sondergutachten zur Auslegung und Bemessung wären erforderlich. Die Funktion „Dichtung“ ist hier eher rechtlich als technisch unter dem Aspekt „hinreichend“ zu bewerten.

Systembedingte Folgekosten sind nicht zu erwarten, da keine zusätzlichen technischen Einrichtungen erforderlich sind, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen.

Eine Funktionssicherheit ist grundsätzlich gegeben. Bauzeit und technologische Umsetzbarkeit sind als gut zu bewerten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht

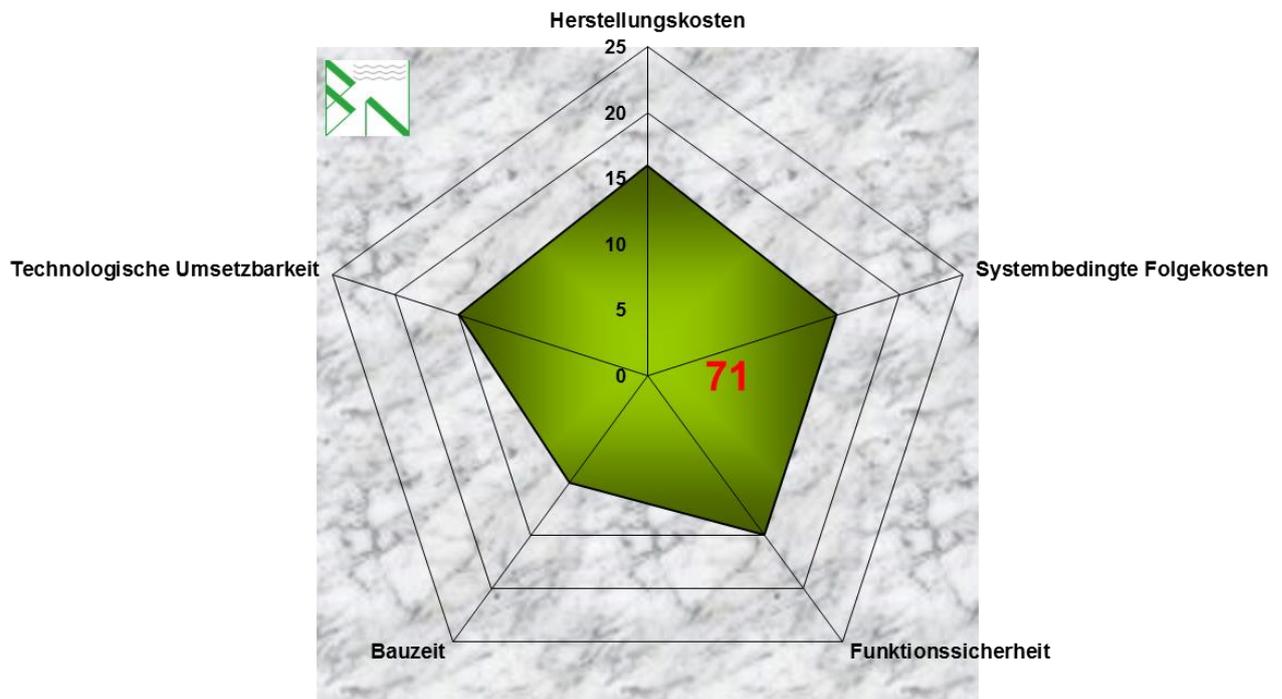


Abbildung 41: Wertungsdiagramm Variante 4

Die Variante 4 – Wasserhaushaltsschicht erreicht eine Gesamtpunktzahl von 71 Punkten und belegt damit den Platz 2 im Variantenvergleich

4.4.7 Bewertung Variante 5 - Kapillarsperre mit mineralischem Kapillarblock und Kapillarschicht

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 5 betragen ca. 51,00 €/m². Unter Berücksichtigung der Leistungen Vorarbeiten, Wegebau, Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung ergeben sich ca. 66,00 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 5 - Kapillarsperre mit mineralischem Kapillarkblock und Kapillarschicht für den Standort Kiev die günstigste Lösung (Rang 1) im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Das Kriterium Funktionssicherheit wird mit 1 bewertet, da dieses System eine dauerhafte messtechnische Überwachung bzw. Kontrolle (Feldweise Erfassung der Abflüsse in Schicht und Block) erfordert. Das System funktioniert nur bei Neigungen steiler als 1 : 6 annehmbar sicher.

Die Funktionssicherheit und das technische Risiko sind bei dieser Variante deutlich am höchsten. Sogenannte „Durchbrüche“ können durch Material-Inhomogenität oder kleinste Einbauungenauigkeiten, insbesondere im Grenzschichtbereich zwischen Schicht und Block entstehen, was einem Versagen des Dichtungssystems gleich kommt.

Systembedingte Folgekosten sind durch die zusätzlichen technischen Einrichtungen (Dränagen, Schächte mit Messeinrichtungen) gegeben, welche im Rahmen der Nachsorge einer Instandhaltung, Erneuerung und Betreuung unterliegen. Hier erfolgt die Bewertung mit 4.

Die reine Bauzeit ist ähnlich wie bei den Varianten TASI“- Dichtung zu bewerten. Die mögliche Tagesleistung beim Einbau der beiden mineralischen Dichtungskomponenten liegt unter 1.000,00 m²/Tag. Es sind sehr hohe Anforderungen an das Einbaupersonal zu stellen.

Das Kriterium technologische Umsetzbarkeit ist lediglich mit 2 zu bewerten, da das technische Restrisiko als extrem hoch anzusehen ist. Der Untersuchungsaufwand vor Baubeginn und während des Bauens ist ebenfalls extrem hoch. Für die Kipprinnenversuche und deren Auswertung und anschließender Anpassung der Planung hinsichtlich Zwischenwasserfassungen sind 4 bis 6 Monate zu kalkulieren. Die erforderliche Einbaugenauigkeit ist als extrem hoch zu bewerten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

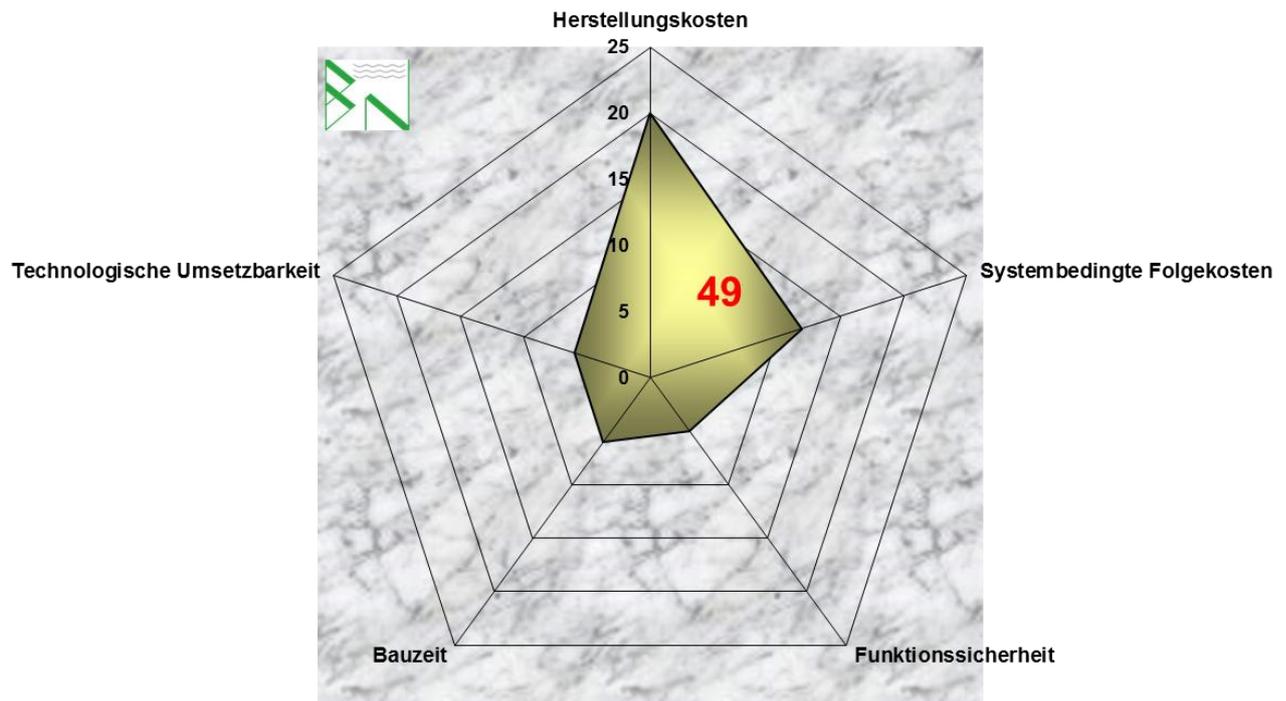


Abbildung 42: Wertungsdiagramm Variante 5

Die Variante 5 - Kapillarsperre mit mineralischem Kapillarblock und Kapillarschicht erreicht eine Gesamtpunktzahl von 49 Punkten und belegt damit den Platz 6 im Variantenvergleich

4.4.8 Bewertung Variante 6 - Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn und Kapillarschicht

Die Herstellungskosten für das reine Abdichtungssystem der Variante 6 betragen ca. 56,00 €/m². Unter Berücksichtigung der Leistungen Vorarbeiten, Wegebau, Oberflächenwasserfassung und Anpassung Gasfassung ergeben sich ca. 70,00 €/m².

Hinsichtlich der Kosten ist die Variante 6 - Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn und Kapillarschicht für den Standort Kiev die zweitgünstigste Lösung (Rang 2) im Vergleich zu den anderen 5 Varianten.

Bedingt durch die industriell und damit homogen gefertigte Kapillarblockmatte schneidet die Variante 6 bei den Kriterien Funktionssicherheit, Bauzeit und Technologische Umsetzbarkeit jeweils einen Wertungspunkt besser ab als die Variante

5. Die Funktionssicherheit, die Einbaugenaugigkeit und das technische Restrisiko sind etwas geringer einzustufen als beim mineralischen Kapillarblock.

Mit diesen System lassen sich jedoch auch nur Flächen mit Neigungen steiler als 1 : 6 grundlegend abdichten.

Die Wertung ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht.

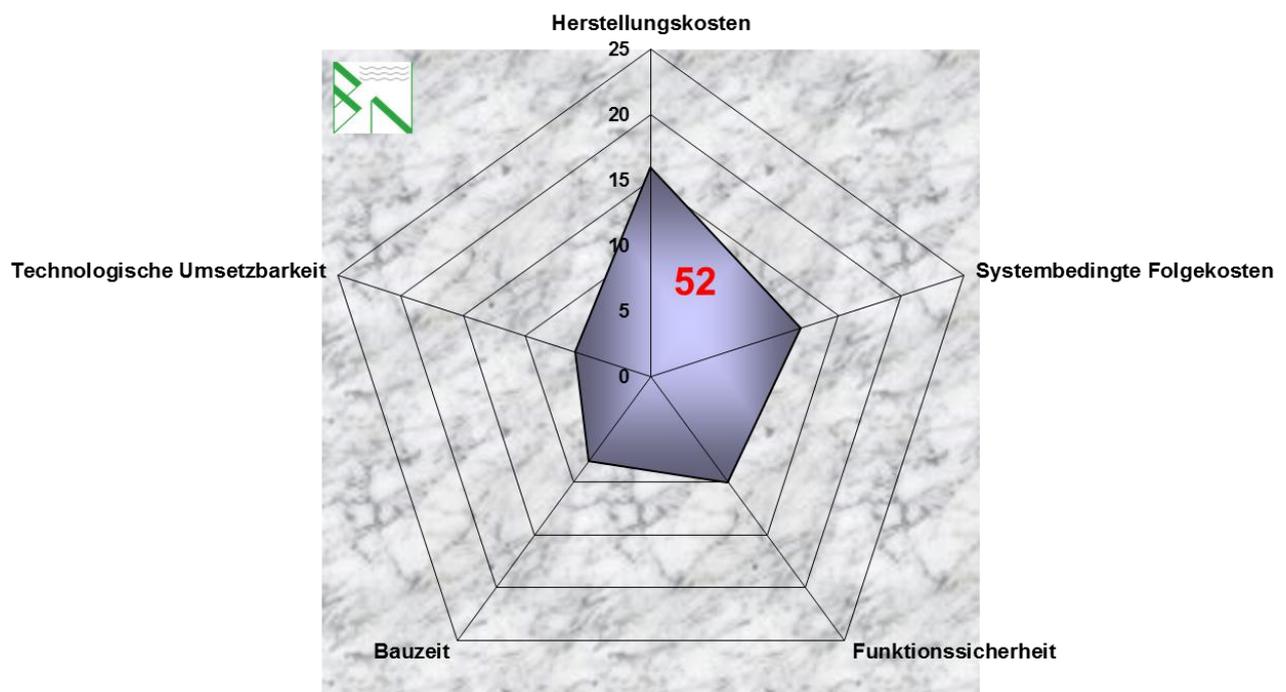


Abbildung 43: Wertungsdiagramm Variante 6

Die Variante 5 - Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn und mineralischer Kapillarschicht erreicht eine Gesamtpunktzahl von 52 Punkten und belegt damit den Platz 5 im Variantenvergleich

4.4.9 Ergebnis des Variantenvergleichs

Entsprechend durchgeführtem Variantenvergleich stellt sich die Variante 3 Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) relativ eindeutig die Vorzugsvarianten dar, Potentielle Alternativen bilden die System Tonabdichtung und Wasserhaushaltschicht. Die anderen Varianten sind für fortführende Planungen nicht zu empfehlen.

4.5 Planungsvoraussetzung

Im Vorwege zum eigentlichen Dichtungsbau ist der Deponiekörper unter den Bedingungen der nachzuweisenden Standsicherheit zu profilieren. Die äußere Standsicherheit ist durch einen externen Sachverständigen bereits im Zeitfenster der Planung nachzuweisen. Die innere Standsicherheit der Deponiedichtung kann letztendlich nur nachgewiesen werden, wenn entsprechende Baustoffe endgültig abgestimmt sind. Nach erfolgter Profilierung ist die Abfalloberfläche durch entsprechendes Gerät (Kompaktoren oder Walzen) fachgerecht zu verdichten. Dies erfolgt in der Regel statisch durch mehrere Walzübergänge mit schwerem Gerät.

Die Deponieflanken sollten nicht steiler als 1:3 hergestellt werden, da es bei steileren Neigungen in der Regel zu Problemen hinsichtlich der Scherfestigkeit (innere Standsicherheit) für die Abdichtung in den kritischen Gleitfugen, im Besonderen im Lastfall Einbau, kommt. Ein Minimalgefälle von 1:20 sollte ebenfalls nicht unterschritten werden, damit eine ordnungsgemäße Abführung des Oberflächenwassers erreicht werden kann. Bei Kapilarsperrensystemen ist die minimale Neigung steiler auszuführen (1:5 bzw. 1:6).

4.6 Bauablauf und Jahresleistung

Nach Abschluss der Profilierung und Verdichtung des Abfallkörpers sowie anderer Vorarbeiten, wie z.B. Anpassen der Gasbrunnen, Umverlegung von Leitungen, Ausbildung von Baustraßen, Herstellung von Kippstellen etc., sind die einzelnen Schichten der Oberflächenabdichtung im bautechnologischen Taktbauverfahren herzustellen. In der Regel wird der Taktbau durch die Verlegungskomponente PEHD-Dichtungsbahn bestimmt. Die entsprechenden Vor- und Nacharbeiten sind auf die Leistungsvorgaben der Verlegungsleistung der PEHD-Komponente abzustimmen. Mit einer fachkundigen Verlegekolonne (optimal 5 Personen) können bei optimalenm Einbaubedingungen pro Tag ca. 1.500 bis 1.700 m² PEHD-Dichtungsbahnen auf freiem Baufeld eingebaut werden.

Der Bauablauf wird darüber hinaus durch Anforderungen an den Einbau anderer Komponenten der Oberflächenabdichtung bestimmt. So muss eine geo-synthetische Dichtungsbahn innerhalb von 48 Stunden mit einer Auflast versehen werden.

Das Zusammenspiel und die Abhängigkeiten der einzelnen Dichtungskomponenten haben wesentlichen Einfluss und bestimmenden Charakter auf die Bauablaufplanung, in die sowohl externe Fachgutachten, als auch die Bauherrenbauüberwachung einzubinden sind.

4.7 Qualitätsmerkmale der Baustoffe und der ausführenden Firma

Nachdem das anzuwendende Oberflächenabdichtungssystem ausgewählt wurde, sind entsprechende Qualitätsmerkmale der einzelnen Baustoffe durch einen Sachverständigen in Form eines Qualitätsmanagementplans zu definieren. Orientierende Angaben hierzu sind in den Unterkapiteln des Kapitels 3.1.3 bzgl. einzelner Dichtungskomponenten, zu finden. Diese sind jedoch vor einer Ausführung weitaus detaillierter auszuarbeiten.

Im Rahmen eines Europäischen Ausschreibungsverfahrens sind die Anforderungsprofile für die ausführenden Firmen zu definieren. Um rechtliche Wettbewerbsbeschränkungen im Europäischen Markt aus dem Weg zu gehen, kann lediglich eine Qualitätssicherung in Form einer Abforderung von Referenzen der Bieter erfolgen. Letzteres gilt auch für die Definition bzgl. deren Fachverlegerpersonal. Hier sind entsprechende Fachschweißnachweise maßgebende Voraussetzung für den Zuschlag.

4.8 Bedingungen an die bauliche Umsetzung

Deponiebau bzw. deren Leistung wird im Wesentlichen durch die Witterungsbedingungen vorgegeben. Hier sind vornehmlich die mineralische Dichtungskomponente sowie die PEHD-Dichtungsbahnen zu benennen. Mineralische Dichtungsbaustoffe reagieren, im Vergleich zu Sanden und Kiesen, wesentlich empfindlicher auf Niederschläge. PEHD-Dichtungsbahnen bzw. auch die Verlegung von geosynthetischen Dichtungsbahnen, der Einbau von TRISOPLAST® etc., darf nicht bei Niederschlagsereignissen ausgeführt werden. PEHD-Dichtungsbahnen dürfen grundsätzlich nicht unterhalb +5°C verschweißt werden. Des Weiteren sind hier noch Bedingungen hinsichtlich Luftfeuchtigkeit und weitere Parameter einzuhalten.

4.9 Mögliche Einbaujahresleistung

Anhand der Wetterdaten für den Standort Kyiv (vergleiche hierzu Kapitel 4.2.2), sind Dichtungsbauarbeiten im Zeitraum von Ende März bis Ende Oktober grundsätzlich

realisierbar. Da jedoch mit witterungsbedingten Unterbrechungen durch Niederschläge zu rechnen ist, können im Mittel pro Jahr etwa 5.000 bis 6.000 m² Deponiefläche endgedichtet werden. Diese Leistung kann grundsätzlich verdoppelt werden, in dem in zwei Baufeldern parallel mit entsprechender Personal- und Geräteeinsatz gearbeitet wird.

4.10 Baukosten geschätzt

Die Bauhauptkosten können bei einer Abdichtungsfläche von ca. 35 ha auf 25.000.000,00 bis 26.000.000,00 € (ohne Umsatzsteuer). Hinzu kommen Baunebenkosten für Planung, Bauüberwachung, fachliche Gutachten, statische Berechnungen, Vermessungen, gutachterliche Baubegleitung, in Höhe von 3.000.000,00 € (ohne Umsatzsteuer).

5 Zusammenfassung und weitere Schritte

Wesentliche Voraussetzung für das Aufbringen einer nachhaltigen Oberflächenabdichtung auf der Deponie Nr. 5 ist der Abbau des Sickerwassereinstaus in den beiden Deponieabschnitten.

Die Deponie befindet sich in der stabilen Methanphase. Nach dem Absenken des Sickerwassereinstaus kann mit einer technisch optimierten und fachlich einwandfrei betriebenen Gasfassung, die Gasverwertung langfristig wirtschaftlich betrieben werden und signifikant zur Reduktion der Gasemission beitragen.

Die vorhandenen Grundwasseranalysen im Abstrom der Deponie und die selbst angefertigten Grundwasseranalysen im Anstrom der Deponie ergeben keinen Anfangsverdacht für eine deponiebedingte Kontamination des Grundwasserleiters.

Es wird empfohlen, die Grundwasseranalysen im An- und Abstrom der Deponie durch ein zweites unabhängiges Labor gegenprüfen zu lassen.

Als vorbereitende Maßnahme zur Oberflächenabdichtung der Deponie Nr. 5 empfehlen wir folgende weiteren Schritte:

1. Entwicklung eines Sickerwasserbehandlungskonzeptes, das mit temporär unterschiedlichen Sickerwasserbehandlungskapazitäten den Abbau des Sickerwassereinstaus in und auf der Deponie gewährleisten kann.
2. Festlegung einer Abschlusskubatur für die Deponieoberfläche.

3. Entscheidung über den Umfang der umzulagernden Abfallmengen bzw. Entscheidung, ob das Restvolumen über Hausmüll, Bauschutt oder Erdbaustoffe beizustellen ist.
4. Festlegung eines Verfüllkonzeptes der Deponieabschnitte.
5. In Abhängigkeit von dem Verfüllkonzept, Festlegung von Bereichen, die mit einer Zwischenabdeckung versehen werden sollen.
6. Verfüllen von Deponieteilbereichen bis zur Erreichung der Deponieendhöhe und deren Zwischenabdeckung.
7. Kontrolle der verfüllten Teilbereiche der Deponie zur Ermittlung von Dokumentation der Setzung des Deponiekörpers.
8. Nach dem Abklingen der Hauptsetzungen, abschnittsweises Aufbringen der Oberflächenabdichtung.

Aufgestellt:

Krempferheide, den 27.11.2018

BN Umwelt GmbH

Stefan Keck

