

# Abschlussbericht

Ressourcenpotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Wiesbaden

**Auftraggeber:** ELW



Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden  
Deponiestraße 15  
D-65 205 Wiesbaden

**Ansprechpartner:**  
Herr Michael Zorbach  
Herr Dietrich Volk

**Auftragnehmer:** Justus-Liebig-Universität Gießen

Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement  
Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement  
Heinrich-Buff-Ring 26  
35392 Gießen

**Ansprechpartner:**  
Herr Prof. Dr. Stefan Gäth  
Herr Dr. Jörg Nispel

Stand 22. April 2014



## Danksagung

---

Der vorliegende Abschlussbericht führt die Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zur Erkundung des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch zusammen.

Hierbei wird neben den gewonnenen Ergebnissen ein besonderes Augenmerk auf die Methodik der Untersuchungen gelegt und daraus resultierende Fragestellungen abgeleitet.

Aus wissenschaftlicher und ressourcenökonomischer Sicht ist dieses zukunftsweisende Projekt ein erster Schritt, um bisher verborgene bzw. nicht vermutete Rohstoff- und Energiepotenziale der Bundesrepublik Deutschland näher zu erkunden und ins Interesse von Wissenschaft, Politik und Wirtschaft zu rücken.

Zudem trägt es wesentlich dazu bei, allgemein gültige Kenngrößen zukünftiger abfallwirtschaftlicher Fragestellungen zu benennen und zu charakterisieren.

Für die gute Zusammenarbeit, Unterstützung und Projektbegleitung möchten wir den Entsorgungsbetrieben der Landeshauptstadt Wiesbaden, den Mitarbeitern der Bohrfirma Ivers sowie allen weiteren beteiligten Personen recht herzlich danken. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Joachim Wack, Herrn Michael Zorbach und Herrn Dietrich Volk.

## **Inhaltsverzeichnis**

Danksagung .....	2
1 Einleitung und Zielsetzung .....	15
2 Stand der Forschung .....	17
2.1 Rechtliche Grundlagen.....	19
2.2 Schutzgüter.....	21
2.2.1 Schutzgut Wasser .....	22
2.2.2 Schutzgut Boden.....	22
2.2.3 Schutzgut Luft.....	22
2.2.4 Schutzgut Flora und Fauna.....	23
2.2.5 Schutzgut Landschaftsbild .....	24
2.2.6 Sonstige Schutzgüter .....	25
2.3 Arbeitsschutz .....	25
2.3.1 Rechtliche Grundlagen und relevante Rahmenbedingungen .....	25
2.3.2 Arbeits- und Sicherheitsplan.....	26
2.3.3 Arbeitsschutz in kontaminierten Bereichen.....	27
2.3.4 Arbeitsschutz in nicht kontaminierten Bereichen.....	27
2.4 Technische Möglichkeiten der Aufbereitung .....	28
2.4.1 In-Situ Stabilisierung .....	28
2.4.2 Abfallentnahme .....	30
2.4.3 Transport .....	30
2.4.4 Deponiegutbehandlung .....	30
2.4.4.2 KLASIERUNG .....	32
2.5 Kostenstruktur des Deponierückbaus.....	40
2.6 Nachsorge und Folgekosten.....	41
2.7 Rohstoffmärkte und Preisentwicklung.....	46
2.8 Ausgewählte Deponierückbauprojekte.....	47
2.8.1 Deponie Burghof.....	47
2.8.2 Zentraldeponie Düsseldorf Hubbelrath .....	50
2.8.3 Hessische Deponien als Rohstofflagerstätten.....	53
2.8.4 Deponie Deiderode.....	55
2.8.5 Verbundvorhaben Deponiekörper .....	56
2.8.6 Deponie Rennerod .....	58
2.8.7 Wertstoffpotenzial in Abfällen rückgebauter Hausmülldeponien .....	61
2.8.8 Kreismülldeponie Hechingen .....	63
2.8.9 Deponie Reiskirchen .....	63
3 Deponieabschnitt I.....	65

3.1	Ablagerungshistorie .....	66
3.2	Kenndaten und Aufbau .....	67
3.3	3D-Modell des Deponiekörpers.....	68
4	Material und Methoden .....	72
4.1	Probebohrungen .....	72
4.1.1	Lage der Bohrpunkte .....	73
4.1.2	Bohrprofile und Abfallcharakterisierung .....	75
4.2	Klassierung .....	75
4.3	In-Situ Sortierung .....	76
4.4	Nachsortierung.....	77
4.5	Wassergehalt.....	78
4.6	Stoffgehalt.....	78
4.7	Aschegehalt.....	78
4.8	Brennwert .....	78
4.9	Chlor und Schwefel.....	79
4.10	Schwermetalle.....	79
4.11	Stabilisierungsgrad .....	79
4.12	Zusammenfassung.....	82
5	Ergebnisse und Diskussion .....	83
5.1	Ablagerungsmenge und Bohrprofile .....	83
5.1.1	Bohrprofile .....	83
5.1.2	Ablagerungsmengen.....	84
5.2	Korngrößenverteilung .....	87
5.3	Deponiegutzusammensetzung.....	90
5.3.1	Feinfaktion .....	90
5.3.2	Mittelfaktion .....	94
5.3.3	Grobfraktion .....	99
5.3.4	Gesamtzusammensetzung .....	105
5.3.5	Schwankungsbereich der Zusammensetzung.....	110
5.3.6	Wassergehalt.....	110
5.4	Frischmassepotenzial .....	111
5.4.1	Schicht A   Abdeckung .....	112
5.4.2	Schicht AR   Abraum .....	112
5.4.3	Schicht B   Bauschutt .....	113
5.4.4	Schicht HG   Haus- und Gewerbemüll.....	114
5.4.5	Gesamtpotenzial .....	114
5.5	Trockenmassepotenzial.....	116

5.5.1	Schicht A   Abdeckung.....	116
5.5.2	Schicht AR   Abraum.....	117
5.5.3	Schicht B   Bauschutt.....	117
5.5.4	Schicht HG   Haus- und Gewerbeabfälle .....	118
5.5.5	Gesamtpotenzial .....	119
5.6	Energetische Verwertung .....	120
5.6.1	Theoretischer Energiewert .....	123
5.7	Stabilisierungsgerad des Deponiekörpers.....	125
5.7.1	Trockensubstanz und Glühverlust.....	126
5.7.2	pH-Wert.....	127
5.7.3	Brennwert - Standardverbrennungsenthalpie .....	128
5.7.4	Chemischer Sauerstoffbedarf .....	129
5.7.5	Kohlenstoffanteile.....	130
5.7.6	TTC-Test .....	131
5.7.7	Biologischer Sauerstoffbedarf.....	131
5.8	Ersatzbaustoffeigenschaften .....	132
5.9	Preisentwicklung ausgewählter Primär- und Sekundärrohstoffe.....	137
5.9.1	Eisenerz und Stahlschrott .....	137
5.9.2	Kupfer .....	138
5.9.3	Aluminium.....	140
5.9.4	Preisprognosen .....	142
5.10	Kosten und Erlöse .....	145
5.10.1	Metallvermarktung .....	145
5.10.2	CO <sub>2</sub> - Einsparung .....	146
5.10.3	Flächenrückgewinnung .....	147
5.10.4	Kosten des Rückbaus .....	147
5.10.5	Kosten der Nachsorge.....	151
6	Ganzheitliche Bewertung.....	153
6.1	Rückbau oder Nachsorge – aktuell .....	153
6.2	Rückbau oder Nachsorge – zukünftig .....	154
7	Abschließende Diskussion und Fazit .....	156
7.1	Rückbau oder Nachsorge .....	159
8	Fazit und Ausblick .....	162
9	Zusammenfassung .....	163
9.1	Erfassung des Ressourcenpotentials.....	163
9.1.1	Gegenstand und Umfang der Untersuchungen .....	163
9.1.2	Ablagerungsmengen des Deponieabschnitts I .....	165

9.1.3	Zusammensetzung des Deponieabschnitts I .....	165
9.1.4	Bewertung des Rückbaus des Deponieabschnitts I .....	167
10	Literatur.....	170

## Abbildungen und Tabellen:

Abbildung 1: Teilschritte der Deponieerkundung in Hinblick auf deren Eignung zum Landfill Mining [EPA - United States Environmental Protection Agency, 1997] .....	18
Abbildung 2: Entscheidungsmodell über das Zulassungsverfahren beim Deponierückbau [Finck, 1999] .....	21
Abbildung 3: Grundlegende Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung und Techniken der Deponiegutsortierung .....	28
Abbildung 4: Verlauf der Stilllegung einer Deponie aus abfallrechtlicher Sicht [Burkhardt & Egloffstein, 2005] .....	42
Abbildung 5: Anteile der auf der Deponie Burghof abgelagerten Abfallarten [Rettenberger, 1996a] .....	47
Abbildung 6: Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung [Rettenberger et al., 1995] .....	48
Abbildung 7: Zusammensetzung des Deponieguts der Zentraldeponie Hubbelrath .....	51
Abbildung 8: Verfahrensablauf beim Rückbauprojekt auf der Zentraldeponie Hubbelrath [Hübler & Wiskemann, 1995] .....	52
Abbildung 9: Mittlere Deponiegutzusammensetzung und deren Verwertungs- sowie Entsorgungsoptionen [Hübler & Wiskemann, 1995] .....	52
Abbildung 10: Abgelagerte Stoffströme auf der Deponie Kirschenplantage für den Zeitraum 1973 bis 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau .....	54
Abbildung 11: Kumulierte Fraktionsanteile der 11 hessischen Referenzdeponien für den Zeitraum zwischen 1972 und 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau .....	54
Abbildung 12: Korngrößenverteilung ostdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998] .....	57
Abbildung 13: Korngrößenverteilung westdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998] .....	58
Abbildung 14: Abschätzung der Zusammensetzung des Deponiekörpers Rennerod   Voruntersuchung [Groß, 1998] .....	59
Abbildung 15: Zusammensetzung des Deponieguts Rennerod   Voruntersuchung [Groß, 1998] .....	59
Abbildung 16: Korngrößenverteilung und Anteil Heizwertreicher Stofffraktionen des Deponieguts Rennerod   Voruntersuchung [Groß, 1998] .....	60
Abbildung 17: Aufbereitungskonzept des ersten Bauabschnitts der Deponie Rennerod auf Basis der Voruntersuchungen [Groß, 1998] .....	60
Abbildung 18: Zusammensetzung des Rückbaumaterials der Deponie Rennerod nach Stoffgruppen in Gew.- und Vol.-% (Hochrechnung nach [Groß, 1998]) (K P GL T) = Heizwertreiche Fraktion mit $H_u > 11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .....	61
Abbildung 19: Zusammensetzung des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen .....	63
Abbildung 20: Deponieabschnitte der Siedlungsabfalldeponie Dyckerhoffbruch der Landeshauptstadt Wiesbaden [nach SHC, 2009] .....	65
Abbildung 21: Historische Entwicklung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch [nach BGU, 2009] .....	66
Abbildung 22: Schematischer Aufbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch .....	67
Abbildung 23: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle (zweifach überhöhte Darstellung) .....	68
Abbildung 24: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle und Untergrenze der Bauschuttablagerung – Zwischenbereich ist durch Abraumsande charakterisiert (zweifach überhöhte Darstellung) .....	69
Abbildung 25: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung) .....	69

Abbildung 26: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung) .....	69
Abbildung 27: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (I und II) (zweifach überhöhte Darstellung) .....	70
Abbildung 28: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II sowie III - Rekultivierungsschicht) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung).....	70
Abbildung 29: 3D-Modelldarstellung des heutigen Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (zweifach überhöhte Darstellung).....	71
Abbildung 30: Querschnitt des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch auf Basis der 3D-Modells (beispielhafte Darstellung).....	71
Abbildung 31: Verfahrensabläufe der Untersuchungen des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.....	72
Abbildung 32: Lage der Probebohrungen auf dem Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch .....	74
Abbildung 33: Schwingssieb zur Klassierung des Deponieguts .....	76
Abbildung 34: Verteilung der untersuchten Bohrmeter (uBm) nach ausgewiesenenen Schichten im Rahmen der Bohrlochprofilerstellung (Prozentuale Verteilung nach untersuchten Bohrmetern).....	84
Abbildung 35: Verteilung der abgelagerten Abfallarten in Bezug auf das vorhandene Deponievolumen (Berechnungsgrundlage stellt das 3D-Strukturmodell dar).....	85
Abbildung 36: Verteilung der abgelagerten Abfallarten in Bezug auf das vorhandene Deponievolumen ohne Berücksichtigung der abgelagerten Braumsande und –materialien (Berechnungsgrundlage stellt das 3D-Strukturmodell dar).....	85
Abbildung 37: Mittlere Dichte abgelagerter Siedlungs- und Mineralstoffabfälle.....	86
Abbildung 38: Schwankungsbreite der Korngrößenverteilung des Deponieguts des Deponieabschnitts I .....	88
Abbildung 39: Mittlere Korngrößenverteilung nach ausgewiesenenen Schichten im Rahmen der Bohrlochprofilansprache .....	88
Abbildung 40: Mittlere Korngrößenverteilung nach ausgewiesenenen Hauptkomponenten im Rahmen der Bohrlochprofilansprache.....	89
Abbildung 41: Mittlere Korngrößenverteilung nach Bohrlöchern.....	89
Abbildung 42: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Feinfraktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	90
Abbildung 43: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Feinfraktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	90
Abbildung 44: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	91
Abbildung 45: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	91
Abbildung 46: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Braumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	92
Abbildung 47: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Braumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	92
Abbildung 48: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	93

Abbildung 49: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	93
Abbildung 50: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	94
Abbildung 51: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse).....	94
Abbildung 52: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Mittelfraktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	95
Abbildung 53: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Mittelfraktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	95
Abbildung 54: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	96
Abbildung 55: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	96
Abbildung 56: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Abraumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	97
Abbildung 57: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Abraumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	97
Abbildung 58: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	98
Abbildung 59: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	98
Abbildung 60: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	99
Abbildung 61: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse).....	99
Abbildung 62: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Grobfaktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	100
Abbildung 63: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Grobfaktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	101
Abbildung 64: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	101
Abbildung 65: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	102
Abbildung 66: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abraumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	102
Abbildung 67: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abraumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	103
Abbildung 68: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	104
Abbildung 69: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	104
Abbildung 70: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	105

Abbildung 71: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse) .....	105
Abbildung 72: Gesamtzusammensetzung nach Abfallschichten unter Berücksichtigung der Stoffgruppen.....	106
Abbildung 73: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden (Angaben in Gew.-% FM).....	107
Abbildung 74: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Abdeckung (Angaben in Gew.-% FM) .....	108
Abbildung 75: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Abraum (Angaben in Gew.-% FM) .....	108
Abbildung 76: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Bauschutt (Angaben in Gew.-% FM) .....	109
Abbildung 77: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Haus-/Gewerbemüll (Angaben in Gew.-% FM) .....	109
Abbildung 78: Mittlerer Wassergehalt der Stofffraktionen und Schwankungsbereich (Angaben in Gew.-% in Bezug zur Frischmasse) .....	111
Abbildung 79: Frischmassepotenzial der Abdeckung (Angaben in Mg FM) .....	112
Abbildung 80: Frischmassepotenzial der Abraumschicht (Angaben in Mg FM) .....	113
Abbildung 81: Frischmassepotenzial der Bauschuttschicht (Angaben in Mg FM) .....	113
Abbildung 82: Frischmassepotenzial der Haus- und Gewerbemüllschichten (Angaben in Mg FM) .....	114
Abbildung 83: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (Angaben in Mg FM) .....	115
Abbildung 84: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM) .....	116
Abbildung 85: Trockenmassepotenzial der Abdeckung (Angaben in Mg TM) .....	117
Abbildung 86: Trockenmassepotenzial der Abraumschichten (Angaben in Mg TM) .....	117
Abbildung 87: Trockenmassepotenzial der Bauschuttschichten (Angaben in Mg TM) .....	118
Abbildung 88: Trockenmassepotenzial der Haus- und Gewerbemüllschichten (Angaben in Mg TM) .....	119
Abbildung 89: Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (Angaben in Mg TM) .....	119
Abbildung 90: Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM) .....	120
Abbildung 91: Ermittelte Heizwerte ( $H_u$ ) ausgewählter/heizwertreicher Stofffraktionen.....	121
Abbildung 92: Mittlerer Heizwert der heizwertreichen Fraktion .....	121
Abbildung 93: Charakterisierung des theoretischen Energiewerts des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.....	124
Abbildung 94: Nutzbare Energie des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Abhängigkeit der mittleren Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke.....	125
Abbildung 95: Schwankungsbereich ( $KI_{90\%}$ ) des Glühverlust (oTS) in Abhängigkeit der Klassierfraktion .....	126
Abbildung 96: Zusammenhang der oTS-Anteile in Abhängigkeit der Klassierfraktion.....	126
Abbildung 97: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Glühverlust (oTS) .....	127

Abbildung 98: Schwankungsbereich (KI <sub>90</sub> ) des pH-Werts (oTS) in Abhängigkeit der Klassierfraktion .....	127
Abbildung 99: Zusammenhang des pH-Werts der Fein- und Mittelfraktion .....	128
Abbildung 100: Wertebereich der Standardverbrennungsenthalpie der untersuchten Proben .....	128
Abbildung 101: Zusammenhang zwischen Standardverbrennungsenthalpie und Glühverlust .....	129
Abbildung 102: Chemischer Sauerstoffbedarf im Mittel über 5 Tage der Fein- und Mittelfraktion .....	129
Abbildung 103: Zusammenhang des chemischen Sauerstoffbedarfs der Fein- und Mittelfraktion.....	130
Abbildung 104: TC-, TOC- und TIC-Gehalte der Fein- und Mittelfraktion.....	130
Abbildung 105: Zusammenhang der TC-, TOC- und TIC-Gehalte zwischen der Fein- und Mittelfraktion.....	131
Abbildung 106: Biologischer Sauerstoffbedarf der Fein- und Mittelfraktion nach 5 Tagen .....	132
Abbildung 107: Zusammenhang des BSB <sub>5</sub> der Fein- und Mittelfraktion.....	132
Abbildung 108: Leitfähigkeit der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung .....	134
Abbildung 109: pH-Wert der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung .....	134
Abbildung 110: Chrom <sub>gesamt</sub> -Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung .....	135
Abbildung 111: Kupfer-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung .....	135
Abbildung 112: Sulfat-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung.....	136
Abbildung 113: Vanadium-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung .....	136
Abbildung 114: Preisentwicklung für Stahlschrott und Eisenerz im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011 .....	138
Abbildung 115: Zusammenhang des Stahlschrott- und Eisenerzpreises .....	138
Abbildung 116: Preisentwicklung für Kupferschrott und Primärkupfer im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011.....	139
Abbildung 117: Zusammenhang des Kupferschrott- und Primärkupferpreises .....	140
Abbildung 118: Preisentwicklung für Aluminiumschrott und Aluminium im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011.....	141
Abbildung 119: Zusammenhang des Aluminiumschrott- und Aluminiumpreises .....	141
Abbildung 120: Prognostizierte Preisentwicklung für Stahl-, Aluminium- und Kupferschrott.....	142
Abbildung 121: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes weltweit von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 – 2009 (orange) .....	143
Abbildung 122: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit der Weltbevölkerung von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 – 2009 (orange).....	144
Abbildung 123: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Erdölpriences von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 - 2009 (orange).....	144
Abbildung 124: Potenzielle Wertschöpfung der Metallvermarktung .....	146
Abbildung 125: CO <sub>2</sub> -Einsparpotenziale des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch .....	147
Abbildung 126: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Best Case“ Szenarios.....	148

Abbildung 127: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Worst Case“ Szenarios.....	150
Abbildung 128: Nachsorgekosten des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch unter Berücksichtigung einer 100 Jahre andauernden Nachsorgephase und linearem Kostenrückgang.....	151
Abbildung 129: Kosten der Nachsorge und Sanierung im Rahmen der Erlös betrachtung .....	152
Abbildung 130: Kosten und Erlöse des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts   Gesamtbetrachtung .....	154
Abbildung 131: Benötigter Flächengewinn zum kostenneutralen Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.....	154
Abbildung 132: Vergleichende Darstellung des realen Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch mit Ergebnissen ähnlicher Vorhaben bzw. stattgefunder Rückbauprojekte .....	157
Abbildung 133: Untersuchungsrahmen zur Erkundung des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Wiesbaden.....	164
Abbildung 134: Prozentuale Zusammensetzung der unterschiedlichen Deponiebereiche bzw. Abfallarten .....	165
Abbildung 135: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM).....	166
Abbildung 136: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Best Case“ Szenarios.....	167
Abbildung 137: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Worst Case“ Szenarios.....	168
Abbildung 138: Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch – Betrachtung bis zum Jahr 2060 .....	169

Tabelle 1: Einsatzgebiete von Zerkleinerern in der Abfallaufbereitung [Kranert & Cord-Landwehr, 2010].....	32
Tabelle 2: Siebdurchgänge ausgewählter Deponierückbauprojekte .....	35
Tabelle 3: Übersicht heute gängiger Einrichtungen zur Sortierung von Abfällen bzw. Deponiegut.....	36
Tabelle 4: Eignung von Altabfällen/ Deponiegut zur aeroben Nachbehandlung [WENGENROTH, 1995] .....	40
Tabelle 5: Spezifische Kosten des Deponierückbaus   abgeändert nach BÖLTE & GEIPING [2011] .....	40
Tabelle 6: Abschätzung des Zeitraums bis zum Erreichen der jeweiligen Grenzkonzentration gemäß Anforderungswerten Anhang 51 AbwV [Eitner, 2010c].....	43
Tabelle 7: Spezifische Folgekosten für Hausmülldeponien in Abhängigkeit des Ablagerungsvolumens und der Ablagerungsfläche [Burkhardt & Egloffstein, 2005].....	44
Tabelle 8: Rückstellungskosten für unterschiedliche Siedlungsabfalldeponien .....	44
Tabelle 9: Praxisnahe Folgekostenkalkulation [Stegmann et al., 2006] .....	45
Tabelle 10: Mittlere Verteilung des Kostenaufwands für Stilllegung und Nachsorge [Bartl, 2005] .....	46
Tabelle 11: Durchschnittlicher Rohstoffverbrauch pro Einwohner und Jahr [Allianz Global Investors, 2011].....	46
Tabelle 12: Deponiecharakteristika des Verbundvorhabens Deponiekörper [Dohmann, 1997].....	56
Tabelle 13: Sortieranalyseergebnisse der Grob- und Mittelfaktion [Christ et al., 2011] .....	62
Tabelle 14: Konzentrationen seltener Erden in Grob-, Mittel- und Feinfaktionen aus dem Deponierückbau [Christ et al., 2011].....	62
Tabelle 15: Deponiegutzusammensetzung der Deponie Reiskirchen (theoretische Betrachtung).....	64
Tabelle 16: Mittlere Heizwerte unterschiedlicher Stofffraktionen (Berechnung auf molekularer Ebene) .....	64
Tabelle 17: Übersichtstabelle der durchgeführten Bohrmaßnahmen .....	73
Tabelle 18: Definition der Stofffraktionen der In-Situ Sortierung .....	76
Tabelle 19: Gruppierung der definierten Stofffraktionen der In-Situ Sortierung auf Basis ihrer Eigenschaften zur potenziellen Verwertung .....	77
Tabelle 20: Zusammenfassende Darstellung der Untersuchungen in Abhängigkeit der Klassierfraktionen.....	82
Tabelle 21 Verteilung der abgelagerten Abfallarten (Berechnung basierend auf abgeleiteten Volumen und mittlerer Abfalldichte) .....	87
Tabelle 22: Anforderungskriterien potenzieller EBS-Abnehmer .....	122
Tabelle 23: Ergebnisse der Untersuchung der heizwertreichen Fraktion im Vergleich.....	123
Tabelle 24: Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke [Hölzle, 2011] .....	124
Tabelle 25: Mittlere Materialeigenschaften der Fraktion < 50 mm im Vergleich zu den Materialanforderungen für Recyclingbaustoffe nach ErsatzbaustoffV-E (2012) .....	133
Tabelle 26: Fe-Metallgehalte des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch und Charakterisierung der NE-Metalle... ..	145
Tabelle 27: Spezifische CO <sub>2</sub> -Einsparung durch das Recycling einzelner Stofffraktionen .....	146
Tabelle 28: Monetäre Bewertung des Flächengewinns des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch .....	147
Tabelle 29: Erlös- und Kostenbilanzierung des „Best-Case“ Szenarios unter aktuellen Bedingungen .....	148

Tabelle 31: Erlös- und Kostenbilanzierung des „Worst-Case“ Szenarios unter aktuellen Bedingungen .....	150
Tabelle 34: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.....	153
Tabelle 1: Verteilung der abgelagerten Abfallarten – Gesamtbetrachtung.....	165
Tabelle 2: Mittlere Materialeigenschaften der Fraktion < 50 mm im Vergleich zu den Materialanforderungen für Recyclingbaustoffe nach ErsatzbaustoffV-E (2012).....	166

# 1 Einleitung und Zielsetzung

---

*„Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen stellen Abfalldeponien eine Möglichkeit zur Kompensation primärer Rohstoffe dar!“*

---

Ressourcen wie Stahl, Kupfer, Phosphor und Energie werden aufgrund starker Nachfragesteigerung zunehmend knapper und somit auch teurer. Es ist zu vermuten, dass sich an dieser Situation zukünftig nichts ändert. Vielmehr ist zu erwarten, dass sich die Marktlage mit steigender Weltbevölkerung und entsprechendem Konsumwandel noch drastischer entwickelt [RWI ESSEN ET AL., 2006].

In diesem Zusammenhang zeigen Prognosen, dass im Jahr 2050 ca. 9,3 Milliarden Menschen auf der Erde leben und Produkte konsumieren werden [DSW, 2011]. Neben Grundnahrungsmitteln wird demnach auch der Verbrauch an industriellen Rohstoffen stark ansteigen. Untersuchungen der Firma SHELL [2009] erwarten, dass die weltweite Automobilflotte um den Faktor zwei bis drei steigen wird. Im Bereich der Hightech-Technologien wie der Mobilfunkbranche und Techniken der erneuerbaren Energien sind noch drastischere Wachstumsraten zu erwarten [WIRTSCHAFTS WOCHE, 2010]. Gleiches gilt für den globalen Energiehunger, der bis zum Jahr 2050 um 70 bis 100 % steigen soll [SPIEGEL ONLINE, 2007].

Die Folgen dieser Entwicklungen sind klar: Preise für mineralische und energetische Rohstoffe werden weiter steigen - ebenso der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß. In den nächsten Jahren bis Jahrzehnten kommt demnach eine große Aufgabe auf die Menschheit zu, die es zu lösen gilt. Alternative und nachhaltige Lösungen zu finden, wird damit immer dringender [SCHNEIDER, 2011].

Aus diesem Grunde wurde u.a. von der EU ein Konzept zur Ressourcenstrategie vorgelegt, das die Werhaftigkeit anthropogener Rohstoffläger in das Zentrum zukünftiger Entwicklungen rückt [DIE BUNDESREGIERUNG, 2007].

Neben primären anthropogenen Rohstofflägern, die sich in den meisten Fällen in einer aktiven Nutzung befinden, sind Hausmülldeponien ungenutzte Rohstoffdepots, die aufgrund fehlender Getrenntsammelsysteme und der damals gängigen Einstellung zu Abfällen über Jahrzehnte - mit Ressourcen - befüllt wurden. Zu den auf der Deponie Dyckerhoffbruch abgelagerten Abfällen gehören somit alle Stofffraktionen, wie sie auch heute in unseren Getrenntsammelsystemen anfallen, wobei sich die Zusammensetzung der unterschiedlichen Fraktionen wie Fe-Metalle, NE-Metalle, PPK, Kunststoffe, Organik, Mineralstoffe, Elektronikschrött etc. im Laufe der Nutzung entsprechend dem gesellschaftlichen Konsum- und Produktionsverhalten geändert hat.

Eine Vorbehandlung der Abfälle mit dem Ziel, die Rohstoffe von den ablagerungsfähigen Schadstofffraktionen zu trennen, fand aufgrund geringer Beseitigungs- und Rohstoffkosten nicht statt, was bedeutet, dass Hausmülldeponien wie die Deponie Dyckerhoffbruch anthropogene Rohstoffläger darstellen, deren Inhalt und Werhaftigkeit von der Nutzung und der Nutzungsdauer abhängig ist. Es wird erwartet, dass die Nutzung der in den Deponien enthaltenen Rohstoffe mit steigender Rohstoffknappheit wirtschaftlich erforderlich wird [GÄTH & NISPEL, 2011].

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass auch schadstoffhaltige Abfälle (z.B. Asbest, Batterien, Farben etc.) auf Hausmülldeponien eingelagert wurden, deren Verwertung oder Beseitigung bei der Nutzbarmachung der deponierten Rohstoffe umweltgerecht zu erfolgen hat. Zudem sind Kontaminationen anderer Stoffgruppen zu erwarten.

Neben dem positiven Effekt der Umweltentlastung führt der Deponierückbau zudem zur Gewinnung von neuem Ablagerungsvolumen oder neuen Wirtschaftsflächen.

Alternative zur Nutzbarmachung der im Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch lagernden Rohstoffe stellt die Nachsorge dar. Aufgrund des Alters des Deponieabschnitts I bzw. des damaligen Stands der Technik besteht weder eine heute gängige Basis- noch Oberflächenabdichtung des Deponiekörpers. Demnach fallen die jährlichen Überwachungs-, Pflege- und ggf. Sanierungskosten bei einem Abwägungsprozess besonders ins Gewicht. Zu beachten ist, dass eine Entlassung von Deponien aus der Nachsorgephase keinen konkreten Anforderungen unterliegt bzw. im Ermessensraum der jeweils zuständigen Behörde liegt. Derzeit existieren jedoch keine fundierten Aussagen über einen realistischen Nachsorgezeitraum. Abschließend ist zu erwähnen, dass der Deponiestandort Dyckerhoffbruch in absehbarer Zeit an seine Kapazitätsgrenzen stößt und somit neugewonnene Fläche eine kostbare Ressource darstellt.

Der Begriff des „landfill minings“ bzw. des „rohstofforientierten Deponierückbaus“ beschreibt eine Möglichkeit, diesen Problemstellungen entgegenzuwirken und derzeit ungenutzte Rohstoffpotenziale zu mobilisieren sowie lokalen Rohstoff- und Energieengpässen entgegenzuwirken. Die wirtschaftliche Nutzung der Rohstoff- und Energievorräte des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch hängt maßgeblich von

- der Entwicklung der Rohstoffverknappung und der Rohstoffmärkte,
- dem Rohstoffgehalt und der Rohstoffverteilung innerhalb des Deponiekörpers,
- der technischen und umweltverträglichen Machbarkeit,
- den ökologischen Wirkungen,
- den Kosten für mögliche Sanierungsmaßnahmen und die Nachsorge,
- den Kosten des Rückbaus und der Deponiegutaufbereitung sowie
- der Nachnutzung des gewonnenen Geländes

ab. Dementsprechend sind die Ziele dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wie folgt zu benennen:

- Untersuchung des Rohstoffpotenzials des Deponieabschnittes I der Deponie Dyckerhoffbruch nach Art, Quantität und Qualität der Ressourcen.
- Aufstellung und ökonomische sowie ökologische (CO<sub>2</sub>-/Energiebilanzierung) Bewertung verfügbarer Techniken, die für eine geeignete Aufbereitung deponierter Rohstoffe dienen könnten.
- Aufstellung der Kostenstruktur der Deponienachsorge bzw. Folgenutzung.
- Erstellung eines mathematischen Materialflussmodells, mit dessen Hilfe die Frage beantwortet werden soll, unter welchen Randbedingungen die umweltverträgliche Aufbereitung und Nutzung der deponierten Ressourcen wirtschaftlich ist.

Insgesamt wird hierdurch die ganzheitliche Bewertung des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch erreicht. Zudem ist es möglich, die Frage zu beantworten, unter welchen Randbedingungen die umweltverträgliche Aufbereitung und Nutzung der deponierten Ressourcen wirtschaftlicher sowie nutzeneffizienter, als die alternativ notwendige Deponienachsorge, sein könnte.

## 2 Stand der Forschung

---

*Wie bereits früh und heute wieder erkannt:  
„Abfall ist Rohstoff am falschen Ort!“*

---

Der Prozess des landfill minings kam bereits vor mehr als 50 Jahren erstmals zum Einsatz. Das 1953 realisierte Projekt des Rückbaus einer Deponie der Stadt Tel Aviv (Israel) belegt zudem die Wirtschaftlichkeit solcher Vorhaben [SHUVAL, 1958]. Einer der größten Verfechter des landfill minings dieser Zeit war Professor McGauhey der Universität Kalifornien in Berkeley, USA. Bereits in den sechziger Jahren wies er auf Fachtagungen darauf hin, dass Deponien zukünftige Rohstofflagerstätten darstellen, die es zu nutzen gilt [SAVAGE ET AL., 1993].

Verbesserte Rückgewinnungstechnik und die Verknappung von Deponiekapazitäten ließen das Interesse am landfill mining in den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts wachsen. Das Hauptziel, welches bei diesen Vorhaben verfolgt wurde, lag in der Gewinnung von Abfällen zur Brennstoffnutzung sowie in der gleichzeitigen Schaffung neuen Deponievolumens. Die stoffliche Verwertung bzw. die Abschöpfung von Rohstoffen spielte zum damaligen Zeitpunkt eine untergeordnete Rolle [HOGLAND ET AL., 2004].

In Europa und Asien gewann das landfill mining Mitte der achtziger Jahre ebenfalls an Bedeutung. In Osteuropa, Indien und China wurden vorwiegend Deponien der Eisen- und Stahlindustrie rückgebaut, um die darin enthaltenen Metalle zu gewinnen [KRUG, 2008]. Erste Erfahrungen beim Rückbau von Siedlungsabfalldeponien wurden in Deutschland im Jahr 1993 mit der Durchführung des Pilotprojekts auf der Deponie Burghof gemacht [HOGLAND ET AL., 2004].

Die in der Literatur beschriebenen Einzelprojekte des landfill minings zeigen mit wenigen Ausnahmen positive Ergebnisse hinsichtlich des Kosten-/Nutzenverhältnisses auf. Anzumerken ist, dass es sich bei den meisten Rückbauvorhaben um unabhängige Einzelprojekte handelte, bei denen die Initiative für das landfill mining vorwiegend von regionalen Bedürfnissen ausging. Unerwünschte, störende und umweltbelastende Deponien sollten durch Rückbau kostengünstig oder sogar gewinnbringend entfernt werden. Mittlerweile haben auch verstärkt Privatunternehmen das Ressourcenpotenzial von Deponien erkannt und sind an deren gewinnbringender Bewirtschaftung interessiert [VAN DER ZEE ET AL., 2004].

In diesem Zusammenhang stellt sich Wissenschaft und Wirtschaft die Frage, welche Deponien zu welchem Zeitpunkt profitabel genutzt werden können. Laut KURIAN ET AL. [2003] ist der Erfolg des landfill minings von folgenden Einflussgrößen abhängig:

- Zusammensetzung des abgelagerten Abfalls
- Einbaubedingungen und historische Betriebsführung
- Zersetzungsgrad des Abfalls
- vorhandener Markt für die gewonnenen Produkte.

Allein in Deutschland besteht aufgrund der historischen Entwicklungen in der Abfallwirtschaft ein enormes Angebot an potenziellen Rückbauobjekten. Nach VAN DER ZEE ET AL. [2004] kann dabei die Abschätzung des Rohstoffpotenzials über einen „step-wise“ Ansatz erfolgen. Dieser beruht auf einer Kosten/Nutzen-Analyse, welche die zu erwartenden Kosten und den versprochenen Nutzen in Abhängigkeit regionaler Gegebenheiten definiert und gewichtet.

Eine Auflistung der potenziellen Kosten und des potenziellen Nutzens von Deponierückbauvorhaben sowie einen schrittweisen Projektplan zur Vorgehensweise bei Rückbauprojekten gibt ebenso die UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY in ihrem Bericht „Landfill Reclamation“ [1997] an.

Der Projektplan sieht die in Abbildung 1 enthaltenen Teilschritte vor [EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997].

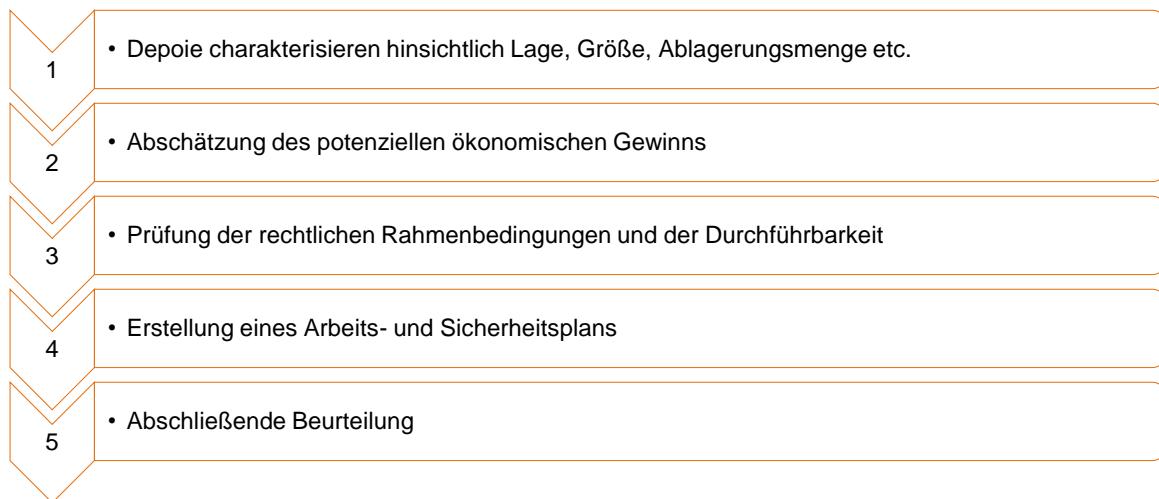


Abbildung 1: Teilschritte der Deponieerkundung in Hinblick auf deren Eignung zum Lanfill Mining [EPA - United States Environmental Protection Agency, 1997]

Deponien sind geprägt von räumlichen, zeitlichen sowie gesellschaftlichen Entwicklungen [YOKOYAMA ET AL., 2006]. Sie stellen Haufwerke unterschiedlicher Zusammensetzung und unterschiedlichen Alters dar [WIEMER ET AL., 2009]. Galten sie noch vor wenigen Jahrzehnten als stinkende und Gewässer belastende Abfallberge, so hat sich dieses Bild durch den Einsatz moderner Deponietechnik mittlerweile gewandelt. Proportional zum hohen technischen Einsatz ist der Aufwand für Überwachung, Abwasseraufbereitung und Instandsetzung stark gestiegen. Eine Reduzierung der Nachsorgezeit und –kosten kann erzielt werden, wenn die in Deponien enthaltenen „Schadstoffe“ vermehrt als Rohstoffe genutzt werden [BAFU - BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2006]. In Fachkreisen wird dies als „landfill mining“ bezeichnet.

Nach BOTHMANN ET AL. [2002] wird unter Deponierückbau die vollständige oder teilweise Herausnahme von eingelagerten Abfällen aus einer Deponie verstanden. Dabei kann eine nachgeschaltete Behandlung des Deponiegutes stattfinden. Es werden die Ziele

- der Volumenreduzierung,
- der Reduzierung des Flächenbedarfs,
- der Inaktivierung des reaktiven Abfallkörpers,
- der Rückgewinnung von Materialien,
- die Verlängerung der Nutzungsdauer sowie
- die Sanierung von Altlasten

verfolgt [BRAMMER ET AL., 1997].

„Deponierückbau hat Zukunft, wenn sich herausstellt, dass die Nachsorge der mit unbehandelten Abfällen gefüllten Deponien länger dauert und teurer wird als ursprünglich erwartet war. Insbesondere Deponien mit hohen Nachsorgekosten z.B. Grubendeponien, die durch Pumpen entwässert werden müssen, Deponien mit aufwendigen Bauwerken im Deponiekörper (Gänge, Schächte) oder Deponien mit Schlitzwandabdichtung bieten sich besonders für eine Rückbaumaßnahme an. Wenn dann noch, mit schwindenden Müllmengen, Kapazitäten in thermischen Anlagen frei werden, kann Altmüll zur Auslastung der Anlagen beitragen“ [BOTHMANN ET AL., 2002]. Zudem bietet die gewonnene Fläche neuen Raum für Deponiekapazitäten oder eine alternative Nutzung.

Landfill mining ist als ein Prozess definiert, bei dem offene oder bereits geschlossene Deponien unter der Verwendung konventioneller Tagebaumethoden abgegraben werden und der entnommene Abfall anschließend einer Aufbereitung zugeführt wird. Je nach Anzahl und Qualität der gewünschten Recyclingprodukte können bei der Aufbereitung unterschiedliche Verfahrenskomponenten zum Einsatz kommen. Typisch sind vorgeschaltete Siebeinrichtungen, die zur Abtrennung von bodenähnlichen Materialien dienen. Eine Magnetabscheidung gewinnt die eisenhaltigen Metalle zurück. Zudem ermöglicht Luftklassifikation und das Anlegen elektrischer Felder die Separation von Nicht-Eisenmetallen und Kunststoffen.

Auf diese Weise können aus eingelagerten Abfällen nachträglich Metalle, Glas, Kunststoffe, Holz und Bodenmaterial zurück gewonnen werden [VAN DER ZEE ET AL., 2004]. Die derzeit erzielbaren Rückgewinnungsquoten liegen bei 85 bis 95 % für Bodenmaterial, 70 bis 90 % für Metalle und 50 bis 75 % für Kunststoffe. Die Reinheitsgrade betragen 90 bis 95 % für Bodenmaterial, 80 bis 85 % für Metalle und 70 bis 90 % für Kunststoffe. Höhere Rückgewinnungsquoten und Reinheitsgrade erfordern generell eine komplexere Aufbereitungstechnik [CARDIFF UNIVERSITY, 2004].

## 2.1 Rechtliche Grundlagen

Derzeit ist der Deponierückbau in keiner Rechtsvorschrift als direkter Tatbestand geregelt. Generell können Schwierigkeiten bei der Durchführung von Sanierungs- und Deponierückbauvorhaben durch frühe Absprache mit den zuständigen Behörden über die notwendigen Genehmigungsunterlagen vermieden werden [BOTHMANN ET AL., 2002].

„Für den Rückbau einer Deponie kommen das abfallwirtschaftliche oder das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren oder beide Verfahren in Frage, da der Abfall in Sortier-, Rotte- oder thermischen Anlagen behandelt wird. Bezugsobjekt der Zulassung ist sowohl nach Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz als auch nach Bundesimmissionsschutzgesetz die Errichtung oder Änderung einer Anlage“ [FINCK, 1999].

Grundsätzlich gelten beim Rückbau von Deponien die Regelungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes, da Deponien Anlagen sind, die nach den Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes errichtet und mit Abfällen im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes verfüllt werden bzw. wurden. Des Weiteren unterliegen Abfälle, die nicht nach dem Stand der Technik behandelt und entsorgt wurden, weiterhin dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KOCH & HARMS-KREKELER, 1997].

Deponierückbauvorhaben sind in der Regel eine wesentliche Änderung des Deponiebetriebs und müssen daher nach § 31 Absatz 3 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes [1994] bzw. aktuell nach § 35 Absatz 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [2012] genehmigt werden [HARMS-KREKELER, 1996; KOCH & HARMS-KREKELER, 1997; DIECKHOFF & PRACK, 1995; DIECKHOFF & PRACK, 1994]. Hierin heißt es,

*(3) § 74 Absatz 6 des Verwaltungsverfahrensgesetzes gilt mit der Maßgabe, dass die zuständige Behörde nur dann an Stelle eines Planfeststellungsbeschlusses auf Antrag oder von Amts wegen eine Plangenehmigung erteilen kann, wenn*

*1. die Errichtung und der Betrieb einer unbedeutenden Deponie beantragt werden, soweit die Errichtung und der Betrieb keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Absatz 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut haben können, oder*

*2. die wesentliche Änderung einer Deponie oder ihres Betriebes beantragt wird, soweit die Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Absatz 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut haben kann, oder*

3. die Errichtung und der Betrieb einer Deponie beantragt werden, die ausschließlich oder überwiegend der Entwicklung und Erprobung neuer Verfahren dient, und die Genehmigung für einen Zeitraum von höchstens zwei Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage erteilt werden soll; soweit diese Deponie der Ablagerung gefährlicher Abfälle dient, darf die Genehmigung für einen Zeitraum von höchstens einem Jahr nach Inbetriebnahme der Anlage erteilt werden. Die zuständige Behörde soll ein Genehmigungsverfahren durchführen, wenn die wesentliche Änderung keine erheblichen nachteiligen Auswirkungen auf ein in § 2 Absatz 1 Satz 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung genanntes Schutzgut hat und den Zweck verfolgt, eine wesentliche Verbesserung für diese Schutzgüter herbeizuführen. Eine Plangenehmigung nach Satz 1 Nummer 1 kann nicht erteilt werden

4. für Deponien zur Ablagerung von gefährlichen Abfällen,

5. für Deponien zur Ablagerung von nicht gefährlichen Abfällen mit einer Aufnahmekapazität von 10 Tonnen oder mehr pro Tag oder mit einer Gesamtkapazität von 25. 000 Tonnen oder mehr; dies gilt nicht für Deponien für Inertabfälle.

(4) § 15 Absatz 1 Satz 1 bis 4 und Absatz 2 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes gilt entsprechend. Satz 1 findet auch auf die in § 39 genannten Deponien Anwendung.

(5) Für nach Absatz 4 anzeigenbedürftige Änderungen kann der Träger des Vorhabens eine Planfeststellung oder eine Plangenehmigung beantragen.

Grundsätzlich gilt, dass bei separater Lagerung und Behandlung des rückgebauten Deponieguts, sprich es werden Anlagen zur Aufbereitungen an anderer Stelle errichtet oder genutzt, eine Genehmigung dieser Anlagen nach Bundesimmissionsschutzverordnung notwendig werden [KRUG, 2009].

Wie § 35 Absatz 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [2012] zu entnehmen ist, liegt es im Ermessen der zuständigen Behörde, anstelle eines Planfeststellungsverfahrens ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren ohne Beteiligung der Öffentlichkeit vorzunehmen. Hierdurch entfällt zudem die nach Planfeststellungsverfahren geforderte Umweltverträglichkeitsprüfung. Voraussetzung einer solchen Einzelfallentscheidung ist, dass diese keine erheblichen Auswirkungen auf die in § 2 Absatz 1 Satz 2 des Gesetzes über Umweltverträglichkeitsprüfung genannten Schutzgüter hat.

Prinzipiell führt der Deponierückbau zu einer Verbesserung der Situation der Schutzgüter, daher sollte im Regelfall eine abfallrechtliche Genehmigung anstelle eines Planfeststellungsverfahrens ausreichen [DIECKHOFF & PRACK, 1994]. Einen Überblick zum Entscheidungsmodell beim Deponierückbau gibt Abbildung 2.

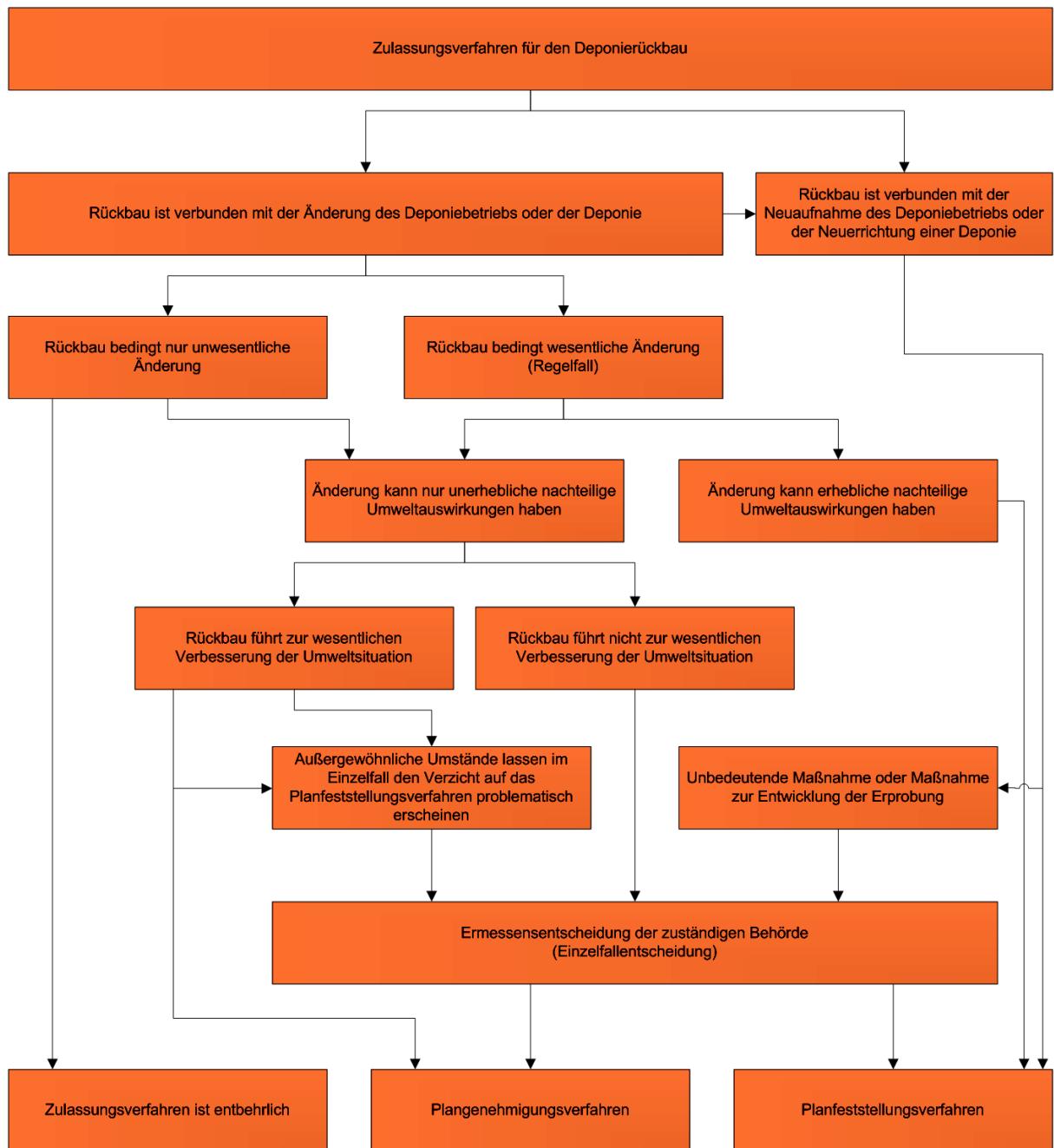


Abbildung 2: Entscheidungsmodell über das Zulassungsverfahren beim Deponierückbau [Finck, 1999]

## 2.2 Schutzzüge

Im Rahmen des Rückbauvorhabens einer Deponie können sich Auswirkungen auf verschiedene Schutzzüge ergeben. Diese können sowohl negativ als auch positiv ausfallen. Unter Anwendung eines Genehmigungsverfahrens müssen diese Umweltauswirkungen beschrieben, analysiert und bewertet werden. Weiterhin ist zu prüfen, ob für das Rückbauvorhaben eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchgeführt werden muss.

Schutzzüge, die von eventuellen Auswirkungen betroffen sein können, werden nachfolgend aufgelistet, die möglichen Ursachen der für eine Einwirkung auf das Schutzzug beschrieben und Maßnahmen genannt, die zur Verhinderung dessen beitragen.

### **2.2.1 Schutzgut Wasser**

Als wesentlicher Bestandteil des Lebens, wird bei einer UVP eine mögliche Gefährdung durch Stoffeinträge und ein sparsamen Umgang mit dem Schutzgut Wasser geprüft. Eine mögliche Gefährdung besteht während eines Deponierückbaus durch die Verschleppung von Abfallstoffen und eine damit einhergehende eventuelle Kontamination von Oberflächenwasser. Grund hierfür sind in erster Linie Verschleppungen durch Fahrzeuge bzw. Fahrzeugbereifung, die in Verbindung mit Niederschlägen zu Kontaminationen des Oberflächenwassers - nicht nur am Rückbauort selbst - führen können. Um dies zu verhindern gilt es geeignete Maßnahmen durchzuführen. Hierbei sind Vorrichtungen für die Fahrzeug- und/oder Reifenwäsche mit anschließender Fassung und Behandlung des Waschwassers zu nennen.

Eine weitere Gefährdung des Schutzgutes Wasser kann sich durch die Freisetzung von Deponiesickerwasser während der Rückbaumaßnahmen ergeben. Durch in der Deponie eventuell vorhandene Sickerwasserstauhorizonte, kann es beim An-/Abgraben dieser Schichten zu einem Auslaufen des Sickerwassers und damit zu einer erhöhten Menge an Sicherwasser insgesamt kommen. Um eine Kontamination von unbelastetem Wasser zu verhindern, gilt es geeignete Rückhalte-, Abpump- und Erfassungsmöglichkeiten bereitzustellen. Das dort anfallende Sickerwasser kann anschließend der üblichen Sickerwasseraufbereitung zugeführt werden.

### **2.2.2 Schutzgut Boden**

Der Boden als weitgehend nicht erneuerbare Ressource und wesentliches Element einer nachhaltigen Entwicklung stellt ein überaus wertvolles Gut dar, was es vor negativen Auswirkungen durch anthropogene Einwirkungen zu schützen gilt.

Im Rahmen eines Deponierückbaus sind mögliche Verwehungen von leichten Materialien wie Kunststofffolien und Papier, welche beim Rückbau ausgegraben werden, zu beachten bzw. als Gefährdung einzustufen. Um dies zu verhindern, bietet sich die Aufstellung von Fangnetzen im Bereich der Rückbauarbeiten an. Daneben ist auch hier, ebenso wie beim Schutzgut Wasser, eine Verschleppung und Kontamination des Bodens durch Fahrzeugbereifung zu beachten. Reifenwaschanlagen und die regelmäßige Reinigung der Fahrwege stellen hierbei geeignete Sicherungsmaßnahmen dar.

Kontaminationen des Bodens außerhalb des Deponiestandorts sind in der Regel nicht zu befürchten, da die gewonnenen Stofffraktionen im Normalfall auf im Straßenverkehr zugelassene LKW umgeladen werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Verladestelle entsprechend sauber ist.

### **2.2.3 Schutzgut Luft**

Umweltauswirkungen auf das Schutzgut Luft können sich u.a. in der Luftqualität, der Beeinträchtigung der lufthygienischen Situation und der Änderung der lokalklimatischen Bedingungen widerspiegeln.

Im Rahmen des Rückbauverfahrens ist, wie bei fast allen Baumaßnahmen, mit einer erhöhten Staubbildung zu rechnen. Die abgegrabenen Materialien trocknen durch den Einfluss der Sonne und des Windes aus und können so zu einer Staubbela stung im Gebiet der Rückbaumaßnahmen führen. Zur Verhinderung dessen bieten sich zum einen aktive Handlungsoptionen wie beispielsweise die Bewässerung der Materialien, Nebelkanonen oder der Einsatz von Eisenchloridsalzen an. Zum anderen tragen auch optimierte Abbaukonzepte, die eine geringe Lagerungszeit der rückgebauten Abfälle vorsehen, zu einer verminderten Staubbildung bei. Gleichzeitig erweisen sich diese Maßnahmen auch als effektive Verfahren, um eine mögliche Keimemission weitestgehend zu unterbinden.

Eine weitere mögliche Gefährdung des Schutzgutes Luft ist etwaiges noch in der Deponie vorhandenes Restgas. Durch die Abgrabung und Umlagerung der Abfälle kann noch vorhandenes Deponiegas freigesetzt werden und in die Atmosphäre entweichen. Vor einer Rückbaumaßnahme gilt es daher in Voruntersuchungen mögliche Gasgefährdungen zu ermitteln und je nach Untersuchungsergebnis entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass durch eine optimierte Stabilisierung des Deponiekörpers deutliche Reduktionen der Restgasmenge und somit des Gefährdungspotenzials erreicht werden können.

Neben Staub- und Gasfreisetzung besteht auch die Möglichkeit, dass bei Rückbaumaßnahmen Geruchsemissionen entstehen können. Diese treten vor allem im direkten Umfeld der Baumaßnahmen und am Verladeplatz auf. Allerdings haben Untersuchungen im Rahmen großtechnischer Rückbaumaßnahmen einer Deponie gezeigt, dass es während dieses Vorhabens zu keiner nennenswerten Geruchsbelastung kam. Im Vergleich zu frisch abgelagertem Hausmüll ist demnach mit einer um den Faktor 5 - 8 geringeren Geruchsfreisetzung zu rechnen (Rettenberger, 1998). Trotz allem sollte Vorsorgemaßnahmen für mögliche, unvorhersehbare Geruchsemissionen getroffen werden. Dazu kann im Vorfeld der Arbeiten ebenfalls eine Vorabbelüftung der abzubauenden Abfälle durchgeführt werden. Eine Reduktion der Geruchsbelastung ist ebenso durch optimierte Abbaukonzepte, die eine schnelle Weiterverarbeitung eventuell geruchsbildender Abfälle vorsehen, zu erreichen.

## 2.2.4 Schutzgut Flora und Fauna

Im Rahmen von Rückbaumaßnahmen auf Deponien müssen auch die Schutzgüter „Tier und Pflanze“ berücksichtigt werden. Rekultivierte Deponiestandorte stellen in einigen Fällen besonderen Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten dar. Mit dem Rückbau der Deponie ist sowohl ein Verlust, als auch - je nach angestrebter späterer Nutzung - ein Gewinn an Lebensraum für Flora und Fauna zu erwarten.

Vor einer Rückbaumaßnahme gilt es, floristische und faunistische Gutachten zu erstellen und im Falle des Vorkommens schützenswerter Pflanzen- oder Tierarten geeignete Schutzmaßnahmen mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Dies gilt insbesondere für den Teil der Deponie Dyckerhoffbruch, der als Ausgleichsfläche und Rückzugsgebiet für die Tier- und Pflanzenwelt ausgewiesen ist. Diese schon lange rekultivierten Flächen beherbergen verschiedenste Vogelarten wie den Weißstorch, den Graureiher, den Schwarzmilan, den Habicht, den Mäusebussard, den Pirol oder die Nachtigall. Daneben sind insbesondere auch die zwölf Arten der Roten Liste der in Hessen vom Aussterben bedrohten Vögel zu nennen. Dazu zählen u.a. das Schwarzkelchen, der Steinschmätzer und der Eisvogel (ELW, 2013). Die Lebensräume für diese Arten wurden zum Teil extra aufgebaut und bedürfen einer regelmäßigen Pflege durch den Mensch.

Bei Rückbaumaßnahmen in diesem Bereich gilt es Maßnahmen zu entwickeln, die diese Tierarten entweder schützen oder aber die Möglichkeit einer Umsiedlung dieser Arten in Betracht ziehen, was den Bau geeigneter Ausgleichsflächen und Biotope außerhalb des Deponiebereiches nach sich ziehen würde.

Untersuchungen auf Altdeponien, die keiner regelmäßigen Pflege unterworfen sind, zeigen, dass diese eher selten aus vegetationskundlicher Sicht einen hohen Beitrag zum Artenschutz leisten. Der gesamte Artenbestand des Untersuchungsraums ist in der Regel geprägt und bestimmt von der im Rahmen der Rekultivierung erfolgten Ansaat und teilweisen Pflanzung. Die teilweise nachgewiesenen seltenen und gefährdeten Arten entstammten vor allem der kurzlebigen Ruderal- und Ackerunkrautflora, sind eher konkurrenzschwach und können offene Böden schnell besiedeln. Sie werden jedoch spätestens nach einigen Jahren verdrängt, wenn sich die Vegetationsdecke der ausdauernden Arten schließt. Die dann auf Dauer verbleibenden Waldbestände sind nur dann wertvoll für den Naturschutz, wenn sie sich lange Zeit möglichst ungestört entwickeln können (Wattendorf, 2001). Ob dies auf Deponiestandorten möglich ist, ist

bis heute nicht eindeutig erwiesen. Aus vegetationskundlicher Sicht ist es fraglich, ob diese Wälder in überschaubaren Zeiträumen überhaupt eine Bedeutung für den Artenschutz erreichen können.

Auch das faunistische Artenspektrum auf nicht regelmäßig durch den Menschen gepflegten Deponiestandorten ist meist sehr begrenzt. Insbesondere nah am Boden lebende Tierarten wie Ameisen, Reptilien und kleine Nager finden sich auf Deponiestandorten selten. Zu begründen ist dies mit den ökotoxikologisch wirkenden Methanausgasungen der Deponie in Verbindung mit dem geringen Sauerstoffgehalt des Bodens (Bierschenk, 2010), insbesondere in den ersten Jahren nach der Rekultivierung.

## 2.2.5 Schutzgut Landschaftsbild

Jede anthropogene Baumaßnahme bedeutet einen Eingriff in die Natur und damit eine Veränderung des Landschaftsbildes. Im Rahmen des Rückbaus einer Deponie ist es von daher unerlässlich, im Vorhinein die Auswirkungen der Maßnahme auf das Schutzgut Landschaftsbild zu ermitteln.

Da der Begriff Landschaft oder Landschaftsbild sehr subjektiv geprägt ist, gilt es objektive Bewertungskriterien zu nutzen, um die Auswirkungen auf dieses Schutzgut abschätzen zu können. Folgende objektivierbare Größen werden dabei zur Bewertung empfohlen (Knoll et al., 2008).

- **Zerschneidung der Landschaft**

Mit Hilfe dieses Bewertungskriteriums wird bemessen, inwieweit die Raumstruktur durch den geplanten Eingriff verändert wird. Als starke Zerschneidung der Landschaft gilt eine vollkommene Sichtbarriere. Aber auch schon leichte Veränderungen in der Sichtbeziehung sind zu berücksichtigen.

- **Flächenverlust**

Als messbare Größe ist hierbei die Flächeninanspruchnahme durch das geplante Rückbauvorhaben heranzuziehen. Als Flächenverlust wird die Fläche bezeichnet, die nachhaltige Einwirkungen auf das Erscheinungsbild der Landschaft bewirkt. Diese gehen einher mit einem Verlust an Naturnähe, Eigenheit und Vielfalt des Landschaftsbildes.

- **Verlust an Vielfalt**

Je stärker die Vielfalt eines Geländes dem Betrachter erscheint, umso erlebnisreicher wird das Landschaftsbild empfunden. Geprägt wird diese Vielfalt durch den Reichtum an Struktur, Nutzungsformen und Landschaftselementen.

Es ist wichtig, den Begriff Vielfalt in diesem Kontext genau zu definieren. Eine vielfältige Landschaft ist nicht von vorne herein als positiv zu bewerten. Sie muss im Zusammenhang mit den bestehenden Raumdimensionen und Raumelementen, -proportionen und deren Beziehung untereinander betrachtet werden.

- **Verlust an Naturnähe**

Je geringer der anthropogene Einfluss in einer Landschaft ist, desto größer ist die Naturnähe. Das Vorhandensein einer großen Anzahl an natürlichen bzw. naturnahen Elementen oder umgekehrt das Fehlen von als typisch anthropogen identifizierbaren Elementen sind dabei als messbare Größen zu verwenden.

- **Verlust an Eigenart**

Ein Verlust an Eigenart geht mit dem Beseitigen charakteristischer, eigenartsprägender Landschaftselemente und dem Einbringen landschaftsfremder Elemente einher. Durch die Definition eines Bezugsraumes, in dem vergleichbare Landschaftsbilder vorliegen, wird die

Eigenart einer Landschaft bestimmt. Sie beinhaltet sowohl die Wiedererkennbarkeit als auch die Repräsentativität der Landschaft. Gleichzeitig bezeichnet die Eigenart die Wesensart einer Landschaft, die sich im Laufe der Geschichte herausgebildet hat und deren Einmaligkeit nur in diesem örtlichen Zusammenhang erkennbar ist.

#### - **Ästhetischer Funktionsverlust**

Das Kriterium des ästhetischen Funktionsverlustes eines Landschaftsbildes ist qualitativ und quantitativ zu bewerten. Über die Eingriffserheblichkeit wird der qualitative ästhetische Funktionsverlust bestimmt. Die Eingriffserheblichkeit wird definiert durch Eingriffsintensität und Empfindlichkeit der Landschaft. Je mehr die Charakteristik des Eingriffsobjekts (z.B. Bauhöhe, Material) der Charakteristik der Landschaft widerspricht, umso höher ist die Eingriffsintensität der Maßnahme. Die Empfindlichkeit der Landschaft gegenüber anthropogenen Eingriffen ergibt sich aus ihrer visuellen Verletzlichkeit (wegen ihrer Einsehbarkeit), ihrer Schutzwürdigkeit und ihrem ästhetischen Eigenwert. Aus der Sichtbarkeit des Eingriffs in die Tiefe der Landschaft (Einwirkungsbereich) ergibt sich dagegen der quantitative ästhetische Funktionsverlust. Insgesamt ist der ästhetische Funktionsverlust durch einen Eingriff umso größer, je größer die Eingriffserheblichkeit (qualitativer Funktionsverlust) und je größer der Landschaftsbereich (Flächenumfang) ist, von dem aus der Eingriff wahrzunehmen ist (quantitativer Funktionsverlust).

### **2.2.6 Sonstige Schutzgüter**

Sowohl durch Lärm als auch durch Licht können sich bei Rückbaumaßnahmen einer Deponie Umweltauswirkungen auf weitere Schutzgüter ergeben. Lärm, verursacht durch die Abbauarbeiten und den Abtransport der Abfälle führt im Zeitraum der Maßnahme zu einer erhöhten Lärmbelastung. Um diese zu reduzieren, sollten die Kapazitäten der Fahrzeuge, welche die Abbruchmaterialien abtransportieren, möglichst effizient und vollständig ausgenutzt werden. Dadurch kann gewährleistet werden, dass keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt und Leerfahrten ausgeschlossen werden. Insbesondere die akustischen Signale, welche die Erdbaumaschinen wie Bagger und Radlader beim Zurücksetzen von sich geben, können als sehr störende Lärmquelle empfunden werden. Hierbei besteht die Option diese gegen optische Warneinrichtungen auszuwechseln.

Für den Fall, dass die Arbeiten auch bei Dunkelheit fortgesetzt werden, erweisen sich die starken Baustellenbeleuchtungen als eine etwaige Störquelle. Es sollte von daher darauf geachtet werden, dass die Ausleuchtung ausschließlich den Bereich der gerade betreffenden Abbrucharbeiten umfasst und auch von weit her nicht als blendend oder störend empfunden wird.

## **2.3 Arbeitsschutz**

Das Arbeiten mit möglicherweise kontaminierten bzw. gesundheitsgefährdenden Stoffen stellt besondere Ansprüche an den Arbeitsschutz. Nachfolgendes ist in diesem Kontext in Bezug auf einen Deponierückbau zu berücksichtigen sowie abzuwägen.

### **2.3.1 Rechtliche Grundlagen und relevante Rahmenbedingungen**

Im Rahmen eines Deponierückbaus sind im Bereich des Arbeitsschutzes verschiedene gesetzliche Grundlagen und technische Regelwerke zu beachten. Die folgende Auflistung benennt die wichtigsten Gesetze und technischen Regeln, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## Gesetze und Verordnungen

---

- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)
- Biostoffverordnung (BioStoffV)
- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
- Baustellenverordnung (BaustellV)
- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)

## Technische Regeln

---

- Regel der gesetzlichen Unfallversicherung: Deponien (GUV-R 127)
  - Berufsgenossenschaftliche Regel: Kontaminierte Bereiche (BGR 128)
  - LAGA Mitteilung 23: Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle
  - Technische Regel für Gefahrstoffe 517: Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen Rohstoffen und daraus hergestellten Zubereitungen und Erzeugnissen (TRGS 517)
  - Technische Regeln für Gefahrstoffe 519: Asbest-, Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten (TRGS 519)
  - Technische Regel VDI 3860, Blatt 1: Messen von Deponiegas – Grundlagen (VDI 3860-1)
  - Berufsgenossenschaftliche Information: Merkblatt für Fahrerkabinen mit Anlagen zur Atemluftversorgung auf Erdbaumaschinen und Spezialmaschinen des Tiefbaus (BGI 581)
  - Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe 214: Abfallbehandlungsanlagen einschließlich Sortieranlagen in der Abfallwirtschaft (TRBA 214)
- (Quelle: DWA-Themen)

Vor Beginn eines Rückbaus sind vom Auftraggeber bzw. Bauherrn Informationen über den in der Deponie enthaltenden Abfall einzuholen. Für den Fall, dass die vorhandenen Betriebsaufzeichnungen als Datengrundlage unzureichend sind, um das Abfallinventar genau bestimmen zu können, sind Probeschürfungen und Probebohrungen am Deponiekörper durchzuführen.

Ausgehend von diesen Untersuchungen gilt es eine Gefährdungsabschätzung durchzuführen und das Gefahrstoffpotenzial sowie die Möglichkeit des Auftretens biologischer Arbeitsstoffe zu bestimmen. Nach § 7 GefStoffV und § 8 BioStoffV ist beim Vorhandensein entsprechender Gefahrstoffe eine Gefährdungsbeurteilung der Arbeitsplätze durchzuführen (vgl. § 5 ArbSchG) und damit kontaminierte und nicht kontaminierte Bereiche aufzuzeigen.

### 2.3.2 Arbeits- und Sicherheitsplan

Auf der Datengrundlage der Gefährdungsabschätzung und der Erkundungen bezüglich der Deponiekörperzusammensetzung ist ein Arbeits- und Sicherheitsplan zu erstellen, der sowohl Bestandteil der Ausschreibungen zum Rückbauprojekt sein soll als auch während der Umsetzung der Baumaßnahme allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden muss.

Weiterhin ist der Auftraggeber gemäß BGR 128 Ziff. 5 verpflichtet, insofern die Baumaßnahmen von mehreren Auftragnehmern durchgeführt werden, eine geeignete Person, mit entsprechender Sachkunde als Sicherheits- und Gesundheitskoordinator einzustellen. Dieser soll die lückenlose sicherheitstechnische Überwachung und Koordinierung der Arbeiten sicherstellen.

Bei der Erarbeitung des Arbeits- und Sicherheitsplans gilt es die Bestimmungen des § 4 ArbSchG zu berücksichtigen. Folgende Angaben sind für die Erstellung des Planes von besonderer Relevanz.

- Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung des Deponiekörpers und der Gefahrenanalyse
  - gewähltes Rückbauverfahren mit Angabe der Arbeitsschritte, Tätigkeiten und Maschineneinsätze
  - Gefährdungsbeurteilung der Arbeitsplätze
  - Maßnahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes
    - Festlegung der persönlichen Schutzausrüstung
    - Technische Schutzmaßnahmen (Schutzbelüftungsanlagen, Staubbekämpfung etc)
    - Einsatz von Schwarz-Weiß-Bereichen
  - Messkonzept zur Überwachung der Arbeitsplatzbedingungen
    - Festlegung von Schutzmaßnahmen bei Überschreitung von zu definierenden Schwellenwerten
    - Festlegung der Messgeräte und –verfahren zur Messung explosiver und/oder toxischer Gase in der Atmosphäre
  - Arbeits- und Betriebsanweisungen
- (Quelle: DWA-Themen)

### **2.3.3 Arbeitsschutz in kontaminierten Bereichen**

Nach BGR 128, Ziff. 2 Nr. 3 sind kontaminierte Bereiche als Standorte definierte, die über eine gesundheitlich unbedenkliche Grundbelastung hinaus mit Gefahrstoffen oder biologischen Arbeitsstoffen verunreinigt sind. Als Gefahrstoffe gelten Stoffe, die gefährliche Eigenschaften entsprechend §3a Abs. 1 Chemikaliengesetz aufweisen und/oder Stoffe im Sinne des §19 Abs. 2 Nr. 1-4 des Chemikaliengesetzes (vgl. BGR 128, Ziff. 2 Nr. 4). Als biologische Arbeitsstoffe werden laut § 2 Biostoffverordnung Mikroorganismen bezeichnet, die beim Menschen Infektionen, toxische oder sensibilisierende Wirkungen hervorrufen können.

Neben der während der Errichtung einer Deponie und des Deponiebetrieb in Bezug auf den Arbeitsschutz geltenden GUV-R 127/BGR 127 „Deponien“, sollten bei Deponierückbaumaßnahmen weitere gesetzliche Grundlagen zum Tragen kommen. In Abhängigkeit von der Abfallzusammensetzung und des Deponietyps sind dabei sowohl die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) als auch die BGR 128 „Kontaminierte Bereiche“ zu berücksichtigen. Diese sollten insbesondere dann Anwendung finden, wenn:

- mit dem Vorhandensein biologischer Arbeitsstoffe zu rechnen ist.
- keine vorhergehende Belüftung des Deponiekörpers stattgefunden hat und es dadurch zum Auftreten von Deponegas oder anderer toxischer Gase kommen kann.
- die Gefahr besteht, dass im Abfallinventar gesundheitsgefährdende Fasern wie Mineralfasern oder Asbest freigesetzt werden können (vgl. Anhang III, Ziffer 2.3 GefStoffV).
- beim Rückbau möglicherweise weitere Gefahrstoffe vorhanden sein können, die Rückstände wassergefährdender Stoffe, Schleifstäube oder Reste von Pestiziden enthalten.

### **2.3.4 Arbeitsschutz in nicht kontaminierten Bereichen**

Bei Rückbaumaßnahmen von nicht kontaminierten Deponien wie Schlacke- oder Erddeponien ist entsprechend § 2 Abs. 2 BaustellV ein Sicherheits- und Gesundheitsplan zu erstellen.

## 2.4 Technische Möglichkeiten der Aufbereitung

Im Rahmen von Pilotprojekten haben sich unterschiedliche Verfahrensabläufe der Deponiegutaufbereitung bewährt. Einen Überblick über die grundlegenden Verfahrenselemente gibt Abbildung 3.

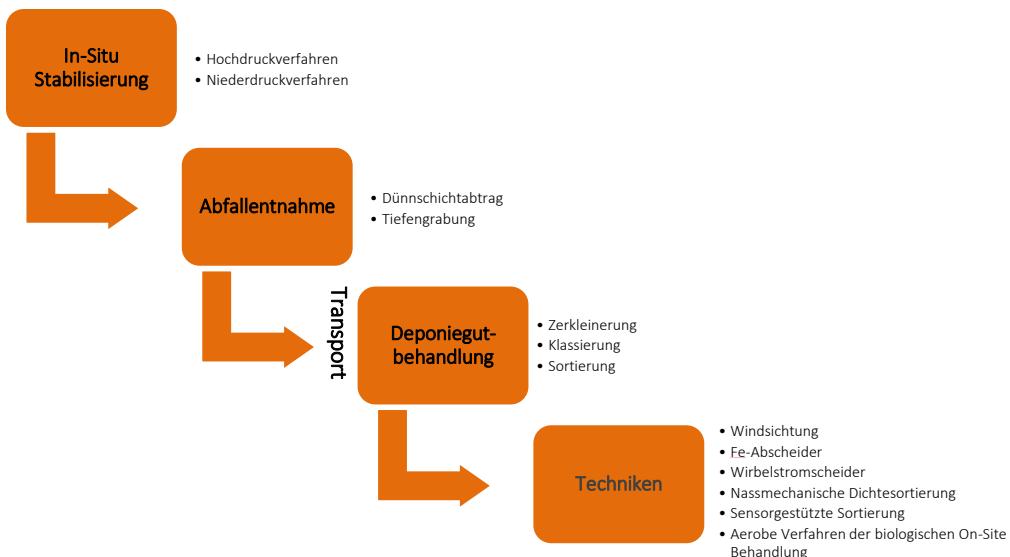


Abbildung 3: Grundlegende Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung und Techniken der Deponiegutsortierung

### 2.4.1 In-Situ Stabilisierung

Verfahren der In-Situ Stabilisierung wurden ursprünglich zu Sicherung und Sanierung von Altlasten sowie Altdeponien entwickelt, die aufgrund unzureichender technischer Maßnahmen ein Gefährdungspotenzial für die Umwelt oder das Wohl der Allgemeinheit aufweisen.

Im Kontext des Deponierückbaus werden diese Verfahren zur Minderung von Emissions-, Methan- und Geruchsfrachten eingesetzt. Ein zusätzlicher positiver Nebeneffekt ist die Trocknung des behandelten Deponieguts, wodurch die nachgeschaltete Klassierung und Sortierung wesentlich verbessert werden kann. Das Prinzip der In-Situ Stabilisierung basiert dabei auf der Umstellung der vorherrschenden anaeroben Deponiekörperverhältnisse auf aerobe Bedingungen durch aktive Belüftung. Hierzu kann grundsätzlich zwischen dem

- Hochdruckverfahren (z. B. Biopuster®-Verfahren, Smell-Well-System) und dem
- Niederdruckverfahren (z. B. AEROflott®-Verfahren)

unterschieden werden [PRANTL ET AL., 2006A & 2006B].

#### HOCHDRUCKVERFAHREN

Beim Hochdruckverfahren wird mit Sauerstoff angereicherte Umgebungsluft über Druckimpulse in den Deponiekörper eingestoßen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der kurzen Behandlungszeit zur Milieuumstellung. In wenigen Tagen bis maximal einigen Wochen sind deutliche Methan- und Geruchsreduzierungen des Abfallkörpers und somit die gesetzlichen Anforderungen des Arbeits- und Nachbarschaftsschutzes ohne zusätzliche Maßnahmen erzielbar [PRANTL ET AL., 2006A & 2006B].

## NIEDERDRUCKVERFAHREN

Niederdruckverfahren kommen vorwiegend zur Altlastensanierung oder als Nachsorgemaßnahme jüngerer Deponien zum Einsatz. Über das meist vorhandene Deponiegasbrunnensystem wird dabei einerseits aktiv Luftsauerstoff in den Deponiekörper eingebracht und andererseits die entstehende Überschussluft über entsprechende Gasbrunnen abgesaugt und anschließend behandelt. Der vergleichsweise geringe Lufteintrag erfolgt bei Drücken von 0,1 - 1,5 bar [PRANTL ET AL., 2006A & 2006B]. Für die Geruchsstabilisierung haben sich Behandlungszeiträume von 4 – 8 Tagen als ausreichend erwiesen. Für die gezielte Trocknung des Deponieguts müssen jedoch Behandlungszeiten von 4 - 8 Wochen eingerechnet werden. Das Ziel der gleichzeitigen Reduktion der noch im Deponiekörper vorhandenen organischen Substanz bedarf sogar einer aktiven Belüftungsdauer von ca. 3 Monaten [BOTHMANN ET AL., 2002].

## PRAXISANWENDUNG

Nach aktuellen Erkenntnissen sind für Rückbauprojekte Verfahren mit hohen Belüftungsraten und -drücken, also Hochdruckverfahren, vorzuziehen. Diese ermöglichen bei kurzer Behandlungsdauer eine deutliche Geruchs- und Methanemissionsminderung sowie eine verfahrensfördernde Vortrocknung des Deponieguts [BOTHMANN, 2005].

In Praxisuntersuchungen haben sich das

- Biopuster®-Verfahren und das
- Rotte-Filter-Verfahren (Smell-Well-System)

als geeignet erwiesen.

Im Rahmen eines Umlagerungsprojektes auf der Deponie Wien-Donaupark kam das Biopuster®-Verfahren zur kurzfristigen Geruchsstabilisierung erfolgreich zum Einsatz. Hierbei wurde komprimierte Luft mit Drücken zwischen 2 und 10 bar in Schallgeschwindigkeit über intermittierend arbeitende Druckluftlanzen in Impulswellen in den Deponiekörper eingeblasen. Aufgrund des sehr hohen Druckimpulses konnten so auch dicht gelagerte Bereiche homogen durchlüftet werden. Die dabei entstehenden Deponiegase wurden über entsprechende Sauglanzen abgezogen und in Bio- bzw. Aktivkohlefiltern nachbehandelt. Zur Beschleunigung des Gesamtprozesses ist es sinnvoll die eingeschossene Luft mit Sauerstoff anzureichern [LEIKAM ET AL., 1998].

Praktische Erfahrungen mit dem Rotte-Filter-Verfahren konnten bei einem Rückbauprojekt auf der Deponie Burghof gewonnen werden. Hierbei wurde der entsprechende Deponiebereich 2 Wochen vor Beginn des Aushubs einer Belüftung unterzogen. Die technische Umsetzung erfolgte über ein Raster aus 3,5 m langen Belüftungs- und Absauglanzen, die entsprechend in den Deponiekörper gerammt wurden. Über das geschaffene Belüftungssystem wurde anschließend Umgebungsluft - über eine als Biofilter wirkende Rottebox - angesaugt, in den Deponiekörper eingebracht und parallel abgesaugt. Durch die stündliche Änderung der Strömungsrichtung wurde die Kanalbildung und die einseitige Belastung des Biofilters verhindert.

Die abgesaugte Luft wurde dabei ebenfalls über den Biofilter an die Umgebung abgegeben. Der Vorteil dieser Luftführung ist darin zu sehen, dass die Luft einerseits mit aeroben Mikroorganismen angereichert, erwärmt und mit Wasserdampf gesättigt wird sowie andererseits Geruchsstoffe und Methan im Biofilter abgebaut werden. Neben der deutlichen Geruchsminderung hat sich in diesem Zusammenhang die Möglichkeit zur gleichzeitigen Trocknung des behandelten Deponieguts als positiv herausgestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Wasseraustrag über zwischengeschaltete Kondensatoren erzielt, sodass ein mittleres Gehaltsniveau des Deponieguts von ca. 30 Gew.-% realisiert werden konnte. Insgesamt hat sich gezeigt, dass ein solches System auch bei starken Niederschlagsereignissen und Frost effektiv eingesetzt werden kann [RETTERBERGER, 1998].

## **2.4.2 Abfallentnahme**

Für das Abgraben von Deponiekörpern bieten sich zwei Varianten an. Einerseits handelt es sich um den passiven Dünnschichtabtrag mittels Radlader und andererseits um den aktiven Tiefenaushub mittels Löffelbagger. Der Unterschied beider Verfahren liegt ausschließlich in der Mächtigkeit des abzutragenden Deponieguts. So wird im Dünnschichtabtrag maximal eine Schicht von 0,5 m Deponiegut großflächig abgetragen, während der Tiefenaushub Abtragsschichten von 2,0 – 3,0 m vorsieht. Die anschließende Verladung sowie der Abtransport des Deponieguts zur weiteren lokalen Aufbereitung oder einem Umschlagsplatz sollte in beiden Fällen über geländegängige Muldenkipper erfolgen [RETENBERGER, 1998 & 2010A].

### **PRAXISANWENDUNG**

Untersuchungen haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass der aktive Tiefenaushub den Vorteil des nahezu kompletten Aushubs des zuvor aerobisierten Bereichs mit sich bringt. Zur Emissions- und Geruchsminderung der abgetragenen Deponiebereiche sollte jedoch eine ca. 0,5 m dicke Schicht des bereits aerobisierten Deponieguts erhalten werden. Ein zusätzlicher technischer Vorteil dieser Abgrabungsvariante liegt darin, dass einzelne, zumeist sperrige Deponiekörperbestandteile vorselektiert sowie separiert werden können und für den weiteren Verfahrensablauf keine Probleme verursachen.

## **2.4.3 Transport**

Lokalspezifische Gegebenheiten können betriebswirtschaftlich Anlass geben, das abgegrabene Deponiegut nicht in einer mobilen Aufbereitungsanlage auf dem Standort selbst zu behandeln, sondern dieses einer bereits bestehenden Sortieranlagen zuzuführen.

In diesem Kontext ist die Errichtung oder Umnutzung eines bestehenden Abfallumschlagsbereichs notwendig. Das zu behandelnde Deponiegut wird hier über die zuvor erwähnten Muldenkipper angeliefert und entsprechend auf verkehrsrechtlich zugelassene Transportfahrzeuge umgeladen und zur weiteren Aufbereitung abtransportiert.

### **PRAXISANWENDUNG**

Der Einsatz eines Löffel- oder Greiferbaggers eignet sich hierbei als technisch optimale Lösung, da einerseits gezielt mögliche Störstoffe separiert werden können und andererseits eine ordnungsgemäße sowie saubere Verladung des Deponieguts gewährleistet wird.

## **2.4.4 Deponiegutbehandlung**

Unabhängig vom Ort der Deponiegutaufbereitung können unterschiedliche technische Aggregate und deren Kombination zum Einsatz kommen. Potenziell handelt es sich um technisches Knowhow der Abfallaufbereitungs- und Recyclingbranche.

### **2.4.4.1 Zerkleinerung**

Durch die Zerkleinerung des Deponieguts wird eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche erreicht und Aggregate bzw. Konglomerate unterschiedlicher Materialien aufgetrennt. Beide Aspekte sind förderlich für die weitere Stoffabtrennung [BILTEWSKI ET AL., 2000].

Untersuchungen aus der Recyclingbranche zeigen, dass eine Zerkleinerung und Auftrennung auf > 80 mm, 80 – 40 mm und < 40 mm praxistauglich ist und die Effektivität der weiteren Prozesse begünstigt [KORN, 2011]. Folgende Aggregate können zum Einsatz kommen:

- **Kammwalzenzerkleinerer**

Kammwalzenzerkleinerer eignen sich vor allem für die Aufbereitung diffus zusammengesetzter Abfälle wie bspw. Haus- und Sperrmüll, Altholz, Baumischabfall oder Biomüll. Das Funktionsprinzip dieser langsam laufenden Aggregate beruht dabei auf Zug- und Reißwirkungskräften. Ihr Aufbau sieht eine oder zwei mit Zähnen ausgerüstete Walzen

vor, die durch Rotation und in Verbindung mit hydraulisch ausweichbaren Gegenrosten eine Zerkleinerung des Materials herbeiführen. Durch das mögliche Wegklappen des hydraulisch gesteuerten Gegenrostes wird gewährleistet, dass bei einer Blockade des Systems nahezu keine Störausfälle auftreten.

Der Vorteil eines Kammwalzenzerkleinerers liegt in seiner selektiven Zerkleinerungswirkung, die insbesondere für den nachgeschalteten Klassier- und Sortierprozess förderlich ist. Zähelastische Stoffe wie bspw. Kunststofffolien werden im Rahmen der Kammwalzenzerkleinerung in ihrer Größe kaum reduziert und können daher im nachgeschalteten Klassier- sowie Sortierprozess gut separiert werden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

- **Schneckenmühlen**

Schneckenmühlen sind langsam laufende Aggregate, die das Aufgabematerial durch obenliegende Schneckenwalzen einziehen und gegen eine unterhalb liegende Walze oder Schnecke pressen. Der Zerkleinerungsvorgang findet dabei durch quetschende, scherende, reißende und brechende Kräfte statt. Dieses technische Zerkleinerungsverfahren zeichnet sich durch sein breites Spektrum an einsetzbaren Abfällen wie Haus-, Sperr-, Gewerbe-, Holz- oder Bioabfall aus. Vorteilhaft ist zudem die staub- und lärmreduzierte Arbeitsweise, geringer Verschleiß sowie vergleichsweise geringe Verdichtungseffekte nasser Inputstoffe [FRICKE ET AL., 2002].

- **Schneidmühlen und Rotorscheren**

Schneidmühlen bzw. Rotorscheren bestehen aus horizontal angeordneten Einzel- oder Mehrfachwellen, die mit entsprechenden Schneidmessern ausgerüstet sind. Der Unterschied zwischen Schneidmühlen und Rotorscheren liegt dabei in der Rotationsgeschwindigkeit der Wellen. So sind Rotorscheren langsam laufende Aggregate, während hingegen Schneidmühlen hohe Wellendrehzahlen aufzeigen. Die gegenseitige Wellendrehrichtung bei Mehrfachwellenaggregaten bzw. das Drehen einer Einzelwelle gegen einen Schneidkamm sorgt für den Einzug sowie die Zerkleinerung des Inputstoffs [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Rotorscheren stellen keine hohen Ansprüche an die physikalischen Eigenschaften der zu zerkleinernden Materialien. Sie eignen sich daher für Haus-, Sperr- und Gewerbeabfälle, Altkabel, Kunststoffabfälle und Industrieabfälle. Eine zusätzliche hydraulische Pressvorrichtung ermöglicht zudem die Zerkleinerung sperriger Materialien bei gleichbleibender Durchsatzleistung. Einwellenzerkleinerer sind eine besondere Form der Rotorscheren, die nur einen Rotor aufweisen aber mit höheren Drehzahlen arbeiten. Diese speziellen Aggregate decken ein noch breiteres Abfallspektrum ab und kommen vorwiegend zur Zerkleinerung von Althölzern, Kunststoffen, Verpackungen, Teppichböden, Textilien sowie Elektronikschrött zum Einsatz [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Bei Schneidmühlen handelt es sich hingegen um schnell drehende Aggregate, die hauptsächlich zur Zerkleinerung von Monochargen im gezielten Recyclingprozess ihre Anwendung finden. Zwar sind diese Mühlen in der Lage auch zähelastische Materialien wie bspw. Leder oder Kunststofffolien zu zerkleinern, jedoch besitzen sie gleichzeitig eine hohe Störanfälligkeit gegenüber festen Materialien wie etwa Metallen [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

- **Backenbrecher**

Backenbrecher haben sich in der Praxis vor allem zur Zerkleinerung von Bauschutt bewährt, da sie sich aufgrund ihres Funktionsprinzips besonders gut für harte und spröde Materialien eignen. Die Zerkleinerung des Materials findet dabei zwischen zwei

oszillierenden Brechbacken statt, wobei das Material in den meisten Fällen von oben aufgegeben wird. Die gewünschte Endkörnung des Outputmaterials lässt sich durch Variation der Abstände zwischen den beiden Brechbacken einstellen [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Tabelle 1 zeigt abschließend die wesentlichen Einsatzgebiete der genannten Zerkleinerungsaggregate in der Abfallwirtschaft.

Tabelle 1: Einsatzgebiete von Zerkleinerern in der Abfallaufbereitung [Kranert & Cord-Landwehr, 2010]

Rohstoff/Materialeigenschaft	Grobzerkleinerung ca. < 150 mm	Zielkorngröße	Feinzerkleinerung ca. < 10 mm
	Mittelzerkleinerung ca. < 50 mm		
Mineralien, Bauschutt hart bis mittelhart	Backenbrecher, Prallbrecher, Schlagwalzbrecher	Schlagbrecher, Prallbrecher	Stab-/Kugelmühle, Feinprallmühle, Stiftmühle, Schlagkreuzmühle
Metalle/Schrotte, Altkabel duktil	Schrottschere, Shredder, Hammerbrecher, Rotorschere	Shredder, Hammermühle, Einwellenzerkleinerer, Schneidmühle	Spänebrecher, Schneidmühle
Haus- und Sperrmüll, Gewerbeabfall weich, mittelhart, elastisch bis zähelastisch	Rotorschere, Kammwalzenzerkleinerer, Schraubenmühle, Autogenmühle	Rotorschere, Kammwalzenzerkleinerer, Hammermühle, Einwellenzerkleinerer	Einwellenzerkleinerer Hammermühle
Thermoplaste, Elastomere zähelastisch	Rotorschere	Einwellenzerkleinerer, Schneidmühle, Hammermühle	Schneidmühle Hammermühle (kryogen)

#### 2.4.4.2 KLASIERUNG

Klassievorgänge ermöglichen die Aufteilung eines Stoffgemisches anhand der spezifischen Korngrößenverteilung. Prinzipiell wird hierzu das jeweilige Stoffgemisch über eine mit geometrisch angeordneten Öffnungen besetzte Trennfläche bewegt. Stoffe, die aufgrund ihrer Geometrie kleiner sind als die Trennflächenöffnungen, werden abgesondert und als Unterkorn aus dem Aggregat befördert. Das Überkorn verbleibt auf der Trennfläche und wird separat ausgestoßen. Aufgrund technischer Begrenzungen verbleibt jedoch meist ein gewisser Anteil des Unterkorns im Überkorn. Zudem kann es aufgrund von Verschleißerscheinungen und damit verbundenen Vergrößerungen der Trennöffnungen vorkommen, dass Überkorn als Unterkorn deklariert wird. Ein weiteres Problem stellt das so genannte Klemmkorn dar. Hierunter wird Material verstanden, welches nahezu identische Größen wie die Trennöffnungen besitzt und dadurch zu Verstopfungen sowie einer Minderung der Trennleistung führt. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Feuchte- und Fein- bzw. Unterkorngehalt eine erhöhte Verstopfungsgefahr einhergeht, der durch zusätzliche technische Einrichtungen wie Bürsten, Ketten, Luftstöße etc. entgegen gewirkt werden kann [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Im Rahmen des Deponierückbaus sollte der Klassierung ein besonders hoher Stellenwert beigemessen werden, da hierdurch das Rückbaumaterial mit vergleichsweise niedrigen Investitionen und technisch geringem Aufwand optimal der weiteren Verwertbarkeit sowie der damit verbundenen Aufbereitungstechnik zugeführt werden kann. Ziel sollte es sein, spezifische Klassierschnitte zu wählen, die eine bestmögliche Trengenaugigkeit der entstehenden

Kornfraktionen gewährleisten und somit einerseits die Möglichkeit bieten, bereits verwertbare Stoffströme abzutrennen und andererseits die Effizienz der weiteren Materialtrennung bzw. - aufbereitung zu verbessern.

- **Trommelsiebe**

Trommelsiebe haben sich in der Praxis bewährt und kommen vorwiegend zur Klassierung von Verpackungs- und Gewerbeabfällen, Kompost sowie Bauschutt zum Einsatz. Das Funktionsprinzip von Siebtrommeln beruht auf einem rotierenden zylindrischen Siebmantel, der das aufgegebene Material durch Reib- und Zentrifugalkräfte trennt. Kleinere Bestandteile passieren bei diesem Vorgang die Sieböffnungen und können gesondert abgegeben werden. Eine leichte Neigung der Siebtrommel oder spezielle Mitnahmeverrichtungen gewährleisten den Transport des Materials bzw. Überkorns durch die Siebtrommel [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Im praktischen Einsatz zur Klassierung von Deponiegut fanden Trommelsiebe bereits vielseitig ihre Anwendung. Es hat sich jedoch gezeigt, dass vor allem Verstopfungen der Sieblöcher, starke Verschleißerscheinungen und Stillstände, die aus Umwickelungen antreibender Aggregate mit Deponiegutbestandteilen resultieren, als problematisch zu sehen sind [RETENBERGER, 1998; HÖLZLE, 2010].

- **Spannwellensiebe**

Spannwellensiebe basieren auf verformbaren Siebböden, die aus Gummi oder Kunststoff gefertigt sind und sich auf gegeneinander angeordneten sowie bewegenden Kippträgersystemen bewegen. Durch die wellenartige Bewegung der Siebfläche und hohe Schwingungszahlen wird dabei eine Klassierung des Aufgabematerials erreicht. Zusätzlich wird hierdurch das Material über die Siebfläche transportiert und aufgelockert [FRICKE ET AL., 2002]. Die bevorzugten Trennbereiche dieser Siebe liegen im Bereich von 1 – 30 mm. Einsatz finden sie daher oftmals in der Aufbereitung von Kompost, Feinmüll und vorzerkleinertem Elektronikschrott [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Beim Rückbauprojekt der Deponie Burghof konnten Erfahrungen mit diesem Siebtyp gesammelt werden. Insgesamt hat sich aber gezeigt, dass zwar eine gute Auflockerungswirkung vorhanden war, jedoch die gewünschte Trenngenaugkeit aufgrund starker Verschmutzungen nicht erzielt werden konnte [RETENBERGER, 1998].

- **Schwingsiebe**

In einem schwingenden Rahmen gefasste Siebeläge bilden das wesentliche Element von Schwingsieben. In Abhängigkeit der Bauform wird zwischen Linear- und Kreisschwingsieben unterschieden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010]. Schwingsiebe können als Ein- oder Mehrdecksiebe aufgebaut sein, was die Abtrennung mehrerer Kornfraktionen über ein komplexes Aggregat ermöglicht. Entscheidend für die Güte der Trennung sind die Materialeigenschaften und die Sieblänge. In der Praxis werden Sie vorzugsweise zur Klassierung von Bauschutt, Schlacken, Altglas oder Elektronikschrott eingesetzt [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Im Rahmen des Rückbaus der Deponie „Am Jagerbergl“ wurde das gewonnene Deponiegut mittels Schwingsieb in eine Fein- (< 35 mm), Mittel- (35 – 80 mm) und eine Grobfraktion (> 80 mm) klassiert. Anschließend wurde die Mittelfraktion einer Schwerguttrennung zugeführt. Die hierzu eingesetzte Steinfalle, also letztlich ein schnell laufendes Förderband mit stufenlos regulierbarer Geschwindigkeit, erwies sich insgesamt als geeignet, da lediglich 10 Vol.-% an Störstoffen im abgetrennten Schwergut vorzufinden waren. Ebenso hat sich der Einsatz eines Spannwellensiebs zur weiteren Aufbereitung des Bandüberlaufs der Steinfalle bewährt. Selbst bindiges Material führte hier zu keinen Verstopfungen des Aggregates und somit zu einer optimalen Trennleistung [LERCH ET AL.,

2010]. Ähnliche Erfahrungen wurden auch beim Rückbauprojekt auf der Deponie Burghof gemacht [RETENBERGER, 1998].

- **Ballistische Separatoren**

Ballistische Separatoren wurden ursprünglich zur zweistufigen Trennung von zerkleinertem Haus- und Gewerbeabfall in eine Schwer-, Leicht- und Feinfraktion entwickelt. Durch eine bewegliche, geneigte und mit Sieböffnungen versehene Fläche wird dabei der Trennprozess erreicht, wobei die Fläche selbst in einzelne Rüttellelemente unterteilt ist. In Abhängigkeit des spezifischen Gewichts, der Größe und der Form des jeweiligen Inputmaterials wird dieses zur oberen (Leichtfraktion) oder unteren (Schwerfraktion) Kante des Aggregats bewegt und ausgestoßen bzw. über die Sieböffnungen (Feinfraktion) ausgegeben [BILITEWSKI ET AL., 2000].

Erfahrungen mit dem Einsatz eines ballistischen Separators zur Aufbereitung von Deponiegut konnten ebenfalls im Rahmen des Rückbauprojekts Burghof gesammelt werden, wobei eine Klassierung der zuvor gewonnenen Grobfraktion erfolgte. Die Ergebnisse zeigen eine hervorragende Trennleistung des Aggregats bei gleichzeitig gutem Reinheitsgrad der gewonnenen heizwertreichen Leichtfraktion [RETENBERGER, 1998].

- **Bewegte Roste**

„Unter dem Begriff bewegte Roste werden Schwingsiebe mit stangenförmigem Siebbelag sowie die so genannten Rollenroste, bei denen die Siebflächen aus einzelnen, in gleicher Drehrichtung laufenden Walzen oder Scheiben oder Sternen bestehen, zusammengefasst“ [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Stangenroste bzw. so genannte Stangensizer bestehen aus einem Siebkasten, in dem mehrere Siebdecks kaskadenförmig hintereinander angeordnet sind. Der Stangenabstand bestimmt in diesem Zusammenhang die gewünschte Trengroße der einzelnen Siebdecks. Von Nachteil ist, dass aufgrund der technischen Ausführung längliche und flächige Materialien größerer Abmessung zwischen den Stangen hindurchrutschen und somit in das Unterkorn gelangen [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Versuche von FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] mit rückgebautem Deponiegut zeigen, dass Stangensiebe im Vergleich zu Trommelsieben im ersten Siebdurchgang einen erheblichen Vorteil bieten. Hierbei kam ein zweistufiges Stangensieb mit Stangenabständen von 60 und 30 mm zum Einsatz. Nach Angaben der Autoren sei vor allem die deutlich höhere Aussiebung des Feinmaterialanteils hervorzuheben. Die Ursachen für dieses Ergebnis sind darin zu sehen, dass Stangensiebe eine vergleichsweise höhere Auflockerungswirkung haben und gleichzeitig weniger anfällig gegenüber Verschmutzungen sind. Insbesondere Textilien, Kunststofffolien und Tonbänder führten im Fall des eingesetzten Trommelsiebs zu Verschmutzungen und damit auch zu nennenswerten Ausfallzeiten. Einen weiteren Vorteil von Stangensieben sehen die Autoren darin, dass insbesondere feinkörnige und nasse Materialien nicht zu Verklumpungen geführt haben. Diese Tatsache reduziert den Anteil aggregierten Feinkorns im Siebüberlauf erheblich und verbessert somit dessen Qualität.

Der Aufbau von Rollenrosten sieht eine Vielzahl, in gleichen Abständen parallel angeordnete Wellen vor, die mit runden, polygonförmigen oder sternförmigen Walzen oder Scheiben belegt sind. Durch die Stellung dieser zueinander ergeben sich quadratische oder rechteckige Öffnungen, über die das Unterkorn ausgetragen wird. Die Walzenabmessung sowie die Wellenabstände bestimmen in diesem Zusammenhang die Größe der Rostöffnung und somit die Größe des Unterkorns. Das entsprechende Überkorn wird durch die gleichgerichtete Drehrichtung der Walzen zur Austragsseite transportiert und separiert. Generell zeichnen sich Rollenroste durch ihre geringe

Verstopfungsanfälligkeit aus, weshalb sie insbesondere zur Klassierung von siebschwierigen, klumpenden und feuchten Materialien wie bspw. Kompost, Bodenmaterial, Grünabfällen und Bauschutt eingesetzt werden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010]. Ein Einsatz unter Verwendung von Deponiegut ist nicht bekannt.

- **Klassierschnitte**

Tabelle 2 zeigt die bei unterschiedlichen Rückbauprojekten gewählten Klassierschnitte. Diese bewegen sich bei einer einstufigen Klassierung zwischen 30 und 40 mm bzw. bei einer zweistufigen Klassierung zwischen 16 und 40 sowie 30 und 80 mm. Generell sollten Voruntersuchungen des Deponieguts zeigen, welche Trennschnitte zu wählen sind und welches technische Aggregat den Anforderungen gerecht wird.

**Tabelle 2: Siebdurchgänge ausgewählter Deponierückbauprojekte**

Deponie	Abfallart	1. Siebfaktion	2. Siebfaktion	3. Siebfaktion
Düsseldorf-Hubbelrath	nicht brennbare Abfälle	> 40 mm	16 - 40 mm	< 16 mm
Sengenbühl	Hausmüll	> 30 mm	< 30 mm	-
Schöneiche	Hausmüll	> 40 mm	20 - 40 mm	< 20 mm
Schöneicher Plan	Industrieabfall, Schlacken, Sonderabfall, Hausmüll	> 40 mm	20 - 40 mm	< 20 mm
Merzig-Fitten	Hausmüll, Gewerbeabfall, Bauschutt	> 60 mm	20 - 60 mm	< 20 mm
Kaisermühlen, Wien Donaupark	Hausmüll, Bauschutt, Abfall mit geringem organischen Anteil	> 40 mm	< 40 mm	-
Scheffau	Hausmüll	> 80 mm	40 - 80 mm	< 40 mm
Burghof	Hausmüll	> 60 mm	20 - 60 mm	< 20 mm
Marquartstein	Hausmüll	> 80 mm	35 - 80 mm	< 35 mm
Rennerod	Hausmüll	> 60 mm	< 60 mm	-

### 2.4.4.3 Sortierung

Für die Sortierung des Deponieguts bzw. der gewonnenen Fraktionen kommen grundsätzlich die heute gängigen technischen Einrichtungen der Recyclingbranche in Frage. Einen Überblick dieser gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht heute gängiger Einrichtungen zur Sortierung von Abfällen bzw. Deponiegut

Technische Einrichtung	Eignung	Probleme
<b>Massenstromsortierverfahren</b>		
<b>Windsichtung</b>	Abtrennung heizwertreicher Materialien/Kunststofffolien	Hohe Wassergehalte
<b>Eisen-Abscheider</b>	Abtrennung magnetischer Metalle	Eisenhaltige Materialkonglomerate
<b>Wirbelstromabscheider</b>	Abtrennung von Nichteisenmetallen	Schichtdicke
<b>Nasse Dichtesortierung</b>	Aufbereitung von Kunststoffgemischen zur stofflichen Verwertung   Trennung von Nichteisenmetallen   Behandlung belasteter Böden	Kornform und –größe
<b>Einzelkornsortierung</b>		
<b>Nahinfrarot-Sortierung</b>	Trennung von Kunststoffverpackungsabfällen nach der Kunststoffart   Trennung chlorhaltiger Kunststoffe aus Ersatzbrennstoffen   Trennung papier-/kunststoffhaltiger Verbundverpackungen von übrigen Leichtverpackungen   Trennung von Brennstoffen und übrigen Abfallstoffen	Zu geringe Reflektion der Materialien
<b>Röntgenzeilensensor</b>	Breites Spektrum an organischen (Kunststoffe, Holz etc.) und anorganischen Stoffen (Steine, Metalle, Glas)	Vereinzelung
<b>Induktionssortiersystem</b>	Metallaufbereitung/-trennung	Vereinzelung
<b>Optische Sortierung</b>	Sortierung von Altglas, Keramik, Kunststoffen	Vereinzelung und Verschmutzungsgrad

- **Windsichtung**

In der Aufbereitung von Abfällen werden Windsichter vielfach zur Abtrennung heizwertreicher Materialien wie bspw. Kunststofffolien eingesetzt. Die Trennung dieser Fraktionen aus dem Inputmaterial erfolgt dabei aufgrund von physikalischen Unterschieden in der Dichte, der Kornform und der Korngröße. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass eine Vorbehandlung des Inputmaterials stattfinden sollte, die die genannten Trennmerkmale ausprägt. Eine bedeutende Rolle nimmt zudem der Wassergehalt des Inputmaterials ein. Dieser ist negativ korreliert mit der Trennleistung des Verfahrens [KRAMERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Aufgrund unterschiedlicher Bauformen hinsichtlich der Luftströmungsrichtung kann zwischen Auf- und Querstromsichtern unterschieden werden. Eine häufig und erfolgreich eingesetzte Bauform zur Trennung von Hausmüll ist der Zick-Zack-Sichter, der ein senkrechtes, zickzackförmiges Sichtrohr aufweist. Dabei strömt die erzeugte Sichtluft von unten und somit entgegen der Fallrichtung des zu trennenden Materials nach oben separierend hindurch. An jedem Knick des so genannten Sichterkanals durchläuft das Material den Luftstrom und prallt anschließend auf die gegenüberliegende Sichterwand, wodurch Materialien höherer Dichte aufgrund der Schwerkraft den Sichterkanal vollständig passieren. Die Leichtfraktion wird hingegen aus dem Sichterkanal ausgestoßen. In Abhängigkeit der Anzahl der Sichtglieder, der geometrischen Anordnung, der Luftstromintensität und der Eigenschaften des Inputmaterials lässt sich die gewünschte Trennschärfe regulieren [TRENNSO-TECHNIK GMBH, 2011; BILITEWSKI ET AL., 2000].

Eine vergleichsweise einfache Methode mit deutlich geminderter Trennschärfe stellt die Absaughaube dar. Diese wird über einer Fördereinrichtung oder ggf. bereits innerhalb der Klassierung installiert und saugt die Leichtfraktion direkt ab. Die anschließende Abscheidung der gewonnenen Fraktion findet in den meisten Fällen über einen Zyklon statt [BILITEWSKI ET AL., 2000].

- **Eisen-Abscheider**

In diesem Kontext haben sich quer oder parallel über dem Abfallstrom angebrachte Überbandmagnete als einfache und praxistaugliche Lösung bei gleichzeitig hohen Trennleistungen erwiesen. In der Abfallaufbereitungstechnik gibt es derzeit eine Vielzahl an Magnetabscheidern unterschiedlicher Leistung, sodass in Abhängigkeit der Eigenschaften des Inputmaterials bereits gute Lösungen zur Abtrennung existieren [LERCH ET AL., 2010].

- **Wirbelstromabscheider**

Wirbelstromabscheider eignen sich grundsätzlich zur Abtrennung von Nichteisenmetallen aus einem Materialstrom. Die Abtrennung der entsprechenden, elektrisch gut leitenden Stoffe wird durch die Induktion von Spannung und anschließende Einwirkung eines Magnetfelds erreicht. Dabei ist das Magnetfeld dem Erregerfeld umgeben, wodurch es zur Abstoßung der Nicht-Eisenmetalle und damit zur Trennung von nicht-leitfähigen Abfallbestandteilen kommt [LERCH ET AL., 2010].

Das wichtigste Trennkriterium stellt hierbei die Kornzusammensetzung des zu trennenden Materials dar, die im Bereich von 1 – 150 mm liegen sollte. Des Weiteren sollte zur optimalen Trennleistung das Inputmaterial als gleichmäßige Einkornsicht, also flächig bei gleichzeitig geringer Schichtdicke, vorliegen, was bspw. über eine vorgeschaltete Schwingförderrinne erreicht werden kann. Die Praxis zeigt zudem, dass die vorhergehende Entfernung von Eisen-Metallen eine Verbesserung des Trennvorgangs hervorruft [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

- **Nasse Dichtesortierung**

Zur Anwendung kommen nasse Dichtesortierungsverfahren vorrangig bei der Aufbereitung von Kunststoffgemischen für das werkstoffliche Recycling. Daneben liegen die Einsatzgebiete auch in der Trennung von Nichteisenmetallen und in der Behandlung belasteter Böden [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Nach KRANERT & CORD-LANDWEHR [2010] kann zwischen dem statischen Schwimm-Sink-Verfahren und der Trennung im Zentrifugalfeld unterschieden werden. In beiden Fällen ist die Dichte der zu separierenden Stoffe wesentliches Trennkriterium.

Im statischen Schwimm-Sink-Verfahren erfolgt die Trennung unter Ausnutzung der normalen Erddanziehungskraft in flüssigkeitsgefüllten Behältern, wobei Stoffe mit geringer Dichte aufschwimmen und gleichzeitig schwere Materialien absinken. Neben der Dichte spielt die Kornform und -größe bei diesem Verfahren eine entscheidende Rolle für die Trennleistung bzw. Trennschärfe, sodass hier systembedingte Grenzen existieren. Positiv hervorzuheben ist der vergleichsweise einfache und investitionsarme Aufbau dieser Aggregate [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

Im Vergleich zu statischen Schwimm-Sink-Verfahren sind Methoden zur Trennung im Zentrifugalfeld durch die technisch hervorgerufenen und deutlich erhöhten Beschleunigungskräfte selektiver und effizienter. In der praktischen Anwendung haben sich hierbei Hydrozykloone und Sortierzentrifugen bewährt [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010; HERBOLD MECKESHEIM GMBH, 2006; GERHART ET AL., 2011].

### - Sensorgestützte Sortierung

„Die sensorgestützte Sortierung ist ein Verfahren der Einzelkornsortierung. Im Gegensatz zu den Massenstromsortierverfahren, bspw. Dichtetrennung, Siebung oder Wirbelstromscheidung, muss das Merkmal, anhand dessen die Trennung erfolgt, an jedem Einzelkorn oder auch Abfallartikel diskret gemessen werden. Die Abfälle müssen demzufolge in geeigneter Weise der Messeinrichtung „vorgeführt“ werden, damit eine direkte „Sicht“ auf den Artikel ermöglicht wird. Dies geschieht durch Strang- bzw. Flächenvereinzelung, wobei sich in der Abfallaufbereitung aus Wirtschaftlichkeitsaspekten die Flächenvereinzelung praktisch vollständig durchgesetzt hat“ [HTP INGENIEURGESELLSCHAFT PARTG, 2004].

### Nahinfrarot-Sortierung

Die bekannteste und weit verbreitete sensorgestützte Sortiertechnik ist die Nahinfrarot-Sortierung (NIR-Sortierung), wobei die Erkennung unterschiedlicher Materialien auf deren spezifischen Spektren beruht. Hierbei wird mittels eines speziellen Sensors das jeweilige Spektrum erfasst und mit einer Datenbank abgeglichen. Diese ermöglicht es, unterschiedliche Stoffgruppen zu identifizieren und anschließend gezielt über bspw. Luftimpulse zu separieren. Der sortierbare Korngrößenbereich von NIR-Sensoren liegt zwischen 20 und 250 mm, wobei vor allem dunkle Materialien schwieriger zu trennen sind. Dies beruht darauf, dass von ihnen eine sehr geringe Reflektion ausgeht und eine Sensorerkennung nicht möglich ist [KRANERT & CORD-LANDWEHR, 2010].

### Röntgenzeilensensor

Die Sortierung mittels Röntgenzeilensensor ist eine sehr effektive und leistungsfähige Variante der sensorgestützten Sortiertechnik. Mit Hilfe von Röntgenstrahlung, die in der Lage ist die unterschiedlichen Materialien zu durchdringen und dabei eine Abschwächung erfährt, wird hierbei die Detektion unterschiedlicher Stoffe erreicht [ZEIGER, 2006].

Im Gegensatz zu optischen Sortiersystemen haben somit sowohl die Farbe als auch der Verschmutzungsgrad des Inputmaterials keinen großen Einfluss auf die Materialerkennung und somit auch nicht auf die Trennleistung sowie Trennschärfe. Vorteilhaft ist zudem, dass sich diese Aggregate prinzipiell zur Identifikation eines breiten Spektrums an organischen (Kunststoffe, Holz etc.) und anorganischen Stoffen (Steine, Metalle, Glas) eignen. In Bezug auf die Aufbereitung von Deponiegut wäre der Einsatz eines Röntgenzeilensensors zur Trennung einer vorbehandelten Feinfaktion in eine organische und eine ggf. direkt ablagerungsfähige mineralische Fraktion denkbar [ZEIGER, 2006; KREINDL, 2010].

### Induktionssortiersystem

Dieses System eignet sich vorwiegend für den Bereich der Metallaufbereitung, wobei die einzelnen Metalle über spezielle Sensoren mittels magnetischer Induktion erkannt werden. Anschließend werden die erfassten Metalle durch einzeln ansteuerbare Druckluftdüsen ausgeblasen und somit separiert [STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH, 2003]. Induktionssortiersysteme erreichen aufgrund ihrer hohen Sensitivität sehr gute Trennleistungen bei gleichzeitig tiefer Trennschärfe [KOHAUPT, 2007].

### Optische Sortierung

Bei der Farbsortierung von Materialien wird anhand optischer Merkmale wie Farbe, Transparenz und Glanz oder geometrischer Abmessungen eine Trennung der Stoffe herbeigeführt. Die Erkennung erfolgt in den meisten Fällen über eine Farbzeilenkamera. Die nachgeschaltete Separation wird wiederum durch Druckluftdüsen erreicht. Entscheidend für die Trengüte ist neben der Vereinzelung der Abfälle auf dem

Sortierband auch der Verschmutzungsgrad des Materials. Das bevorzugte Einsatzgebiet dieser Aggregate liegt in der Altglas-, Altpapier- und Kunststoffaufbereitung [HABICH, 2007].

#### Erfahrungen bei der Deponiegutsortierung

Untersuchungen auf bayerischen Deponien haben gezeigt, dass der Einsatz eines Windsichters zur Deponiegutaufbereitung nur bedingt geeignet ist. Probleme ergaben sich vor allem aus der Verfrachtung feiner mineralischer Bestandteile in die zu gewinnende heizwertreiche Fraktion. Zudem führten größere mineralische Bestandteile zu erheblichen Geräteschäden und Stillständen [HÖLZLE, 2010].

Im Bereich der Metallabtrennung kommt LERCH ET AL. [2010] zur Erkenntnis, dass durch eine vorgeschaltete Zerkleinerung des Deponieguts deutlich höhere Wiederfindungsraten bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung erzielt werden können.

Die Tauglichkeit der nassmechanischen Aufbereitung von Deponiegut konnte im Rahmen eines Rückbauprojekts auf der Deponie Burghof näher untersucht werden. Hierbei wurde die gewonnene Feinfraktion (0 – 20 mm) erfolgreich in eine bodenähnliche Fraktion zur Verwertung, eine Leichtfraktion zur thermischen Verwertung und einen Sedimentfilterkuchen zur Beseitigung aufbereitet. Als positiver Nebeneffekt fand zudem in der bodenähnlichen Fraktion eine deutliche Reduzierung der Schwermetalle, PAK's, EOX's und Mineralölkohlenwasserstoffe statt. Trotz der guten Trennleistung, bei gleichzeitiger Reduzierung der Schadstoffe, wurde das Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiter betrieben [RETENBERGER, 1998].

Ähnliche Ergebnisse zeigten Untersuchungen auf der Deponie Sengenbühl, bei denen ein Teil der Feinfraktion (< 40 mm) mehrstufig nassmechanisch behandelt wurde. Das so gewonnene grob- und feinkörnige Schergut wies lediglich noch einen Glühverlust von < 3 Gew.-% auf, was im Vergleich zur Gesamtfraktion einer Reduktion von 70 bis 80 % entspricht [FRIEDMANN & ZOLLNER, 1995].

Aufgrund des teilweise sehr hohen Verschmutzungsgrades des Deponieguts und den daraus resultierenden Verfälschung der stoffspezifischen optischen Eigenschaften ist ein Trennverfahren mittels Farbzeilenkamera aus aktueller Sicht nicht praktikabel.

#### 2.4.4.4 Aerobe Nachbehandlung

In Hinblick auf die Verwertung gewonnener Stofffraktionen der mechanischen Deponiegutaufbereitung bieten sich biologische Nachbehandlungsmaßnahmen zur Einhaltung definierter Kriterien oder zur Vorbereitung auf eine weitergehende Klassierung und Sortierung an.

Eine Möglichkeit zur gezielten Minderung der organischen Substanz bzw. zur Stabilisierung der jeweiligen Stofffraktion stellt die aerobe biologische Behandlung dar. Von Vorteil ist, dass sich bei erneuter Ablagerung des behandelten Materials ein verminderter Deponiegasbildungspotenzial bei gleichzeitiger Massen- und Volumenreduktion ergibt. In Abhängigkeit der Eigenschaften des Ausgangssubstrats wäre es zudem denkbar, das behandelte Material als Deponiebaustoff zu verwenden [WENGENROTH, 1995].

WENGENROTH [1995] zeigt auf, dass sich für die Behandlung von Deponiegut vor allem die Mietenkompostierung und Biozellenreaktoren (Boxen oder Container) eignen. Dabei zeichnet sich die Mietenkompostierung durch ihre vergleichsweise einfache Handhabung und den benötigten geringen Investitionsbedarf aus. Biozellenreaktoren bieten hingegen die Möglichkeit einer aktiven Belüftung und Abluftbehandlung.

Insgesamt ist zu beachten, dass aufgrund der bereits innerhalb des Deponiekörpers stattgefundenen Abbauprozesse nur eine bedingte weitere Mineralisation möglich ist, die der einer Nachrotte ähnelt. Zudem sollte das Material während der Rotte nicht umgesetzt werden, da dies in den meisten Fällen zu einem Zusammenbruch der Mikroorganismenaktivität führt.

Erfahrungsberichte belegen, dass bei der aeroben Nachbehandlung von Deponiegut nur mit sehr geringen Geruchs- und Sickerwasseremissionen zu rechnen ist [WENGENROTH, 1995; SAURE ET AL., 1995]. Tabelle 4 listet die wesentlichen Prüfkriterien und Eigenschaften der Eignung von Altabfällen bzw. Deponiegut zur aeroben Nachbehandlung auf.

Tabelle 4: Eignung von Altabfällen/ Deponiegut zur aeroben Nachbehandlung [WENGENROTH, 1995]

Kriterium	Wert bzw. Eigenschaft	Bewertung
<b>Abfallart</b>	Siedlungsabfälle mineralische Abfälle	✓ ✗
<b>Alter der Siedlungsabfälle</b>	< 10 Jahre > 30 Jahre	✓ ✗
<b>Deponiegasproduktion</b>	> 8 m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> < 3 m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	✓ ✗
<b>Materialstruktur</b>	strukturell vorwiegend Feinfraktion (< 8 mm)	✓ ✗
<b>Glühverlust</b>	> 25 % < 15 %	✓ ✗
<b>C/N-Verhältnis</b>	< 50:1 > 50:1	✓ ✗
<b>Selbsterhitzung (im Dewar-Gefäß)</b>	> 30 °C < 30 °C	✓ ✗
<b>Wassergehalt im Deponiekörper</b>	Gering Hoch	✓ ✗

✓ gute Eignung  
✗ eher schlechte Eignung

## 2.5 Kostenstruktur des Deponierückbaus

Die Kostenblöcke des Deponierückbaus sind nach SCHULTE [2011] sowie BÖLTE & GEIPING [2011] wie in Tabelle 5 zu benennen. Es ist zu beachten, dass die angegebenen spezifischen Kosten Anhaltswerte darstellen, deren Größenordnung stark von den strukturellen Gegebenheiten des Deponiestandorts abhängt.

Tabelle 5: Spezifische Kosten des Deponierückbaus | abgeändert nach BÖLTE & GEIPING [2011]

Rückbaukosten	Einheit	Spezifische Kosten
Aufnahme	€*Mg <sup>-1</sup>	5,0
Aufbereitung	€*Mg <sup>-1</sup>	10,0
Entsorgung MVA Material	€*Mg <sup>-1</sup>	90,0
Entsorgung heizwertreiche Fraktion	€*Mg <sup>-1</sup>	50,0
Entsorgung SBS	€*Mg <sup>-1</sup>	10,0
Entsorgung MBA	€*Mg <sup>-1</sup>	105,0
Entsorgung von Schadstoffen	€*Mg <sup>-1</sup>	50,0
Transport	€*Mg <sup>-1</sup>	10,0
Betriebskosten	€*Mg <sup>-1</sup>	6,6

Für drei aufgestellte Varianten kommen BÖLTE & GEIPING [2011] zur Erkenntnis, dass die spezifischen Rückbaukosten in einem Bereich von 50 – 120 €\*Mg<sup>-1</sup> Deponiegut liegen. Eigene Aufstellung zur Kostenstruktur des Deponierückbaus der Kreismülldeponie Hechingen weisen in diesem Zusammenhang mittlere Rückbaukosten von 98 €\*Mg<sup>-1</sup> Deponiegut aus.

### VARIANTE 1

Verbringung der heizwertreichen Fraktion in die MVA und Verbringung der Fraktion < 40 mm in die MBA

Kosten: 110 €\*Mg<sup>-1</sup> rückgebautes Deponiegut

### VARIANTE 2

Verbringung des gesamten Materials in die MVA

Kosten: 100 €\*Mg<sup>-1</sup> rückgebautes Deponiegut

### VARIANTE 3

Wiedereinbau am Standort ohne Wertstoffe

Kosten: 43 €\*Mg<sup>-1</sup> rückgebautes Deponiegut

### VARIANTE 4 (BSP. KREISMÜLLEPONIE HECHINGEN)

Entsorgung in MVA 10 %; Entsorgung als Ersatzbrennstoff 5 %, Entsorgung in MBA 5 %, Deponierung Klasse II 47 %, Deponierung Klasse I 15 %, Deponierung Klasse 0 5 %, Verwendung zur Verfüllung/Rekultivierung fremd 5 %, Verwendung zur Rekultivierung eigen 5 %, Sonderbehandlung 3 %

Kosten: 98 €\*Mg<sup>-1</sup> rückgebautes Deponiegut

Wie aus den Betrachtungen deutlich wird, hängen die Kosten des Deponierückbaus in besonderem Maße von der Entsorgung der Feinfraktion ab (Variante 1 und 2). Die Preise der Müllverbrennung und mechanisch-biologischen Abfallbehandlung sind derzeit noch nicht an den Primärenergiepreis gebunden. Gleichermaßen gilt ebenso für die energetische Verwertung der heizwertreichen Fraktion. Es ist davon auszugehen, dass durch steigende Primärrohstoffpreise eine Kopplung der Sekundärbrennstoffpreise stattfinden wird, wodurch Aufwendungen zur Entsorgung einzelner Stofffraktionen deutlich sinken würden. Fallende Zuzahlungen für die Entsorgung verbleibender Restfraktionen machen es daher sinnvoll die Kosten des Deponierückbaus neu zu bewerten.

## 2.6 Nachsorge und Folgekosten

„Aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht beginnen die Kosten, welche für den Abschluss einer Deponie rückzustellen sind, nicht erst in der Nachsorgephase bzw. mit der Schlussabnahme gemäß TA Siedlungsabfall sondern bereits mit der sogenannten Stilllegungsphase nach der Anlieferung der ‚letzten Tonne Abfall und somit direkt nach Verfüllung der Deponie, da ab diesem Zeitpunkt keine Einnahmen durch Deponiegebühren mehr erzielt werden können“ [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005].

Demnach sind alle folgenden Maßnahmen wie bspw. das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung, die Rekultivierung und der Rückbau von Betriebseinrichtungen in der Folgekostenberechnung zu berücksichtigen. Der häufig verwendete Begriff Nachsorgekosten ist daher besser durch den Begriff Folgekosten zu ersetzen. Einen Überblick über die darin enthaltenen Kostenstrukturen gibt Abbildung 4. Dabei sind alle Punkte hervorgehoben, die im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Folgekostenberechnung zu berücksichtigen sind [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005].



Abbildung 4: Verlauf der Stilllegung einer Deponie aus abfallrechtlicher Sicht [Burkhardt & Egloffstein, 2005]

Der Begriff der Folgekosten kann in Investitionskosten und zeitabhängige Kosten untergliedert werden. Zu ersteren sind Aufwendungen zu zählen, die bspw. für die Herstellung der Oberflächenabdichtung, die Aufbringung der Rekultivierung oder den Rückbau betrieblicher und baulicher Einrichtungen, also letztlich einmalig, anfallen.

Zeitabhängige Kosten werden durch den Betrieb, Wartungsarbeiten und Reparatur der vorhandenen Einrichtungen sowie durch die Überwachung der Deponie hervorgerufen. Hierbei ist die Dauer der Nachsorge ein wesentlicher Faktor.

#### Zeitdauer der Nachsorge

Nach Deponieverordnung ist für Deponien der Klasse II bis IV ein Nachsorgezeitraum von mindestens 30 Jahren rechnerisch zu erfassen. Die reale Dauer der Nachsorgephase lässt sich jedoch nur durch Emissionsprognosen abschätzen. Hierbei zeigt sich, dass der definierte Zeitraum von 30 Jahren in den meisten Fällen deutlich überschritten wird. Den limitierenden Faktor stellt dabei die geforderte Sickerwasserqualität dar [WOLFGARTEN, 2010]. Im Fall des Deponiegases kann aufgrund vorliegender Studien davon ausgegangen werden, dass bei kommunalen Hausmülldeponien die aktive Entgasungsphase nach etwa 30 Jahren eingestellt ist. Aus wirtschaftlicher Sicht ist hierbei interessant, wie lange das erfasste Deponiegas in Blockheizkraftwerken oder vergleichbaren Einrichtungen lukrativ genutzt werden kann und wie lange die abschließende Phase der Deponiegassafung

mittels Gasbehandlung durchzuführen ist. Hinsichtlich zulässiger Restemissionen werden in der Literatur Werte von 0,02 bis 0,14  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  genannt [EITNER, 2010c].

Tabelle 6: Abschätzung des Zeitraums bis zum Erreichen der jeweiligen Grenzkonzentration gemäß Anforderungswerten Anhang 51 AbwV [Eitner, 2010c]

Parameter	Grenzkonzentration	Ausgangskonzentration im DSR	Zeitraum bis Grenzkonzentration erreicht	Zeitraum bis Grenzkonzentration erreicht [KRÜMPPELBECK, 2000]
	[mg*l <sup>-1</sup> ]	[mg*l <sup>-1</sup> ]	[a]	[a]
CSB Mittelwert	200	500 – 12.700 3.000	80 – 360 140	65 – 320
TKN Mittelwert	70	200 – 2.100 900	120 – 450 220	Jahrzehnte bis Jahrhunderte
Cl Mittelwert	100	340 – 2.950 1.200	90 – 250 140	25 – 60
AOX Mittelwert	0,5	0,39 – 2,38 1,6	30 – 210 80	40 – 100

Nach Tabelle 6 ist davon auszugehen, dass im Bereich der Sickerwassererfassung und -behandlung Nachsorgezeiträume von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten zu berücksichtigen sind. Entsprechend sind auch die Einrichtungen zur Sickerwassererfassung, Oberflächenwasserableitung, Deponieüberwachung usw. langfristig erforderlich und kostenmäßig zu erfassen.

Im Sinne des Nachsorgebegriffs bilden Deponien aus heutiger Sicht ein Abfallendlager, woraus theoretisch ein unendlicher Nachsorgezeitraum resultiert. Hiermit kann jedoch betriebswirtschaftlich nicht gerechnet werden, sodass realistische Zeiträume der aktiven Nachsorge definiert werden müssen.

Für reaktive Hausmülldeponien ist ein Nachsorgezeitraum anzusetzen, der berücksichtigt, dass noch über längere Zeiträume mit relevanten Gas- und Sickerwasseremissionen zu rechnen ist. In der Literatur werden hierzu Zeiträume von ca. 30 bis 80 Jahren genannt [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 2005].

Nach BURKHARDT & EGLOFFSTEIN [1996] sind nachfolgende Gruppen im Rahmen der Kostenkalkulation zu berücksichtigen:

- Oberflächenwasserableitung (Bau und Betrieb bzw. Unterhalt)
- Oberflächenabdichtung (Bau- und Baunebenkosten)
- Rekultivierung (Herstellung und Pflege)
- Sickerwasserbeseitigung/-reinigung (Betriebskosten)
- Entgasung (Betriebskosten, evtl. Rückbau)
- Mess- und Kontrollprogramm (Monitoring während der Nachsorgephase)
- Rückbaumaßnahmen (Rückbau von Betriebsanlagen und Gebäuden etc.)
- Sonstige Kosten (Personalkosten, Pacht etc.)

In diesem Zusammenhang sind in der Fachliteratur sehr unterschiedliche Folgekostenschätzungen vorhanden. Für Berechnungen, die auf Grundlage der TA-Siedlungsabfall beruhen und Nachsorgezeiträume von 30 bis 80 Jahren berücksichtigen, können die in Tabelle 7 angegebenen Werte angenommen werden. Die Kosten der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung werden hierbei berücksichtigt. Es wird deutlich, dass die Höhe der Folgekosten im Wesentlichen von der Deponiefläche und dem Ablagerungsvolumen abhängen [BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 1996].

Tabelle 7: Spezifische Folgekosten für Hausmülldeponien in Abhängigkeit des Ablagerungsvolumens und der Ablagerungsfläche [Burkhardt & Egloffstein, 2005]

Statistische Kenngröße	Volumina [m³]	Flächen [m²]	Verhältnis [m³*m⁻²]	Nachsorgekosten [€*m⁻²]	Nachsorgekosten [€*m⁻³]
MIN	1,0	7,5	0,13	200	10,5
MW	2,9	19,1	0,15	250	17,5
MAX	4,8	28,5	0,17	310	23

Nach BÖLTE & GEIPING [2011] sind für die Folgekosten bei einer 30 oder 50-jährigen Nachsorgedauer 23 bis 30 €\*Mg⁻¹ abgelagertem Abfall anzurechnen.

EITNER [2010c] kommt im Rahmen von betriebswirtschaftlichen Rückstellungsberechnungen verschiedener Deponien auf die in Tabelle 8 aufgezeigten Größenordnungen.

Tabelle 8: Rückstellungskosten für unterschiedliche Siedlungsabfalldeponien

Siedlungsabfalldeponie	Fläche [ha]	Volumen [Mio. m³]	Mittlere Deponiehöhe [m]	Spezifische Nachsorgekosten [€*m⁻³]
Deponie A	20,0	3,5	17,5	8,9
Deponie B	6,5	0,8	12,3	8,9
Deponie C	10,5	1,0	9,5	10,7
Deponie D	19,7	4,0	20,3	8,9
Deponie E	30,9	7,1	23,0	11,6
Deponie F	24,1	4,0	17,0	11,3
Mittelwert	ca. 18,0	ca. 3,0	ca. 16	ca. 9,5

STEGMANN ET AL. [2006] stellen im Rahmen einer Studie die in Tabelle 9 enthaltene praxisnahe Folgekostenkalkulation auf. Hierbei können die Kosten in Abhängigkeit der Nachsorgedauer, der Deponiegröße, der vorhandenen technischen Einrichtungen und/oder der regionalen Situation abweichen. Einen abschließenden Überblick zur Verteilung der anfallenden Kosten gibt Tabelle 10.

Tabelle 9: Praxisnahe Folgekostenkalkulation [Stegmann et al., 2006]

Kostenhauptgruppe/-untergruppe	Einheit	Spezifische Kosten	
		von	bis
<b>Oberflächenabdeckung/-abdichtung</b>			
• Profilierung	€*m <sup>-2</sup>	2	10
• temporäre Oberflächenabdeckung inkl. Infrastruktur	€*m <sup>-2</sup>	15	45
• endgültige Oberflächenabdichtung inkl. Infrastruktur	€*m <sup>-2</sup>	60	100
• Rückbaumaßnahmen im Rahmen der Stilllegung	€*m <sup>-2</sup>	1	3
<b>Sickerwasserbehandlung (Betrieb und Kapitaldienst)</b>			
• Sickerwasserbehandlung vor Ort	€*m <sup>-3</sup>	20	50
• externe Sickerwasserbehandlung inkl. Transport	€*m <sup>-3</sup>	20	60
• vereinfachte Reinigung, z.B. Pflanzenkläranlagen	€*m <sup>-3</sup>	2	10
<b>Deponiegasbehandlung (Betrieb und Kapitaldienst)</b>			
• aktive Gasfassung und thermische Gasbehandlung	€*ha <sup>-1</sup>	8.000	12.000
• aktive Gasfassung und Biofiltereinsatz	€*ha <sup>-1</sup>	4.000	8.000
• passive Methanoxidation über Rekultivierungsschicht	€*ha <sup>-1</sup>	0	200
<b>In-situ Stabilisierung</b>			
• Infiltrationssystem	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	4.000	6.000
• aktive in-situ Belüftung (ohne Abluftbehandlung)	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	2.000	4.000
<b>Sonstige laufende Kosten</b>			
• Unterhaltung Oberflächenabdichtung	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	4.000	10.000
• Unterhaltung aktive Gasfassung	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	5.000	7.000
• Unterhaltung Sickerwasserfassung	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	4.000	6.000
• Unterhaltung Infrastruktur	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	4.000	6.000
• Gasmonitoring	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	1.000	3.000
• Setzungsmessungen	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	500	1.000
• Sickerwassermanagement	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	2.000	4.000
• Grundwassermanagement	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	1.000	3.000
• Umfeldüberwachung inkl. Wetterdaten etc.	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	1.000	2.000
• Versicherungen etc.	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	2.000	4.000
• Nachsorgemanagement, Berichtswesen und Dokumentation	€*a <sup>-1</sup> *ha <sup>-1</sup>	4.000	6.000

Tabelle 10: Mittlere Verteilung des Kostenaufwands für Stilllegung und Nachsorge [Bartl, 2005]

Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahme	Stilllegungskosten (Investitionen)	Nachsorge Betriebskosten	Anteil Gesamtkosten
Oberflächenabdichtung und Rekultivierung	73 %	18 %	45 %
Oberflächenentwässerung	5 %	2 %	3 %
Grundwasser	1 %	3 %	1 %
Sickerwasser	14 %	47 %	32 %
Deponiegas	4 %	10 %	7 %
Rückbau entbehrlicher Anlagen	2 %	-	1 %
weitere Nachsorgemaßnahmen und Einrichtungen	1 %	20 %	11 %

## 2.7 Rohstoffmärkte und Preisentwicklung

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts steigt die weltweite Nachfrage nach Industriemetallen, Seltenen Erden und Energie enorm. Dieser Aspekt zeigt sich unter anderem in den stark volatilen Märkten und damit verbundenen Preisschwankungen [MATTHIES, 2011]. Laut Schätzungen der UN steigt die Weltbevölkerung derzeit sekündlich um 2,6 Menschen [UN, 2011]. Dies bedeutet, dass im Jahr 2050 ca. 9 Mrd. Menschen von der Erde und ihren Ressourcen leben müssen. Einen wesentlichen Beitrag zu dieser Entwicklung werden nach Expertenmeinung insbesondere die Schwellen- und Entwicklungsländer leisten [OECD, 2011; ALLIANZ GLOBAL INVESTORS, 2011]. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sich die Weltwirtschaft, gemessen am GDP, verdoppelt. Dabei wird besonders in den BRIC-Staaten mit einem starken Wirtschafts- und Konsumwachstum gerechnet [OECD, 2011]. Im Zusammenhang steigender Weltbevölkerung, wachsender Wirtschaftsleistung und sich erhöhendem Konsum werden auch der Rohstoff- und Energieverbrauch stetig steigen [FISCHER-KOWALSKI, 2009]. Hochrechnungen des WORLD ENERGY COUNCILS [2007] rechnen bis 2025 mit einer Verdopplung des weltweiten Stromverbrauchs, der sich bis zum Jahr 2050 sogar verdreifacht. Noch drastischer wird der Anstieg des Primärenergieverbrauchs der nicht-OECD-Staaten angesehen. Dieser wird sich bis 2035 um ca. 90 % steigern. 2035 wird alleine China etwa 70 % mehr Energie verbrauchen als die USA, die zu diesem Zeitpunkt (2035) als zweitgrößter Konsument angesehen wird [IEA, 2011]. Dieser starke Wachstumstrend lässt sich teilweise noch deutlicher bei Industriemetallen wie Kupfer, Aluminium und Eisen erkennen [OECD, 2011; BANK, 2011; ERICSSON, 2011]. Entwicklungsländer haben aktuell im Vergleich zu Industrieländern einen um Dreiviertel geringeren Metallverbrauch, obwohl dort etwa fünfmal mehr Menschen leben. Tabelle 11 veranschaulicht dies deutlich.

Tabelle 11: Durchschnittlicher Rohstoffverbrauch pro Einwohner und Jahr [Allianz Global Investors, 2011]

Rohstoff [ $\text{kg} \cdot \text{EW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]	Deutschland	China	Potenzieller Wachstumsfaktor Chinas
Aluminium [ $\text{kg} \cdot \text{EW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]	16	2	8,0
Erdöl* [ $\text{kg} \cdot \text{EW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]	1.645	411	4,0
Stahl [ $\text{kg} \cdot \text{EW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]	465	271	1,7
Kupfer [ $\text{kg} \cdot \text{EW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ]	16	3	5,3

\* 1 Barrel Erdöl entspricht einem Volumen von 159 l. Bei einer Dicht von  $0,862 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  sind dies  $137 \text{ kg} \cdot \text{Barrel}^{-1}$ .

Experteneinheiten gehen davon aus, dass vor diesem Hintergrund die zukünftige Verfügbarkeit einzelner Industriemetalle wie bspw. Kupfer stark gefährdet ist und neue Lösungen gefunden werden müssen [ERICSSON, 2011]. Neben Substitutions- und Explorationsmaßnahmen stellen in diesem Kontext anthropogene Depots (Deponien, Altgebäude, E-Schrott etc.) eine Quelle dar, in denen sich ca. 80 bis 90 % der bisher gewonnenen Rohstoffe befinden [WUPPERTAL INSTITUT, 2008].

Ähnliches gilt für energetische Rohstoffe, die in Form von Kunststoffabfällen, Holzresten etc. allgegenwärtig vorliegen. Insgesamt wird daher auch in Zukunft ein weiterer Preisanstieg auf den nationalen und internationalen Rohstoffmärkten zu verzeichnen sein, der sich unmittelbar auf mehr oder minder gekoppelte Sekundärrohstoffmärkte auswirkt.

## 2.8 Ausgewählte Deponierückbauprojekte

### 2.8.1 Deponie Burghof

Die Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH führte 1993 bis 1994 auf der Deponie Burghof in Vaihingen/Horrheim ein Demonstrationsprojekt zur praktischen Umsetzbarkeit von Deponierückbauvorhaben durch. Ziel war es, durch Aushub, arbeitnehmerfreundliche Sortierung und Sichtung die in den Abfällen enthaltenen Problemstoffe zu entfernen, verwertbare Materialien wiederzugewinnen und somit neues Deponievolumen zu schaffen [GÖSCHL, 1995].

Die Deponie Burghof wurde seit 1978 nach dem Stand der Technik betrieben. Abbildung 5 zeigt die während des Betriebszeitraums abgelagerten Anteile der Abfallarten [RETENBERGER, 1996a].

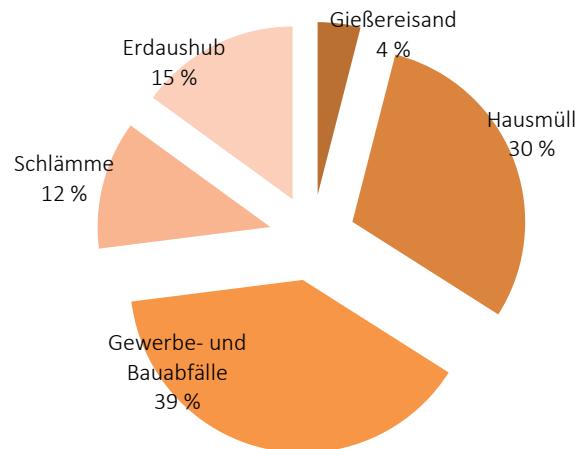


Abbildung 5: Anteile der auf der Deponie Burghof abgelagerten Abfallarten [Rettenberger, 1996a]

Anaerobe Abbauprozesse, die innerhalb des Deponiekörpers stattfinden, sind mit Geruchsentwicklungen verbunden. Daher sind vor der Deponieöffnung Maßnahmen zu treffen, die eine Beeinträchtigung der Umwelt durch Geruch reduzieren. Die Geruchsstabilisierung wurde im Fall der Deponie Burghof durch das Zuführen von organisch belasteter, warmer und wasserdampfgesättigter Luft erzielt. Dabei zeigte sich, dass sich das Mikroklima des belüfteten Deponiebereichs bereits nach 10 bis 14 Tagen umstellte und anaerobe, geruchsverursachende Abbauprozesse unterbunden wurden.

Der Abbau geruchstabilisierter Deponieabschnitte erfolgte mittels Löffelbagger, an den sich ein Transport des Materials mittels LKWs zur Aufbereitungsanlage anschloss [GÖSCHL, 1995]. Einen Überblick der weiteren Verfahrensschritte gibt Abbildung 6, wobei eine mobile und modular erweiterbare Aufbereitungsanlage zum Einsatz kam.

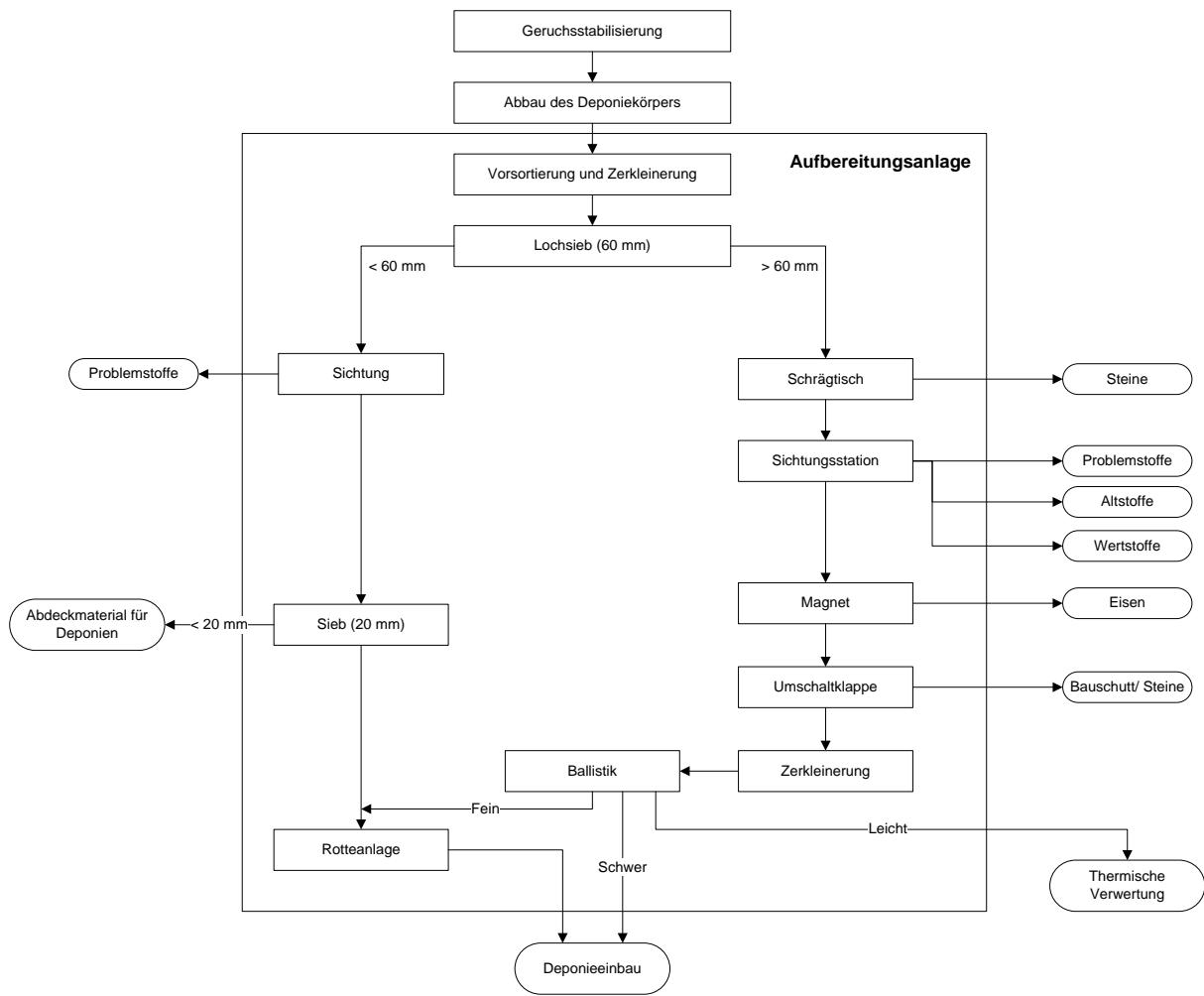


Abbildung 6: Verfahrensschritte der Deponiegutaufbereitung [Rettenberger et al., 1995]

Wie dargestellt, bestand der erste Aufbereitungsschritt aus einer Vorsortierung, die sperrige Teile entfernte. Anschließend kam es in einem Trommelsieb zur Bildung eines Unter- (0 - 60 mm) und Überkorns (> 60 mm). Nach Sichtung wurde das Unterkorn einer weiteren Klassierung unterzogen. Die daraus resultierenden Fraktionen wurden entweder direkt wieder abgelagert oder als Deponiebaumaterial verwendet. Versuche zur biologischen Behandlungsfähigkeit zeigten, dass dieser Abfall nur noch geringe biologische Aktivität entwickelte [GÖSCHL, 1994].

Das Überkorn (> 60 mm) durchlief zunächst ein Schrägband, um Steine, Ziegel und Betonbrocken auszusortieren. Das verbleibende Material wurde anschließend einem automatischen Sortiersystem zugeführt, wodurch die Abscheidung von Wertstoffen wie bspw. Holz und Kunststoffe erzielt wurde. Nach der Sichtungsstation schied ein Überbandmagnet Eisenmetalle ab. Die bis dahin nicht aussortierten Abfälle wurden in einem letzten Aufbereitungsschritt durch einen Ballistikseparator in eine Fein-, Schwer- sowie Leichtfraktion aufgetrennt (nähere Einzelheiten zum Aufbereitungsverfahren sind [GÖSCHL, 1994 & 1995; RETTENBERGER ET AL., 1995; BOTHMANN ET AL., 2002] zu entnehmen).

Die Leichtfraktion, hauptsächlich bestehend aus Kunststoffen, Papier und Textilien, konnte aufgrund des hohen Heizwertes größtenteils thermisch verwertet werden. Die Schwerfraktion glich mit ihrer Zusammensetzung der zuvor in der Aufbereitungsanlage aussortierten Steinfraktion. Entsprechend wurde sie dem gleichen Verwertungsweg zugeführt. Bei der

Feinfraktion aus dem Ballistikseparator handelte es sich um nur sehr geringe Mengen, die zumeist direkt wieder deponiert wurden [GÖSCHL, 1994 & 1995].

Während des einjährigen Pilotprojekts wurden insgesamt 50.000 m<sup>3</sup> Deponiematerial ausgebaut und behandelt. Die Ergebnisse belegen nach Angaben von GÖSCHL [1995], dass durch Deponierückbau eine Volumenreduktion von mehr als 50 Vol.-% zu erreichen ist. Die für den Volumengewinn wesentliche Fraktion ist die Leichtfraktion, die mit Heizwerten von 16.000 – 22.000 kJ\*kg<sup>-1</sup> und einem Volumenanteil von 51 % zur energetischen Verwertung geeignet ist. Die Fraktion < 20 mm machte ca. 13 Vol.-% des Gesamtvolumens aus und erfüllt die nach TASi geforderten Ansprüche der Deponiekategorie II oder könnte ggf. mit Vorlage eines Verwendungsnachweises außerhalb von Deponien verbracht werden. Kontaminationsuntersuchungen der aussortierten Steinfraktion (etwa 10 Vol.-%) ergaben Werte, die weit unter vergleichbaren Werten der Bauschuttaufbereitung lagen. Ein direkter Einsatz als Recyclingmaterial ist somit möglich. Metalle und Holz machten nur etwa 2 Vol.-% des Deponiematerials aus. Zudem zeigte sich, dass in einer 14 Jahre alten Deponie nur geringe Alterungs- und Reaktionsprozesse der Materialien auftraten.

Die Fortsetzung des Pilotprojekts fand bis 1996 mit eingeschränkter wissenschaftlicher Begleitung statt. Innerhalb der drei Projektjahre wurden insgesamt 120.000 m<sup>3</sup> Abfall ausgekoffert und behandelt. Der mit 79 Gew.-% mengenmäßig bedeutendste Anteil entfiel dabei auf die Feinfraktion < 60 mm, welche nach einer biologischen Vorbehandlung wieder abgelagert wurde. Die thermisch verwertbaren Komponenten wie Holz, Textilien und die kunststoffhaltige Leichtfraktion machten 17 Gew.-% aus. Die stofflich verwertbaren Metalle, Steine und Kunststoffe besaßen einen Anteil von 4 Gew.-%. Neben der stofflichen und energetischen Verwertung sorgte die verbesserte Einbautechnik dafür, dass etwa 50 % des Deponievolumens eingespart werden konnte.

Zu beachten ist, dass ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen des einjährigen Pilotprojekts und der Fortsetzungsphase nicht möglich ist, da eine Gegenüberstellung von Massen- zu Volumenströmen stattfinden würde.

Die Gesamtkosten für den Rückbau beliefen sich umgerechnet auf ca. 165 € pro m<sup>3</sup> Deponiegut. Diese, im Vergleich zum regulären Rückbau, hohen Kosten sind auf die durchgeführten Optimierungsversuche bei der Aufbereitung zurückzuführen. Bei voller Auslastung der Anlage hätten die Kosten um mehr als die Hälfte niedriger gelegen [RETENBERGER ET AL., 1995]. Der Anlagendurchsatz ist somit ein wesentlicher Faktor, der die Wirtschaftlichkeit von Rückbauprojekten beeinflusst.

### UNTERSUCHUNGEN ZUR ABFALLBESCHAFFENHEIT

In Verbindung mit Sanierungsmaßnahmen auf der Deponie Burghof wurden Ende des Jahres 2009 Deponiegutproben entnommen und anschließend hinsichtlich ihrer Beschaffenheit untersucht. Zusätzlich erfolgte die Charakterisierung des Deponieguts anhand folgender Parameter [STEGMANN, 2010]:

- Entnahmetiefe
- Deponiegutzusammensetzung (Holz, Kunststoffe, Metalle, Steine, Papier, mineralisierter Müll und Sonstiges)
- Farbe bzw. Aussehen
- Wassergehalt
- Besonderheiten

In Bezug auf die Deponiegutzusammensetzung ist dabei festzuhalten, dass die untersuchten Deponiegutproben sehr unterschiedliche Anteile der oben genannten Fraktionen aufzeigen. Nach STEGMANN [2010] ist dies darauf zurück zu führen, dass der Deponiekörper neben typischen

Siedlungsabfällen auch andere Abfälle wie bspw. Bauschutt beinhaltet, die unterschiedliche Eigenschaften besitzen und ebenfalls im Rahmen der Untersuchungen beprobt wurden.

Die Ergebnisse der Wasser- und Trockensubstanzgehaltsbestimmung des Deponieguts zeigen im Mittel mit 26,5 Gew.-% der FM Wassergehalt bzw. 73,5 % der FM Trockensubstanz vergleichbare Werte zu anderen Siedlungsabfalldeponien auf. Auch die Variation der Glühverlustwerte und des organischen Kohlenstoffgehalts ist vergleichsweise gering und mit denen ähnlicher Untersuchungen vergleichbar. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass trotz relativ heterogener Deponiegutzusammensetzung ein mehr oder minder homogenes Emissionsverhalten zu vermuten ist [STEGMANN, 2010].

Die ermittelten Gasbildungspotenziale über 21 Tage ( $GB_{21}$ ) ermöglichen Aussagen zur zukünftigen Deponegasproduktion, also zum Restgehalt an noch vorhandenen, biologisch abbaubaren Bestandteilen im Deponiekörper. Unter Berücksichtigung, dass das gesamte Deponiegaspotenzial um etwa 30 – 50 % höher liegt als die Ergebnisse des Standardversuchs, kann dieses mit 15 – 30  $m^3 \cdot Mg^{-1}$  abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Eluatanalysen zeigen in Bezug auf vergleichbare Siedlungsabfalldeponien erhöhte Konzentrationen auf. Dies gilt vor allem für die Parameter Leitfähigkeit, DOC, Chlorid, Phenolindex, Ammonium, CSB und BSB<sub>5</sub> [STEGMANN, 2010].

## 2.8.2 Zentraldeponie Düsseldorf Hubbelrath

Die in diesem Kapitel gemachten Ausführungen zur Zentraldeponie Hubbelrath entstammen, falls nicht separat angegeben, HÜTLER & WISKEMANN [1995] und WISKEMANN [1993].

Seit 1972 betreibt die Stadt Düsseldorf die Bauschuttdeponie Hubbelrath, die mit einem Abfallvolumen von ca. 4,5 Mio. m<sup>3</sup> nahezu vollständig verfüllt ist. Dies gab der entsorgungspflichtigen Körperschaft den Anlass, die Rückbaufähigkeit und den daraus resultierenden Volumengewinn zu untersuchen. Unter Rückbau wird hierbei neben der einfachen Umlagerung der Abfälle auch die Abtrennung und Nutzung verwertbarer Fraktionen verstanden.

Neben der vorrangigen Ablagerung von nicht brennbaren Materialien wurde die Deponie in der Vergangenheit als Zwischenlager für Siedlungsabfälle genutzt, um Engpässe der 1965 in Betrieb genommenen Müllverbrennungsanlage zu überbrücken. Im Sinne der Gewinnung von Sekundärrohstoffen steht die Abschätzung und Beurteilung des Anteils an eingelagerten Siedlungsabfällen im Vordergrund der Untersuchung.

Forderungen nach der aktiven Entgasung der Zentraldeponie Hubbelrath erforderten es zwölf neue Gasbrunnen bis zu einer Tiefe von 50 Metern anzulegen. Die Bohrpunkte wurden dabei so angelegt, dass unterschiedliche Ablagerungsbereiche der Deponie erfasst werden konnten. Das im Rahmen der Bohrungen gewonnene Material stellt neben Auswertungen zur Abfallstatistik die Grundlage zur Beurteilung der Rückbaufähigkeit dar.

Für quantitative Analysen wurde pro Meter Bohrtiefe eine Mischprobe hergestellt, die auf pH-Wert, Leitfähigkeit, Wassergehalt, Glühverlust und die Anteile der Stoffarten Schluff, Sand, Kies, Steine, Asche, Schlacke, Beton, Holz, Kunststoffe, Gummi, Sperrmüll, Isoliermassen, Bitumenmasse, Hausmüll, Glas sowie Metalle untersucht werden sollte. Aufgrund der bei den Bohrungen gewonnenen Erkenntnisse, dass einzelne Stoffarten wie bspw. Bitumen- und Isoliermasse lediglich in vernachlässigbaren Mengen auftraten, konnte der Stoffgruppenkatalog auf acht Fraktionen begrenzt werden. Die Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen sind Abbildung 7 zu entnehmen.

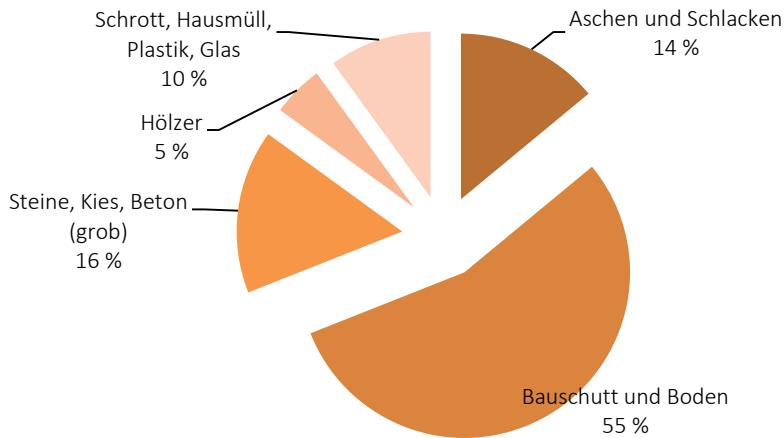


Abbildung 7: Zusammensetzung des Deponieguts der Zentraldeponie Hubbelrath

Die festgestellten Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit weisen mit pH 8 bis 10 bzw. 0 bis  $1.000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  unbedenkliche Werte auf. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die Untersuchungen der zwölf unterschiedlichen Bohrungen nahezu identische Ergebnisse liefern und somit eine homogene Verteilung der Stoffarten innerhalb der Deponie vorliegt.

Der Schwerpunkt der qualitativen Analysen lag auf der Fragestellung, ob die eingelagerten bzw. rückgewonnenen Bauschuttfraktionen hinsichtlich ihrer Kontaminationsbelastungen mit frisch angelieferten Bauschuttfraktionen vergleichbar sind. Die Ergebnisse der Kontaminationsuntersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Verteilungsmuster der Kontaminationen ist über das Tiefen- und Flächenraster der Deponie relativ gleichmäßig.
- Feine Fraktionen sind deutlich höher mit organischen und anorganischen Kontaminationen belastet als vergleichbare frische Bauschuttproben.
- Die grobe Bauschuttfraktion zeigt hinsichtlich der organischen und anorganischen Belastung ähnliche Größen auf, wie frischer Bauschutt.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die grobe Fraktion der aufbereiteten Deponiemasse sowohl heute als auch zukünftig verwertet werden könnte. Für die Feinfraktion sollten hingegen Sonderverwendungen wie bspw. der Einsatz als Deponiebaustoff gefunden werden.

Die insgesamt gewonnenen Ergebnisse weisen ein mittleres bis hohes Rückbaupotenzial für die Zentraldeponie Hubbelrath aus. Die Verdichtung dieser Erkenntnis sowie die Sammlung von Erfahrungen des Anlagenbetriebs wurden durch die Durchführung eines großtechnischen Versuchs erzielt. Hierbei wurden rund  $30.000 \text{ m}^3$  Deponiegut ausgebaut und einer mehrstufigen Aufbereitung unterzogen. Eine schematische Darstellung des eingesetzten Aufbereitungsschemas gibt Abbildung 8. Auf eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet, da ausschließlich einfache Techniken zur Klassierung der Materialströme zum Einsatz kamen.

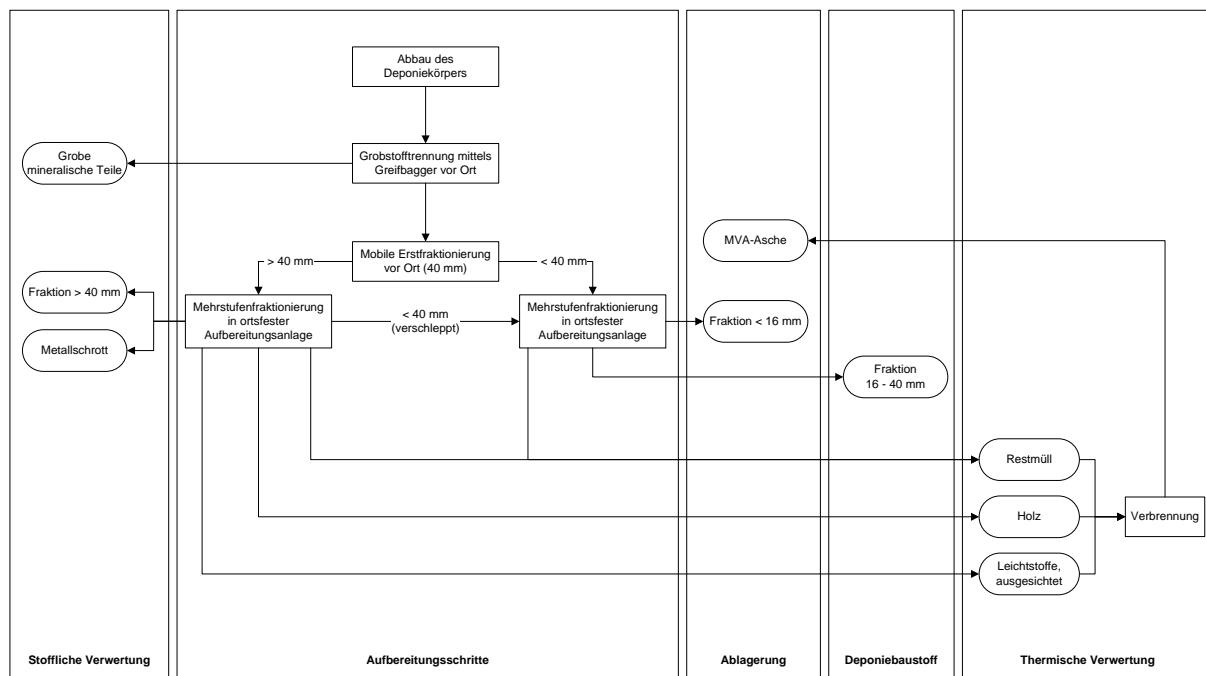


Abbildung 8: Verfahrensablauf beim Rückbauprojekt auf der Zentraldeponie Hubbelrath [Hütler & Wiskemann, 1995]

Wie die Ergebnisse des großtechnischen Versuchs zeigen, konnten trotz einfacher Aufbereitung etwa 75 % der umgelagerten 30.000 m<sup>3</sup> Deponiegut einer Verwertung zugeführt werden. Dabei entfallen Metallschrott, Materialien > 40 mm und grobe mineralische Teile mit etwa 35 % auf die stoffliche Verwertung. Leichtstoffe, Holz und Hausmüll können thermisch verwendet werden. Sie machen insgesamt einen Anteil von ca. 16 % aus. Die übrigen 23 % gehören der Fraktion 16 – 40 mm an. Diese können als Deponiebaustoffe einer Verwertung zugeführt werden.

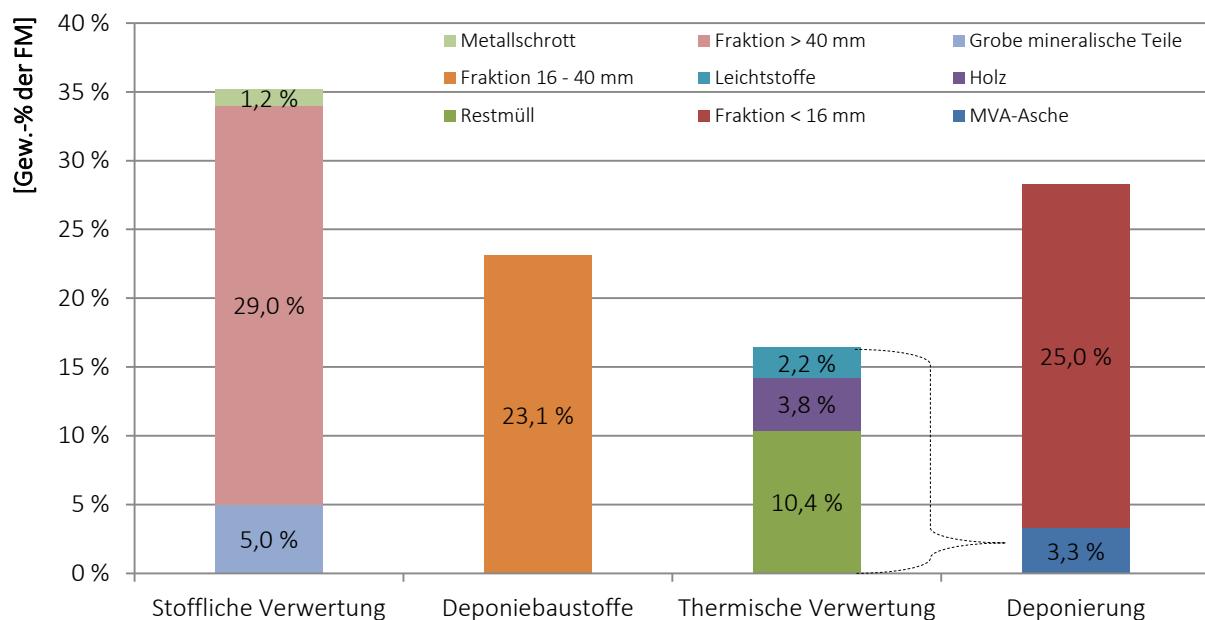


Abbildung 9: Mittlere Deponiegutzusammensetzung und deren Verwertungs- sowie Entsorgungsoptionen [Hütler & Wiskemann, 1995]

### **2.8.3 Hessische Deponien als Rohstofflagerstätten**

Basis dieser Untersuchung ist das Vorhaben des Hessischen Forschungsverbunds Abfall, Umwelt und Ressourcenschutz im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz aus dem Jahre 2008, das Wertstoffpotenzial hessischer Hausmülldeponien abzuschätzen. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf HFvA [2009] UND WIEMER ET AL. [2009].

Die Studie stellt eine übergeordnete Evaluation des Gesamtpotenzials der hessischen Deponien dar und bedient sich dabei der verfügbaren Datenlage sowie Erkenntnissen der Literatur. Zudem bezieht die Bilanzierung stattgefundene Änderungen in der Abfallwirtschaft und somit Änderungen der Abfallbeschaffenheit und –ablagerung in die Betrachtung ein. Hierbei wurden nachfolgende Zeiträume definiert und jeweils nach Art, Menge und Qualität der Abfälle unterschieden.

- 1973 – 1980:  
Entwicklung geordneter Deponietechnik, weitgehend frei von Recyclingaktivitäten
- 1981 – 1992  
Beginnende Abfallverwertung und bundesweite Hausmüllanalysen
- 1993 – 1998  
Nahezu flächendeckende Bioabfallkompostierung sowie Einführung der Verpackungsverordnung
- 1999 – 2005  
Gewerbeabfälle brachen aufgrund der Rahmenbedingungen des neuen Abfallgesetzes weitgehend weg. Das Ende des Deponiezeitalters!

Die Ermittlung der Art und Menge des jeweils in einem Zeitabschnitt abgelagerten Abfalls wurde durch die Bereitstellung von Datenmaterial der Deponiebetreiber, des statistischen Landesamtes sowie dem Landesamt für Umwelt und Geologie ermöglicht. Die Abschätzung der Qualität des abgelagerten Haushmülls für die Zeit vor 1981 wurde mittels Hausmüllanalysen aus Fachliteratur erzielt. Für die Zeitspanne von 1981 bis 1992 wurden die Ergebnisse der beiden bundesweiten Hausmüllanalysen herangezogen und übertragen. Die Zeiträume zwischen 1993 und 2005 wurden durch übertragbare Analysendaten aus der Literatur sowie des Witzenhausen-Instituts charakterisiert. Die Bewertung der Qualität der gewerblichen Abfälle wurde mit Hilfe des hessischen Gewerbeabfallkatasters vorgenommen.

An der Untersuchung nahmen insgesamt 11 hessische Deponien teil. Ein besonderes Augenmerk wurde zudem auf die Deponie Kirschenplantage in der Nähe von Hofgeismar gelegt.

Die Zentraldeponie Kirschenplantage besitzt eine Fläche von 28 ha und wird bereits seit den fünfziger Jahren betrieben. Der sogenannte Altteil wurde bis 1989 verfüllt und macht etwa 9 ha der Gesamtfläche aus. In diesem Bereich sind die abgelagerten Abfälle hinsichtlich ihrer Menge und Zusammensetzung nicht bekannt. Aufgrund geometrischer und topographischer Gegebenheiten gehen die Autoren der Studie von einer Ablagerungsmenge von 1 bis 1,2 Mio. m<sup>3</sup> aus. Über die Zusammensetzung des nach 1989 eingebauten Abfalls existieren hingegen relativ exakte Aufzeichnungen.

Abbildung 10 zeigt die abgeschätzten Stoffmengen, die im Zeitraum von 1973 bis 2005 auf der Deponie abgelagert wurden. Dabei ist zu beachten, dass bei der Berechnung von einem Abbau der organischen Substanz in Höhe von 50 % ausgegangen wird. Auffallend an der spezifischen Abfallzusammensetzung sind die hohen Mineralien- und Organikanteile, die zusammen etwa 60 % der Gesamtmenge ausmachen. Die hochkalorische Kunststofffraktion bestimmt mit rund 10 % bzw. 207.000 Mg maßgeblich die Wertigkeit des Deponiematerials. Metalle machen rund 4 % der vorgefundenen Stoffgruppen aus. Sie setzen sich zu rund 85 % aus Eisenmetallen, 13 % aus NE-Metallen und 2 % Aluminium zusammen.

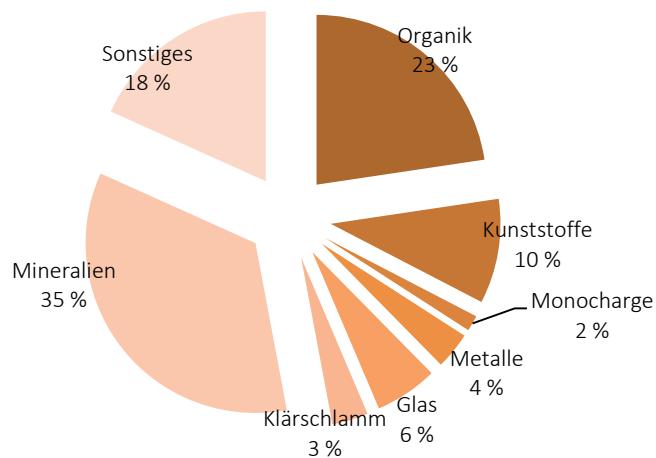


Abbildung 10: Abgelagerte Stoffströme auf der Deponie Kirschenplantage für den Zeitraum 1973 bis 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau

Die prognostizierte prozentuale Verteilung der Stoffgruppen über alle elf hessischen Deponien wird aus Abbildung 11 ersichtlich. Zu beachten ist, dass der starke Anstieg des Mineralienanteils darauf zurückzuführen ist, dass auf einer der Deponien überproportional viel Erdreich abgelagert wurde.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die prozentuale Verteilung der einzelnen Fraktionen von Deponie zu Deponie sehr stark variiert. Die spezifische Evaluierung des Ressourcenpotenzials von Deponien ist somit äußerst bedeutend um valide Aussagen treffen zu können.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse dieser Erhebung aufgrund des einfachen Untersuchungsansatzes kritisch zu betrachten sind und deren Aussagekraft deutlich eingeschränkt werden muss.

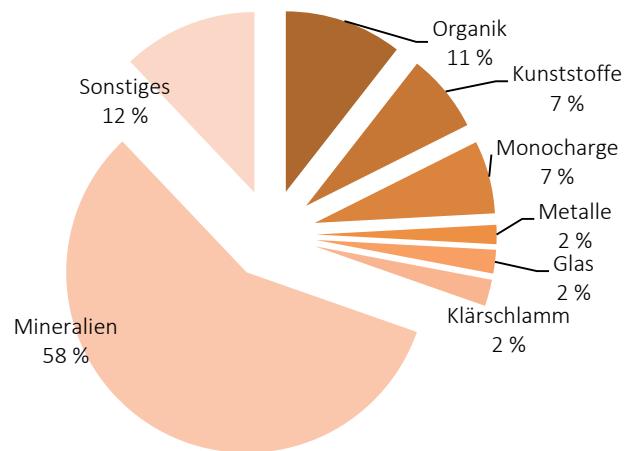


Abbildung 11: Kumulierte Fraktionsanteile der 11 hessischen Referenzdeponien für den Zeitraum zwischen 1972 und 2005 - Nettomengen nach erfolgtem fünfzigprozentigem Organikabbau

## 2.8.4 Deponie Deiderode

Nach RAKETE [2001] konnten beim Rückbauvorhaben der Deponie Deiderode nachfolgende Erfahrungen und Ergebnisse gewonnen werden.

Die kombinierte Bauschutt-, Haus- und Gewerbeabfalldeponie Deiderode wurde von 1972 bis 1987 vom Landkreis Göttingen betrieben. Die darin abgelagerten ca. 900.000 m<sup>3</sup> Abfall sollten aufgrund von Erweiterungsmaßnahmen und der Anpassung an den aktuellen Stand der Technik in zwei Teilschritten umgelagert werden.

Im ersten Teilbereich wurden ca. 477.000 m<sup>3</sup> Abfall umgelagert. Dabei erfolgte vor der eigentlichen Umlagerung mittels Bagger und Dumper eine Be- und Entlüftung des Deponiekörpers, um Geruchs- und Gasemissionen zu minimieren und die Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Die Untersuchungen im Rahmen der ersten Teilfläche ergaben zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Zu keinem Zeitpunkt der Baumaßnahmen wurden die MAK-Werte im Baufeld überschritten.
- Der Effekt der Geruchs- und Gasreduzierung durch Be- und Entlüftung hat sich über alle Erwartungen hinaus bestätigt.
- Während sowie nach Be- und Entlüftungsphasen konnten weder Geruchsbelastungen noch messbare Gaswerte auf der Umlagerungsfläche festgestellt werden.
- Während der gesamten Umlagerung traten keine „besonders überwachungsbedürftigen Abfälle“ auf.
- Auffällig waren sehr hohe Anteile an Kunststofffolien, Gummischläuchen und Altreifen.
- Neben großen Betonbrocken und Natursteinen mit einer Kantenlänge > 50 cm zeichnete sich das Deponiematerial durch einen hohen Anteil an Feinmaterial aus.
- Erkennbar war zudem, dass mit zunehmender Tiefe der Grad der Mineralisierung abnahm.

Die Zielsetzung beim zweiten Teilabschnitt lag in der vorherigen Erkundung des Zustandes und Gefahrenpotenzials der Altabfälle. Hierzu wurden im Abfallkörper insgesamt 20 Bohrungen bis zur natürlich anstehenden Bodenschicht durchgeführt. Die Analysen des gewonnenen Bohrguts lassen folgende Aussagen zu:

- Einen verhältnismäßig hohen Anteil an Inertmaterialien und verpressten Verpackungsfolien.
- Die während den Bohrungen ermittelten Temperaturen von maximal 25 °C waren sehr gering und deuten auf geringe biologische Abbauprozesse hin, zudem bedingen diese eine geringe Gas- und Wasserdampffreisetzung während der Bohrung bzw. der Umlagerung.
- Die Konzentration an Kohlenwasserstoffen in der Gasphase besaßen nur vereinzelt hohe Konzentrationen, die durch die Abfallzusammensetzung zu erklären sind.
- Glühverlust und oTSbio-Werte belegten, dass innerhalb der Deponie nur noch mit geringen Mengen an organisch abbaubaren Substanzen zu rechnen ist.
- Die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser deuteten darauf hin, dass sich die Deponie zum Zeitpunkt der Untersuchungen in der Methan- bzw. Zerfallsphase befand.

Aufgrund der genannten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass nach einer erneuten Ablagerung des Deponieguts nur noch in geringem Maße biologische Prozesse einsetzen werden. In Abstimmung mit der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde wurden daher einerseits die Arbeitsschutzmaßnahmen reduziert und andererseits auf die intensive Absaugung während der Belüftung verzichtet. Die Kosten der Umlagerung wurden auf umgerechnet etwa 4 €\*m<sup>-3</sup> geschätzt.

## 2.8.5 Verbundvorhaben Deponiekörper

Das Ziel des Verbundvorhabens Deponiekörper war es, die Kenntnisse über Deponiekörper und die daraus resultierenden Emissionen zu vertiefen. In insgesamt 9 Teilvergaben wurden hierzu umfangreiche Untersuchungen zum Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Altdeponien durchgeführt [EHRIG & BRINKMANN, 1998].

Im Rahmen des Teilverhabens „Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponie“ bildeten Feststoffuntersuchungen einen Schwerpunkt der Arbeiten. Zur Charakterisierung des Stoffpotenzials wurden mittels Bohrungen Feststoffe aus dem Deponiekörper entnommen und analysiert. Die Darstellung der jeweiligen Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit des entsprechenden Alters der Abfälle ermöglichte zudem die Abbildung zeitlicher Entwicklungen sowie Besonderheiten. Insgesamt wurden sieben verschiedene Deponien beprobt, wobei Abfälle aus einem Zeitraum von etwa 35 Jahren untersucht werden konnten. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die spezifischen Deponiecharakteristika [DOHMANN, 1997].

Tabelle 12: Deponiecharakteristika des Verbundvorhabens Deponiekörper [Dohmann, 1997]

Deponie-kennung	Fläche [ha]	Volumen [Mio. m³]	Ablagerungszeitraum der untersuchten Abfälle	Bemerkung
O	-	-	-	Diente ausschließlich zur Optimierung der Methodik
A*	15	1,40	1980 - 1987	Rund 153.000 Mg deponierte Siedlungsabfälle, die sich in der Hauptmasse zu 38 Gew.-% aus Hausmüll, 17 Gew.-% Gewerbeabfall, 26 Gew.-% Bauabfällen und 11 Gew.-% produktionsspezifischen Abfällen zusammensetzen.
B	3	0,45	1985	Ehemalige Kreismülldeponie, zur abgelagerten Abfallmenge und -zusammensetzung werden keine weiteren Angaben gemacht.
C	39	7,50	1990 - 1994	Jährliche Anlieferungsmenge rund 300.000 Mg, die im Wesentlichen aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfall bestehen. Als tägliche Zwischenabdeckung wird eine Schicht aus zerkleinertem und abgesiebten Sperrmüll aufgetragen.
D*	15	1,40	1977 - 1980	Rund 153.000 Mg deponierte Siedlungsabfälle, die sich in der Hauptmasse zu 38 Gew.-% aus Hausmüll, 17 Gew.-% Gewerbeabfall, 26 Gew.-% Bauabfällen und 11 Gew.-% produktionsspezifischen Abfällen zusammensetzen.
E	6	0,80	1973 - 1986	Kreismülldeponie, zur abgelagerten Abfallmenge und -zusammensetzung werden keine weiteren Angaben gemacht.
F	25	5,00	1980 - 1994	Jährliche Ablagerungsmenge ca. 600.000 Mg, die sich aus Hausmüll, Sperrmüll, Gewerbeabfall und Abwasserschlamm zusammensetzten.
G	45	5,40	1962 - 1983	Ablagerung von Hausmüll, Gewerbeabfällen, Bauschutt, Bodenaushub, Klär- und Industrieschlamm sowie Aschen.
H	2	0,08	1962 - 1975	Während des Deponiebetriebs erfolgt nahezu keine Erfassung der angelieferten Abfälle, daher ist im Fall dieser Deponie mit der vollen Bandbreite an kommunalen und industriellen Abfällen zu rechnen.

\* Es handelt sich bei der Deponie A und D um eine Deponie, an der zwei unterschiedliche Ablagerungsbereiche untersucht wurden

Vor den Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung der Stichproben bzw. des Deponieguts wurde mittels Trommelsiebanlage eine Klassierung in die Fraktionen < 8 mm, 8 – 20 mm, 20 - 40 mm, 40 – 80 mm und > 80 mm vorgenommen. Die sich anschließende Sortierung nach Stoffgruppen beschränkte sich dabei aus technischen Gründen auf die Fraktionen > 20 mm.

Die Ergebnisse der Klassier- und Sortieranalyse wurden auf die Trockenmasse bezogen angegeben, um Verfälschungen durch Wassergehalt zu verhindern.

Abbildung 11 und 12 zeigt den im Rahmen des Projektes ermittelten Anteil unterschiedlicher Korngrößenbereiche für Deponien unterschiedlichen Alters. Zudem wird eine Differenzierung zwischen Deponien der neuen (Abbildung 12) und alten Bundesländer (Abbildung 13) vorgenommen. Der auffällig hohe Anteil der Fraktion < 8 mm von nahezu 80 Gew.-% in alten Deponien der neuen Bundesländer ist nach EHRIG & BRINKMANN [1998] auf die ökonomischen Bedingungen Ostdeutschlands zurückzuführen, die bis 1990 eine im Vergleich zur Bundesrepublik Deutschland kleinere und enger gefächerte Produktpalette und somit auch „Abfallpalette“ mit sich brachten. Hinzu kommt, dass den Haushalten bis Ende der neunziger Jahre vorwiegend auf Braunkohle basierende Heizsysteme zur Verfügung standen, die einen hohen Feinkornanteil in Form von Asche im Abfall hervorriefen. Der Kurvenanstieg für alte westdeutsche Deponien ist aufgrund besserer wirtschaftlicher Bedingungen mit einem Anteil von etwa 45 Gew.-% für die Fraktion < 8 mm deutlich schwächer ausgeprägt.

Der Vergleich der Kurvenverläufe für neue Deponien lässt erkennen, dass sich der Anteil der Feinfraktion in den neuen Bundesländern an den Trend der alten Bundesländer anpasst. Dies ist auf mit der Deutschen Wende einsetzende Verbesserungen der Wirtschaft und den einsetzenden Konsumwandel hin zu westlichen Gewohnheiten zu erklären [DOHMANN, 1997; EHRIG & BRINKMANN, 1998].

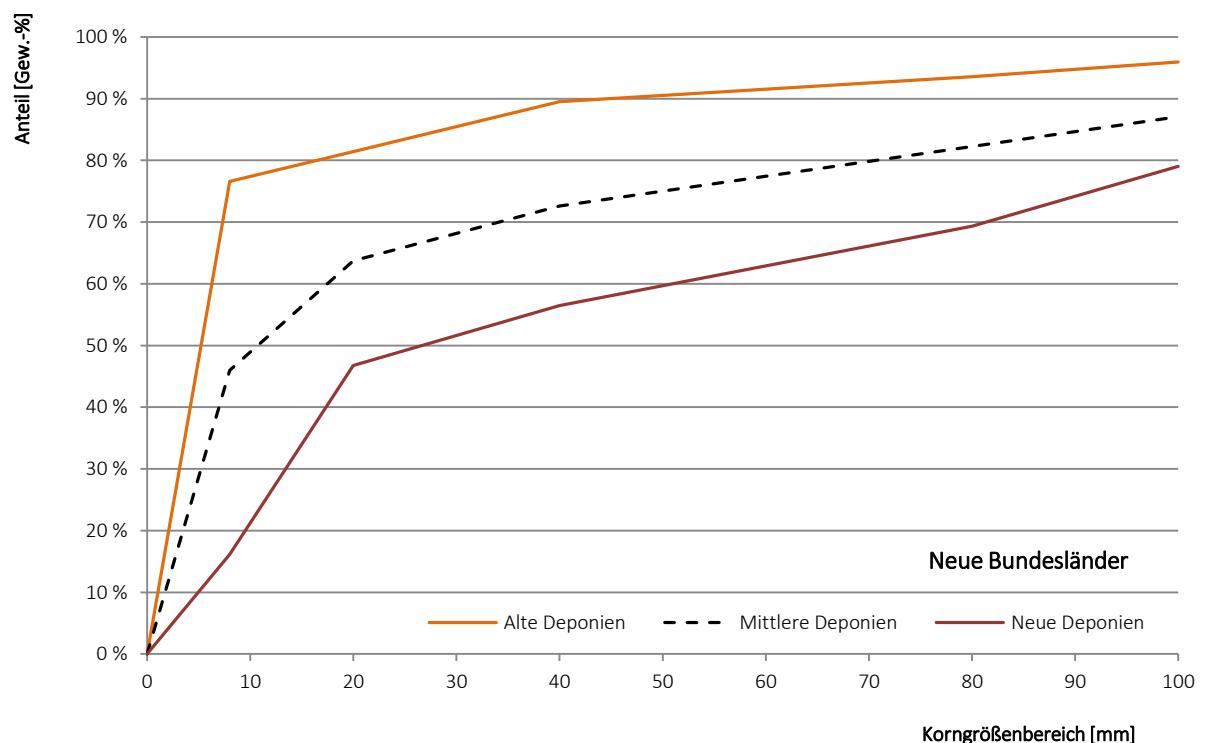


Abbildung 12: Korngrößenverteilung ostdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998]

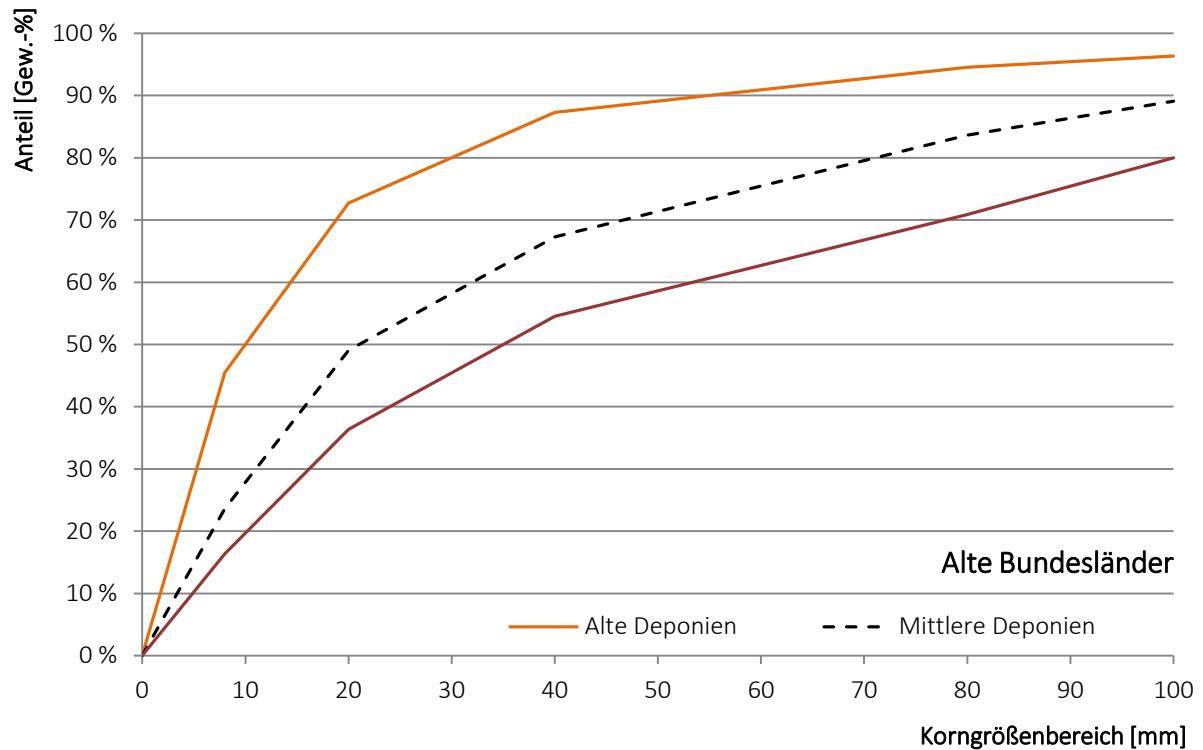


Abbildung 13: Korngrößenverteilung westdeutscher Deponien in Abhängigkeit des Deponiealters [Ehrig und Brinkmann, 1998]

Die Auswertung von Sortieranalysen westdeutschen Deponieguts lässt die Autoren zu folgenden Schlussfolgerungen kommen:

- Mit zunehmender Ablagerungsdauer kommt es zu einer deutlichen Abnahme der organisch abbaubaren Substanz und im Gegenzug zu einer Anreicherung von Inertstoffen.
- Kunststoffabfälle finden sich aufgrund des geringen Aufkommens weniger in alten Deponiegutproben, aufgrund fehlender Getrenntsammelsysteme treten hier erhöhte Mengen an Glas auf.
- Fe- und NE-Metalle lassen keinen zeitlichen Trend erkennen.
- Schadstoffe bzw. Problemabfälle (Batterien, Farreste etc.) machten bei allen Untersuchungen unter 1 Gew.-% aus.

## 2.8.6 Deponie Rennerod

Der Abfallwirtschaftsbetrieb Westerwald betreibt seit 1973 eine Hausmülldeponie nahe der Stadt Rennerod, die im Jahr 1975 den geordneten Betrieb aufnahm. Bis 1996 wurden auf der insgesamt 12 ha großen und nicht basisgedichteten Deponiefläche ca. 800.000 m<sup>3</sup> Abfälle abgelagert. Im Rahmen der Erweiterungsplanungen in den achtziger Jahren wurde ein Sanierungskonzept integriert, das den geordneten Rückbau und die Errichtung eines Abdichtungssystems dieses Altbereichs vorsah [GROß, 1998].

Die im Rahmen der Sanierungsplanung durchgeführten Voruntersuchungen zeigen dabei nachfolgende Ergebnisse. Auf Basis von Mitarbeiterbefragungen und alter Aufzeichnungen konnte die ungefähre Zusammensetzung des Deponiekörpers in Abhängigkeit definierter Abfallarten rekonstruiert werden. Wie Abbildung 14 zu entnehmen ist, setzt sich der Deponiekörper zu etwa 35 Gew.-% aus Hausmüll, 10 Gew.-% Gewerbeabfall und 10 Gew.-% Sperrmüll zusammen. Die übrigen 45 Gew.-% werden durch Erdaushub und Bauschutt beschrieben.

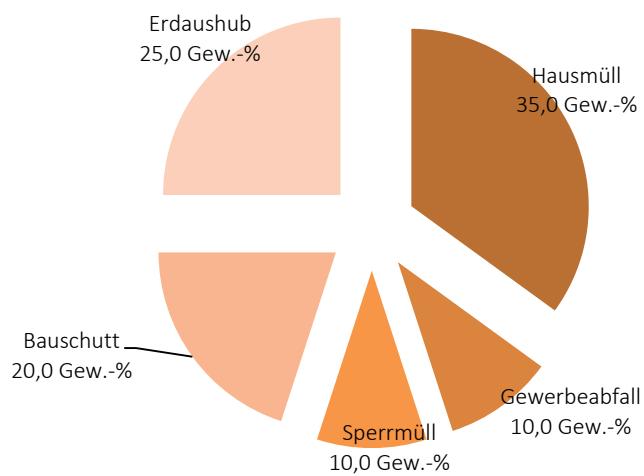


Abbildung 14: Abschätzung der Zusammensetzung des Deponiekörpers Rennerod | Voruntersuchung [Groß, 1998]

Durch repräsentative Probegrabungen und anschließende Sortierung mittels semimobiler Baustellenabfallsortierungsanlage ergab sich für die Deponie Rennerod die in Abbildung 15 dargestellte Deponiegutzusammensetzung. Aufgrund des hohen Anteils an bauschuttähnlichen Materialien sowie Inertstoffen wurde die Zielsetzung der Aufbereitung und Verwertung auf diese Stofffraktionen gesetzt. Untersuchungen zur gezielten Abtrennung einer heizwertreichen Leichtfraktion mittels Windsichter sowie Klassierungen des Deponieguts kommen zu den in Abbildung 16 dargestellten Ergebnissen. Es zeigt sich, dass die heizwertreiche Fraktion einen Anteil von ca. 24 Gew.-% ausmacht [GROß, 1998].

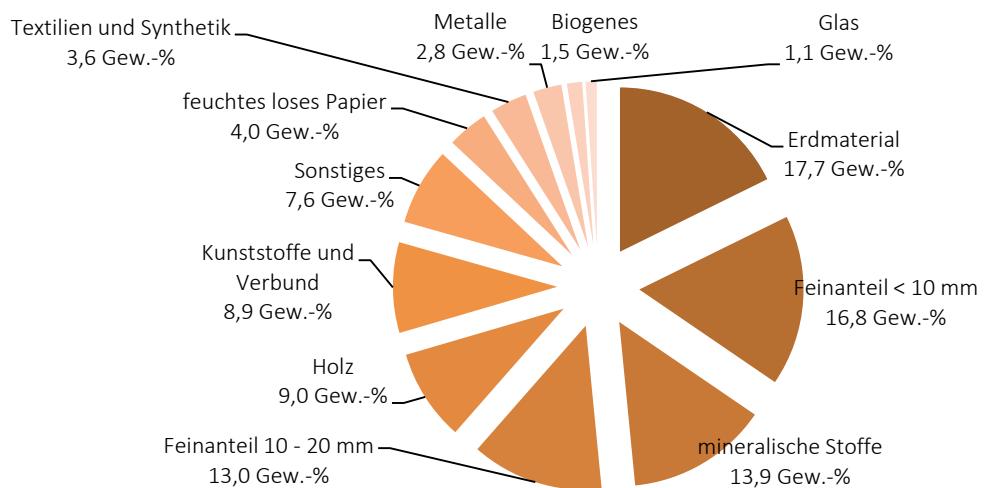


Abbildung 15: Zusammensetzung des Deponieguts Rennerod | Voruntersuchung [Groß, 1998]

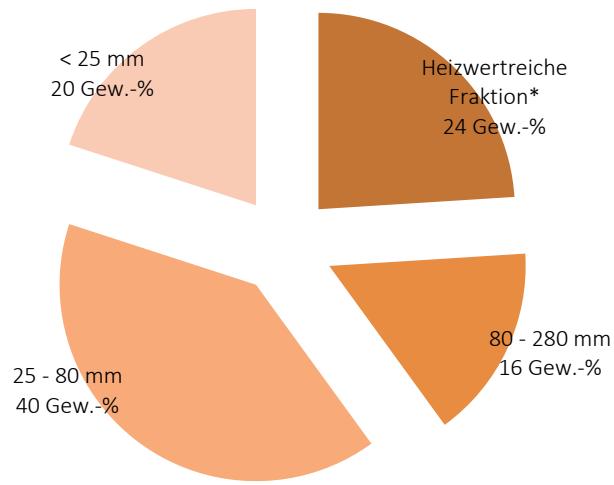


Abbildung 16: Korngrößenverteilung und Anteil Heizwertreicher Stofffraktionen des Deponieguts Rennerod | Voruntersuchung [Groß, 1998]

Auf Basis dieser Ergebnisse und weiterführender Laboruntersuchungen wurde das in Abbildung 17 schematisch dargestellte Aufbereitungskonzept erstellt und in den Jahren 1996 bis 1997 entsprechend 130.000 m<sup>3</sup> Deponiegut behandelt. Das Alter des Deponieguts ist dabei mit 8 - 15 Jahren anzusetzen [GROß, 1998].

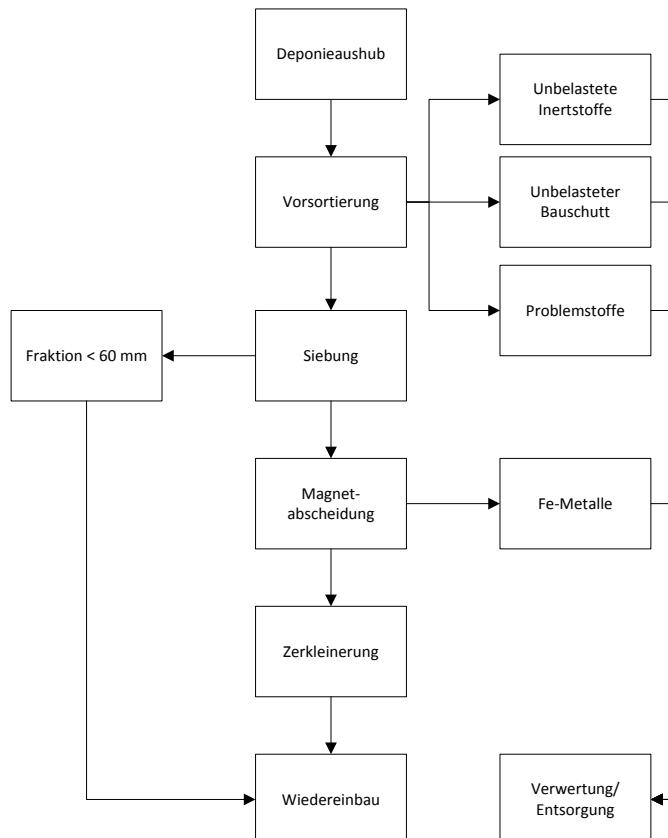


Abbildung 17: Aufbereitungskonzept des ersten Bauabschnitts der Deponie Rennerod auf Basis der Voruntersuchungen [Groß, 1998]

Die Ergebnisse der Untersuchung werden aus Abbildung 18 ersichtlich. Sowohl gewichts- als auch volumenbezogen stellen erdähnliche Materialien den größten Anteil dar. Nach GROß [1998] belegen die Ergebnisse deutlich, dass die Abtrennung einer heizwertreichen Fraktion (Kunststoffe, Papier, Leichtfraktion, Textilien) eine deutliche Verringerung des Deponievolumenbedarfs verursacht.

Metalle zeigen mit 3,2 Gew.-% bzw. 3,1 Vol.-% einen zu anderen Untersuchungen vergleichbaren Wert auf.

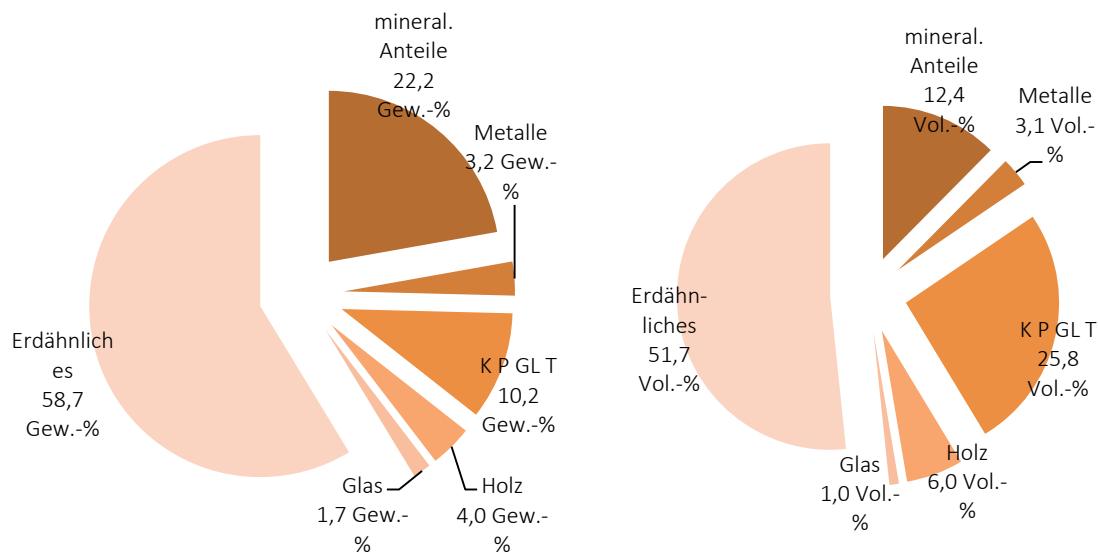


Abbildung 18: Zusammensetzung des Rückbaumaterials der Deponie Rennerod nach Stoffgruppen in Gew.- und Vol.-% (Hochrechnung nach [Groß, 1998])  
(K P GL T) = Heizwertreiche Fraktion mit  $H_u > 11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 2.8.7 Wertstoffpotenzial in Abfällen rückgebauter Hausmülldeponien

Im Rahmen von Schachtsanierungen auf einer Deponie in Deutschland wurden von CHRIST ET AL. [2011] insgesamt drei Deponiegutproben unterschiedlichen Alters gewonnen, klassiert, sortiert und Laboruntersuchungen unterworfen. Im Vordergrund der Analyse stand dabei, zu ermitteln, welche Wertstoffpotenziale einzelne Klassierfraktionen besitzen.

Die Proben sind hinsichtlich ihres Alters wie folgt zu charakterisieren:

- Probe: Deponierung im Jahr 1986
- Probe: Deponierung im Jahr 1987
- Probe: Deponierung im Jahr 1998

Die Klassierung fand in folgende Größenklassen statt:

- Grobfraktion:  $> 50 \text{ mm}$
- Mittelfraktion:  $20 - 50 \text{ mm}$
- Feinfraktion:  $< 20 \text{ mm}$

Hierbei haben die Untersuchungen gezeigt, dass der Anteil der Grobfraktion mit Werten zwischen 75 und 27 Gew.-% der FM große Schwankungsbereiche aufzeigte. Die Anteile der Feinfraktion an der Mittelfraktion schwanken zudem zwischen 32 bis 65 Gew.-% der getrockneten Mittelfraktion.

Die Ergebnisse der händischen Sortierung der Grob- und Mittelfraktion sind Tabelle 13 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass sich die gemachten Angaben jeweils auf die einzelnen

Fraktionen beziehen, wobei die Grobfraktion im feuchten Zustand und die Mittel- sowie Feinfraktion im getrockneten Zustand betrachtet wird.

Tabelle 13: Sortieranalyseergebnisse der Grob- und Mittelfraktion [Christ et al., 2011]

	Probe					
	1		2		3	
	Grobfraktion [Gew.-% FM]	Mittelfraktion [Gew.-% TM]	Grobfraktion [Gew.-% FM]	Mittelfraktion [Gew.-% TM]	Grobfraktion [Gew.-% FM]	Mittelfraktion [Gew.-% TM]
Kunststoffe	38,2 %	5,3 %	26,4 %	5,1 %	21,3 %	9,9 %
Metalle (gesamt)	0,9 %	1,5 %	6,1 %	1,8 %	1,9 %	9,1 %
Fe-Metalle	-	1,4 %	-	1,8 %	-	8,6 %
NE-Metalle	-	0,1 %	-	0,0 %	-	0,5 %
Holz	13,2 %	2,3 %	15,7 %	9,9 %	14,2 %	20,8 %
Textilien	5,7 %	0,6 %	2,5 %	1,4 %	22,7 %	1,8 %
Papier	1,1 %	0,6 %	6,5 %	1,2 %	31,1 %	23,7 %
Steine	20,0 %	26,5 %	29,4 %	18,7 %	4,4 %	30,1 %
Lehm	20,0 %	60,9 %	12,6 %	60,3 %	0,0 %	0,0 %
Glas	0,9 %	2,3 %	0,8 %	1,6 %	0,4 %	4,6 %
Elektrogeräte	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	4,0 %	0,0 %
Wassergehalt*	51,3 %	25,2 %	54,7 %	32,5 %	55,8 %	40,7 %

\* Im Fall der Mittelfraktion bezieht sich der Wassergehalt auf die Fraktion < 50 mm

Nach Tabelle 13 sind wertgebende Kunststoffe überwiegend in der Grobfraktion vorzufinden. Metalle finden sich hingegen durchaus in beiden Fraktionen wieder und erreichen sogar Anteile von bis zu 8,6 Gew.-% der TM.

Tabelle 14: Konzentrationen seltener Erden in Grob-, Mittel- und Feinfraktionen aus dem Deponierückbau [Christ et al., 2011]

Probe	P 1/1	P 2/1	P 3/1	P 1/2	P 2/2	P 3/2	P 1/3	P 2/3	P 3/3
Element	[mg·kg <sup>-1</sup> TM]								
Germanium	0,7	1	0,2	2,3	2	0,2	2	2,4	0,9
Niobium	1,7	1,3	1,2	1,2	1,5	1,1	1,3	2,1	1,8
Ruthenium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Rhodium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Indium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Lanthan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cerium	15	17	6,9	46	41	7,4	38	42	21
Praseodym	1,8	2	1,7	5,4	4,8	0,8	4,5	4,9	2,5
Neodym	6,7	7,4	2,9	21	19	3,1	18	19	9,5
Samarium	1,3	1,4	0,4	4	3,7	0,6	3,3	3,5	1,9
Europium	0,3	0,4	0,2	0,8	0,8	0,2	0,7	0,8	0,5
Gadolinium	1,2	1,4	0,6	4,1	3,8	0,6	3,2	3,6	2
Terbium	0,2	0,2	< 0,1	0,5	0,5	< 0,1	0,4	0,5	0,3
Dysprosium	0,8	0,8	0,3	2,2	2,1	0,4	2	2,2	1,2
Holmium	0,1	0,2	< 0,1	0,4	0,4	< 0,1	0,3	0,4	0,2
Erbium	0,4	0,5	0,2	1,1	1,1	0,3	1	1,1	0,7
Thulium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1
Ytterbium	0,4	0,4	0,2	0,9	0,8	0,2	0,8	0,8	0,5
Lutetium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,6
Hafnium	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4	0,6	0,4
Tantal	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Rhenium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Osmium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Iridium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Die in Tabelle 14 aufgeführten Analysenergebnisse zum Vorkommen von Seltenen Erden im Deponiegut zeigen, dass eine ganze Reihe der Stoffe in allen Fraktionen nachzuweisen ist, wobei vor allem Cerium, Neodym, Praseodym und Gadolinium in höheren Konzentrationen auftraten [CHRIST ET AL., 2011].

Nach CHRIST ET AL. [2011], sollte das Wertstoffpotenzial einer Deponie nicht nur auf den Metall- und Energiegehalt der Grobfraktion bezogen werden. Die potenzielle Gewinnung von Metallen und Seltenern Erden aus der Mittel- und Feinfaktion ist ebenso zu bewerten.

### 2.8.8 Kreismülldeponie Hechingen

Die Kreismülldeponie Hechingen wurde im August 1982 in Betrieb genommen. Bis zum gesetzlich festgelegten Stichtag (31.05.2005) wurden alle aus damaliger Sicht nicht verwertbaren Abfälle aus Haushalten, Gewerbebetrieben und dem Baugewerbe auf der Kreismülldeponie unvorbehandelt abgelagert. Das Gesamtvolumen des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Deponieabschnitts I beträgt dabei nach Angaben des Betreibers 2,3 Mio. m<sup>3</sup>, die auf einer Fläche von 12 ha lagern. Hiervon wurden in den vergangenen Jahren ca. 8 ha vollständig rekultiviert. Bei weiteren 3 ha ist die Oberflächenabdeckung aufgebracht. Die maximale Einbauhöhe kann mit ca. 40 m beziffert werden [ZOLLERNALBKREIS, 2010].

Sortieranalysen der Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement zeigen für die Kreismülldeponie Hechingen das in Abbildung 19 dargestellte Rohstoffpotenzial. Hierbei wurde mittels Schneckenbohrverfahren Deponiegut gewonnen und anschließend manuell sortiert.

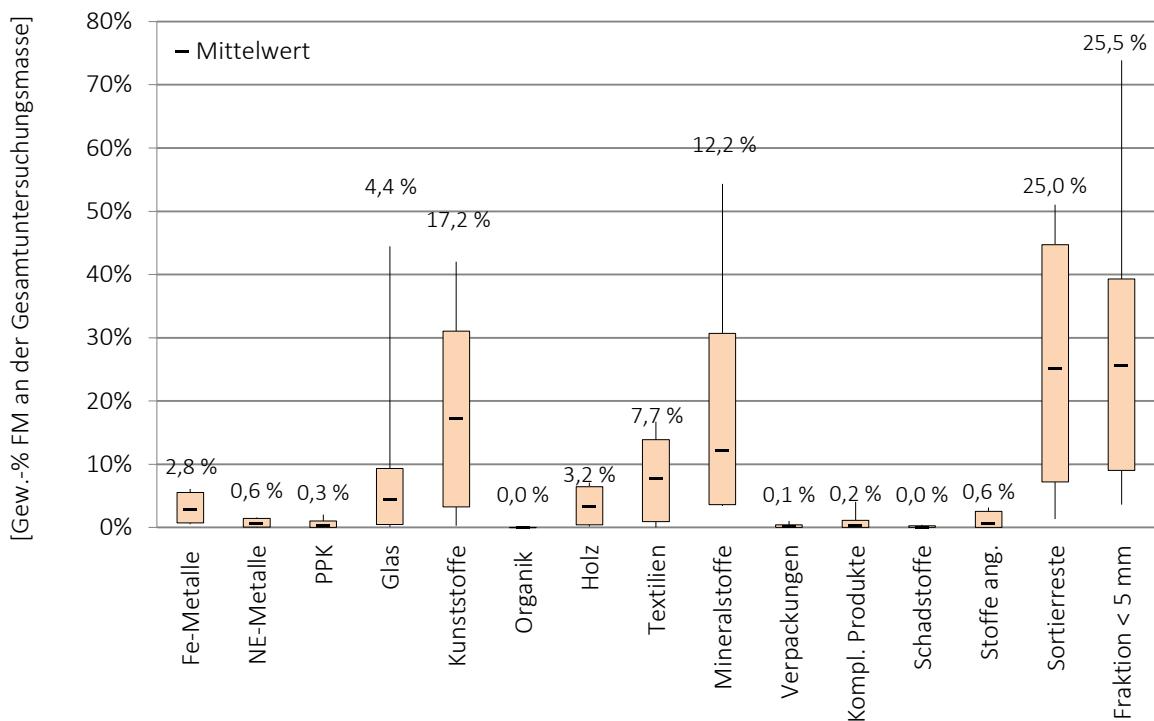


Abbildung 19: Zusammensetzung des Deponieguts der Kreismülldeponie Hechingen

Untersuchungen zum Heizwert ergeben, dass das Deponiegut bzw. darin enthaltene kalorische Fraktionen durchschnittlich 24 MJ\*kg<sup>-1</sup> Energie besitzen.

### 2.8.9 Deponie Reiskirchen

Die ehemalige Deponie Reiskirchen des Landkreises Gießen wurde am 13.02.1973 in Betrieb genommen und bis zur Mitte des Jahres 2001 mit unvorbehandelten Abfällen verfüllt. Die Gesamtfläche des Betriebsgeländes beträgt ca. 12 ha, wobei sich die eigentliche Ablagerungs- bzw. Deponiefläche auf ca. 10 ha ausdehnt. Dort lagert nach Angaben des Landkreises Gießen - Fachdienst Abfallwirtschaft (2008) ein Gesamtabfallvolumen von etwa 2,3 Mio. m<sup>3</sup>. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Abfallarten

- Hausmüll,
- Haushüllähnliche Gewerbeabfälle,
- Sperrmüll,
- Schlämme,
- Baustellenabfälle,
- Bauschutt und
- Erdaushub.

Im Rahmen einer theoretischen Abschätzung, die auf ehemaligen Abfallanalysen basiert, ergibt sich für die Deponie Reiskirchen das in Tabelle 15 enthaltene Rohstoffpotenzial.

Tabelle 15: Deponiegutzusammensetzung der Deponie Reiskirchen (theoretische Betrachtung)

Stofffraktion	Gew.-% FM
Erdaushub	14,70 %
Schlämme	9,70 %
Rest- und Feinfraktion	10,10 %
Schadstoffe	0,30 %
Verbundverpackungen	1,30 %
Komplexe Produkte	4,20 %
Mineralstoffe	5,00 %
Textilien	1,40 %
Organik incl. Holz	22,10 %
Kunststoffe	7,50 %
Glas	6,90 %
PPK	13,30 %
NE-Metalle	0,90 %
Fe-Metalle	2,50 %

Die theoretische Ermittlung der vorhandenen Energiegehalte wird aus Tabelle 16 ersichtlich. Wie zu erwarten ist, verfügen die Kunststoffe über den spezifisch höchsten Heizwert

Tabelle 16: Mittlere Heizwerte unterschiedlicher Stofffraktionen (Berechnung auf molekularer Ebene)

Heizwertreiche Stofffraktionen	Mittlerer Heizwert in MJ*Mg <sup>-1</sup> TS
PPK	16.940
Kunststoffe	38.240
Organik	15.332
Textilien	17.552
Komplexe Verbunde	26.898
Verpackungsverbund	26.898
Rest- und Feinfraktion	6.008

### 3 Deponieabschnitt I

---

Die ELW betreiben bis heute in einem ehemaligen Kalksteinbruch der Dyckerhoff AG eine Hausmülldeponie, die sich in drei Abschnitte untergliedert. Hierbei ist Deponieabschnitt I Gegenstand dieser Untersuchung.

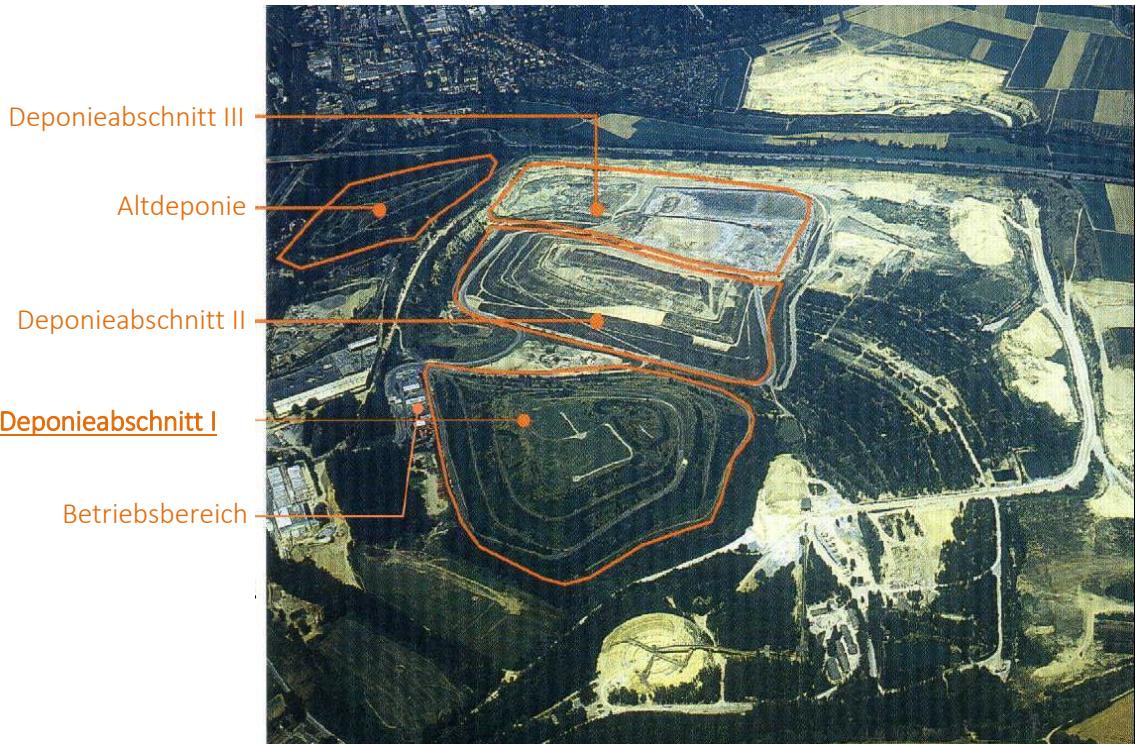


Abbildung 20: Deponieabschnitte der Siedlungsabfalldeponie Dyckerhoffbruch der Landeshauptstadt Wiesbaden [nach SHC, 2009]

Der ehemalige Steinbruch bzw. der heutige Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch wurde bereits verfüllt, als der damalige Steinbruch etwas weiter nördlicher noch betrieben wurde. Entsprechend wurden in den Jahren 1964 bis 1982 maßgeblich Erdaushub, Bauschutt und Siedlungsabfälle - zum Teil vorbehandelt – abgelagert [ELW, 2012].

Gemäß den damals geltenden Vorschriften besitzt dieser Abschnitt keine Basisabdichtung im Sinne der heutigen Deponieverordnung. Regelmäßige Vergleichsproben aus Grundwasserbrunnen ergeben, dass die Grundwasserqualität durch die Deponie nicht beeinträchtigt wird.

Der Deponieabschnitt I wurde bei seiner Stilllegung renaturiert und ist heute mit Gras, Gebüschen und Bäumen bewachsen. [ELW, 2012].

Die Deponie Dyckerhoffbruch ist entsprechend der Begriffsbestimmungen nach §2 der Abfallablagerungsverordnung [ABFABLV, 2001] eine Deponie der Deponiekategorie II. Die Ablagerung im Deponieabschnitt I wurde im Jahr 1983 beendet.

### 3.1 Ablagerungshistorie

Die Ablagerungshistorie des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoff, in dem sich heute der Deponieabschnitt I befindet, wurde anhand von historischen Kartenunterlagen, Luftbildern und Bilddokumenten durch das BGU [2009] rekonstruiert. Dabei wurden neben den Unterlagen der ELW auch Daten der Dyckerhoff Zement AG, des Stadtvermessungsamtes sowie des früheren Landesvermessungsamtes herangezogen [BGU, 2009]. Abbildung 21 beschreibt die Ablagerungshistorie in chronologischer Reihenfolge. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass erst ab den 1970er Jahren Hausmüll und Gewerbeabfälle - teilweise in zerkleinerter Form - abgelagert wurden.



Abbildung 21: Historische Entwicklung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch [nach BGU, 2009]

## 3.2 Kenndaten und Aufbau

Der Deponieabschnitt I mit einer zugelassenen Ablagerungsfläche von 275.000 m<sup>2</sup> wurde im Zeitraum von 1964 bis 1982 mit ca. 10,5 Mio. m<sup>3</sup> Abfall verfüllt und befindet sich derzeit in der Stilllegungsphase.

Betriebsphase:	1964 – 1982
Ablagerungsmenge*:	15,0 – 19,7 Mio. Mg
Ablagerungsvolumen*:	10,5 – 12,8 Mio. m <sup>3</sup>
Fläche der Deponiebasis:	275.000 m <sup>2</sup>
Basisabdichtung:	keine
Zwischenabdeckung/-abdichtung:	vollständig
temporäre Oberflächenabdeckung:	vollständig
Oberflächenabdichtung:	keine
Rekultivierung:	vollständig
Gasfassung:	aktiv, über Gasbrunnen
Sickerwasserfassung:	teilweise, über Sickerwasserbrunnen
Oberflächenwasserfassung:	vollständig

\* Volumen- und Mengenvariation basierend auf Annahme der Deponiesohle gem. Vermessung 1964 bzw. auf Untersuchungsbericht BGU (2009)

Der Müllkörper des Deponieabschnitts I, der oberflächlich mit einer mehrere Meter mächtigen Schicht aus Bodenmaterial abgedeckt ist, besteht aus Haus- und Gewerbeabfällen, die mit Bauschutt und Bodenaushubmassen vermischt vorliegen. Hierbei wurden während des Aufbaus des Deponiekörpers immer wieder Zwischenschichten aus Boden eingebaut, um die Geruchsbelästigung durch Abfälle sowie Verwehungen zu vermeiden. Aufgrund dieser Ablagerungspraxis weist der Deponiekörper eine blätterteigartige Struktur auf.

Seine Aufstandsfläche liegt auf einem Höhenniveau von ca. 95 m ü. NN und besteht aus einer künstlichen Auffüllung, die bereichsweise mehrere Meter mächtig ist. Hauptanteil dieser Schicht sind Sande und Kiese, die von der südlichen Abbauwand her kontinuierlich nach Nordwesten vorgeschüttet wurden.

Einen erheblichen Anteil des Deponiekörpers bilden Bodenaushub und Bauschutt, da der Deponieabschnitt I von den 1960er Jahren bis ca. 1972 als Bodendeponie genutzt wurde. Es handelt sich hierbei um Bodenmaterialien und mineralische Abfälle, die bei Erdbauarbeiten im Raum Wiesbaden und dem Umfeld angefallen sind [BGU, 2009].

Der Deponieabschnitt I ist eine klassische Verdichtungsdeponie. Bei diesem Deponietyp wird Abfall schichtweise aufgeschüttet und verdichtet. Durch das Verdrängen der Luft wird eine möglichst große Dichte im Deponiematerial erzielt, wodurch die Deponie mehr Material fassen kann. Das lagenweise Aufbringen von Bodenmaterial sollte in diesem Zusammenhang Verwehungen von Abfallbestandteilen verhindern.

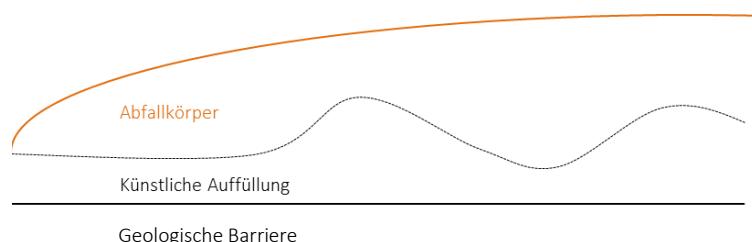


Abbildung 22: Schematischer Aufbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

Da der untersuchte Deponieabschnitt I keine Basisabdichtung im Sinne der heutigen Deponieverordnung besitzt, ist eine Kontamination des Grundwassers durch Sickerwasser der Deponie denkbar. Fehlende Unterlagen über die Errichtung der Deponie erschweren die

Gefahrenabschätzung, die vom Sickerwasser ausgeht. Es wird aber davon ausgegangen, dass unter Steinbruchsohle und Abfallablagerungen eine natürliche Dichtung bzw. Tonbarriere besteht. Um zusätzlich eine potenzielle Grundwasserkontamination zu verhindern wird entstehendes Sickerwasser aktuell von mehreren Brunnen im Umkreis erfasst und einer Abwasserbehandlung zugeführt (Grünz, 2009). Abbildung 22 veranschaulicht dies schematisch. In Bezug auf die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Deponiegut ist zu erwähnen, dass während der Ablagerungsphase eine Vorbehandlung der Abfälle stattgefunden hat. Dies bedeutet, dass Abfälle vor ihrem Einbau in den Deponiekörper über eine Zerkleinerungsanlage geschickt wurden und in diesem Zusammenhang ebenfalls eine Abscheidung von Eisen-Metallen stattgefunden hat. Aufgrund von Ausfällen und Wartungsarbeiten dieser Anlage ist auf Basis von Zeitzeugenaussagen zu berücksichtigen, dass ebenso eine direkte Ablagerung erfolgte. Eine konkrete Abschätzung der Relationen ist aufgrund fehlender Dokumentation an dieser Stelle nicht möglich. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass überwiegende Teile des angelieferten Abfalls einer entsprechenden Behandlung unterlagen.

### 3.3 3D-Modell des Deponiekörpers

Um ein Verständnis für die im Deponieabschnitt I ablaufenden Prozesse zu bekommen, ließen die ELW im Jahr 2010 durch das BGU ein 3D-Strukturmodell des Deponiekörpers anfertigen. Dieses beruht auf alten Luftbildern, Karten, Fotodokumentationen und der Auswertung vorhandener Schichtprofile der Gasbrunnen.

Das Modell weist folgende Abfallschichten aus:

- Rekultivierungsschicht
- Hausmüll
- Bauschutt
- Bindige Bodenablagerungen

Eine genaue Beschreibung des Vorgehens und der daraus gewonnenen Ergebnisse ist dem Bericht des BGU [2010] und der entsprechenden Modellbeschreibung zu entnehmen.

Nachfolgende Abbildungen beschreiben den Aufbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch im Rahmen des 3D-Modells. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der ehemaligen Deponiesohle eine Auffüllung mittels Abraumsanden stattgefunden hat. Hieran schließt eine Lage aus Bauschuttmaterialien, deren untere Grenze gelblich gekennzeichnet ist. Im Anschluss wechseln Bereiche, in denen überwiegend Haus- und Gewerbemüll abgelagert wurden. Diese sind zudem durch Monochargen aus Bauschutt gekennzeichnet.

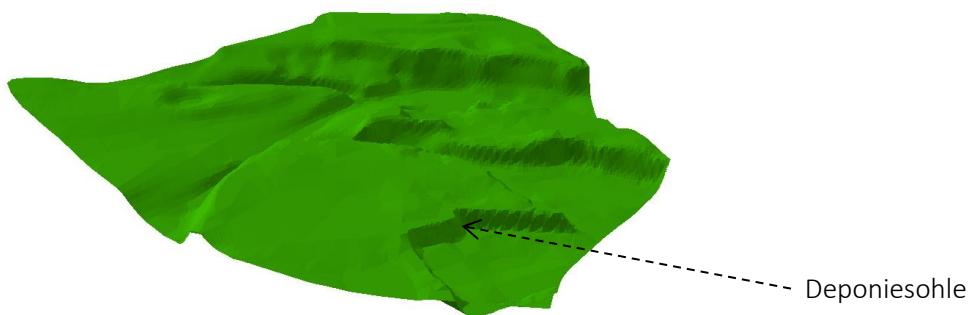


Abbildung 23: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle (zweifach überhöhte Darstellung)

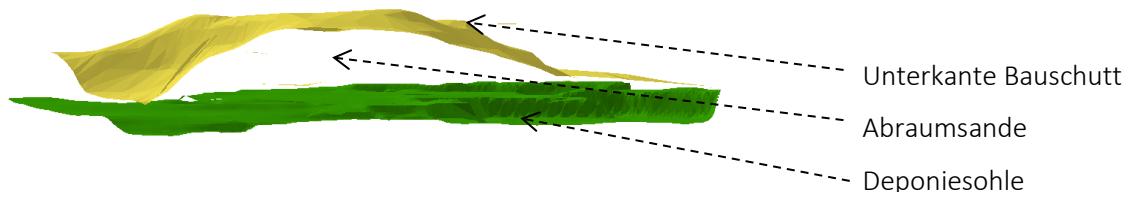


Abbildung 24: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle und Untergrenze der Bauschuttablagerung – Zwischenbereich ist durch Aбраumsande charakterisiert (zweifach überhöhte Darstellung)

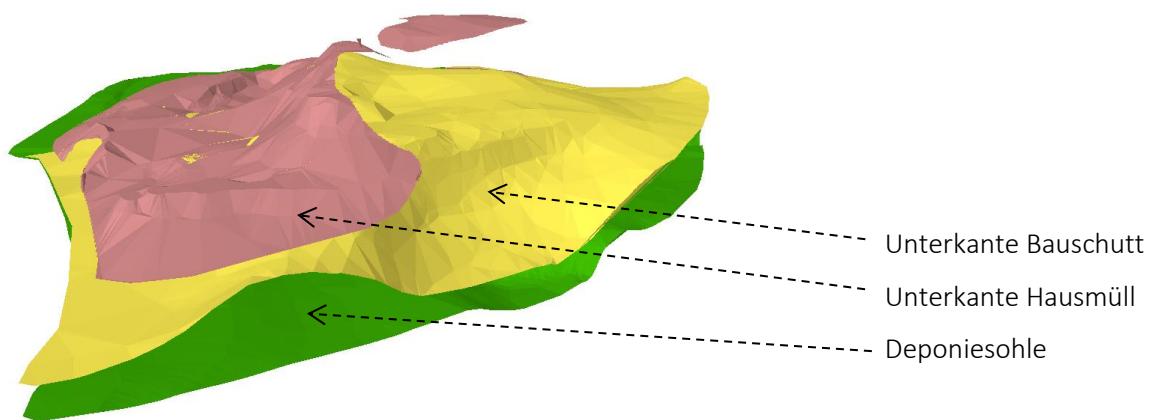


Abbildung 25: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung)

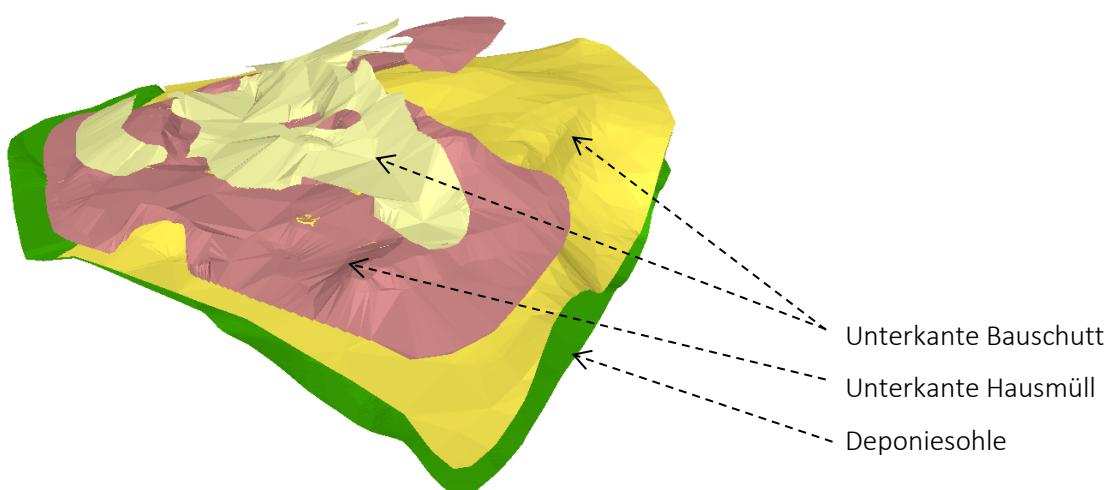


Abbildung 26: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung)

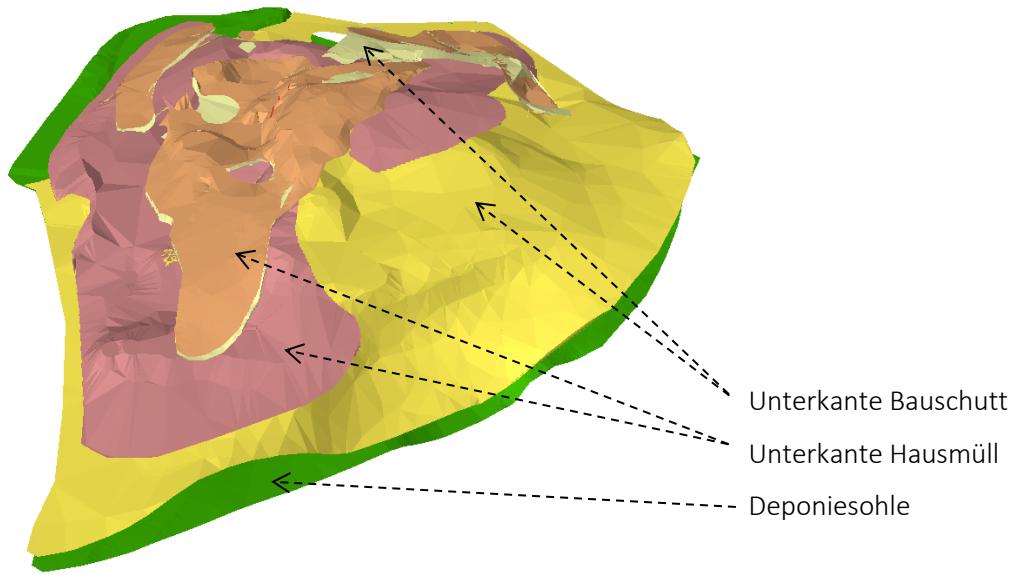


Abbildung 27: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (I und II) (zweifach überhöhte Darstellung)

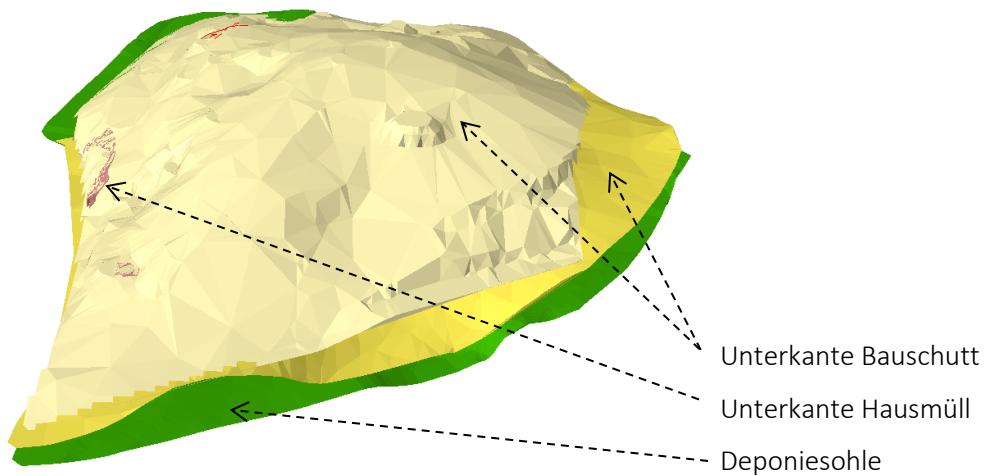


Abbildung 28: 3D-Modelldarstellung der Steinbruch-/Deponiesohle, der Untergrenze der Bauschuttablagerung (I und II sowie III - Rekultivierungsschicht) und der Untergrenze der Haus- sowie Gewerbemüllablagerung (zweifach überhöhte Darstellung)

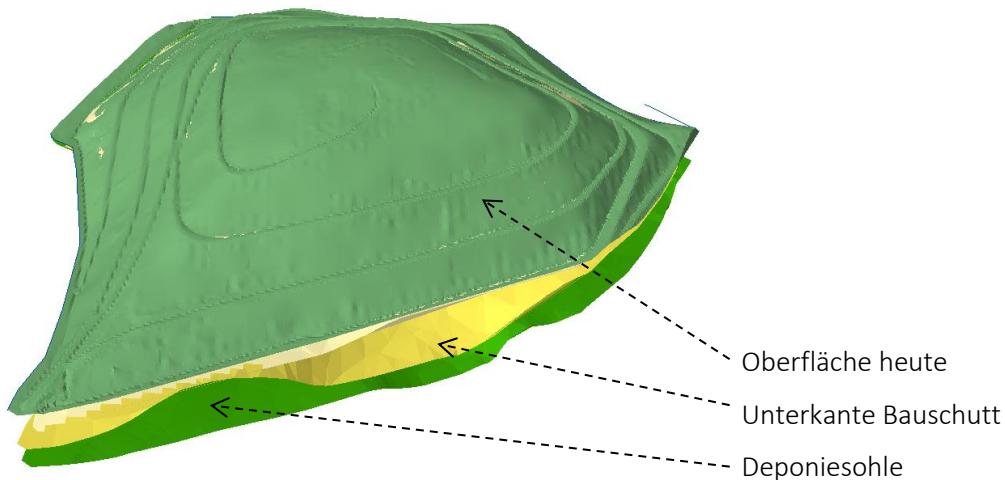


Abbildung 29: 3D-Modelldarstellung des heutigen Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (zweifach überhöhte Darstellung)

Abschließend zeigt Abbildung 30 beispielhaft einen Querschnitt durch den Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch. Hierbei wird die beschriebene Abfolge der genannten Ablagerungsschichten und Abfallarten ersichtlich.

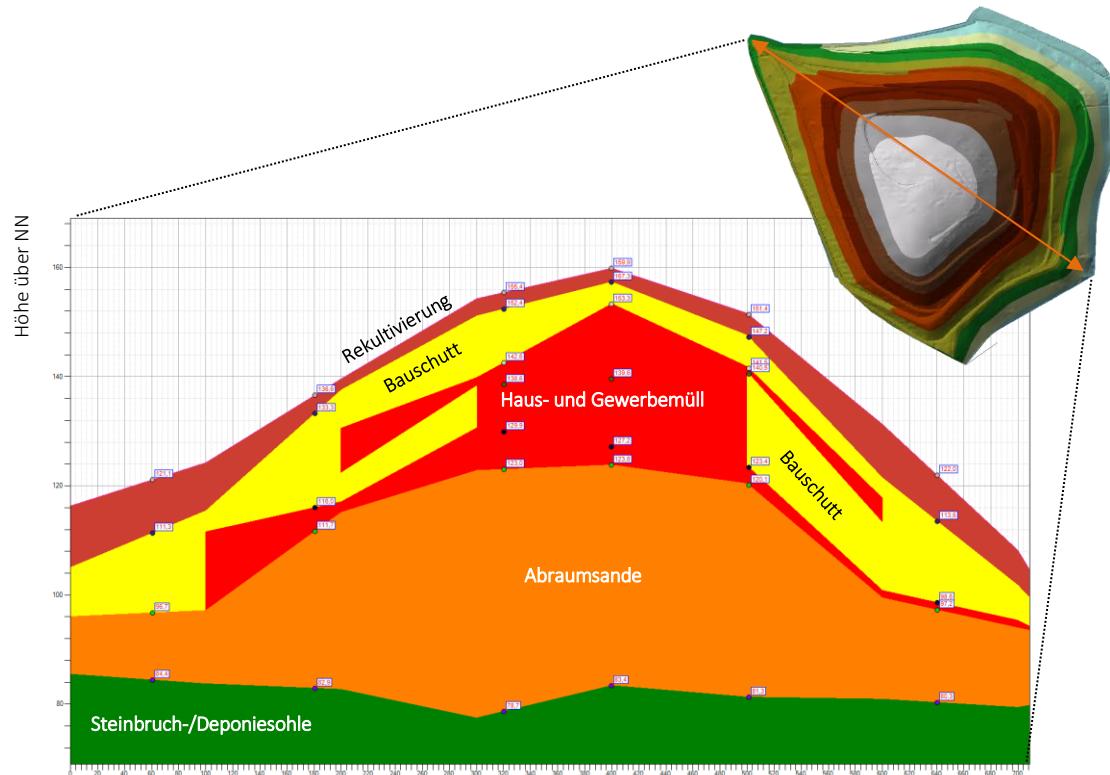


Abbildung 30: Querschnitt des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch auf Basis der 3D-Modelle (beispielhafte Darstellung)

## 4 Material und Methoden

---

Die Untersuchungen des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch umfassten den in Abbildung 31 dargestellten Verfahrensablauf. Generell gilt, dass dieser Verfahrensablauf für jeden einzelnen Bohrmeter durchgeführt wurde, was zu einer sehr detaillierten und umfangreichen Datenerfassung sowie -darstellung führte.



Abbildung 31: Verfahrensabläufe der Untersuchungen des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

Insgesamt konnten im Rahmen der Untersuchungen 29 Bohrlöcher bzw. 615 Bohrmeter nach diesem Schema untersucht werden.

### 4.1 Probebohrungen

Aufgrund technischer Probleme musste das vorgesehene Greiferbohrverfahren ( $\varnothing 0,8\text{ m}$ ) durch ein Schneckenbohrverfahren ( $\varnothing 0,4\text{ m}$ ) mit geringerem Bohrdurchmesser ersetzt werden ([vergl. Abb.](#)). Tabelle 17 gibt in diesem Zusammenhang einen Überblick, welches Bohrverfahren bei dem jeweiligen Bohrloch zu Anwendung kam.

Tabelle 17: Übersichtstabelle der durchgeführten Bohrmaßnahmen

Bohrlochnummer	Greiferbohr-verfahren	Schneckenbohr-verfahren	Höhe über NN in m	Tiefe in m
BL 1	X		117,15	20
BL 2	X		141,47	33
BL 3	X		134,69	17
BL 4		X	115,10	17
BL 5	X		125,80	24
BL 6		X	135,75	34
BL 7		X	112,62	17
BL 8	X		158,17	9
BL 8b	X		158,43	8
BL 9		X	127,47	21
BL 10		X	112,64	16
BL 11		X	135,21	21
BL 12		X	120,94	21
BL 13		X	125,71	7
BL 14		X	132,88	23
BL 15		X	137,00	20
BL 16	X		144,72	30
BL 17	X		153,71	25
BL 18		X	157,56	7
BL 19	X		141,08	29
BL 20		X	148,08	22
BL 21		X	115,65	19
BL 22		X	110,22	17
BL 23		X	121,86	9
BL 24		X	136,19	37
BL 25		X	117,73	22
BL 26		X	134,00	32
BL 27		X	159,36	25
BL 28		X	157,94	33

#### 4.1.1 Lage der Bohrpunkte

Auf Basis des bestehenden 3D-Modells und der bereits bestehenden Gasbrunnen wurde die Lage der anzulegenden Probebohrungen auf den nordöstlichen Bereich des Deponieabschnitts I konzentriert. Entsprechend wurde vermutet, dass hier vorwiegend Haus- und Gewerbeabfälle angetroffen werden.



### Übersichtskarte nach Abschluss der Bohrarbeiten -Stand 20.03.2013-

#### Legende

- Bohrung mit Nummer
- Grenze Deponieabschnitt I

Maßstab Lageplan 1:2.500 auf DIN A3

Erstellt am: 20.03.2013  
Ablage:\GIS\_Dep\Deponieabschnitt I  
Ressourcenpotential  
Kartenwerke  
Bestand nach Abschluss.mxd bzw. pdf

Referenz: Orthofoto aus Überfliegung vom 11.01.2013



0 25 50 100 Meter

**ELW**

Entsorgungsbetriebe der  
Landeshauptstadt Wiesbaden  
Deponiestraße 15  
65205 Wiesbaden

Unterschrift: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

Abbildung 32: Lage der Probebohrungen auf dem Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch

#### **4.1.2 Bohrprofile und Abfallcharakterisierung**

Ziel der Untersuchungen war es auch, das bestehende 3D-Modell des Deponieabschnitts I zu verfeinern. In diesem Zusammenhang wurde jeder Bohrmeter visuell erfasst und einer definierten Klasse zugeordnet. Neben den bereits bestehenden Klassen, wurden zur näheren Definition der vorgefundenen Verhältnisse Unterklassen mit Haupt- und Nebenkomponenten gebildet. Zusätzlich wurden Besonderheiten/Auffälligkeiten wie bspw. das Alter der Ablagerung festgehalten.

Materialansprache im Rahmen der Erkundungsbohrungen:

HM	Hausmüll
HM <sub>g</sub>	Geschredderter Hausmüll
GM	Gewerbemüll
GM <sub>g</sub>	Geschredderter Hausmüll
BS	Bauschutt und Baustellenabfälle
BS <sub>s</sub>	Sandige/feinkörnige Bauschuttmaterialien
BS <sub>lt</sub>	Lehmig/toniger Bauschutt
BS <sub>l</sub>	Lehmiger Bauschutt
BS <sub>t</sub>	Toniger Bauschutt
BM	Bodenmaterial (zumeist Boden mit vereinzelten Einschlüssen von Bauschutt)
BM <sub>lt</sub>	Lehmig/toniges Bodenmaterial
BM <sub>l</sub>	Lehmiges Bodenmaterial
BM <sub>t</sub>	Toniges Bodenmaterial
BM <sub>s</sub>	Sandiges Bodenmaterial
O	Organische Bestandteile
O <sub>z</sub>	Zersetzte organische Bestandteile

Schicht im 3D-Modell:

A	Abdeckungsmaterial (Boden und Bauschutt)
HG	Hausmüll und Gewerbeabfälle
B	Bauschutt/Mineralik
AR	Abraum
C	Corbicula

#### **4.2 Klassierung**

Weder in Deutschland noch in Europa gibt es gesetzliche Vorgaben zur Durchführung von Abfallsortieranalysen. Dennoch gibt es unterschiedliche Richtlinien und Leitfäden, die mit dem Ziel erarbeitet wurden, Abfallanalysen zu standardisieren und ein hohes Qualitätsniveau der Untersuchungen sicher zu stellen. Hierbei orientieren sich die Durchführung der Sortierung sowie der aufgestellte Stoffgruppenkatalog auf die „Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen“ [1998].

Untersuchungen auf anderen Deponien haben gezeigt, dass es vor der eigentlichen Sortierung sinnvoll ist, das Deponiegut einer zweistufigen Klassierung zu unterziehen.

Aufgrund technischer Gegebenheiten und Erfahrungswerte der Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement wurden folgende Trennschnitte bzw. Fraktionsgrößen gewählt:

- Feinfaktion (FF): < 25 mm
- Mittelfaktion (MF): 25 – 50 mm
- Grobfaktion (GF): > 50 mm

Die Klassierung selbst fand mittels Schwingsieb statt, welches manuell beschickt wurde (siehe Abbildung 33). Es ist zu beachten, dass aufgrund der Materialeigenschaften z.B. die Verklebung feinerer Abfälle durch bindiges Bodenmaterial die Ergebnisse der Klassierung ausschließlich eine Momentaufnahme unter den vorgelegenen Bedingungen darstellen. Durch sich ändernde Wasserverhältnisse, Klassierungstechniken oder vorgeschaltete Homogenisierungsmaßnahmen ist hier mit Abweichungen zu rechnen.



Abbildung 33: Schwingsieb zur Klassierung des Deponieguts

### 4.3 In-Situ Sortierung

Anschließend wurde das Material der Grobfraktion je Bohrmeter den nachfolgend aufgelisteten Stofffraktionen zugeordnet und verwogen.

Tabelle 18: Definition der Stofffraktionen der In-Situ Sortierung

Eisen-Metalle	Getränkedosen; Konservendosen; Fe-Aerosoldosen; Umreifungsbänder; Sonst. Fe-Metalle
Nicht Eisen-Metalle	Alu-Dosen; Alu-Aerosoldosen; Sonst. Alu-Verpackungen; NE-Verschlüsse; Blei-Kapseln; Cu-Rohre; Sonst. NE-Metalle
Pappe, Papier, Kartonage (PPK)	Pappe; Papier; Kartonagen; Einweggeschirr; Zeitschriften; Illustrierte; Bücher; Administrationspapiere; Pappmöbel; Papiertapeten; Sonst. PPK
Glas	Weißglas; Braunglas; Grünglas; Glas-Verpackungen; Röhrenglas; Trinkgläser; Medizinische Gläser; Flachglas; Sonst. Gläser
Kunststofffolien	Verpackungsfolien; Umverpackungen; Produktionsrückstände in flächiger Form
Hartkunststoffe	Becher; Blister; Hohlkörper; Einweggeschirr; Umreifungsbänder; Fensterrahmen; Rohre; Kunststoffmöbel; Sonst. Kunststoffe
Organik	Fleisch, Fisch, Knochen; Gekochte Speisereste; Laub; Rasenschnitt; Schnitt- und Topfblumen; Hygienepapiere
Holz	Holz-Verpackungen; Holzmöbel; Sonst. Hölzer
Textilien	Bekleidungstextilien; Haustextilien (Decken, Handtücher etc.); Heimtextilien (Gardinen, Teppiche etc.); Produktionsspezifische Textilien

Mineralstoffe (kein Glas)	Keramik; Porzellan; Sonstige Mineralstoffe wie Beton etc.
Verbund-Verpackung Papier-Verbund	Papier-Verbunde; Kunststoff-Verbunde; Alu-Verbunde; Getränkekartonagen; Sonst. Verbundverpackungen
Verbunde (komplexe Produkte) Elektronikschatz	Elektronikschatz; Polstermöbel; Matratzen; Sonst. Verbundmöbel; Fahrzeugteile; Holz-Metall-Verbunde; Kunststoff-Metall-Verbunde; Holz-Metall-Textilien-Verbunde
Schadstoffe	Batterien; Akkumulatoren; Altmedikamente; Altchemikalien; Altölhaltige Materialien; Sonstige schadstoffbelastete Stoffe; Sondermüll
Stoffe anderweitig nicht genannt	Leder; Gummi; Kork; Altschuhe; Windeln; Sonst. Hygieneprodukte
Sortierreste	Den übrigen Fraktionen vor Ort nicht zuzuordnen/Stoffgemische (ohne Gefährdungspotenzial)
Erdaushub/Boden	Unbelastete Bodenmaterialien (Mutterboden)
Asphalt	Teerreste, Straßenabbruchmaterialien, etc.

Zusätzlich wurden einzelne Stofffraktionen aufgrund ihrer Eigenschaften und potenzieller Verwertungswege wie nachfolgend dargestellt zusammengefasst.

Tabelle 19: Gruppierung der definierten Stofffraktionen der In-Situ Sortierung auf Basis ihrer Eigenschaften zur potenziellen Verwertung

Heizwertreiche Fraktion	PPK, Kunststofffolien, Hartkunststoffe etc.
Problemabfälle	Sortierreste/im Rahmen der Untersuchungen nicht trennbare unbelastete Zusammenschlüsse aus Bodenmaterial, Kunststoffen etc. Schadstoffe bzw. Sondermüll
Metalle	Fe-/NE-Metalle
Mineralstoffe	Erdaushub, Boden, Mineralstoffe (kein Glas) und Glas sowie Asphalt

Zur Nachuntersuchung wurde der Fein- und Mittelfraktion je Bohrmeter eine repräsentative Probe nach PN 98 [2001] entnommen.

#### 4.4 Nachsortierung

Die Nachuntersuchungen beschränken sich auf homogene Proben der Mittel- und Feinfaktion. Hierbei wurden zu Beginn der Untersuchungen sowohl für die Fein- als auch für die Mittelfraktion Nachsortierungen – basierend auf dem genannten Stofffraktionskatalog – durchgeführt. Da es sich bei der Feinfaktion jedoch nahezu ausschließlich um mineralische Bestandteile handelte, wurde von einer weiteren/kompletten Nachuntersuchung abgesehen.

## **4.5 Wassergehalt**

In Abhängigkeit der spezifischen Wasseraufnahmefähigkeit muss für einen Vergleich der Potenziale der Bezug zur Trockenmasse (TM) hergestellt werden. Hierzu wurden je Bohrmeter aliquote Mischproben der Fein- und Mittelfaktion der gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung nach DIN ISO 11465 [1996] unterzogen.

Zusätzlich wurde nach gleicher Methode der stoffspezifische Wassergehalt der zuvor aussortierten Stofffraktionen bestimmt.

## **4.6 Stoffgehalt**

Die Elution nach DIN 19529 stellt ein einstufiges Schüttelverfahren mit einem Wasser- zu Feststoffverhältnis von 2:1 dar. Dieses Verfahren ist geeignet für Materialien mit einer Körnung bis 32 mm und dient der Bestimmung des Elutionsverhaltens anorganischer Parameter. Es ist in der sich derzeit im 2. Entwurf befindlichen „Verordnung über den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken - Ersatzbaustoffverordnung“ als möglicher Deklarationstest zur Einordnung mineralischer Abfälle in Ersatzbaustoffklassen genannt. Entsprechend wurde die Feinfaktion diesbezüglich untersucht. Die Eluierbarkeit von organischen Stoffen aus Feststoffen wurde nach DIN 19527 bestimmt.

## **4.7 Aschegehalt**

Der Aschegehalt wurde bestimmt nach DIN 51719 [1997] „Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes“. Die eingewogene Probe wurde unter festgelegten Bedingungen in einem Tiegel bei  $815 \pm 10^\circ\text{C}$  (bei Holzkohle und Holzkohle Briketts  $710 \pm 15^\circ\text{C}$ ) verascht und nach dem Abkühlen im Exsikkator abgewogen. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen der Massenkonstanz wiederholt.

## **4.8 Brennwert**

Zur Bestimmung des Brennwerts wurde auf die Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysenvorschrift für Sekundärbrennstoffe im Rahmen des RAL-Gütezeichens Sekundärbrennstoffe, Richtlinie der AQS, Universität Lüneburg [2001] zurückgegriffen.

Hierbei wurde die Probe in einer kalorimetrischen Bombe unter festgelegten Bedingungen verbrannt. Durch die bei der Verbrennung entstehende Wärme erhöht sich die Temperatur des Kalorimeters gegenüber seiner Anfangstemperatur. Die Temperaturerhöhung wird entsprechend gemessen.

Der Brennwert selbst errechnet sich aus folgenden Parametern:

- Temperaturerhöhung des Kalorimeters
- Wärmekapazität des Kalorimeters
- Einwaage der Brennstoffprobe
- Wärmemenge, die beim Verbrennen der Zündmittel und der Verbrennungshilfsmittel freigesetzte wurde

Bei der Berechnung des Heizwerts wird die Bildungswärme der verdünnten schwefeligen Säure aus Schwefeldioxid und Salpetersäure aus Stickstoffdioxid vernachlässigt. Die Oxidation des Stickstoffs wird ebenfalls vernachlässigt.

## 4.9 Chlor und Schwefel

Der Chlor- und Schwefelgehalt der heizwertreichen Fraktionen wurde durch den kalorimetrischen Aufschluss und anschließende Messung mittels Ionenchromatographie [DIN EN ISO 10304-1, 2009] bestimmt.

## 4.10 Schwermetalle

Grundlage stellt die ÖNORM EN ISO 17294-2 [2005] dar. Die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) ist in diesem Zusammenhang eine robuste und sensitive Analysenmethode in der anorganischen Elementanalytik. Bei der ICP-MS wird zunächst durch einen hochfrequenten Strom ionisiertes Argon induziert und die Probe auf 5.000–10.000 °C erhitzt. Dabei werden die Atome ionisiert und ein Plasma entsteht. Anschließend werden die im Plasma generierten Ionen in Richtung des Analysators des Massenspektrometers durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Dort werden die einzelnen Elemente und deren Isotope messtechnisch erfasst.

## 4.11 Stabilisierungsgrad

Neben der Messung des biologischen Sauerstoffbedarfs einer Probensuspension, die den Stabilisierungsgrad widerspiegelt, wurden weitere Untersuchungen an ausgewähltem Probenmaterial durchgeführt.

- **Trockensubstanz, Glühverlust**

Die Trockensubstanz wird nach DIN EN 14346 „Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes“ durchgeführt. Der Trockenrückstand wird gravimetrisch bestimmt, nachdem die Probe über 48 h bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet wurde. Der Anteil des Trockenrückstandes an der ursprünglichen Probe wird als prozentuale Trockensubstanz angegeben.

Der Glühverlust wird nach DIN EN 15169 „Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten“ durchgeführt. Die getrocknete Probe der Trockensubstanzbestimmung wird über 6 h bei 550 °C vermuffelt und der organische Trockenrückstand errechnet.

- **pH-Wert**

Der pH-Wert wird nach DIN ISO 10390 „Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes“ durchgeführt. Eine Suspension aus unbehandelter Probe und 0,1 molarer Calciumchlorid-Lösung wird hergestellt und mit einem pH-Meter vermessen.

- **Brennwert**

Der Brennwert wird nach DIN 51900-1 „Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes“ durchgeführt. Getrocknetes Probenmaterial wird mit Paraffin als Brennhilfe

verbrannt und die erzeugte Temperaturänderung detektiert. Die freigesetzte Energie wird auf das eingesetzte Probenmaterial rückgerechnet.

- **Chemischer Sauerstoffbedarf**

Der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) wird mit einem Hach-Lange Test nach DIN 38409 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung – Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedars (CSB) im Bereich über  $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ “ bestimmt. Die von Kaliumdichromat bei der Oxidation der Probe erzeugte Farbänderung wird dabei photometrisch erfasst und als chemischen Sauerstoffbedarf in  $\text{mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$  angegeben und anschließend auf den eingesetzten Feststoff umgerechnet.

- **Total Carbon (TC), Total Organic Carbon (TOC), Total Inorganic Carbon (TIC)**

Der Total Carbon (Gesamtkohlenstoff) wird mittels Infrarotspektroskopie nach einer Hochtemperaturverbrennung der Probe bestimmt. Die Probe wird dabei unter Sauerstoffüberschuss bei  $1200^\circ\text{C}$  verbrannt und der Abgasstrom durch einen Infrarotdetektor geführt, der das erzeugte Kohlenstoffdioxid bestimmt. Eine Kalibrierung wurde im Bereich zwischen 3 und 50 mg Kohlenstoff pro Probe durchgeführt.

Der Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff) wird wie der Total Carbon (TC) bestimmt, nachdem der anorganische Kohlenstoffanteil mit 10-prozentiger Salzsäure ausgetrieben wurde.

Der Total Inorganic Carbon (gesamter anorganischer Kohlenstoff) wird aus der Differenz zwischen Total Carbon (TC) und Total Organic Carbon (TOC) errechnet.

- **TTC-Test**

Der TTC-Test wird nach dem Leitfaden Nr.2-3 der deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA Landesverband Bayern) durchgeführt. Das Probenmaterial wird mit Verdünnungswasser auf einen TS von  $1 \text{ g TS} \cdot \text{l}^{-1}$  verdünnt. Aktive Mikroorganismen in der Probe setzen die Testreagenz (2,3,5-Triphenyltetrazoliumchlorid) enzymatisch zu dem Farbstoff Formazan um. Dadurch lässt sich qualitativ nachweisen, ob die Probe biologisch aktiv ist.

- **Biologischer Sauerstoffbedarf und Leitfähigkeit in der Suspension**

Der biologische Sauerstoffbedarf bis zum Tag 5 wird manometrisch nach DIN EN 1899-1 „Wasserbeschaffenheit- Bestimmung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs nach n-Tagen ( $\text{BSB}_n$ ) – Teil 1 Verdünnungs- und Impfverfahren nach Zugabe von Allthioharnstoff (ISO 5815:1989 modifiziert) Deutsche Fassung EN 1899-1:1998“ bestimmt. Dabei wird organisches Probenmaterial mit Hilfe von angeimpften Mikroorganismen und Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Das Kohlenstoffdioxid reagiert mit Natriumhydroxid zu Natriumcarbonat und erzeugt einen Unterdruck der manometrisch erfasst wird. Der ermittelte biologische Sauerstoffbedarf wird auf die eingesetzte Probe umgerechnet.

Die Leitfähigkeit wird in der Suspension des BSB-Ansatzes gemessen. Aus dem Probenmaterial gelöste Ionen erhöhen dabei die Anzahl der Ladungsträger im Wasser. Diese werden über den gemessenen elektrischen Widerstand erfasst und in eine Leitfähigkeit umgerechnet.

- **Königswasser-Aufschluss**

Zur Schwermetall- und Elementanalyse ist es notwendig das Probenmaterial in einem Aufschluss aufzubereiten und die Analyten in die flüssige Phase zu überführen. Dazu wird ein Königswasseraufschluss angesetzt und 1,5 g luftgetrocknete Probe mit 11 ml Salzsäure

und 4 ml Salpetersäure für 2 h im Heizblock gekocht. Der Aufschluss wird anschließend filtriert und mit Millipore Wasser auf ein Volumen von 50 ml aufgefüllt.

- **Quecksilber und Blei**

Die Quecksilbermessung wird mit einer Kaldampf-AAS durchgeführt. Dazu wird in der verdünnten Königswasserprobe gelöstes Quecksilber mit dem Reduktionsmittel Zinn(II)chlorid zu elementarem Quecksilber reduziert. Durch eine semipermeable Membran wird die Quecksilberwolke mit Hilfe eines Argon Trägergasstromes in die Messküvette geführt, wodurch die Lichtintensität der Quecksilberdampflampe geschwächt wird. Die Kalibrierung erfolgt im Arbeitsbereich zwischen 0,5 und 10 µg/L. Die Messergebnisse werden auf den Feststoff umgerechnet. Die Wiederfindungsrate lag bei 99,7 %.

Der Bleigehalt wird mit Hilfe einer Graphitrohr-AAS bestimmt. Ein Tropfen verdünnte Königswasserprobe wird im Graphitrohr getrocknet und verascht. In der Gasphase über der Probe wird die Schwächung der Lichtintensität einer Bleidampflampe gemessen. Standards zwischen 10 und 50 µg/L werden angesetzt und die ermittelten Probenextinktion auf die Bleikonzentration im Feststoff umgerechnet.

- **Phosphor und Schwefel**

Der Schwefel- und Phosphorgehalt wird mit Hilfe eines induktiv gekoppelten Plasmas mit optischem Emissions-Detektor (ICP-OES) in der Königswasserprobe bestimmt. Dabei wird ein Probenstrom in eine Plasmafackel geführt. Das Probenmaterial wird ionisiert, Elektronen im Energieniveau angehoben oder ganz aus der Elektronenschale entfernt. Beim Rückfall auf das ursprüngliche Energieniveau wird die zugeführte Energie wieder freigesetzt und in Form elementspezifischen Lichtquanten abgegeben. Diese werden vom optischen Detektor erfasst und auf Schwefel- und Phosphorkonzentrationen im eingesetzten Feststoff rückgerechnet.

- **Stickstoffbestimmung**

Die Stickstoffbestimmung wird mit einem Hach-Lange Test nach EN ISO 11905-1 „Bestimmung von Stickstoff – Teil 1: Bestimmung von Stickstoff nach oxidativem Aufschluss mit Peroxodisulfat“ durchgeführt. Die luftgetrocknete Probe wird eingewogen, deren gebundener Stickstoff mit Hilfe von Peroxodisulfat zu Nitrat aufgeschlossen wird. Dieses reagiert zu Nitrophenol, welches photometrisch erfasst wird und auf die Stickstoffkonzentration in der Probe rückgerechnet wird.

- **Chlorid-Bestimmung**

Der Chloridgehalt wird halbquantitativ im Brennwert-Aufschluss bestimmt. Chlorid-Ionen entfärben auf dem Schnellteststäbchen aufgebrachte Zonen rotbraunen Silberchromats. Dadurch lässt sich der Chloridgehalt der Probe in einen Messbereich einordnen und auf die in der Probe enthaltenen Chlorid-Ionen rückrechnen.

- **Nitrat**

Nitrat wird nach DIN 38405-9 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung- Anionen (Gruppe D) – Teil 9: Photometrische Bestimmung von Nitrat (D9)“ im Brennwaertaufschluss der Probe bestimmt. In der Probe vorhandene Nitrat-Ionen werden dabei zu 4-Nitro-2,6-dimethylphenol umgesetzt und können dann photometrisch bei 324 nm gegen deionisiertes Wasser erfasst werden. Die Kalibrierung erfolgt im Bereich zwischen 0,5 und 5 mg NO<sub>3</sub>\*l<sup>-1</sup>.

- Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX)

Zur AOX-Bestimmung wird die luftgetrocknete Probe mit Aktivkohle vermischt und in salpetersaurer Lösung vermengt. Anorganische Halogenide werden dadurch eluiert und wasserlösliche organische Verbindungen von der Aktivkohle gebunden. Das Probenmaterial sowie die Aktivkohle werden im Sauerstoffstrom verbrannt. Organisch gebundene Halogene werden zu Halogenwasserstoff umgesetzt und können mikrocoulometrisch erfasst werden. Sie werden unter dem Summenparameter „Chloridanteil der Probe“ ausgegeben und auf die eingesetzte Probenmenge rückgerechnet.

#### Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die PAK-Bestimmung erfolgt qualitativ mittels einer Extraktion und anschließender Dünnschichtchromatographie. Die Art und Position der fluoreszierenden Verbindungen auf der Dünnschichtplatte wird mit verschiedenen Standards verglichen und ausgewertet. Außerdem wird eine Probe quantitativ mit einer High Performance Liquid Chromatographie (HPLC) untersucht. Dabei wird das erzeugte Extrakt mit einem Laufmittel durch eine Chromatographie-Säule geführt. Die zwischen dem Analyten und der stationären Phase des Säulenmaterials auftretenden Wechselwirkungen erhöhen die Retentionszeit der untersuchten Komponente. Durch die stoffspezifische Retentionszeit und dem Messergebnis des nachgeschalteten Detektors ist eine qualitative PAK-Bestimmung möglich.

## 4.12 Zusammenfassung

Zusammenfassend stellt Tabelle 20 die vorgenommenen Untersuchungen in Abhängigkeit der jeweiligen Fraktion dar.

Tabelle 20: Zusammenfassende Darstellung der Untersuchungen in Abhängigkeit der Klassierfraktionen

	Feinfraktion	Mittelfraktion	Grobfraktion
In-Situ Sortierung			✓
Nachsortierung	(✓)	✓	
Wassergehalt	✓	✓	(✓)
Schadstoffgehalt	✓	✓	(✓)
Aschegehalt			✓*
Brennwert/Heizwert			✓*
Chlorgehalt			✓*
Schwefelgehalt			✓*
Schwermetalle			✓*
Stabilisierungsgrad etc.	(✓)	(✓)	✓*
Eluatuntersuchung			(✓)
✓	Untersuchung hat stattgefunden		
(✓)	Untersuchungen an ausgewählten Proben		
✓*	Untersuchung der heizwertreichen Fraktionen		

## 5 Ergebnisse und Diskussion

---

„Die Deponie das Depot?“

---

### 5.1 Ablagerungsmenge und Bohrprofile

Insgesamt existieren nur wenige belastbare Angaben über die Art und Qualität der Abfälle, welche auf dem Deponiekörper I der Deponie Dyckerhoffbruch abgelagert wurden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Gutachtens im Jahr 2010 durch das BGU ein 3D-Strukturmodell des Deponiekörpers angefertigt. Dieses beruht auf alten Luftbildern, Karten, Fotodokumentationen und der Auswertung vorhandener Schichtprofile der Gasbrunnen.

Ziel der Studie sollte es neben der reinen Potenzialermittlung sein, dieses Modell hinsichtlich der Schichtung des Deponiekörpers zu validieren und vorgefundene Schichtänderungen zu integrieren. Vor diesem Hintergrund wurden sämtliche Bohrmeter durch die Universität Gießen in die vorhandene Schichtenfolge eingeteilt und nachfolgend durch die Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden in das bestehende Strukturmodell eingearbeitet.

Ziel ist es, hierdurch unter Zuhilfenahme von Geoinformationssystems-Tools eine Abschätzung des realen Ablagerungspotenzials bzw. -volumens der unterschiedlichen Abfallschichten zu erzielen. Die entsprechende Umrechnung auf Gewichtsprozent erfolgt in diesem Kontext auf Basis vorhandener Literaturwerte.

#### 5.1.1 Bohrprofile

Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt 615 Bohrmeter charakterisiert. Die Verteilung dieser auf die genannten Abfallarten wird aus Abbildung 34 ersichtlich. Auf Basis der Ergebnisse ist zu vermuten, dass Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch im Wesentlichen durch mineralische Abfälle, in Form von Bodenmaterial und Bauschutt geprägt ist. Diese machen ca. 55 Gew.-% des untersuchten Bereichs aus. Die Ablagerung von Haus- und Gewerbemüll ist im Vergleich zu anderen Hausmülldeponien als gering einzustufen.

Hinzu kommt, dass sich die Lage der Bohrpunkte auf Bereiche konzentriert, die laut bestehendem Strukturmodell überwiegend durch Haus- und Gewerbeabfälle geprägt sein sollten. Daher ist zu vermuten, dass die nicht untersuchten Gebiete des Deponieabschnitts I nahezu vollständig aus inerten Materialien bzw. Bodenmaterial und Bauschutt bestehen. Deren Zusammensetzung und chemischen Eigenschaften sollten denen der vorgefundenen Bauschutt- und Bodenlagen gleichen.

Die ausführliche Darstellung der Bohrprofile ist dem Anhang zu entnehmen.

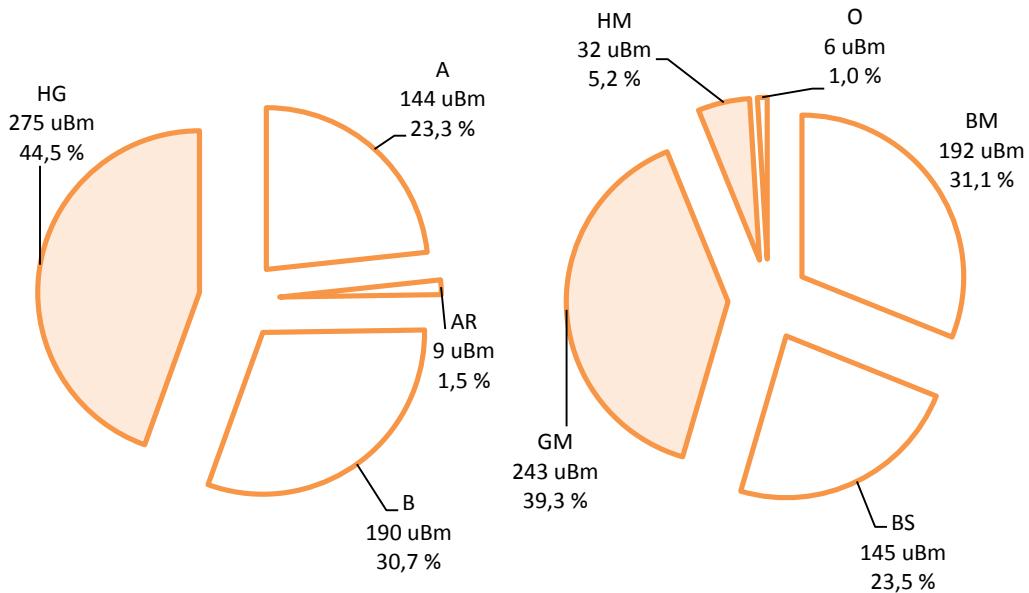


Abbildung 34: Verteilung der untersuchten Bohrmeter (uBm) nach ausgewiesenen Schichten im Rahmen der Bohrlochprofilerstellung (Prozentuale Verteilung nach untersuchten Bohrmetern)

#### Einstufung im Rahmen des 3D-Strukturmodells:

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- AR: Abraummaterial (Abrasande und –materialien des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

#### Detailbetrachtung der Profilerstellung:

- BM: Bodenmaterialien (natürlichen Ursprungs und ohne anthropogene Bestandteile)
- BS: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- GM: Gewerbemüllbereiche (überwiegend durch Produktionsabfälle geprägt)
- HM: Hausmüllbereiche (überwiegend durch Konsumgüter geprägt)
- O: Organische Schlämme aus der Papierherstellung

## 5.1.2 Ablagerungsmengen

Aufgrund der damaligen Einstellung zu Abfällen, fehlender Regelungen und geringer Ablagerungskosten liegen zur tatsächlichen Ablagerungsmenge des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch keine historischen Aufzeichnungen vor. In diesem Kontext bildet das nachträglich erarbeitete 3D-Strukturmodell des Deponiekörpers einen entscheidenden Beitrag zur Bestimmung der deponierten Abfallarten und -massen oder vielmehr Volumina.

### 5.1.2.1 Ablagerungsvolumen

Im Rahmen der gewonnenen Erweiterung des 3D-Strukturmodells, zeigt sich, dass der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch wesentlich durch Abraum geprägt ist. Dieser macht in der Gesamtbetrachtung ca. die Hälfte des Deponiekörpers aus.

Mit Anteilen von jeweils ca. 20 Vol.-% bilden Haus- und Gewerbemüll sowie Bauschutt die wesentlichen Abfallkomponenten. Die verbleibende Abdeckschicht macht demnach lediglich 10 Vol.-% aus (vergl. Abbildung 35).

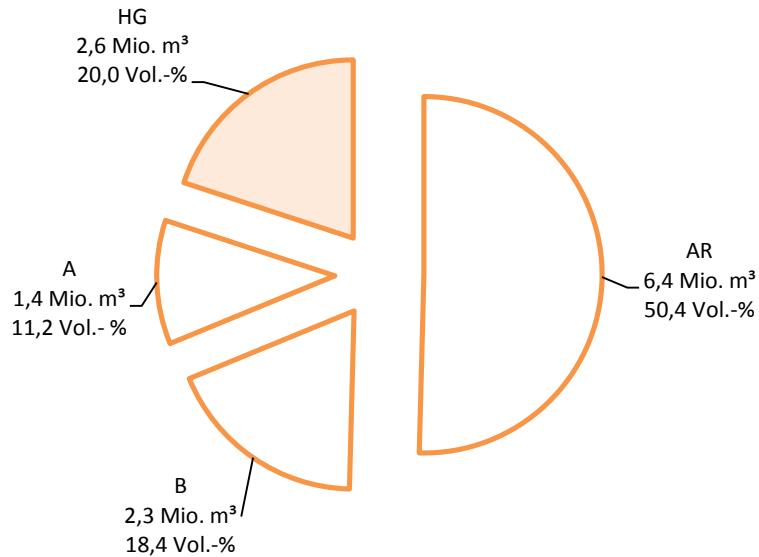


Abbildung 35: Verteilung der abgelagerten Abfallarten in Bezug auf das vorhandene Deponievolumen (Berechnungsgrundlage stellt das 3D-Strukturmodell dar)

#### Einstufung im Rahmen des 3D-Strukturmodells:

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- AR: Braumsand und -materialien des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich beim Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch um einen ehemaligen Steinbruch handelt, auf dem unbelastete Braumsande und -materialien im Untergrund abgelagert wurden, setzt sich die eigentliche Zusammensetzung des kommunal sowie gewerblich abgelagerten Abfalls, wie in Abbildung 36 dargestellt, zusammen.

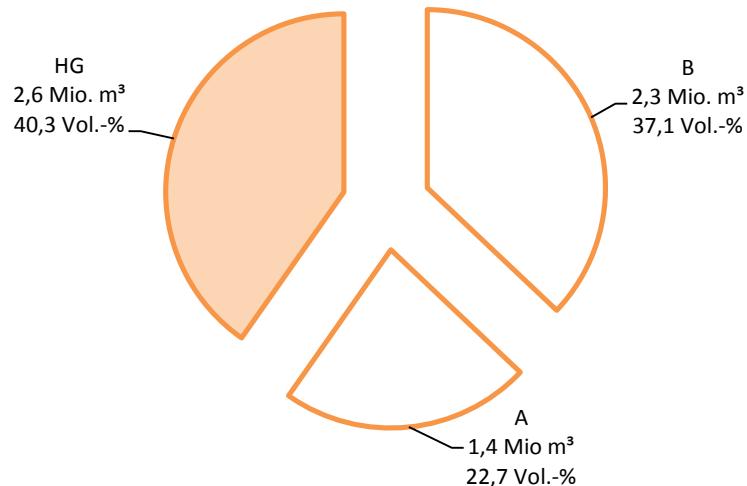


Abbildung 36: Verteilung der abgelagerten Abfallarten in Bezug auf das vorhandene Deponievolumen ohne Berücksichtigung der abgelagerten Braumsande und -materialien (Berechnungsgrundlage stellt das 3D-Strukturmodell dar)

#### Einstufung im Rahmen des 3D-Strukturmodells:

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

Hierbei wird ersichtlich, dass sich der eigentliche Abfallkörper nicht von anderen Deponien unterscheidet. Mit einem Haus- und Gewebeabfallanteil von jeweils etwa 40 Vol.-% existieren hingegen deutliche Parallelen zu anderen Deponien.

Positiv – in Hinblick auf das Ressourcenpotenzial – ist in diesem Zusammenhang ebenfalls der hohe Anteil an Bauschuttmaterialien zu sehen.

Unter Berücksichtigung der Absolutwerte ergibt sich ein Gesamtblagerungsvolumen von 12,8 Mio. m<sup>3</sup>. In diesem Zusammenhang entfallen auf Haus- und Gewerbeabfall ca. 2,6 Mio. m<sup>3</sup>. Bauschutt macht mit 2,3 Mio. m<sup>3</sup> einen ähnlich hohen Anteil aus. Mit 1,4 Mio. m<sup>3</sup> stellt die Abdeckschicht oder vielmehr Abdeckmaterialien die kleinste Fraktion dar. Abraumsande, die lokal eingegrenzt abgelagert wurden, bilden mit 6,4 Mio. m<sup>3</sup> die überwiegend abgelagerte Materialfraktion.

### 5.1.2.2 Abfalldichten

Da im Rahmen der Untersuchungen – technisch bedingt – keine Ermittlung der spezifischen Abfalldichte stattfinden konnte, wird nachfolgend deren Berechnung über repräsentative Literaturwerte vorgenommen.

Wissenschaftlich begleitete Untersuchungen zur Abfalldichte liegen vor. Diese bilden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Grundlage zur massenspezifischen Umrechnung. Folgende Quellen werden herangezogen (siehe Abbildung 37).

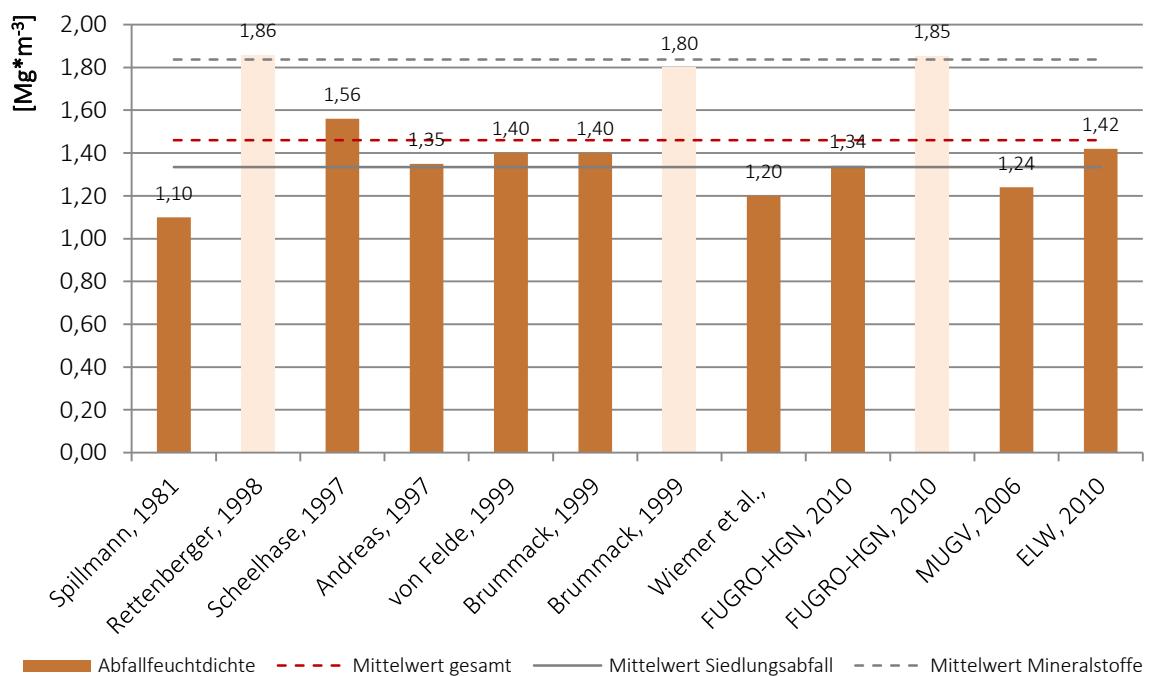


Abbildung 37: Mittlere Dichte abgelagerter Siedlungs- und Mineralstoffabfälle

Spillmann, 1981	aerob vorbeh. HM	Rettenberger, 1998	Feinfraktion (0-20 mm Rückbaumaterial Burghof)
Scheelhase, 1997	MBA Material	Andreas, 1997	MBA Material
von Felde, 1999	Nachverdichtung Walzenzug	Brummack, 1999	Siebdurchgang < 80 mm
Brummack, 1999	Siebdurchgang < 25 mm	Wiemer et al.,	Ablagerungsdichte ohne Bodenmaterial
FUGRO-HGN, 2010	Haushüllähnliche Abfälle	FUGRO-HGN, 2010	Mineralische Abfälle
MUGV, 2006	zerkleinertes Material	ELW, 2012	Abgeleitet aus Ablagerungsmasse und -volumen

Wie sich anhand von Abbildung 37 zeigt, bewegt sich die Einbaudichte von hausmüllähnlichen Abfällen in einem Wertebereich von 1,10 bis 1,56 Mg pro m<sup>3</sup> FM. Im Mittel der Untersuchungen entspricht dies 1,33 Mg\*m<sup>-3</sup>.

Mineralstoffe weisen hingegen eine höhere Einbaudichte auf, die zwischen 1,80 und 1,89 Mg\*m<sup>-3</sup> schwankt. Im Durchschnitt können hier 1,84 Mg\*m<sup>-3</sup> angenommen werden.

### 5.1.2.3 Ablagerungsmenge

Unter Berücksichtigung der genannten Abfalldichten sowie des berechneten Abfallvolumens des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ergibt sich die in Tabelle 21 dargestellte Mengenverteilung nach Abfallarten.

Demnach besitzt der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch eine Gesamtablagerungsmasse von ca. 19,7 Mio. Mg. Auf Abraumsande entfallen etwa 10,3 Mio. Mg bzw. ein Anteil von 50 Gew.-%. Bauschutt macht mit 3,7 Mio. Mg die zweitgrößte Ablagerungsmenge aus.

Tabelle 21 Verteilung der abgelagerten Abfallarten (Berechnung basierend auf abgeleiteten Volumen und mittlerer Abfalldichte)

Einstufung im Rahmen des 3D-Strukturmodells:

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- AR: Abraumsande (Abraumsande und –materialien des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

Abfallschicht	Volumen m <sup>3</sup>	Dichte Mg*m <sup>-3</sup>	Masse Mg FM	Prozentuale Verteilung	
				Vol.-% FM	Gew.-% FM
A Abdeckung	1.433.551,2	1,60	2.293.682,0	11,2%	11,6%
HG Haus-/Gewerbemüll	2.545.537,5	1,33	3.385.564,8	20,0%	17,2%
B Bauschutt	2.342.720,7	1,60	3.748.353,1	18,4%	19,0%
AR Abraumsande	6.428.608,8	1,60	10.285.774,2	50,4%	52,2%
Summe	<b>12.750.418,2</b>	<b>1,53</b>	<b>19.713.374,0</b>	100,0%	100,0%

## 5.2 Korngrößenverteilung

Die Ergebnisse der Klassierungsuntersuchungen zeigen, dass die untersuchten Bereiche des Deponieabschnitts I durchschnittlich 27 Gew.-% FM der Grobfaktion ( $> 50$  mm) aufzeigen. Demnach machen die Mittel- und Feinfaktion nahezu Dreiviertel des Deponiekörpers aus.

In Abhängigkeit des untersuchten Deponiebereichs - neben der Lage des Bohrlochs wird hier auch die Tiefe bzw. das Alter des Deponieguts betrachtet – schwankt der Anteil der Grobfaktion zwischen 8 und 65 Gew.-% der FM. Entsprechend ist die prozentuale Verteilung der Mittel- und Feinfaktion verteilt (siehe Abbildung 38).

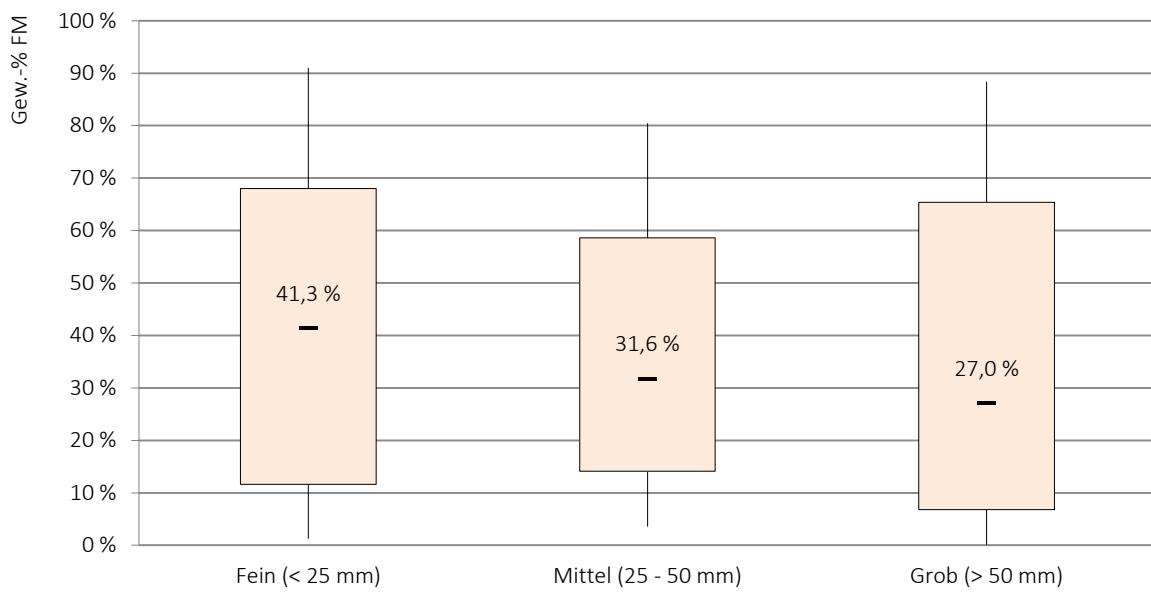


Abbildung 38: Schwankungsbreite der Korngrößenverteilung des Deponieguts des Deponieabschnitts I

Im Rahmen der Analysen konnte keine Regelmäßigkeit zwischen der Korngrößenverteilung und der Abfallartenansprache festgestellt werden. Dies bedeutet, dass unabhängig der Abfallansprache mit unterschiedlichen Verteilungen der Stoffströme (Fein-, Mittel-, Grobfraktion) zu rechnen ist.

Ursache hierfür ist unter anderem, dass bindige Bodenmaterialien zur Klumpenbildung neigen und demnach als Grobfraktion erfasst werden. Ein zusätzlicher Punkt ist, dass Haus- und Gewerbeabfälle vor ihrer Ablagerung teilweise geschreddert wurden, wodurch sich eine Verschiebung der ursprünglichen Korngrößenzusammensetzung ergibt. Problematisch ist auch zu sehen, dass unterschiedliche Wassergehalte des Deponieguts die Klassierung z.T. erheblich beeinflusst haben. Die hieraus resultierende Korngrößenverteilung nach definierter Materialansprache wird aus nachfolgender Abbildung ersichtlich.

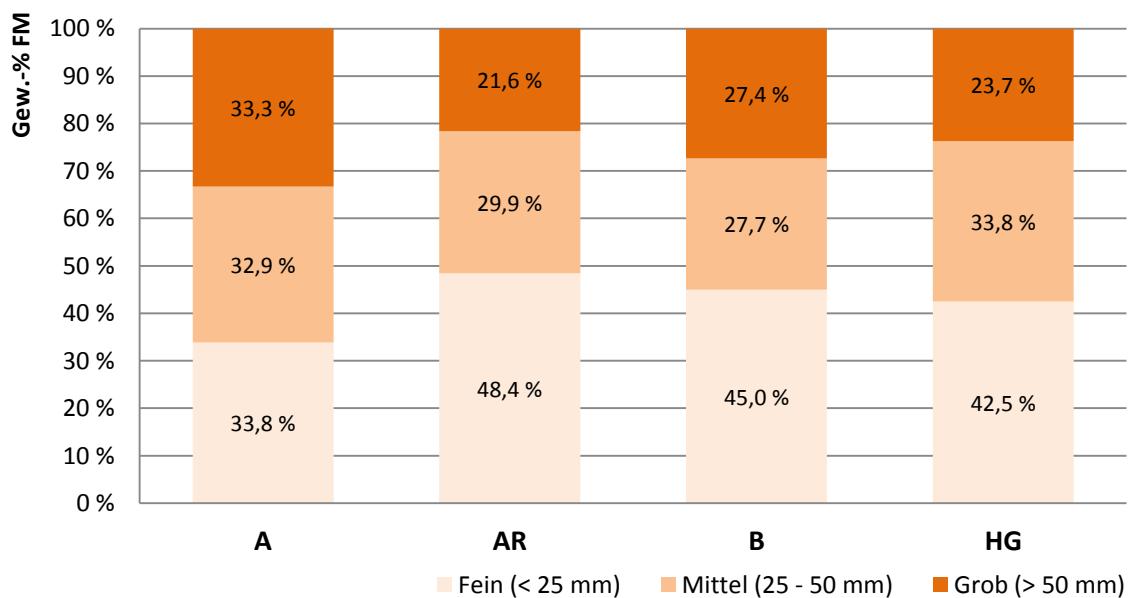


Abbildung 39: Mittlere Korngrößenverteilung nach ausgewiesenen Schichten im Rahmen der Bohrlochprofilansprache

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- AR: Abraummateriale (Abrasumsande und -materiale des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

Selbst bei tieferer Charakterisierung des Deponieguts zeigen sich keine erkennbaren Zusammenhänge. Vielmehr ist unabhängig des jeweils angetroffenen Materials mit einer Gleichverteilung der Korngrößen zu rechnen.

Der vergleichsweise hohe Anteil der Feinfraktion bei stark organischem Deponiegut ist darauf zurückzuführen, dass es sich hierbei ausschließlich um Schlämme aus der Papierindustrie handelt. Für feste organische Bestandteile ist daher eine deutliche Reduktion des Feinkornanteils anzunehmen, die sich an der Verteilung der übrigen Hauptkomponenten orientiert.

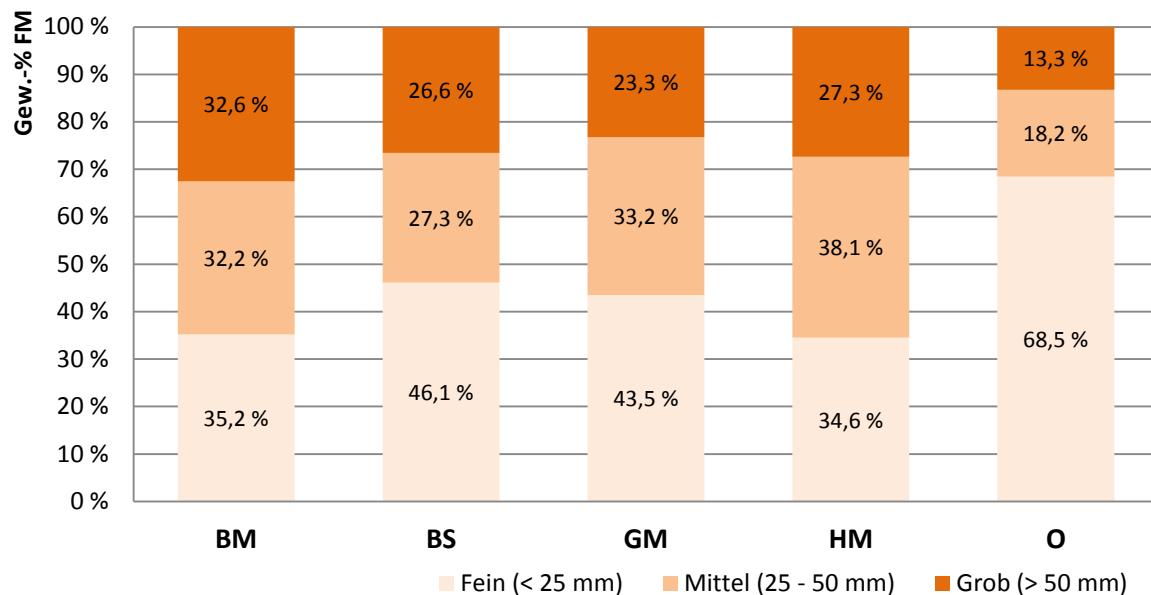


Abbildung 40: Mittlere Korngrößenverteilung nach ausgewiesenen Hauptkomponenten im Rahmen der Bohrlochprofilansprache

- A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)
- AR: Braummateriale (Abrasumsande und –materialien des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)
- B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)
- HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

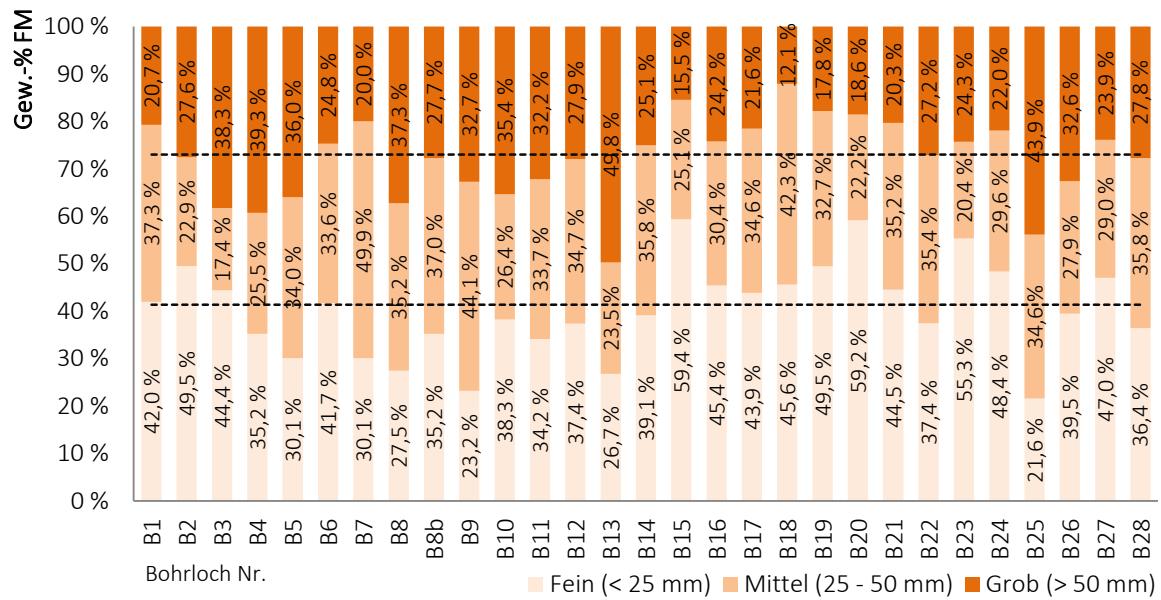


Abbildung 41: Mittlere Korngrößenverteilung nach Bohrlöchern

## 5.3 Deponiegutzusammensetzung

### 5.3.1 Feinfaktion

Mit ca. 41 Gew.-% der Frischmasse macht die Feinfaktion einen wesentlichen Anteil des Deponieabschnitts I aus. Es handelt sich hierbei in den meisten Fällen um eine technisch leicht abtrennbare Fraktion, die insgesamt nachfolgende Potenziale aufzeigt.

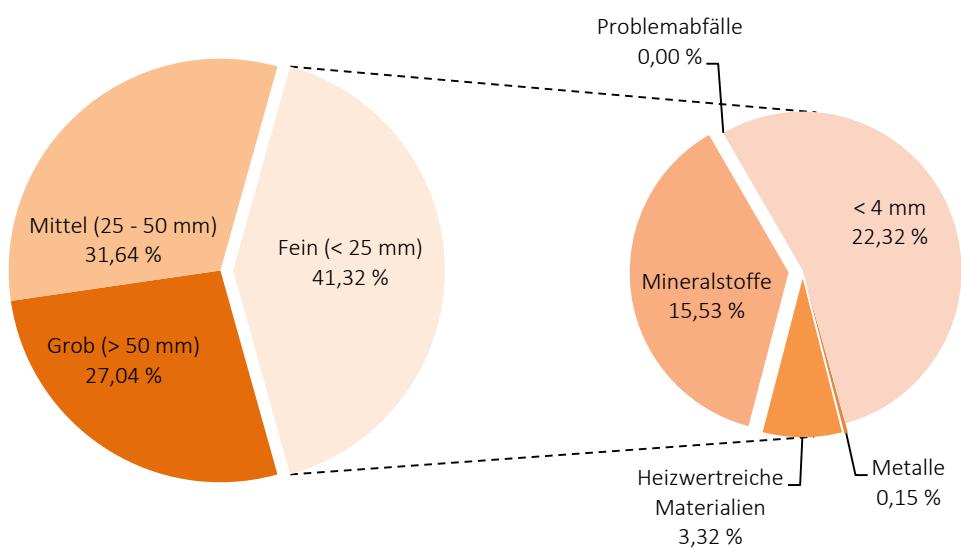


Abbildung 42: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Feinfaktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

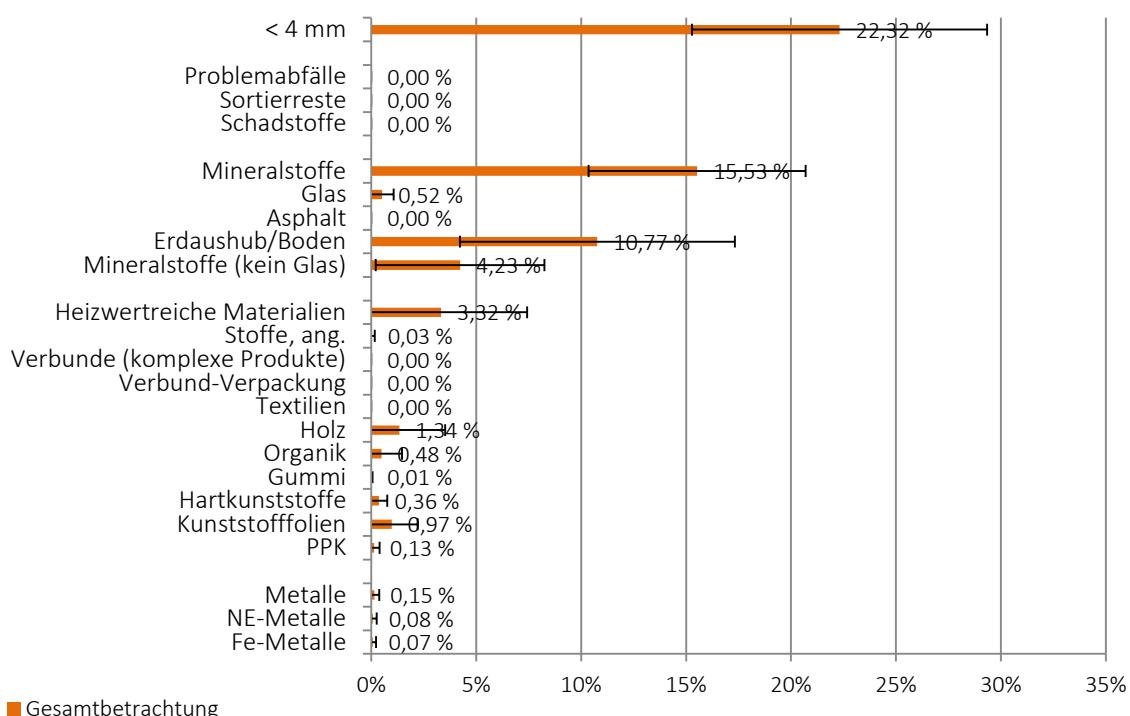


Abbildung 43: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Feinfaktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Es zeigt sich, dass sich die Feinfraktion überwiegend aus inerten Materialien zusammensetzt. Daneben treten Hölzer und Kunststofffolien als heizwertreiche Materialien auf.

Wie Abbildung 44 und Abbildung 45 verdeutlichen, handelt es sich bei der Abdeckung ausschließlich um mineralische Materialien, die in Form von Erdaushub, Boden, Steinen, Beton etc. vorliegen.

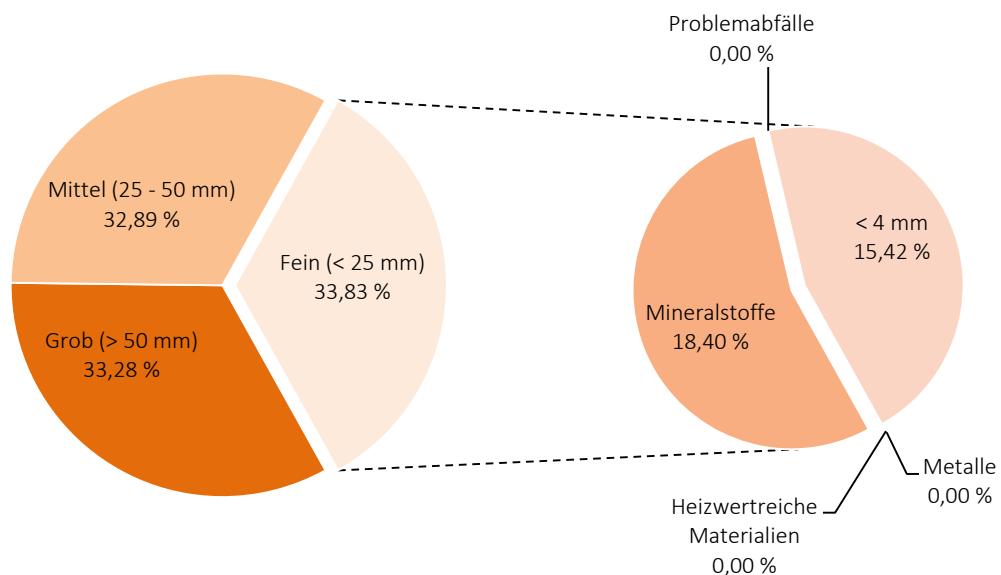


Abbildung 44: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

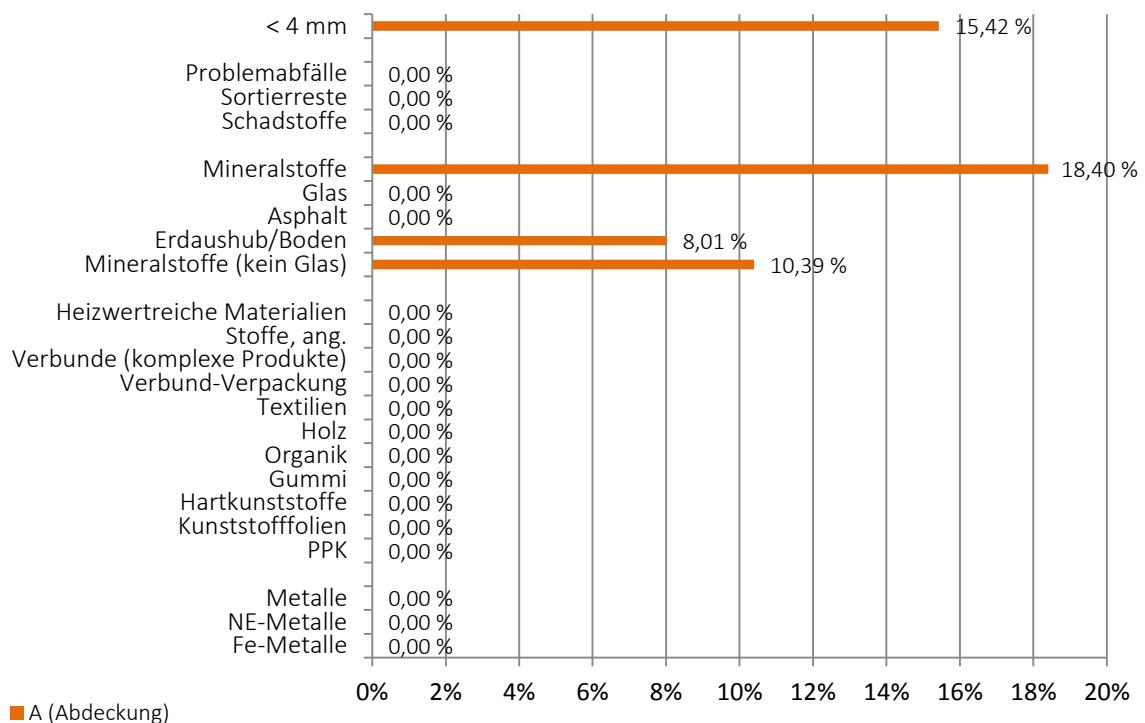


Abbildung 45: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfraktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Gleiches gilt für die definierte Abfallschicht Abraum. Auch hier ist zu erwarten, dass ausschließlich mineralische Bestandteile angetroffen werden. Wie sich im Rahmen der Untersuchungen gezeigt hat, handelt es sich hierbei um Abraumsande des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch.

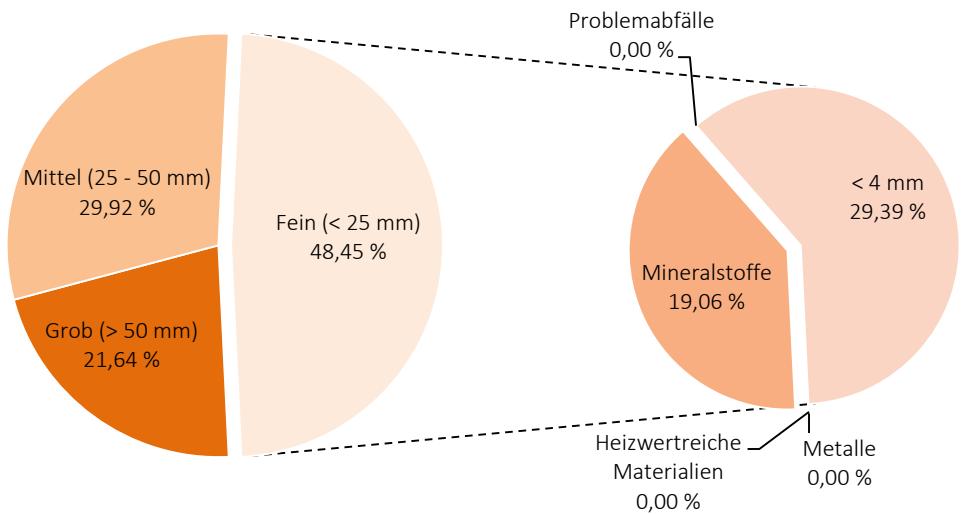


Abbildung 46: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Abraumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

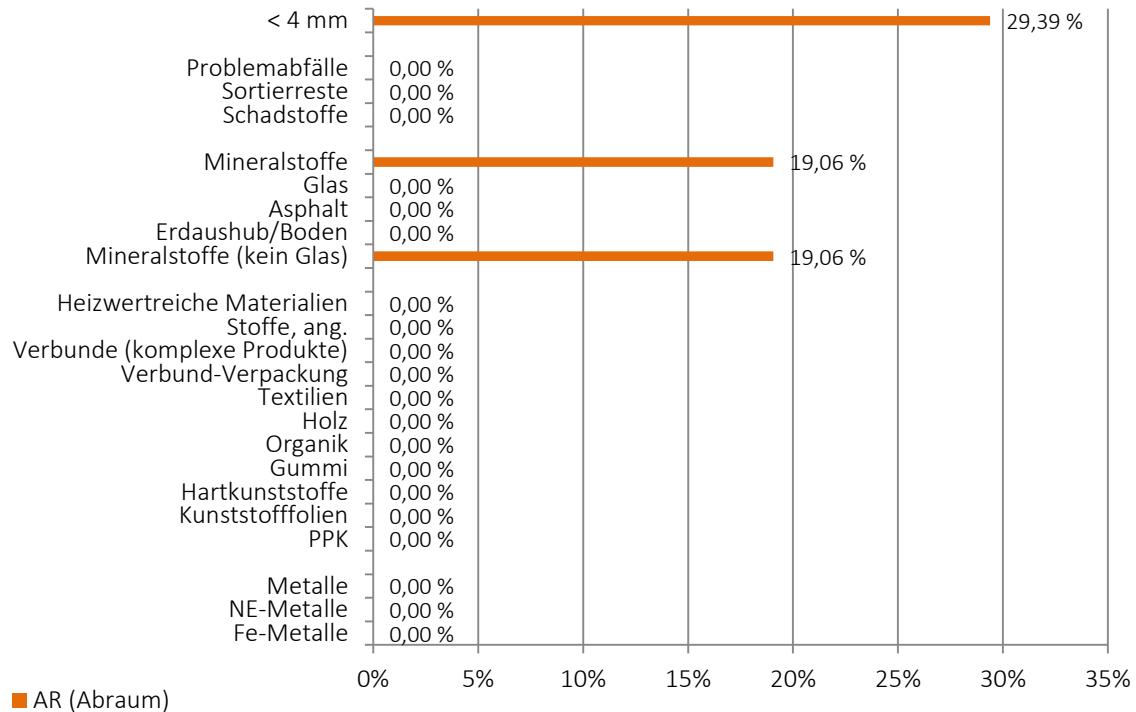


Abbildung 47: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Abraumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Bauschuttablagerungen sind ebenfalls maßgeblich durch mineralische Ablagerungen geprägt. Im Mittel machen diese incl. der Fraktion < 4 mm ca. 97 Gew.-% FM dieser Fraktion aus. Bezogen auf die Gesamtmasse entspricht dies einem Anteil von ca. 44 Gew.-% FM. In einer Größenordnung

von 0,86 Gew.-% FM und 0,03 Gew.-% FM sind heizwertreiche Materialien sowie Metalle unter Berücksichtigung der Gesamtmasse zu erwarten.

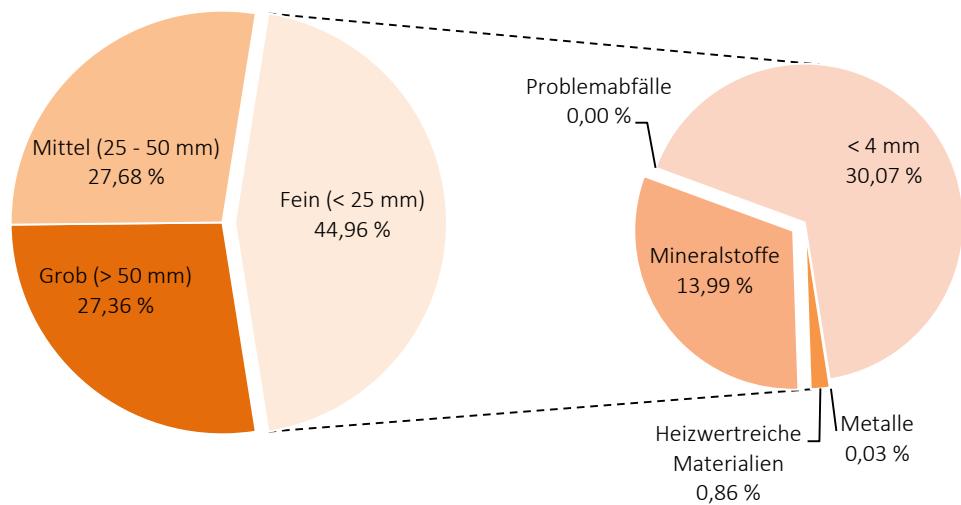


Abbildung 48: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

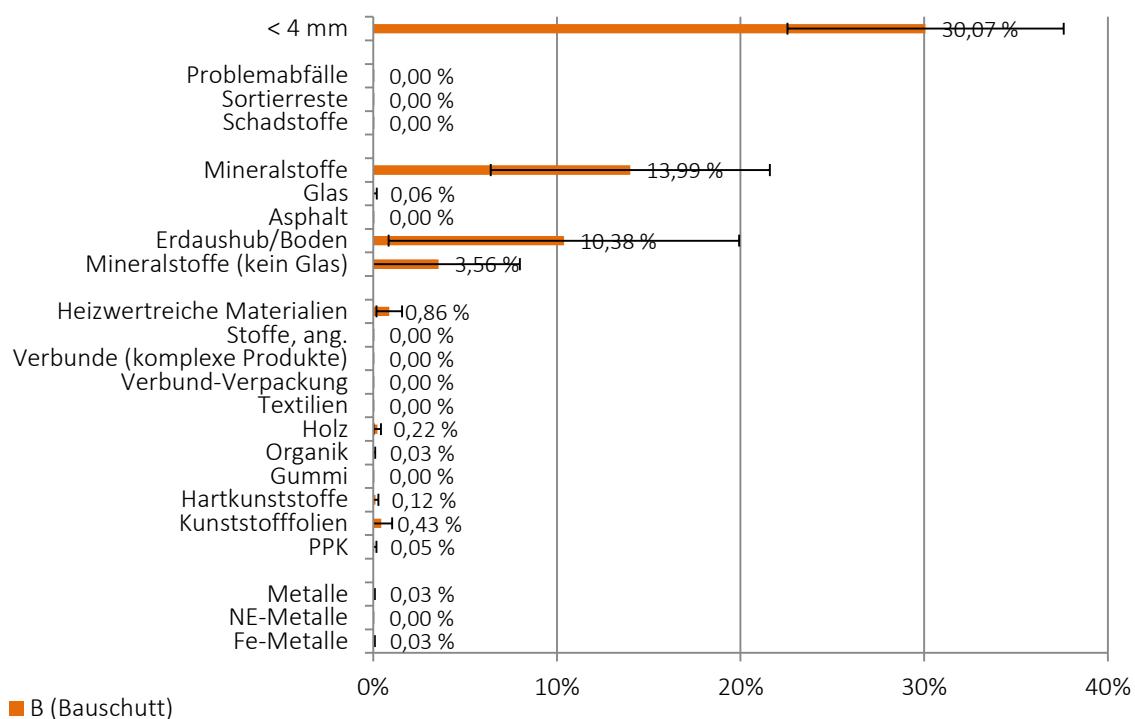


Abbildung 49: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Auch vor dem Hintergrund, dass Abfälle vor ihrer Ablagerung zerkleinert wurden, zeigen Haus- und Gewebemüllschichten ein vergleichsweise hohes Potenzial auf. Trotz des hohen mineralischen Anteils (ca. 90 Gew.-% FM) dieser Fraktion sind heizwertreiche Materialien und Metalle zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist von besonderem Interesse, dass im Fall der Metalle vorwiegend NE-Metalle vorgefunden wurden.

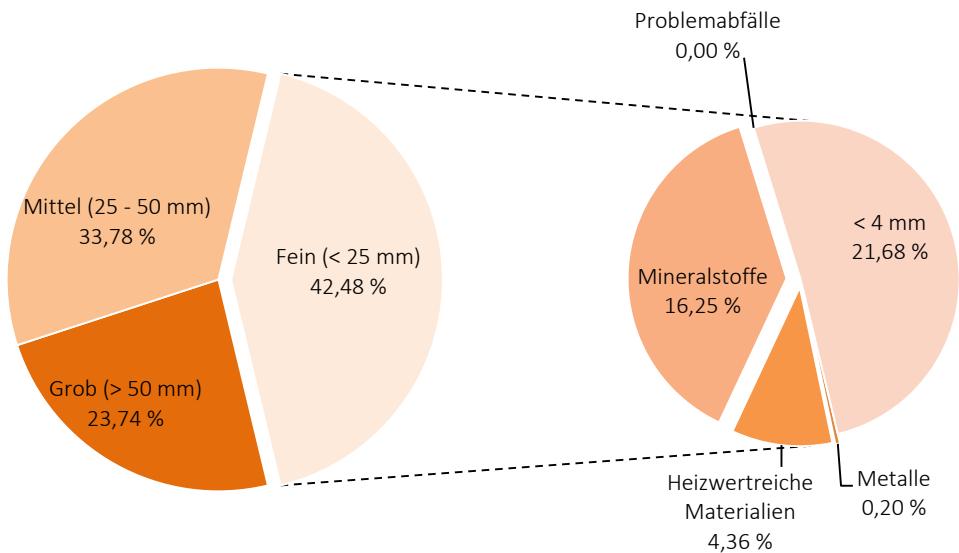


Abbildung 50: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

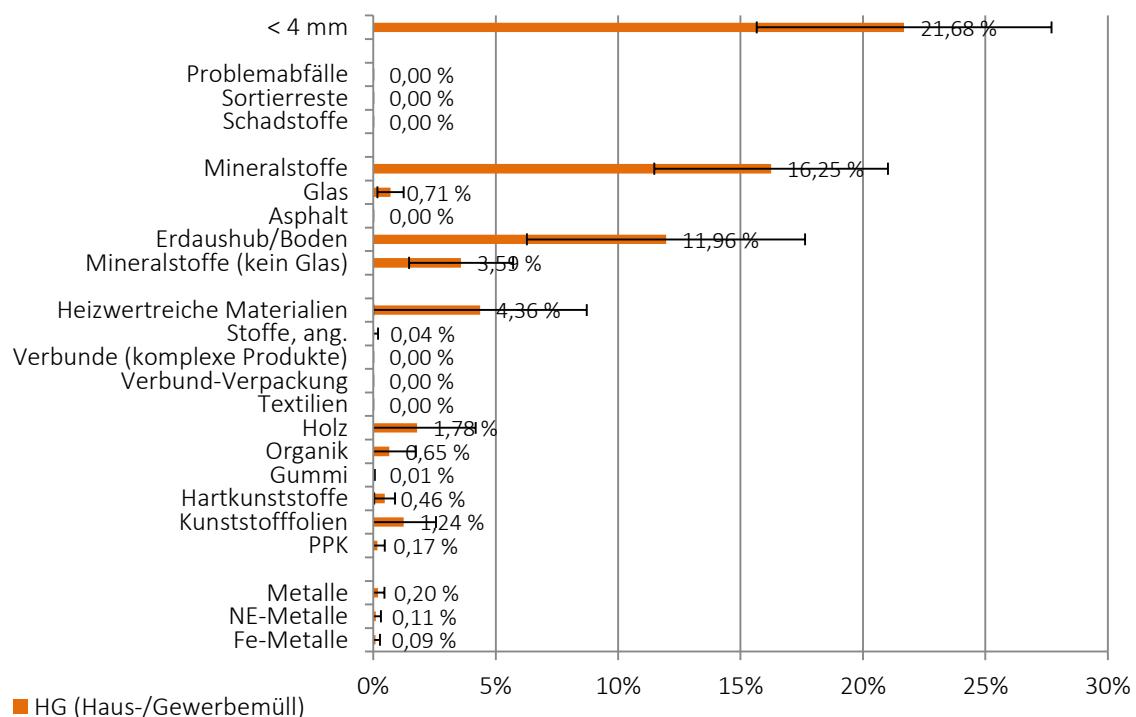


Abbildung 51: Durchschnittliche Zusammensetzung der Feinfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

### 5.3.2 Mittelfaktion

Die Mittelfaktion besteht durchschnittlich zu etwa 60 Gew.-% FM aus mineralischen Bestandteilen, die im Wesentlichen der Fraktion Erdaushub und Boden zuzuordnen sind. Mit ca. 7 Gew.-% FM der Gesamtmasse liegt der Anteil der heizwertreichen Materialien nur geringfügig höher als der der Feinfaktion. Hierbei sind Holz sowie Kunststoffe die wertgebenden Fraktionen. Auffällig ist das vergleichsweise hohe Aufkommen an Problemabfällen. Dieser ist dadurch zu begründen, dass häufig Stoffkonglomerate auftraten, die keiner Fraktion eindeutig zugeordnet

werden konnten und hier als Sortierreste ins Gewicht fallen. Schadstoffe im eigentlichen Sinn sind nahezu keine (0,003 Gew.-% FM der Gesamtmasse) zu verzeichnen. Zwar wurden vereinzelt Batterien gefunden, die aber aufgrund der zugehörigen Untersuchungsmasse nicht ins Gewicht fallen. Das Potenzial dieser Fraktion an Metallen liegt bei ca. 1,5 Gew.-% FM, was in Bezug auf die Gesamtmasse ca. 0,45 Gew.-% der FM entspricht. Anders als in der Feinfaktion sind hier die Fe-Metalle deutlich stärker vertreten (vergl. Abbildung 52 und Abbildung 53).

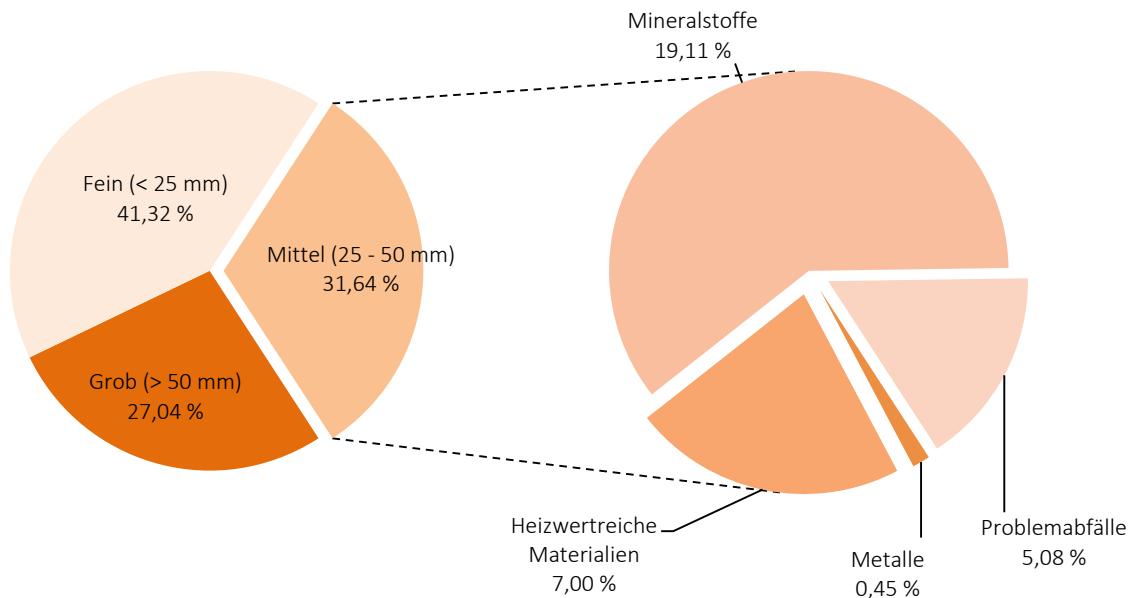


Abbildung 52: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Mittelfraktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

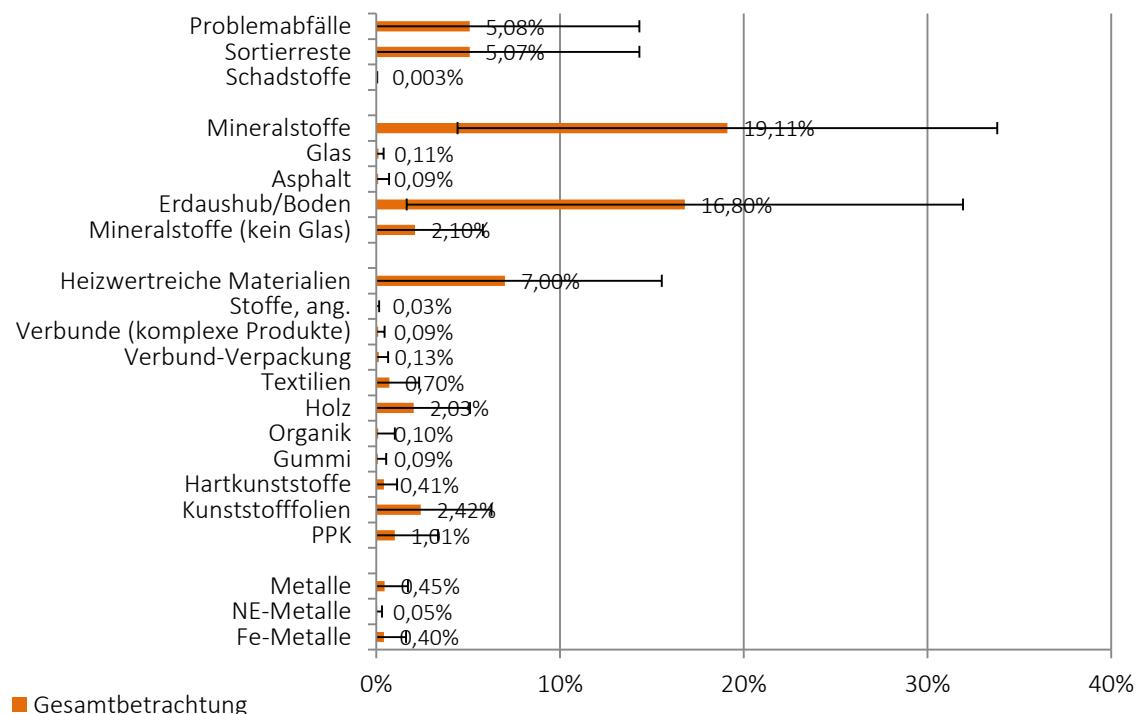


Abbildung 53: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Mittelfraktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Für die Abdeckung ergibt sich das in Abbildung 54 und Abbildung 55 aufgezeigte Bild. Wie zu erwarten ist, besteht diese Schicht nahezu zu 100 % aus mineralischen Bestandteilen. Heizwertreiche Materialien, Metalle und Problemabfälle bilden gemeinsam ein Potenzial < 1 Gew.-% FM der Gesamtmasse.

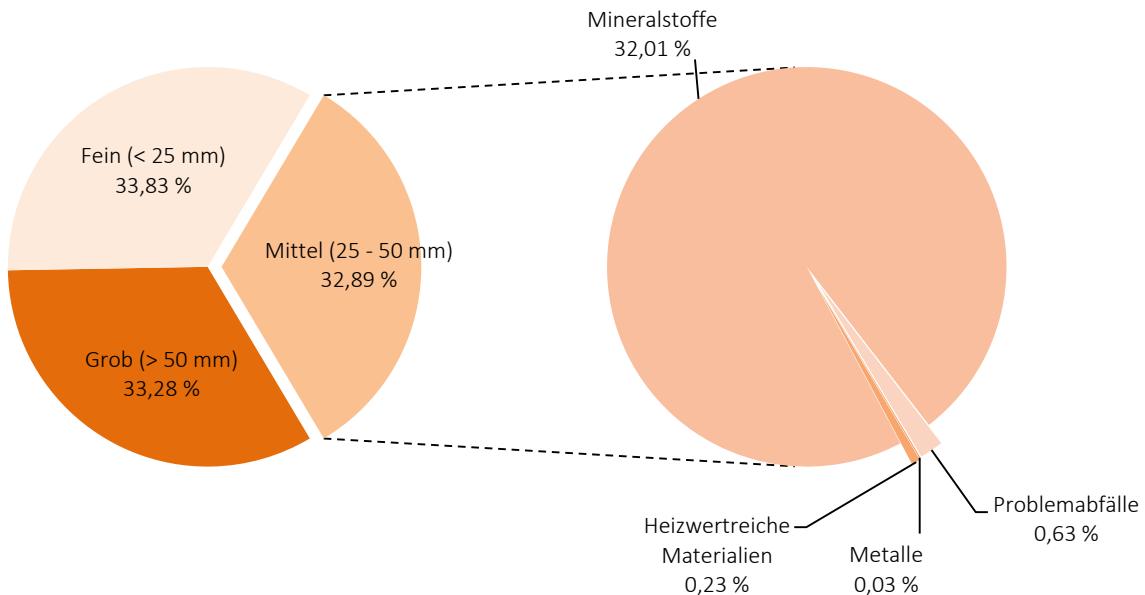


Abbildung 54: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfaktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

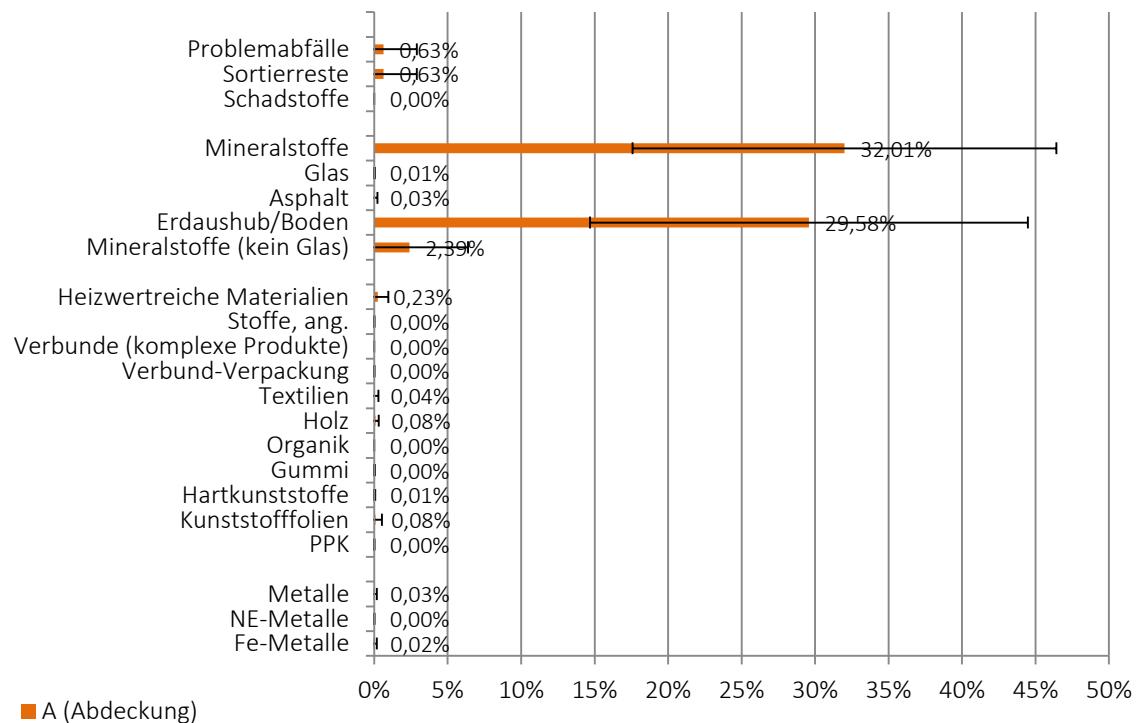


Abbildung 55: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfaktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Wie bereits im Fall der Abdeckschicht bildet auch im Bereich der Abraumschicht mineralisches Material die Hauptkomponente. Hierbei handelt es sich um die bereits erwähnten Abraumsande,

die unterhalb des eigentlichen Deponiekörpers lagern. Abbildung 56 und Abbildung 57 verdeutlichen dies anschaulich.

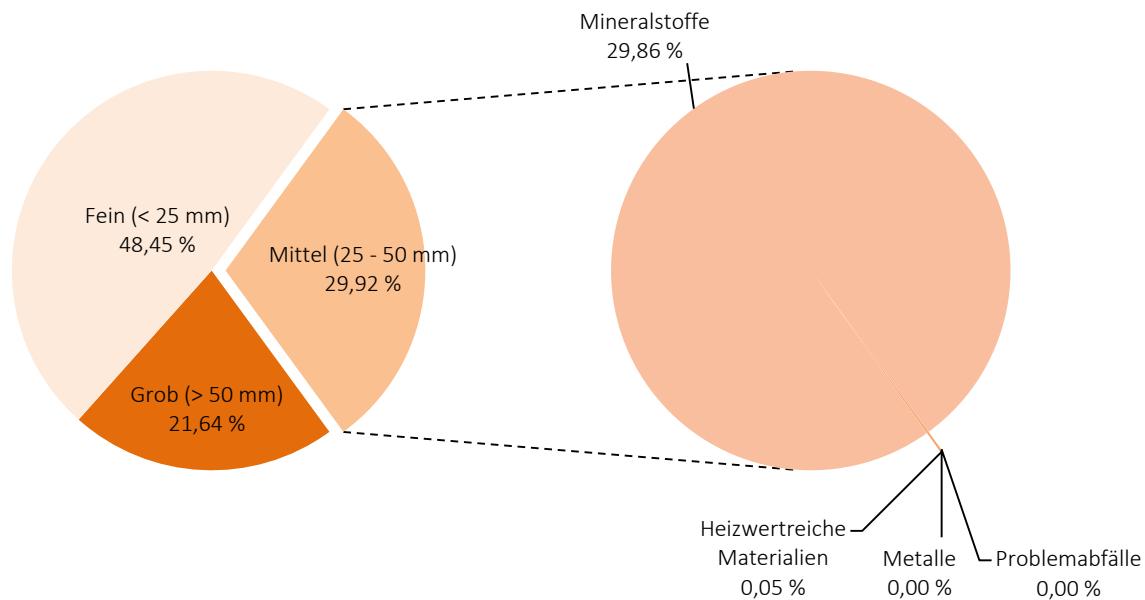


Abbildung 56: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfaktion für die Abraumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

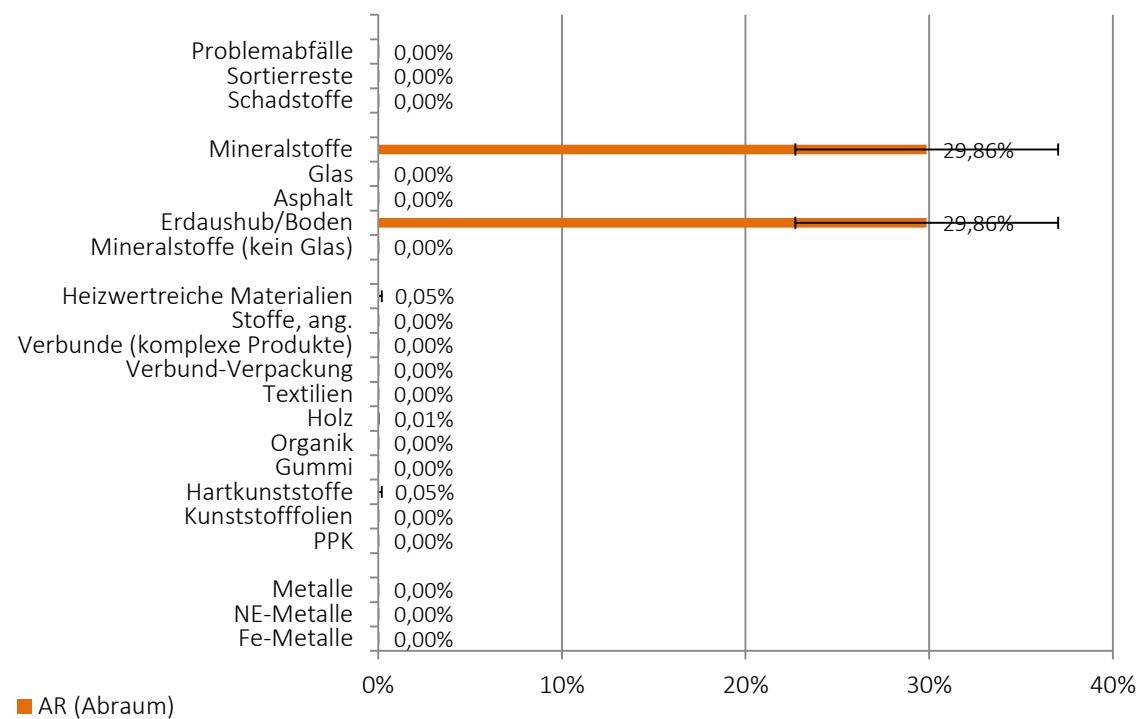


Abbildung 57: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfaktion für die Abraumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Bereiche in denen Bauschutt lagert, sind ebenfalls stark durch mineralische Komponenten geprägt. Diese machen ca. 21,0 Gew.-% FM der Gesamtmasse bzw. 74 Gew.-% FM der Mittelfaktion aus. Problemabfälle, die wiederum aus Sortierresten resultieren, bilden mit 3,67 Gew.-% FM der Gesamtmasse die nächstgrößere Fraktion. Heizwertreiche Materialien, die sich aus Holzresten und Kunststoffen zusammensetzen, befinden sich mit Anteilen von

durchschnittlich 3,16 Gew.-% FM der Gesamtmasse in einer ähnlichen Größenordnung. Metalle, in Form von Nägeln, Federn etc. bilden mit 0,24 Gew.-% FM der Gesamtmasse eine vergleichsweise geringe Menge aus (Abbildung 58 und Abbildung 59).

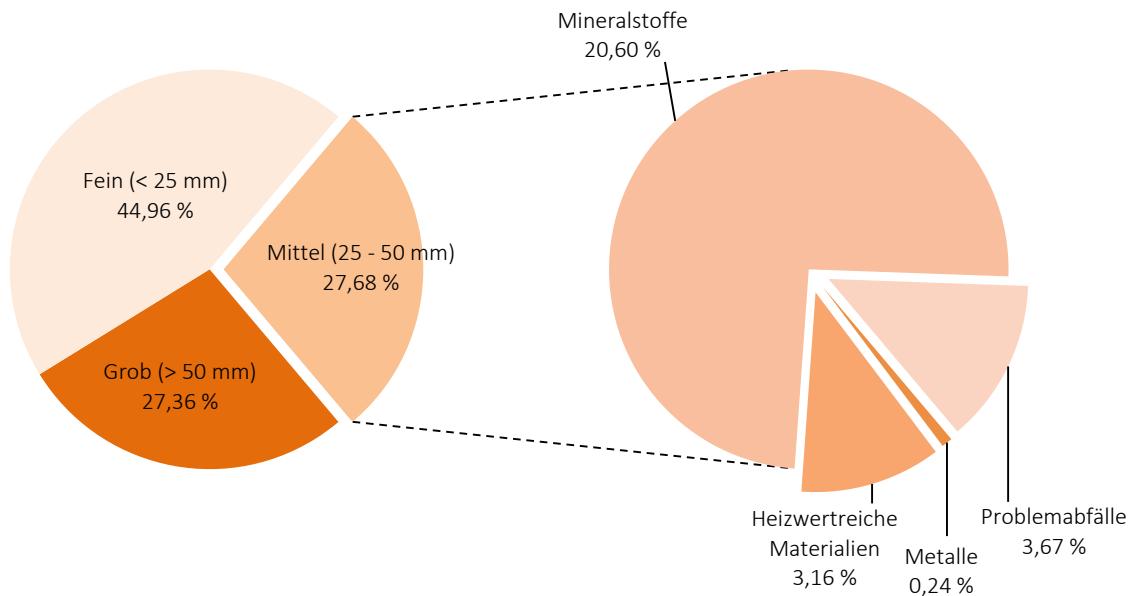


Abbildung 58: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

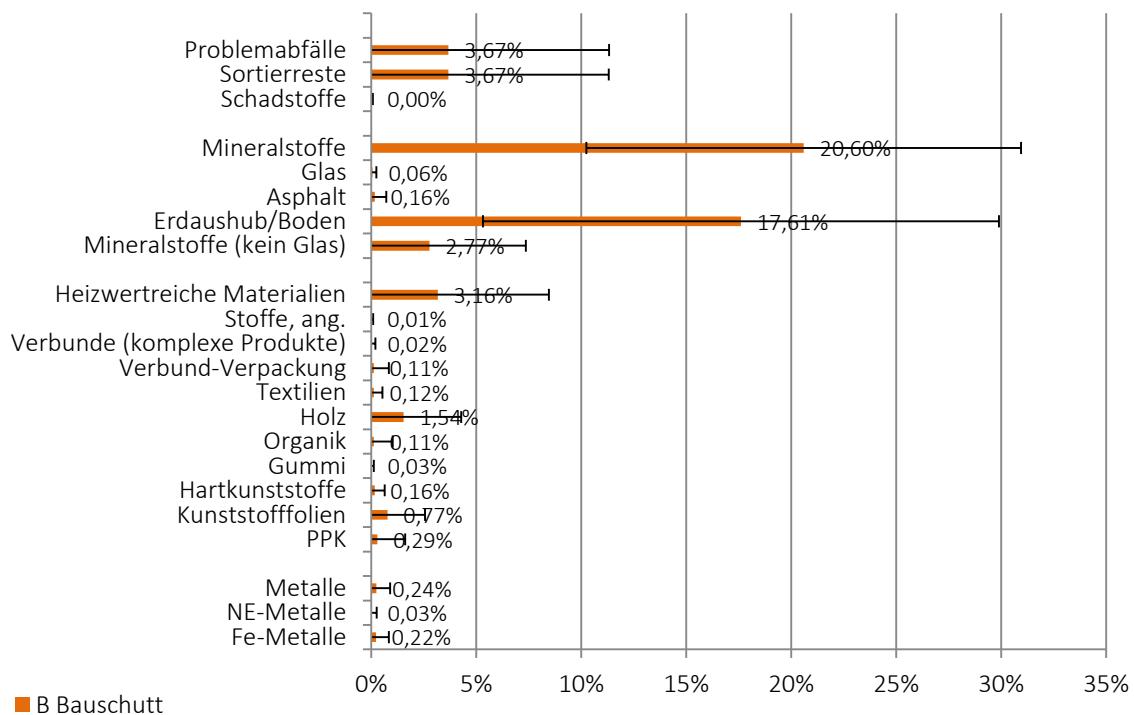


Abbildung 59: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Haus-/Gewerbemüllschichten erweisen sich im Vergleich zu den zuvor genannten Schichten deutlich vielfältiger in ihrer Stoffzusammensetzung. Hauptkomponente der Mittelfraktion sind nicht mehr Mineralstoffe, sondern die heizwertreiche Fraktion. An der Gesamtmasse macht diese ca. 13,43 Gew.-% FM aus (Abbildung 60). Wie Abbildung 61 zu entnehmen ist, ist diese wiederum

stark durch Kunststoffe und Holz geprägt. Daneben treten aber auch PPK und Textilien in den Vordergrund. Bei den Problemabfällen handelt es sich nahezu ausschließlich um Sortierreste. Das Potenzial der Mittelfraktion an Metallen ist mit Anteilen von 0,84 Gew.-% FM der Gesamtmasse vergleichsweise hoch.

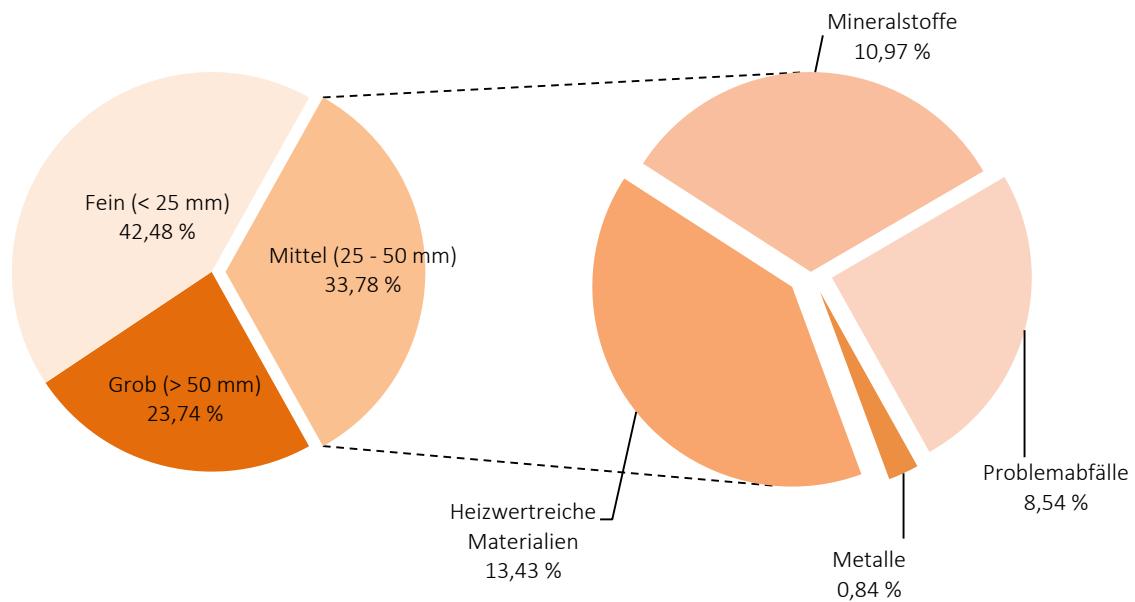


Abbildung 60: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

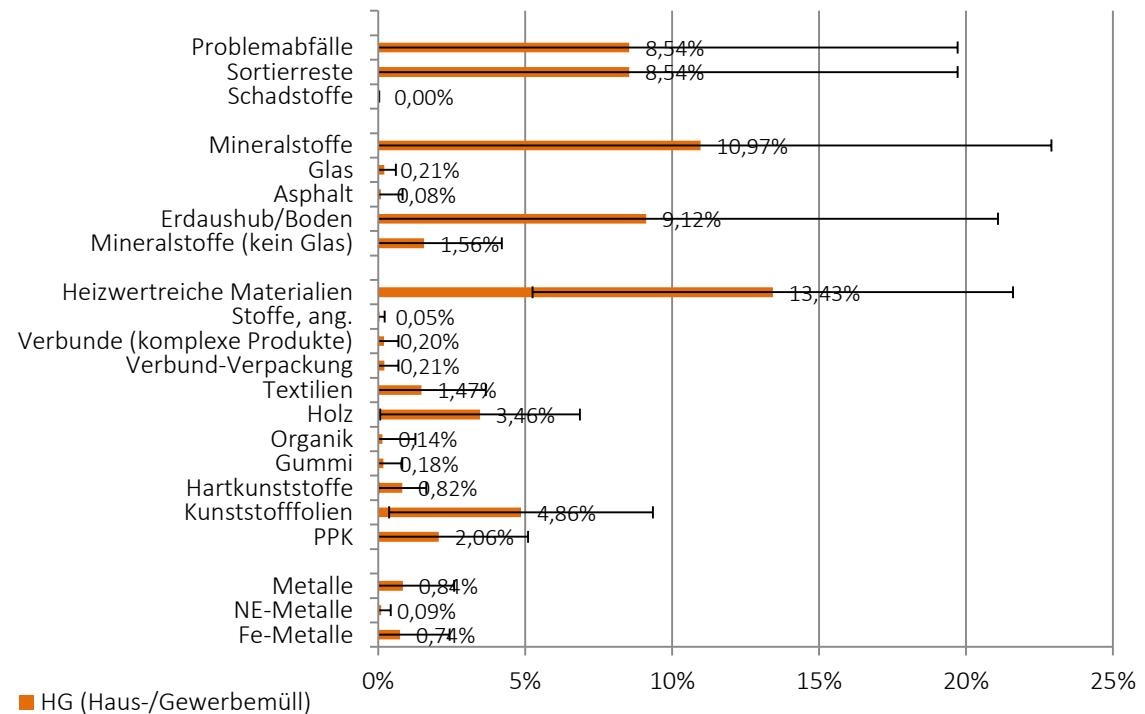


Abbildung 61: Durchschnittliche Zusammensetzung der Mittelfraktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

### 5.3.3 Grobfaktion

Wie bereits für die Fein- und Mittelfaktion aufgezeigt, sind auch im Fall der Grobfaktion mineralische Bestandteile die dominierende Größe. Nach Abbildung 62 machen diese ca. 20,37

Gew.-% FM der Gesamtmasse aus. Dies entspricht einem Anteil an der Grobfraktion von ca. 75 Gew.-% FM. Die nächstgrößere Stoffgruppe ist die heizwertreiche Fraktion, die insgesamt mit 3,93 Gew.-% FM zu veranschlagen ist. Wie bereits im Fall der Mittelfraktion sind auch hier Hölzer und Kunststoffe die prägenden Stofffraktionen. Problemabfälle, die mit 1,99 Gew.-% der FM in der Gesamtmasse vorliegen, sind Zusammenschlüsse unterschiedlicher Stofffraktionen, die im Rahmen der manuellen Sortierung nicht getrennt werden konnten. Schadstoffe und Sonderabfälle wie bspw. Lacke, Batterien, Ölfilter etc. treten hingegen nur in schwindend geringen Mengen auf. Abschließend ist festzuhalten, dass der Metallanteil dieser Fraktion durchschnittlich 0,76 Gew.-% FM an der Gesamtmasse ausmacht. In diesem Kontext liegt das Verhältnis von Fe- zu NE-Metallen bei ca. 12 zu 1.

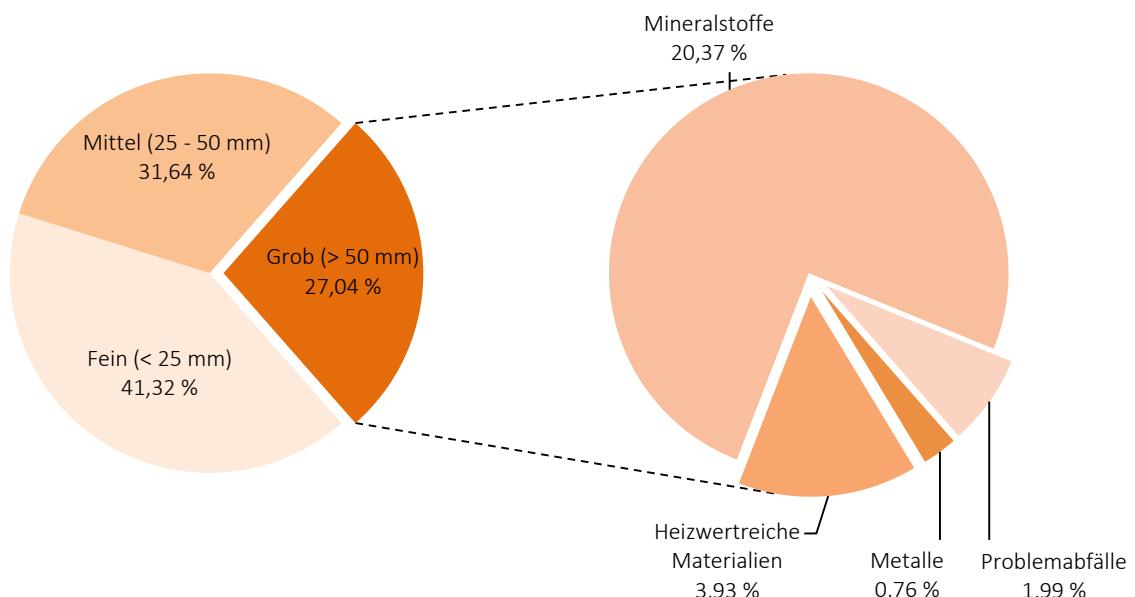


Abbildung 62: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Grobfraktion (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

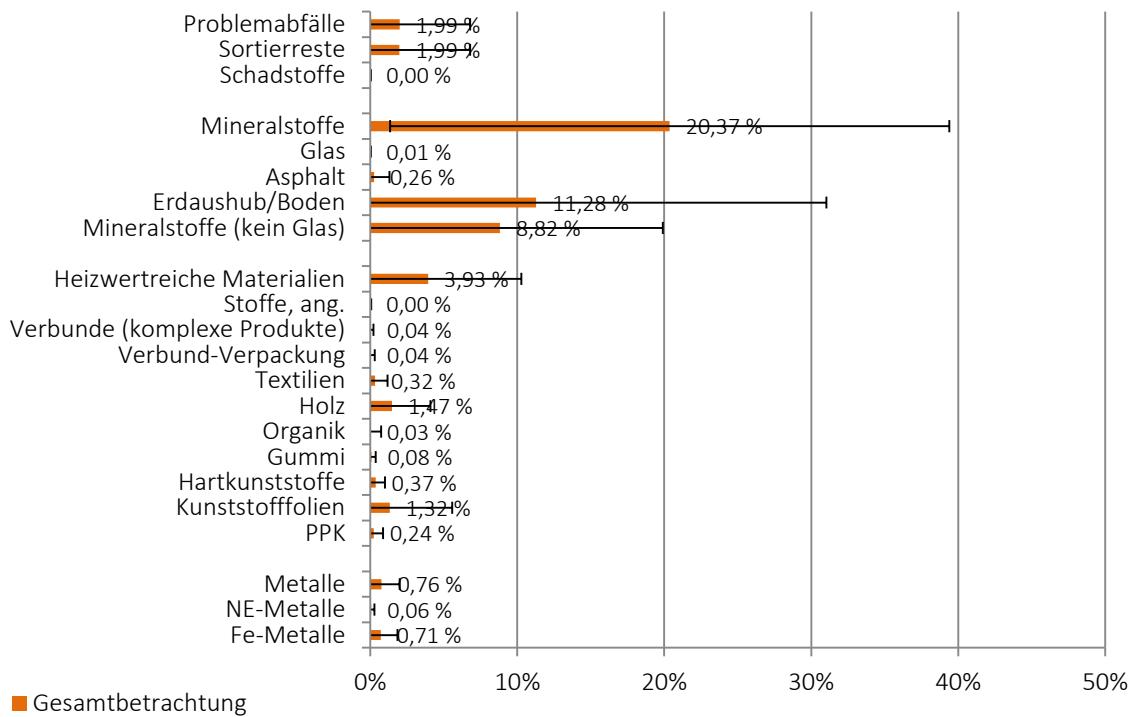


Abbildung 63: Gesamtbetrachtung der durchschnittlichen Zusammensetzung der Grobfraktion unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Die Zusammensetzung der Grobfraktion ähnelt stark den zuvor beschriebenen Fraktionsanteilen der Fein- und Mittelfaktion. Für die Abdeckschicht bedeutet dies, dass diese nahezu aus mineralischen Bestandteilen besteht. Energetisch oder stofflich verwertbare Fraktionen treten lediglich in einer Größenordnung von gemeinsam 0,17 Gew.-% FM der Gesamtmasse auf (Abbildung 64 und Abbildung 65).

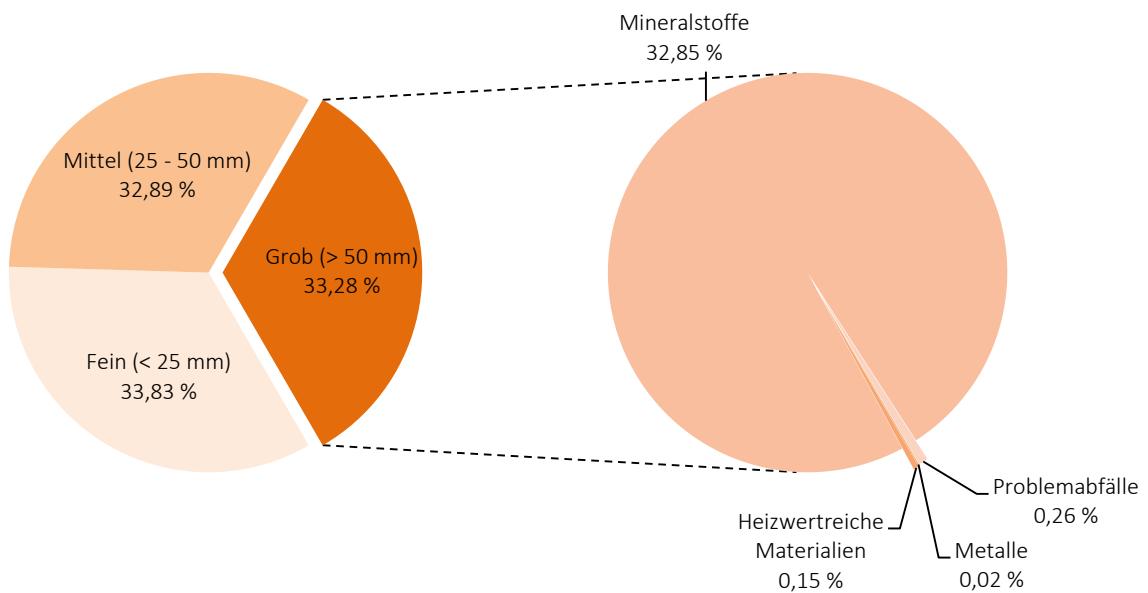


Abbildung 64: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfraktion für die Abdeckschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

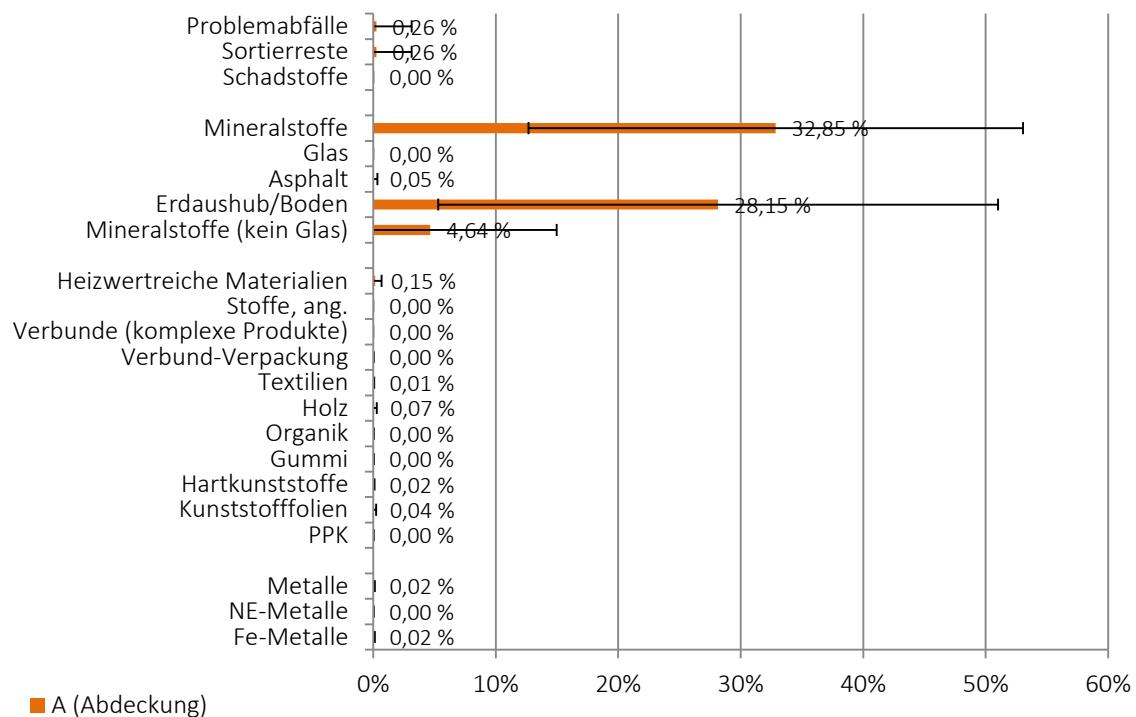


Abbildung 65: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abdeckschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Für Abraumschichten ist festzuhalten, dass Materialen > 50 mm zu 100 % aus Mineralstoffen bestehen. Die übrigen Stoffgruppen sind in diesen Deponiebereichen nicht vorhanden (Abbildung 66 und Abbildung 67).

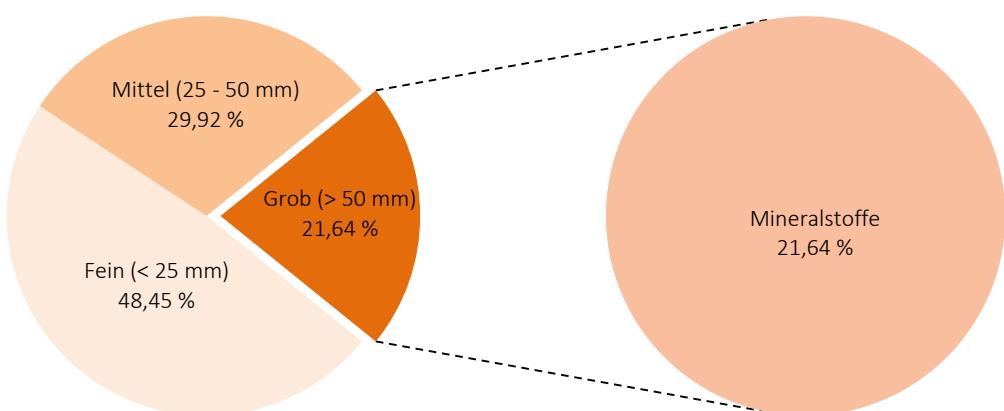


Abbildung 66: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Abraumschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

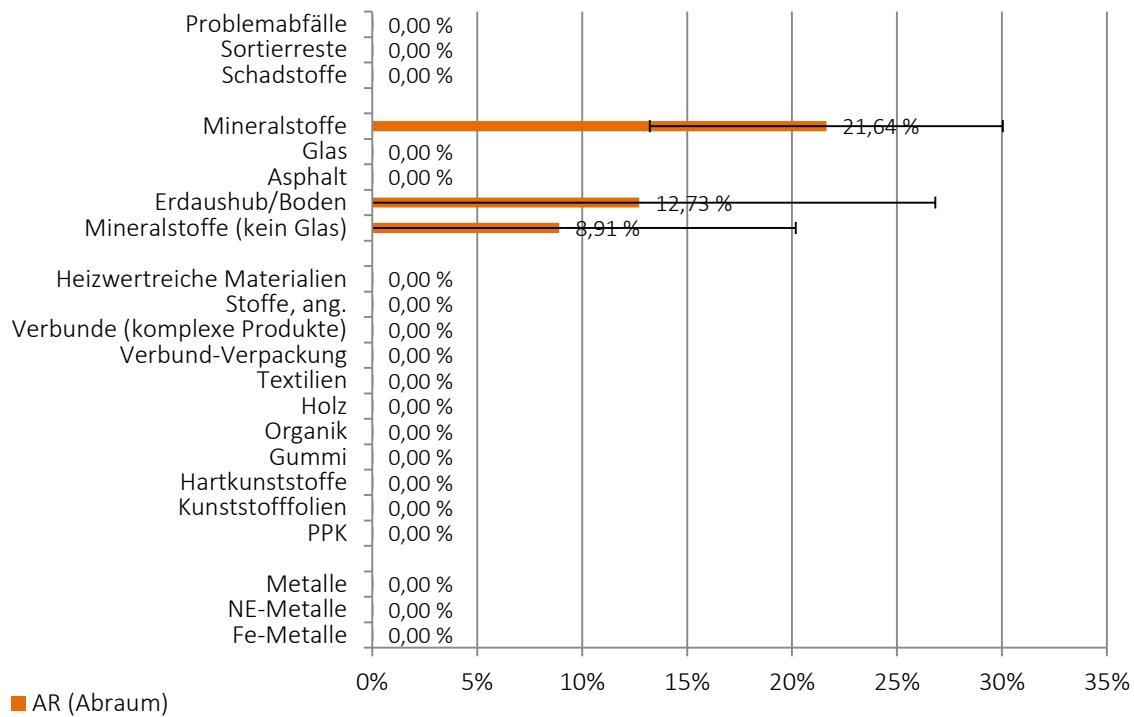


Abbildung 67: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfraktion für die Abraumschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Die Grobfraktion – ausgewiesener Bauschuttschichten – zeichnet sich durch einen 90-prozentigen Anteil an mineralischen Bestandteilen aus. In Bezug auf die Gesamtmasse entspricht dies 24,65 Gew.-% FM (Abbildung 68). Charakteristische Beispiele sind in diesem Fall Ziegel-, Back- und Pflastersteine sowie größere Betonbruchstücke. Auf heizwertreiche Materialien entfallen durchschnittlich 1,74 Gew.-% FM der Gesamtmasse. Wie Abbildung 69 zu entnehmen ist, handelt es sich hierbei weitestgehend um Hölzer. Metalle – meistens in Form von Baustahl und Armierungseisen – sind in der Gesamtmasse in einer Größenordnung von 0,44 Gew.-% FM anzutreffen. Bezogen auf die Grobfraktion entspricht dies einem Anteil von ca. 1,6 Gew.-% FM. Vorhandene Problemabfälle sind wie bereits zuvor weitestgehend durch Stoffkonglomerate geprägt.

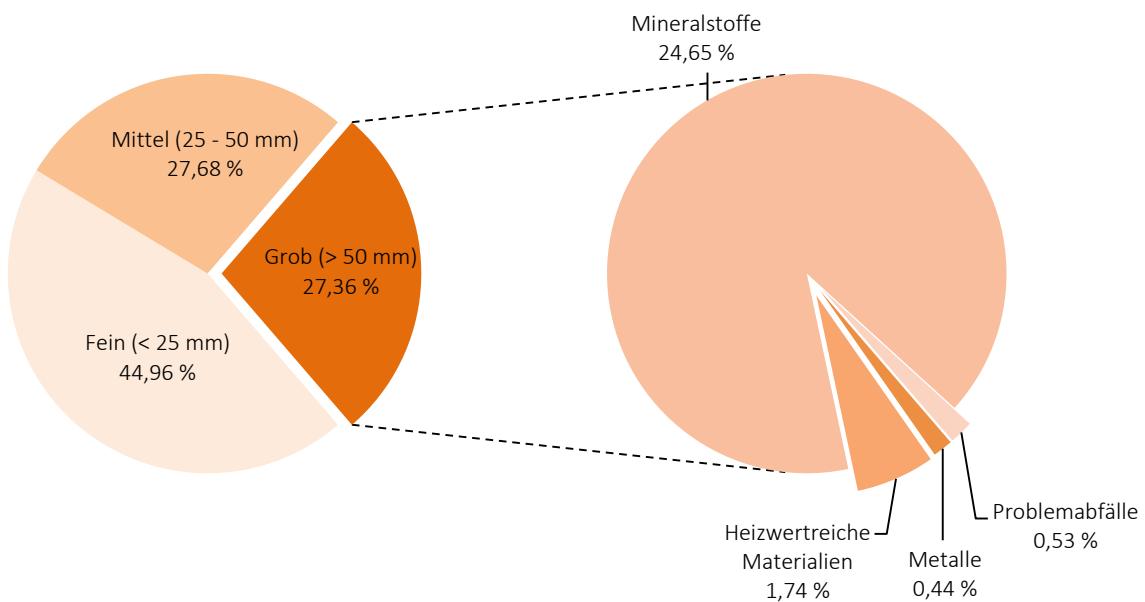


Abbildung 68: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfraktion für die Bauschuttschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

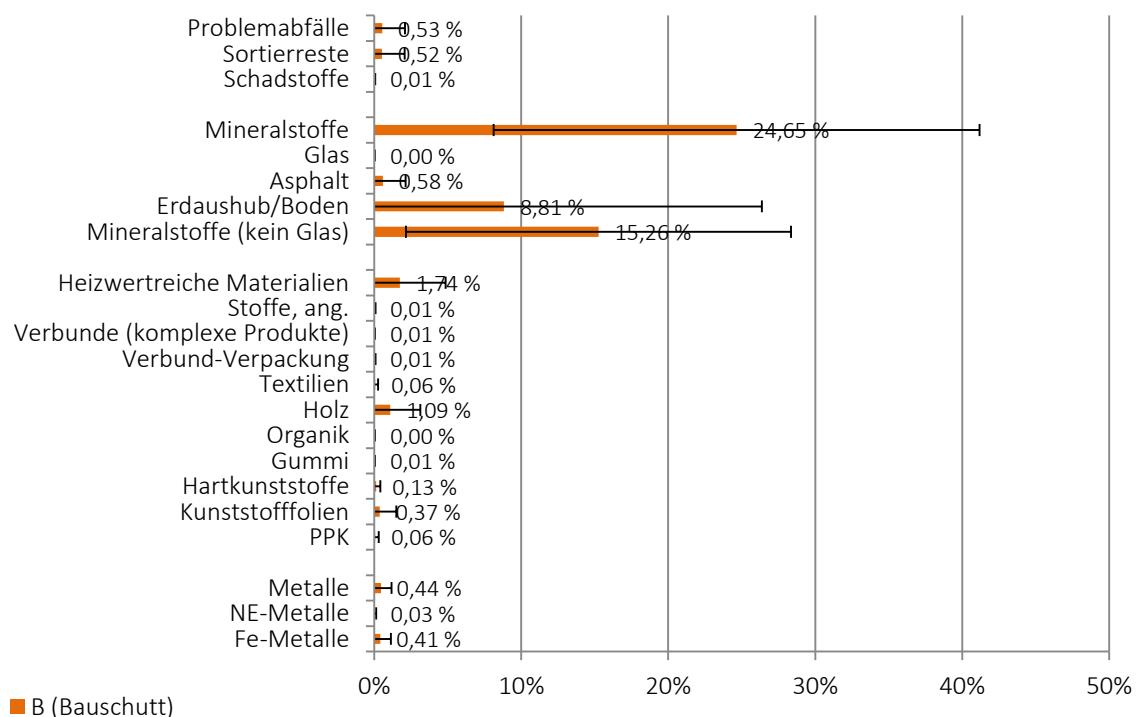


Abbildung 69: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfraktion für die Bauschuttschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

Die Grobfraktion der Haus- und Gewerbemüllschichten besitzt im Mittel 46 Gew.-% FM an mineralischen Bestandteilen. In Bezug auf die Gesamtmasse sind dies 10,83 Gew.-% FM. Die nächstgrößere Gruppe stellen mit einem Potenzial von 7,54 Gew.-% FM der Gesamtmasse heizwertreiche Materialien dar. Dominiert werden diese von Kunststofffolien, Hartkunststoffen, Hölzern und Textilien. Metalle treten in Haus- und Gewerbemüllschichten mit durchschnittlich 1,40 Gew.-% FM auf. Das Verhältnis von Fe- zu NE-Metallen ist auch hier 12 zu 1. Problemabfälle bzw. Sortierreste sind mit Anteilen von 3,97 Gew.-% der Gesamtmasse zu erwarten.

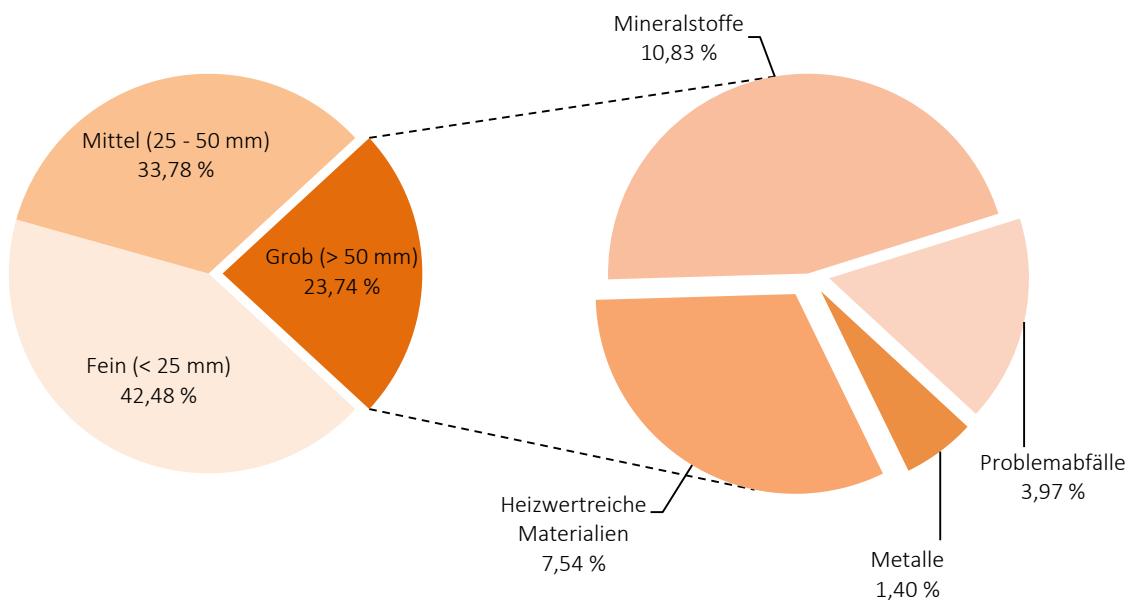


Abbildung 70: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

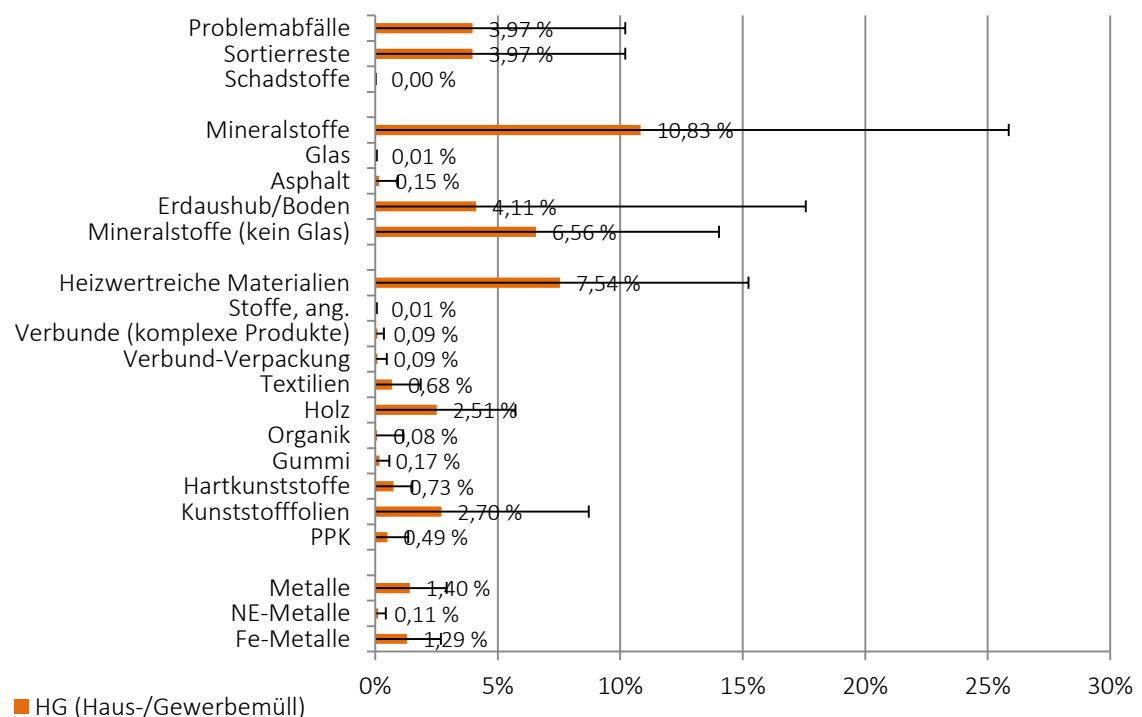


Abbildung 71: Durchschnittliche Zusammensetzung der Grobfaktion für die Haus-/Gewerbemüllschicht unter Berücksichtigung der definierten Stofffraktionen (Angaben in Gew.-% FM in Bezug auf die Gesamtmasse)

### 5.3.4 Gesamtzusammensetzung

Die durchschnittliche Gesamtzusammensetzung der definierten Abfallschichten des Deponiekörpers ergibt sich aus der Summe der oben genannten prozentualen Verteilungen. Wie bereits einzeln für die Fein-, Mittel- und Grobfaktion beschrieben, zeigt Abbildung 72, dass die Abdeck-, Abraum- und Bauschuttschichten zu über 90 Gew.-% FM aus mineralischen Bestandteilen sowie der Fraktion < 4 mm bestehen.

Anders sieht dies für Bauschuttbereiche aus. In diesen Regionen des Deponiekörpers ist ein Potenzial der heizwertreichen Materialien von 5,76 Gew.-% FM zu erwarten. Zudem treten mit 0,72 Gew.-% FM deutlich mehr Metalle als in den zuvor genannten Fraktionen auf. Zusätzlich sind Problemabfälle, also Materialien, die zum einen Schadstoffe und zum anderen prozesshindernde Materialien darstellen, mit mittleren Anteilen von 4,20 Gew.-% zu vermuten.

Aus energetischer und stofflicher Sicht liegt das Hauptpotenzial des Deponieabschnitts I in Bereichen, die als Haus- und Gewerbemüllschichten ausgewiesen sind. In diesen Deponiebereichen ist mit der gesamten Bandbreite der untersuchten Stofffraktionen zu rechnen. Die Fraktion < 4 mm und Mineralstoffe machen dennoch ca. 60 Gew.-% der Frischmasse aus. Metalle mit 2,44 Gew.-% FM und heizwertreiche Materialien mit 25,33 Gew.-% FM zeigen im Vergleich zu den übrigen Abfallschichten ein deutlich erhöhtes Potenzial. Aufgrund der sehr heterogenen Zusammensetzung dieser Schicht bestehen entsprechende Materialzusammenschlüsse<sup>1</sup> (12,51 Gew.-% FM), die im Rahmen der Aufbereitung zu Problemen führen können.

Unabhängig der vorgenommenen Schichteneinteilung der untersuchten Deponiekörperbereiche ist festzuhalten, dass die Hauptfraktion eines möglichen Rückbaus Mineralstoffe incl. der Fraktion < 4 mm darstellen.

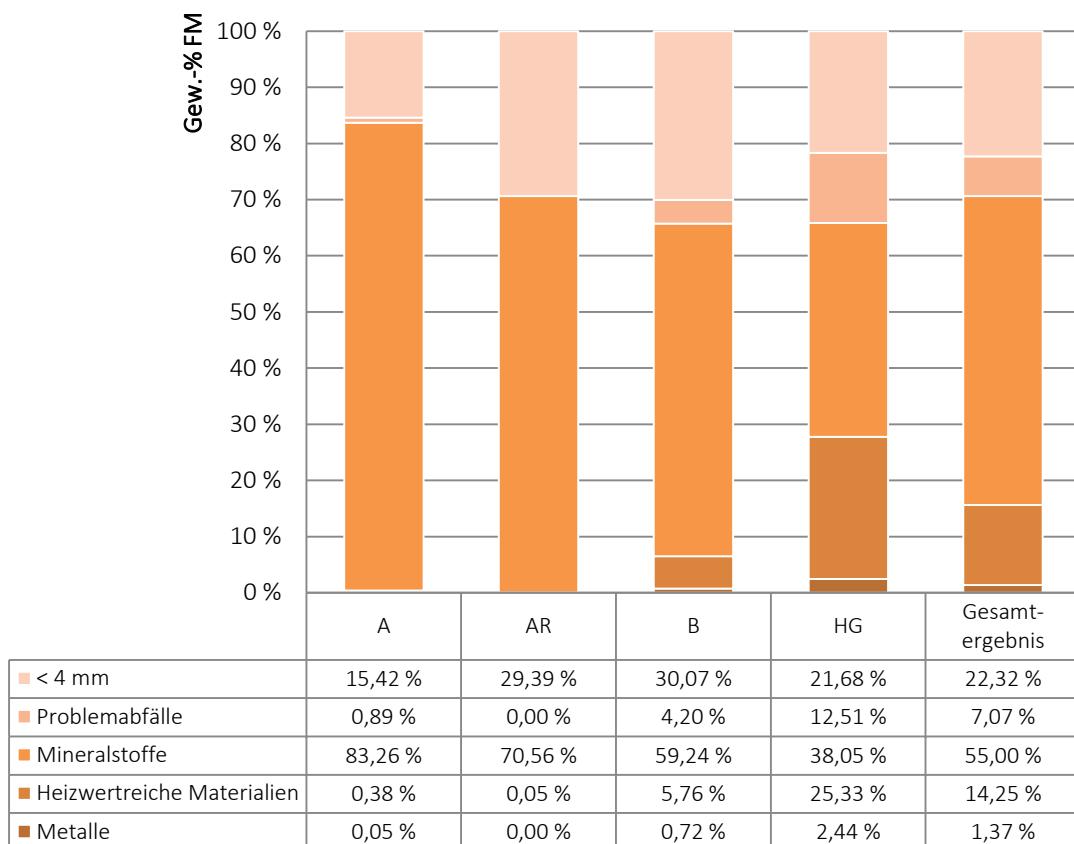


Abbildung 72: Gesamtzusammensetzung nach Abfallschichten unter Berücksichtigung der Stoffgruppen

In Bezug auf die definierten Stofffraktionen gestaltet sich die Zusammensetzung wie in Abbildung 73 dargestellt. Unberücksichtigt bleiben vorerst die Abfallschichten, sodass festgehalten werden

<sup>1</sup> Zusammenschlüsse aus bindigem Bodenmaterial mit Kunststoffen, Holz, etc., dass im Rahmen einer großtechnischen Aufbereitung zu Problemen führen könnte. Eine direkte/stoffliche Trennung erscheint aus aktueller Sicht ohne weitere Vorbehandlung nicht möglich.

kann, dass Erdaushub und Boden ca. 39 Gew.-% FM ausmachen. Gefolgt von Materialien < 4 mm sind Mineralstoffe (Steine, Beton etc.) mit etwa 22 bzw. 15 Gew.-% FM vertreten.

Im Bereich von 5 bis 7 Gew.-% FM sind Sortierreste, Holz und Kunststofffolien angesiedelt. Im Vergleich zu den übrigen Stofffraktionen stellen auch diese ein größeres Potenzial dar. Gewinnbringend vermarktbare Metalle sind mit einem Anteil von durchschnittlich 1,3 Gew.-% FM zu erwarten.

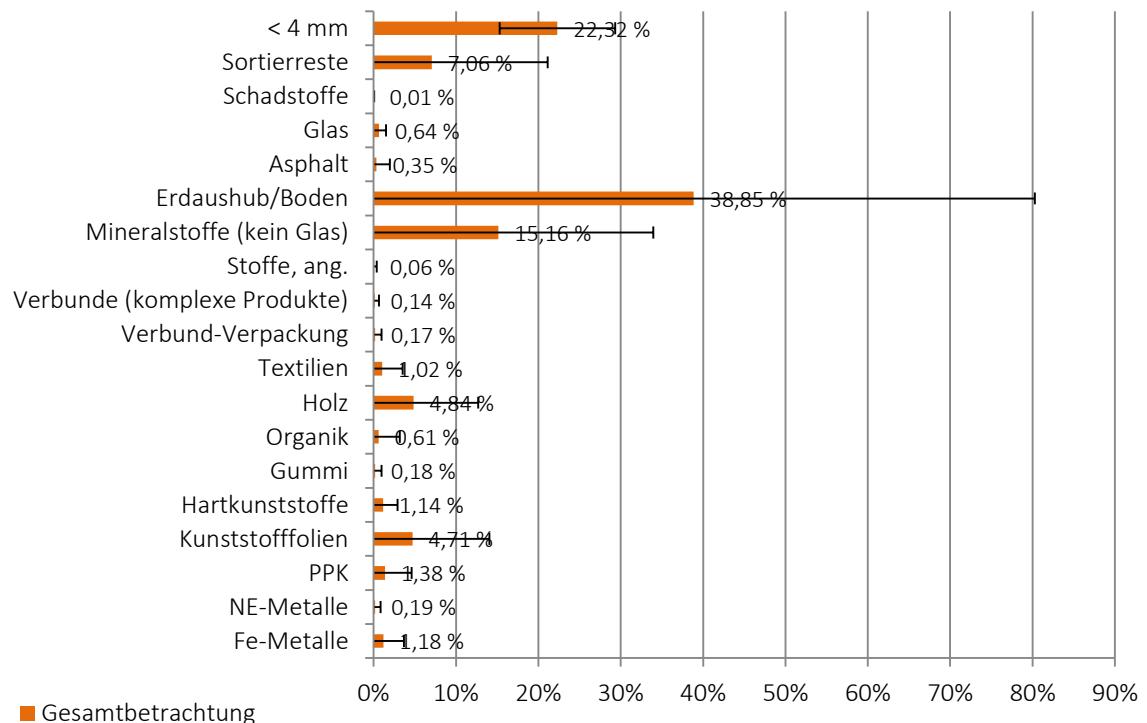


Abbildung 73: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden (Angaben in Gew.-% FM)

Interessant – auch in Hinblick auf die weiteren Verfahrensschritte des Deponierückbaus – ist die Darstellung der Zusammensetzung unterschiedlicher Abfall- bzw. Ablagerungsschichten innerhalb des Deponiekörpers. Diese wird aus den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich.

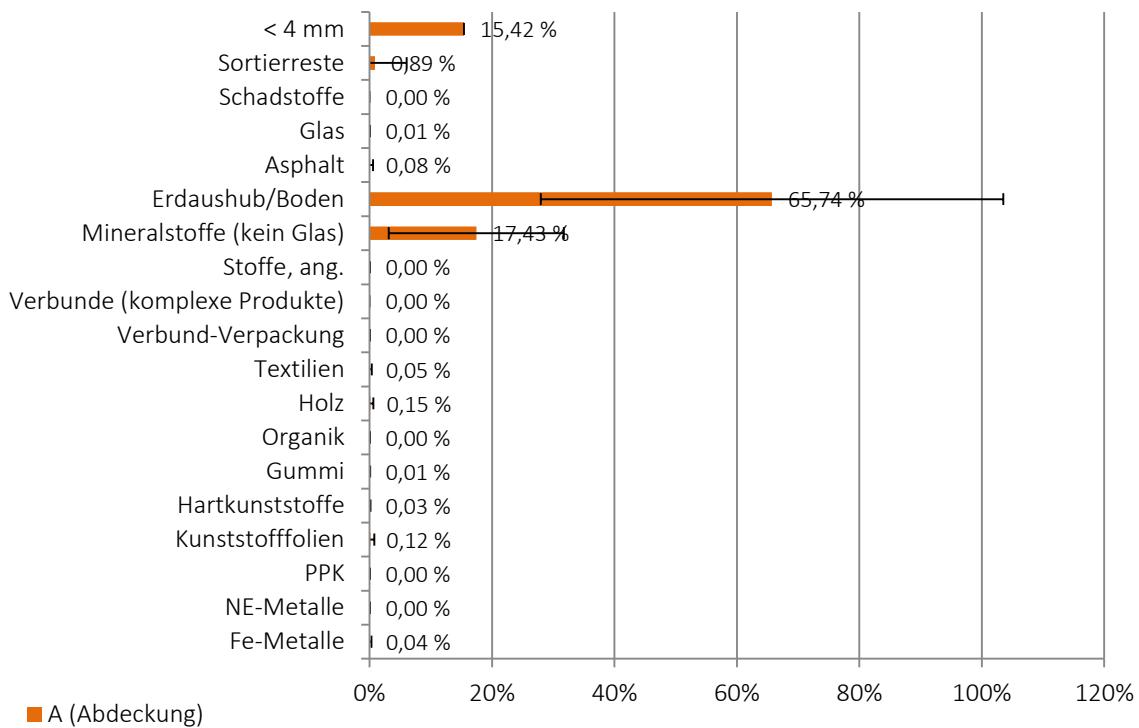


Abbildung 74: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Abdeckung (Angaben in Gew.-% FM)

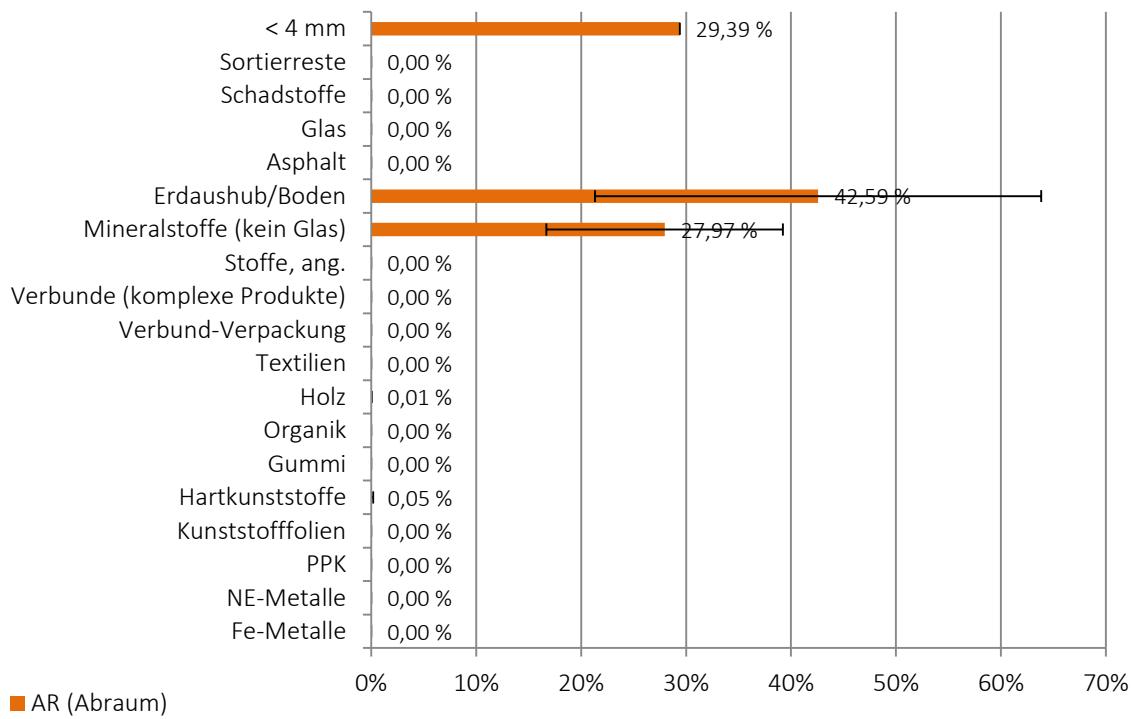


Abbildung 75: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Abrasivum (Angaben in Gew.-% FM)

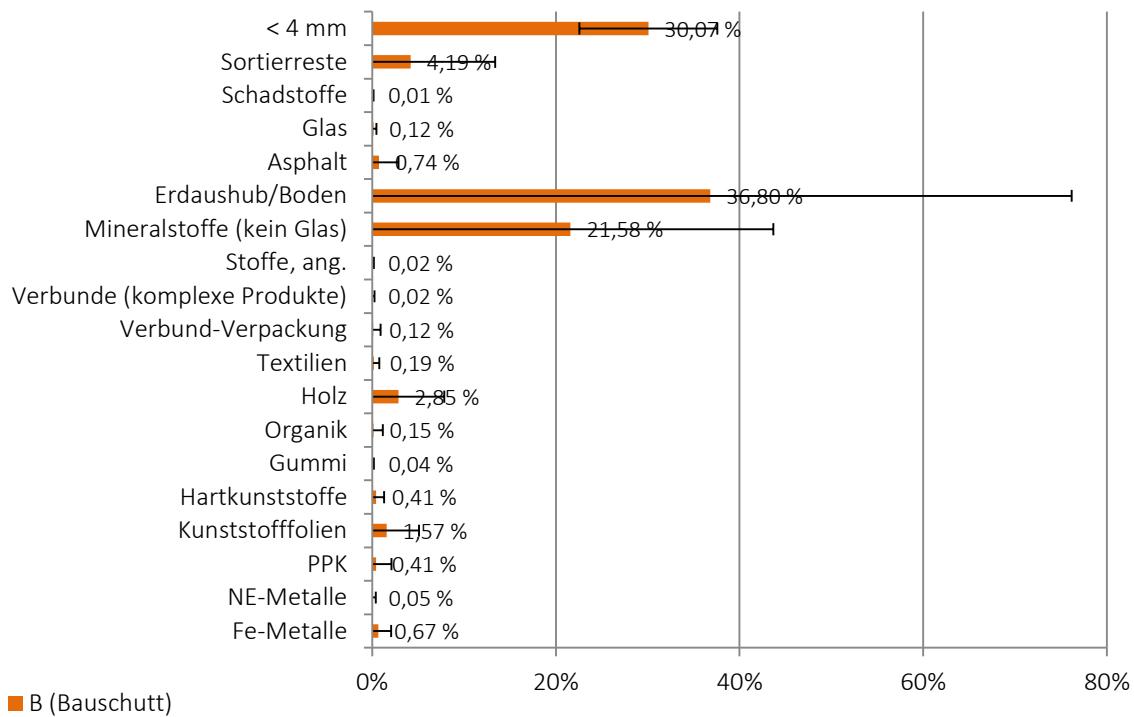


Abbildung 76: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Bauschutt (Angaben in Gew.-% FM)

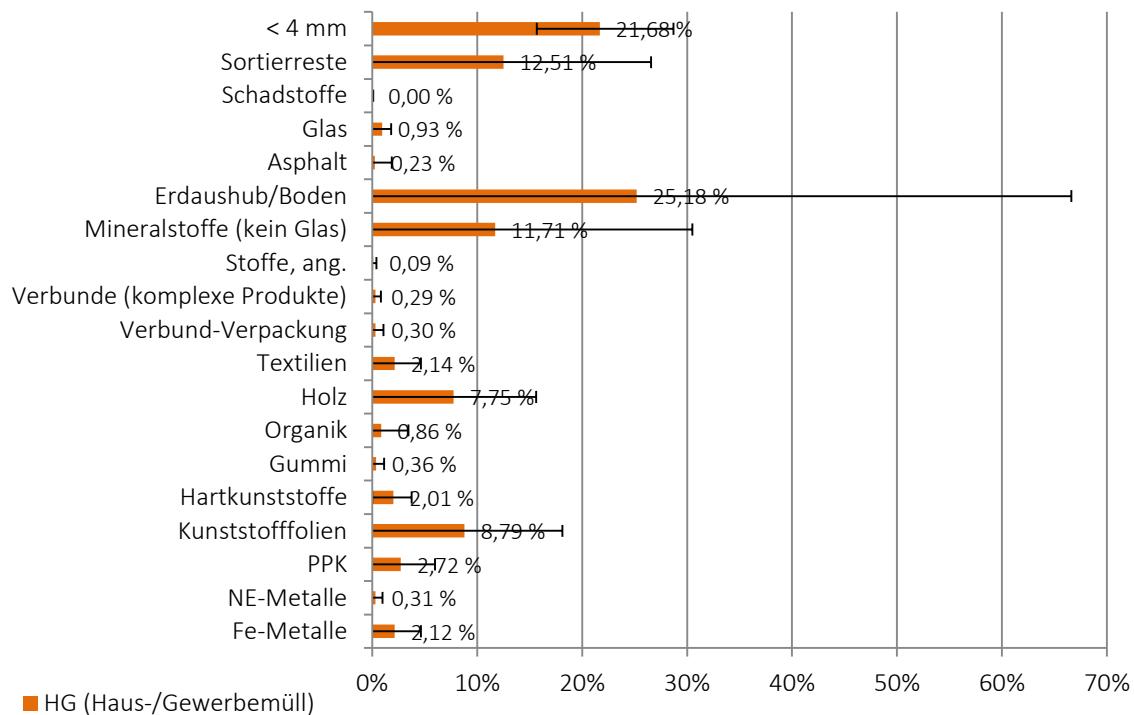


Abbildung 77: Mittlere Deponiegutzusammensetzung des Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch Wiesbaden unter Betrachtung der Schicht Haus-/Gewerbemüll (Angaben in Gew.-% FM)

Insgesamt ergibt sich, dass die Abdeck- und Abraumschicht ausschließlich mineralische Komponenten beinhaltet und entsprechend behandelt werden sollte. In Bauschutt-, Haus- und

Gewebemüllbereiche liegt in der Regel eine Vielzahl unterschiedlicher Stofffraktionen vor, die es zu separieren gilt.

### **5.3.5 Schwankungsbereich der Zusammensetzung**

Sowohl die Grob- als auch die Mittel- und Feinfraktion zeigen deutliche Schwankungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung auf (vergl. Fehlerindikatoren). Auch in Bezug auf die definierten Abfallschichten existieren innerhalb einer Schicht große Abweichungen bezüglich der Zusammensetzung. Je nach Betrachtungsebene treten Abweichungen vom Einfachen bis zum Dreifachen des Mittelwerts auf. Dies bedeutet, dass sehr heterogene Bedingungen vorherrschen, die sowohl horizontal als auch vertikal zu erwarten sind.

### **5.3.6 Wassergehalt**

Der lokal- und stoffgruppenspezifische Wassergehalt trägt entscheidend zur Separationsfähigkeit sowie zur anschließenden Verwertbarkeit der Materialien bei. Nachfolgend werden in diesem Zusammenhang die analysierten Wassergehalte aufgezeigt und deren mögliche Wirkung auf die Rückbaufähigkeit sowie Stofftrennung diskutiert.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden parallel Messungen des stoffspezifischen Wassergehalts der definierten Stoffgruppen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden aus Abbildung 78 ersichtlich. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die vorgefundenen Verhältnisse von vielen Faktoren beeinflusst werden und die Ergebnisse eine entsprechende Momentaufnahme darstellen.

Insgesamt zeigt sich anhand von Abbildung 78, dass wie bereits in der Deponiegutzusammensetzung, deutliche Unterschiede bzgl. des Wassergehalts existieren. Zudem wird ersichtlich, dass innerhalb der einzelnen Stofffraktionen zum Teil große Abweichungen auftreten können.

Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass wasserabweisende Materialien wie bspw. Metalle oder Kunststoffe mit ca. 14 bzw. 26 Gew.-% der FM einen vergleichsweise hohen Wassergehalt aufzeigen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Materialien mit wasserhaltigen Verunreinigungen beaufschlagt sind. So besitzen bspw. Kunststofffolien ein geringes Eigengewicht bei gleichzeitig großer Oberfläche, an der entsprechend große Mengen Wasser haften können.

Dennoch ist festzuhalten, dass diese Stoffe aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften einen deutlich geringeren Wasseranteil besitzen als saugfähige Materialien wie bspw. PPK. Für Textilien, Stoffe ang. (anderweitig nicht aufgeführt), Holz, Organik und PPK liegt der Wassergehalt in einem Bereich von 40 - 50 Gew.-% der FM. Sortierreste weisen mit einem Wassergehalt von ca. 36 Gew.-% der FM ebenfalls einen vergleichsweise hohen Wert auf. Für Mineralstoffe kann ein mittlerer Wassergehalt von 11 Gew.-% der FM angenommen werden.

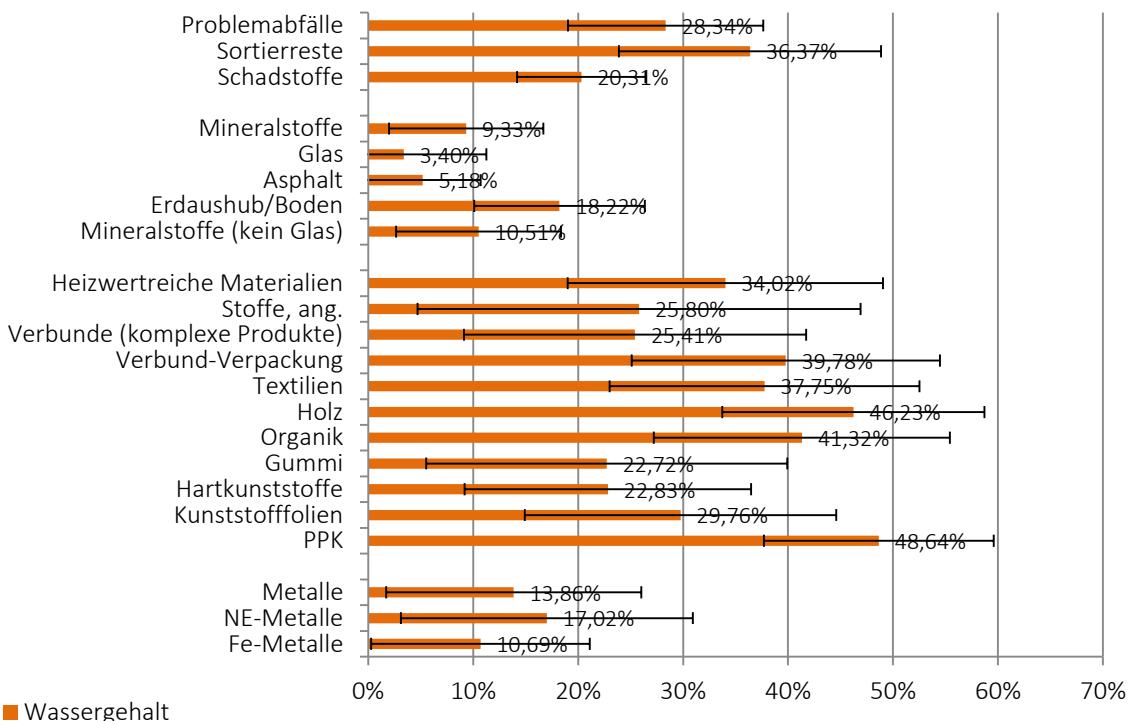


Abbildung 78: Mittlerer Wassergehalt der Stofffraktionen und Schwankungsbereich (Angaben in Gew.-% in Bezug zur Frischmasse)

Im Rahmen der in-situ Klassier- und Sortierarbeiten hat sich gezeigt, dass mit zunehmendem Wassergehalt Probleme bei der Aufbereitung des Deponieguts auftreten. Diese resultieren im Wesentlichen aus folgenden Gegebenheiten:

- Nasse Materialien wie bindiger Boden neigen bei feuchten Verhältnissen verstärkt zur Ausbildung von „Klumpen“, die unterschiedliche Stoffgruppen enthalten und nur schwer trennbar sind. Zudem ergibt sich aus dieser Aggregation eine Verfälschung des eigentlichen Korngrößenspektrums.
- Schlammige bis flüssige Chargen konnten aufgrund ihrer mangelnden Schüttfähigkeit nur unzureichend klassiert und sortiert werden. Zudem ist in diesem Kontext sowie in Hinblick auf einen großmaßstäbigen Rückbau die ordnungsgemäße Beseitigung der auftretenden Abwässer zu gewährleisten.
- Der durch den Wassergehalt bestimmte Abbau und Transport organischer Substanzen führt zu einer Verschmutzung der übrigen Deponiegutbestandteile. Diese Anhaftungen sowie Verfärbungen wirken sich negativ auf die manuelle und maschinelle Sortierbarkeit aus. Zudem wird die Qualität der Stoffe und somit deren potenzielle Verwertbarkeit herabgestuft.

Die teilweise hohen Wassergehalte erschweren nicht nur den Klassier- und Sortierprozess, auch eine energetische Verwertung, die für ausgewählte Stofffraktionen in Betracht kommt, ist ohne wassergehalsreduzierende Maßnahmen erschwert.

## 5.4 Frischmassepotenzial

Aus der abgeleiteten Ablagerungsmasse der einzelnen Abfallschichten und der spezifischen Zusammensetzung dieser, ergibt sich das aktuelle Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.

Dieses beschreibt den „Realzustand“ des Deponiekörpers zum Zeitpunkt der Untersuchungen. Hierdurch bedingt ergeben sich zeitspezifische Gegebenheiten, die sich unter anderem in Form des Wassergehalts, des weiteren Abbaus der organischen Substanz, etc. äußern können. Aufgrund des Alters des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch sind diese Variationen als vergleichsweise gering einzustufen.

#### **5.4.1 Schicht A | Abdeckung**

Die Abdeckung wird durch Mineralstoffe geprägt. Daneben tritt die Fraktion < 4 mm, die ebenfalls als Mineralik einzustufen ist, in den Vordergrund. In Bezug auf die Gesamtmasse von ca. 2,6 Mio Mg FM bedeutet dies, dass bei einem Rückbau etwa 2,5 Mio. Mg FM diese Abfallschicht als mineralische Abfälle einzustufen wären. Metalle, heizwertreiche Materialien und Problemabfälle fallen in diesem Zusammenhang in vergleichsweise geringen Mengen an (siehe Abbildung 79). Dennoch gilt es diese, bei einem Rückbau zu separieren, was durch einen technisch einfachen Aufwand realisierbar ist.

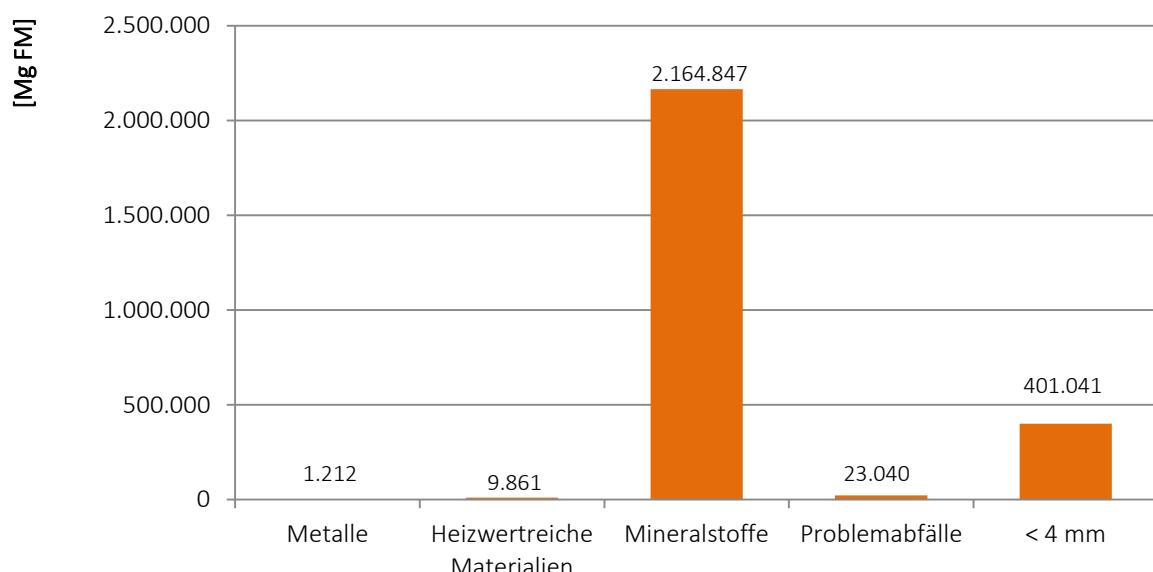


Abbildung 79: Frischmassepotenzial der Abdeckung (Angaben in Mg FM)

#### **5.4.2 Schicht AR | Abraum**

Wie bereits mehrfach genannt, gestalten sich die Abraumschichten des Deponiekörpers I der Deponie Dyckerhoffbruch aus den Abraumsanden des ehemaligen Steinbruchs. Dies wird auch aus dem dort vermuteten Potenzial ersichtlich, dass nahezu mineralischen Ursprungs ist. Wie Abbildung 80 zeigt, sind von abgelagerten 11,8 Mio. Mg FM nahezu 100 % mineralischen Ursprungs. Die Vermischung mit heizwertreichen Materialien ist in diesem Kontext zu vernachlässigen und ggf. der Untersuchungsmethodik geschuldet.

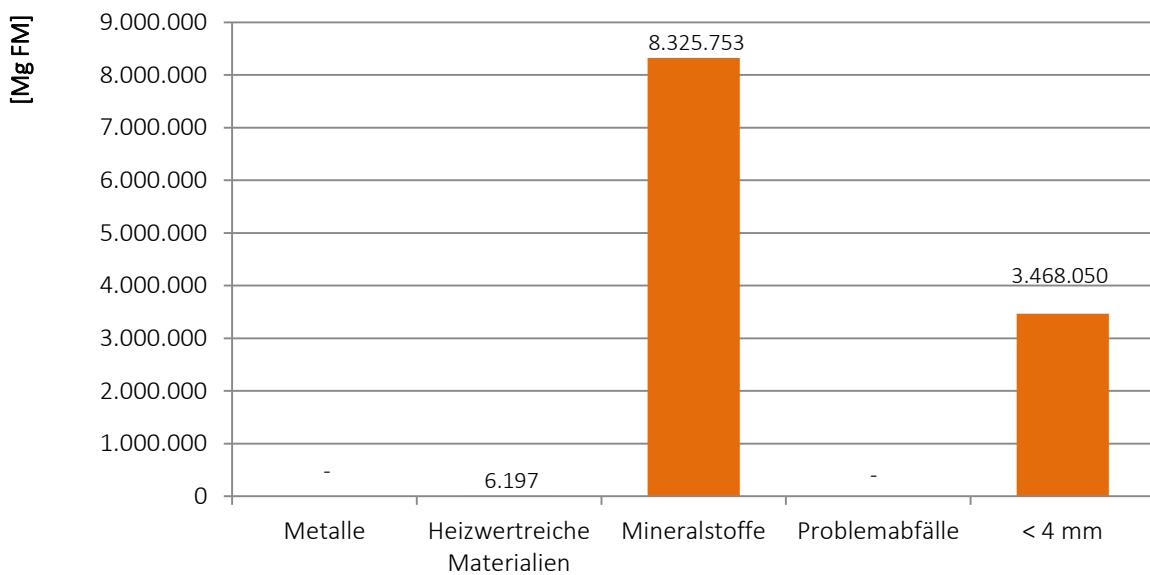


Abbildung 80: Frischmassepotenzial der Abraumschicht (Angaben in Mg FM)

### 5.4.3 Schicht B | Bauschutt

Wie aus anderen Untersuchungen ersichtlich, besitzen Bauschutt und Baustellenabfälle ein nennenswertes Potenzial an derzeit nachgefragten Ressourcen. Im Fall des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch konnte dies jedoch nicht bestätigt werden. Abbildung 81 belegt, dass auch diese weitestgehend durch Mineralstoffe geprägt wird. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die hier vorgefundenen Problemstoffe ebenfalls bzw. weitestgehend mineralischen Ursprungs sind.

Wie im Rahmen der Untersuchungen feststellbar, treten Metalle und heizwertreiche Materialien in Bauschuttschichten des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in konzentrierter Form auf. Dies bedeutet, dass in solchen Abschnitten bspw. größere Metallträger, Folienlagen etc. vorgefunden wurden und sicherlich auch werden, die im Rahmen eines Rückbaus separiert werden sollten.

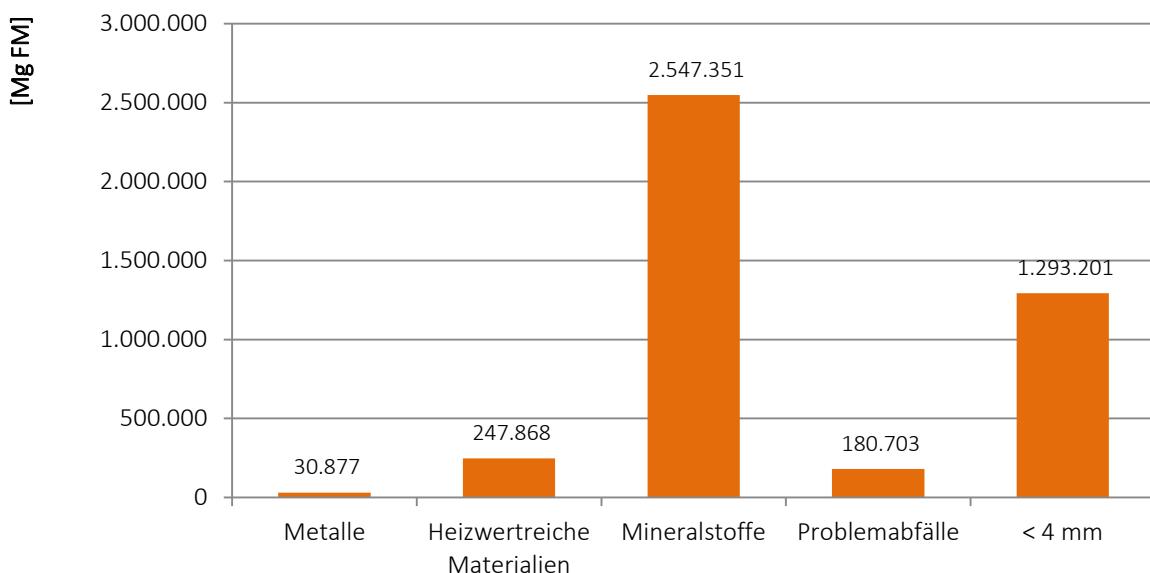


Abbildung 81: Frischmassepotenzial der Bauschuttschicht (Angaben in Mg FM)

#### 5.4.4 Schicht HG | Haus- und Gewerbemüll

In Hinblick auf die stoffliche und energetische Gewinnung sekundärer Rohstoffe, lassen Haus- und Gewerbeabfallbereiche das höchste Potenzial vermuten. Dies ist dadurch bedingt, dass Abfall- bzw. Ressourcentrennung zum Zeitpunkt der damaligen Ablagerungsphase der Deponie Dyckerhoffbruch einen anderen Zeitgeist verfolgte.

Entsprechend wird aus Abbildung 82 ersichtlich, dass trotz des hohen mineralischen Rohstoffpotenzials heizwertreiche Materialien und Metalle einen deutlich höheren Anteil an der Gesamtmasse ausmachen.

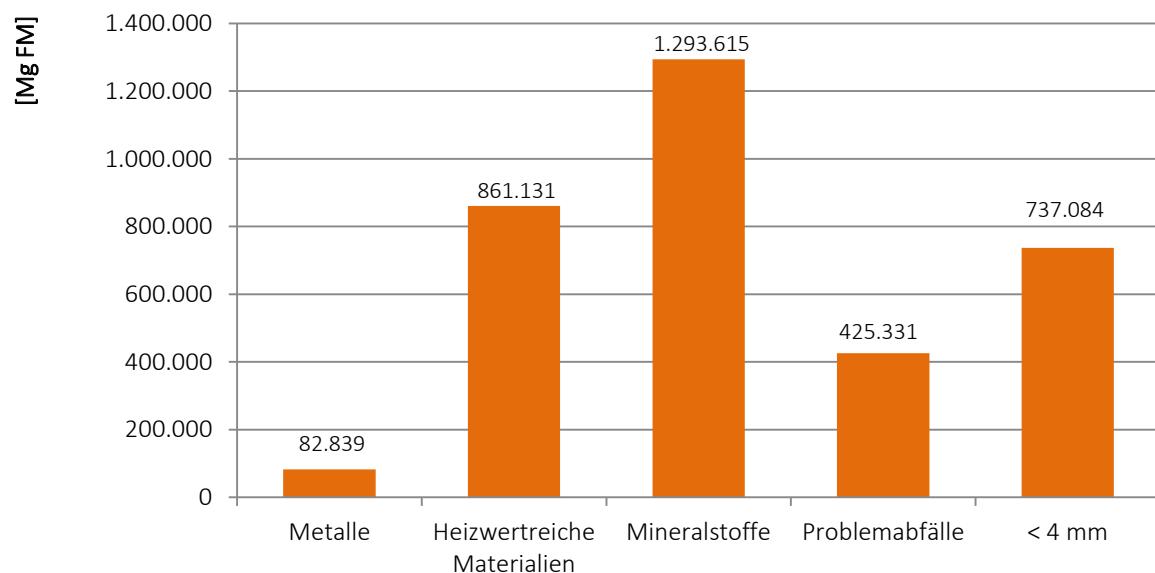


Abbildung 82: Frischmassepotenzial der Haus- und Gewerbemüllschichten (Angaben in Mg FM)

#### 5.4.5 Gesamtpotenzial

Insgesamt ist der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch durch mineralische Bestandteile geprägt. Von insgesamt 22,1 Mio. Mg machen diese etwa 20,8 Mio. Mg aus. Daneben treten heizwertreiche Materialien, wie bspw. Kunststofffolien, und Problemabfälle in nennenswerten Mengen auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei Problemabfällen im Wesentlichen um Materialzusammenschlüsse handelt, die im Rahmen der Aufbereitung kritisch zu beurteilen sind. Im Vergleich zu anderen Untersuchungen ist der Metallgehalt des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch mit ca. 115.000 Mg FM als äußerst gering einzustufen.

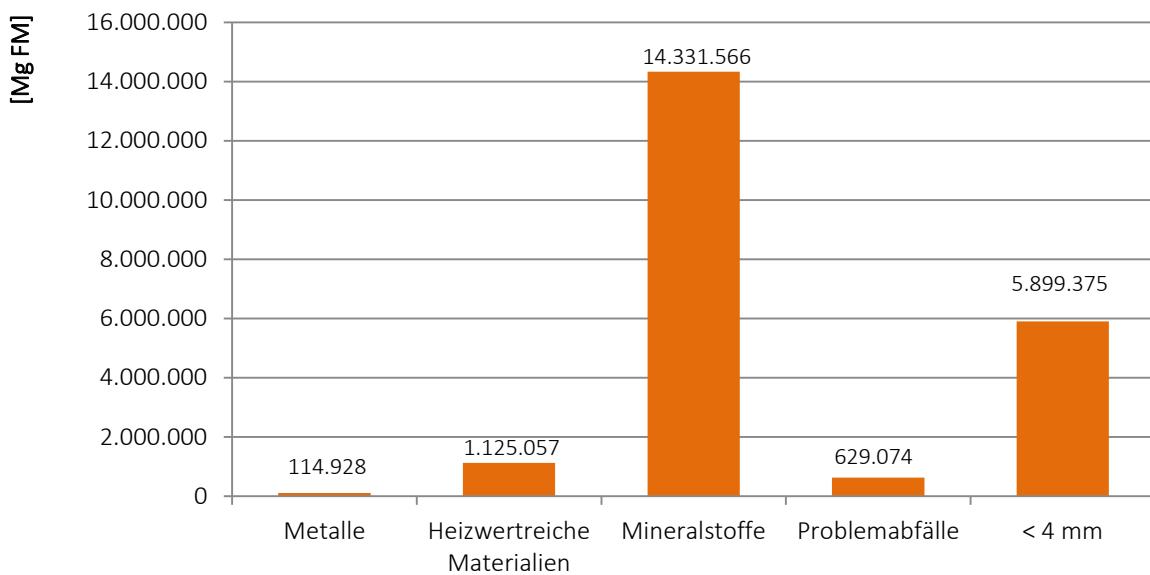


Abbildung 83: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (Angaben in Mg FM)

Abschließend vermittelt Abbildung 84 in welcher Weise sich die aggregierten Stoffgruppen zusammensetzen. Es wird deutlich, dass es sich bei den Mineralstoffen vorwiegend um Bodenmaterialien handelt und Asphalt sowie Glas in vergleichsweise geringen Mengen vorzufinden ist.

Die heizwertreiche Fraktion wird durch die Komponenten Kunststofffolien und Holz geprägt. Verbundverpackungen und komplexe Produkte sind von untergeordneter Bedeutung.

Im Bereich der Metalle dominieren die Fe-Metalle, die ein ca. 10-mal höheres Potenzial als die NE-Metalle vermuten lassen.

Die so genannten Problemabfälle bestehen nahezu ausschließlich aus Sortierresten (Stoffgemischen). Tatsächliche Schadstoffe, wie bspw. Batterien oder Farreste sind lediglich in marginalen Mengen im Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch vorzufinden.

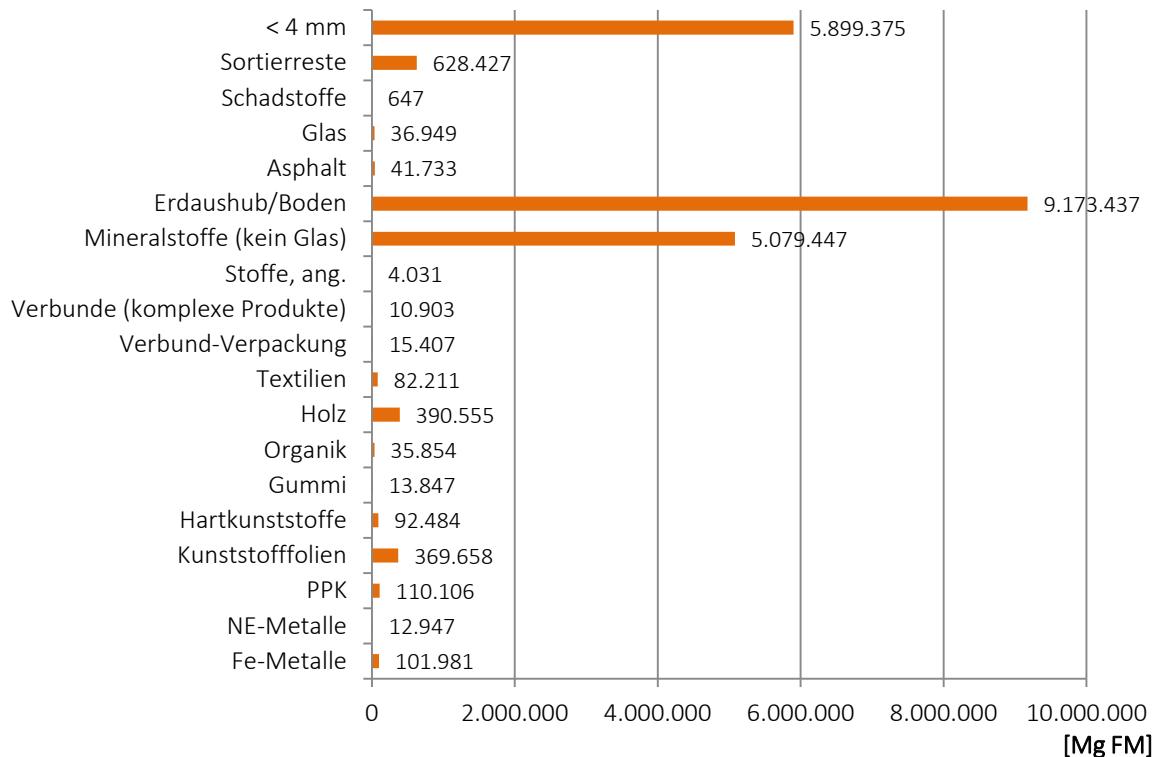


Abbildung 84: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM)

## 5.5 Trockenmassepotenzial

Unter Berücksichtigung der genannten stoffspezifischen Wassergehalte errechnet sich das Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Dieses ist mit einer Gesamttablagerungsmasse von ca. 19,6 Mio. Mg TM einzuordnen und somit deutlich über dem bundesdeutschen Durchschnitt angesiedelt.

### 5.5.1 Schicht A | Abdeckung

Wie zu erwarten, ist auch in Hinblick auf die Trockenmasse, die mineralische Fraktion die Hauptkomponente der Abdeckung. Dies bedeutet, dass es sich bei dieser Fraktion um Bodenmaterialien handelt, die in Abhängigkeit ihrer Belastungen als Recyclingmaterial einsetzbar wären. Unter der Voraussetzung einer klaren Abtrennung, könnten demnach ca. 2,2 Mio. Mg TM als Ersatzbaustoff gewonnen werden. Der hierfür benötigte technische Aufwand - ist aufgrund des geringen „Störstoffanteils“ - vergleichsweise niedrig.

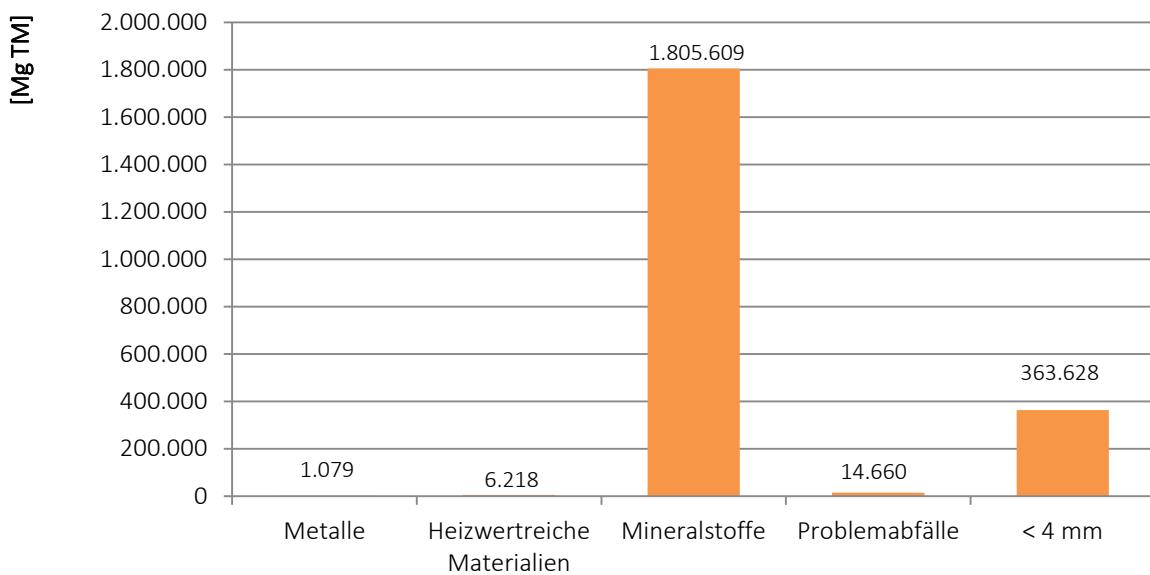


Abbildung 85: Trockenmassepotenzial der Abdeckung (Angaben in Mg TM)

### 5.5.2 Schicht AR | Abraum

Wie bereits für die Abdeckung kann auch für die Abraumbereiche des Deponiekörpers festgehalten werden, dass diese nahezu ausschließlich durch mineralische Komponenten geprägt sind. Eine erneute Verwertung im Sinne der Ersatzbaustoffverordnung erscheint auch hier sinnvoll. Insgesamt handelt es sich bei den potenziell gewinnbaren Recyclingmaterialien um ca. 10,2 Mio. Mg TM.

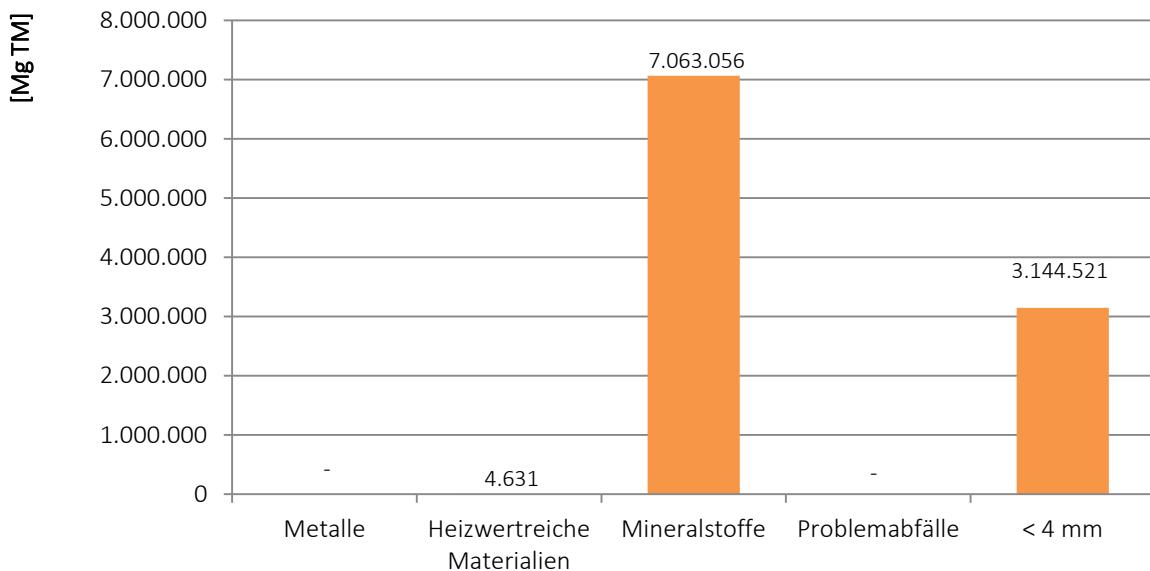


Abbildung 86: Trockenmassepotenzial der Abraumschichten (Angaben in Mg TM)

### 5.5.3 Schicht B | Bauschutt

Aufgrund der unterschiedlichen Wassergehalte der genannten Stofffraktionen zeigt sich in Hinblick auf Bauschuttbereiche, das Mineralische Bestandteile zusätzlich an Bedeutung gewinnen. Ihr Anteil ist mit ca. 3,3 Mio. Mg TM mit über 90 Gew.-% TM anzusetzen.

Anders als zuvor, stellt sich für diese Materialien die Frage, ob eine Aufbereitung zu Recyclingmaterial in Frage kommt. Es stellt sich die Frage, ob eine Aufbereitung, also das Abtrennen der heizwertreichen Fraktion, Metalle und Problemabfälle nutzeneffizient erfolgen kann. Zusätzlich ist zu prüfen, in welcher Form Belastungen des Materials vorliegen, die eine Verwertung ausschließen bzw. erschweren.

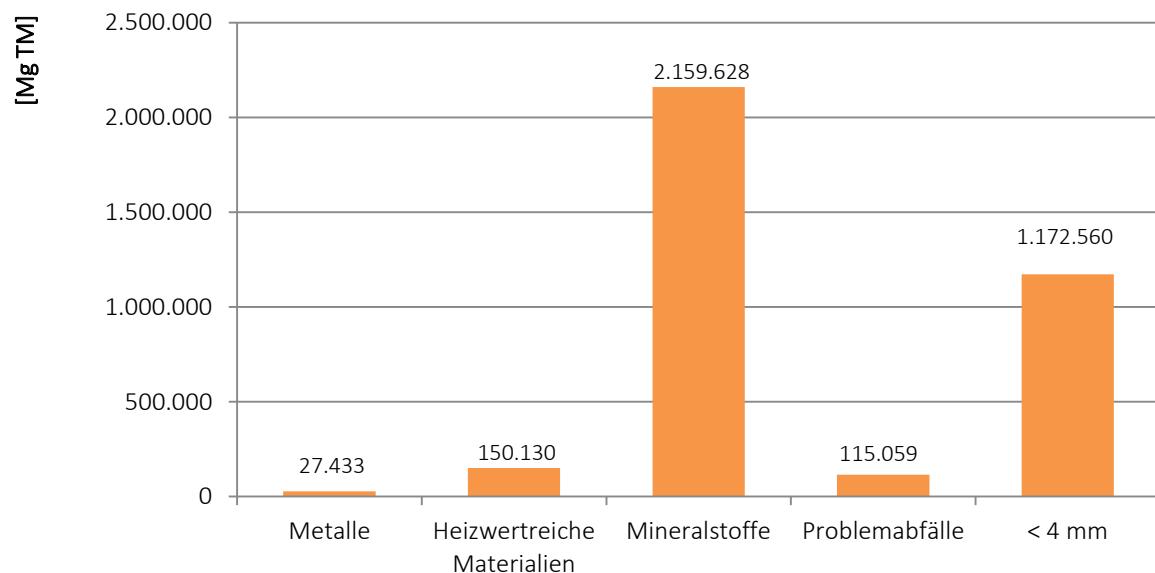


Abbildung 87: Trockenmassepotenzial der Bauschuttschichten (Angaben in Mg TM)

#### 5.5.4 Schicht HG | Haus- und Gewerbeabfälle

Haus und Gewerbeabfallbereiche zeichnen sich durch einen deutlich geringeren Anteil an Mineralstoffen aus. Dieser ist mit 66 Gew.-% TM im Vergleich zu anderen Deponiestandorten dennoch hoch.

Mit etwa 2,8 Gew.-% TM also 73.307 Mg treten erstmals verstärkt Metalle auf. In Hinblick auf das energetische Potenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch erscheinen ausgewiesene Haus- und Gewerbeabfallbereiche ebenfalls von Interesse. Die heizwertreiche Fraktion ist in einer Größenordnung von ca. 540.000 Mg TM anzutreffen.

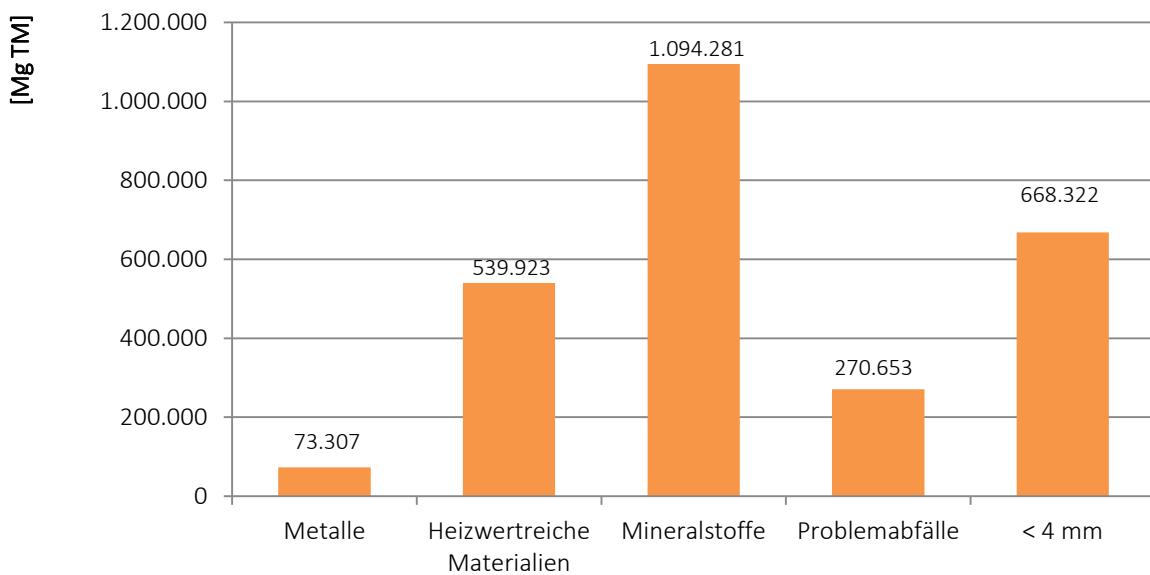


Abbildung 88: Trockenmassepotenzial der Haus- und Gewerbemüllschichten (Angaben in Mg TM)

### 5.5.5 Gesamtpotenzial

Insgesamt stellt sich das Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch wie in Abbildung 89 und Abbildung 90 aufgezeigt dar. Demnach besitzt der Deponiekörper mit rund 17,5 Mio. Mg TM ein sehr großes Potenzial im Bereich der Mineralstoffe, die im Idealfall einer Verwertung zugeführt werden können.

Mit deutlichem Abstand stellt die Stoffgruppe der heizwertreichen Materialien die nächst Größere Ablagerungsmasse dar, die sich auf ca. 700.901 Mg TM beläuft.

Problemabfälle, die in einer Größenordnung von etwa 400.371 Mg TM auftreten, bilden ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Masse.

Wertgebende Metalle sind im Bereich von 101.820 Mg TM im Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch zu vermuten.

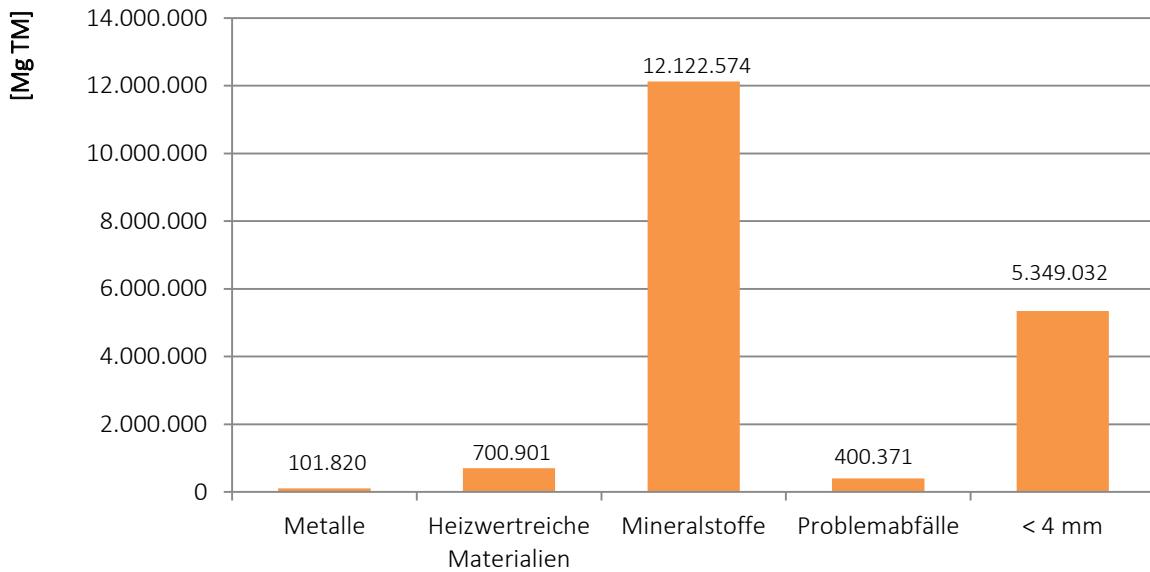


Abbildung 89: Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch (Angaben in Mg TM)

Unter Berücksichtigung der definierten Sortier- bzw. Stofffraktionen ergibt sich die bereits bekannte Verteilung innerhalb der Gruppen. Wiederum zeigt sich, dass Mineralstoffe, Erdaushub

und Boden, die Fraktion < 4 mm, Sortierreste, Holz, Kunststofffolien sowie Fe-Metalle, die wesentlichen Komponenten bilden.

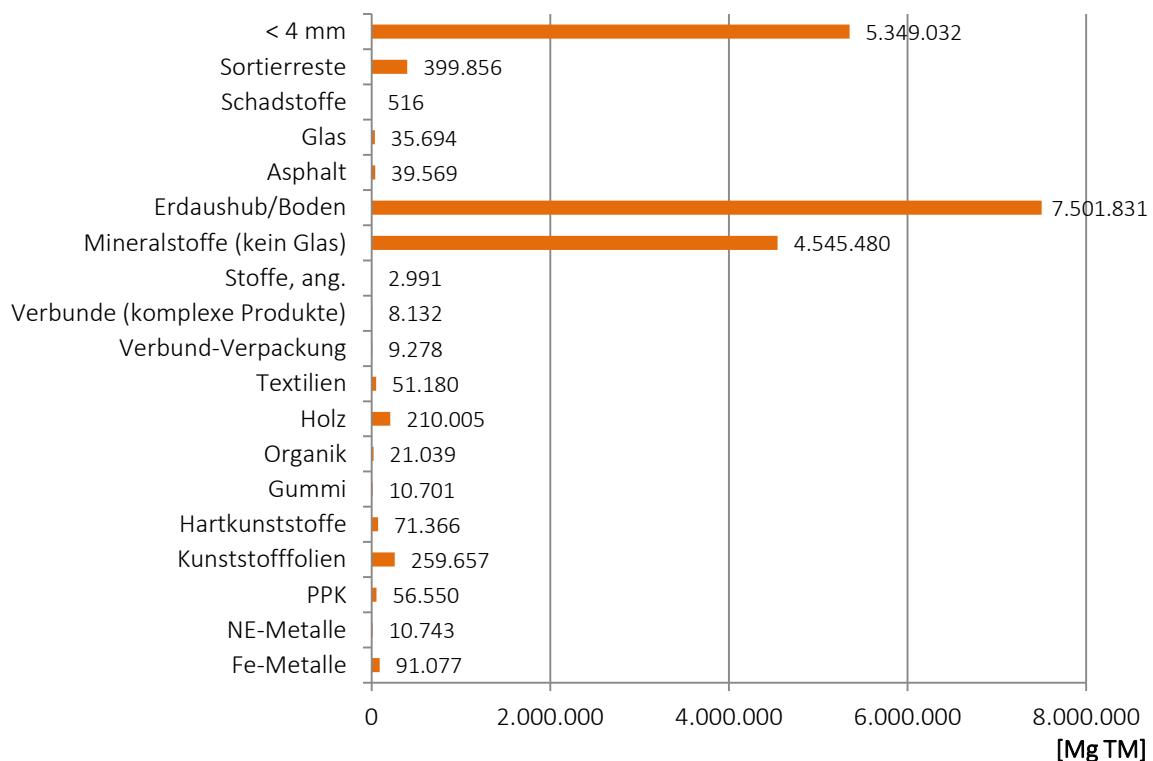


Abbildung 90: Trockenmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM)

## 5.6 Energetische Verwertung

Die Stoffgruppen PPK, Hartkunststoffe, Kunststofffolien, Gummi, Holz und Textilien eignen sich aufgrund ihres hohen Energiegehaltes für eine energetische Verwertung. Um die Möglichkeit dieser Verwertung abzuschätzen, wurden die Heizwerte ( $H_u$ ) bestimmt.

Nach den Grundsätzen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (2012) ist die Anforderung an den Heizwert bei Abfällen zur energetischen Verwertung in § 8 wie folgt definiert:

„Abfälle können zur Gewinnung von Energie genutzt werden ..., wenn der Heizwert des einzelnen Abfalls, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, mindestens **11.000 kJ·kg<sup>-1</sup>** beträgt.“

Die ermittelten Heizwerte der einzelnen Stoffgruppen sind in Abbildung 91 dargestellt. Diese liegen mit Werten von  $13.800$  bis  $25.500 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  TS deutlich über dem geforderten Wert. Hierdurch ist die rechtliche Forderung zur energetischen Nutzung gegeben.

Die höchsten Heizwerte weisen die Kunststoffe mit  $25.500$  und  $24.400 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  auf. Mit rund  $22.600 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  ist die Gummifaktion ebenfalls deutlich über dem geforderten Grenzwert. Holz und Textilien zeigen Heizwerte von ca.  $16.000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Abschließend sei erwähnt, dass selbst PPK, die über mehrere Jahrzehnte im Deponiekörper lagerte, mit  $13.800 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  einen deutlichen Heizwertcharakter besitzt.

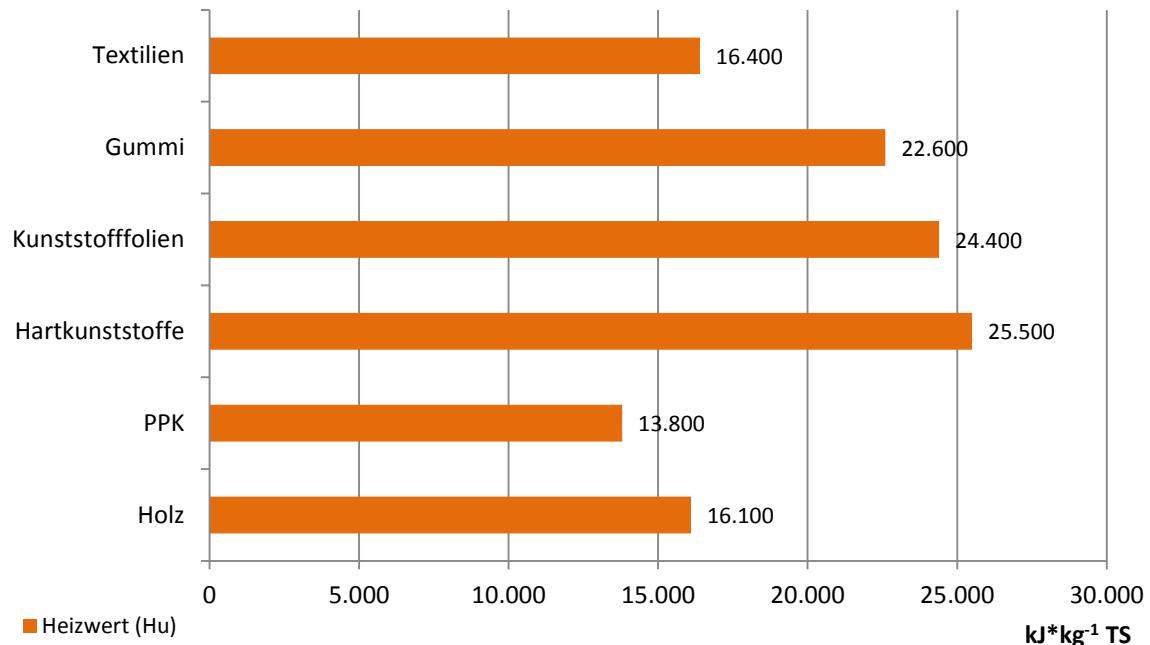


Abbildung 91: Ermittelte Heizwerte ( $H_u$ ) ausgewählter/heizwertreicher Stofffraktionen

Unter Berücksichtigung der mittleren Zusammensetzung der Grobfraktion ergibt sich für die heizwertreiche Fraktion ein durchschnittlicher Heizwert von ca.  $20 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Wie Abbildung 92 zu entnehmen ist, stellen hierbei Kunststofffolien und Hölzer die wesentlichen bzw. wertgebenden Fraktionen dar.

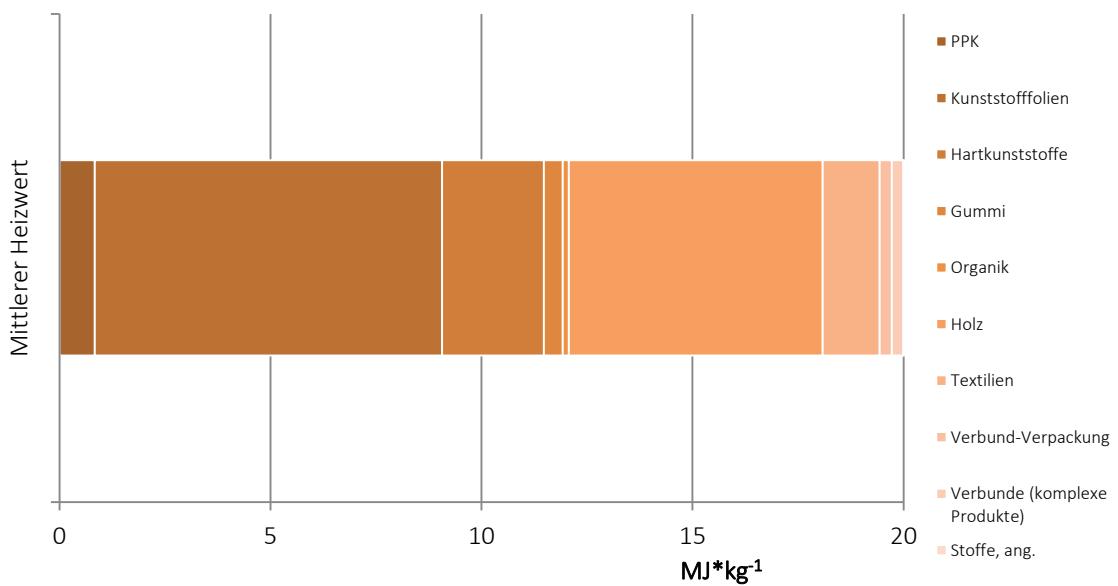


Abbildung 92: Mittlerer Heizwert der heizwertreichen Fraktion

Neben den kalorischen Eigenschaften haben Abnehmer von Ersatzbrennstoffen aus Abfällen weitere Anforderungen an das Material. Dies sind insbesondere die Gehalte an Schwermetallen sowie der Chlorgehalt. Dabei nimmt der Chlorgehalt eine besondere Rolle ein, da dieser die Anforderungen an die Rauchgasreinigung und die Dimensionierung des Kessels wesentlich beeinflusst. Beim Verbrennungsprozess kann es bedingt durch die hohe Reaktionsfähigkeit von Chlor und Chloriden durch das kondensierende Wasser im Abgasstrom zur Bildung von korrosiv

wirkender Salzsäure (HCl) kommen. Bei der Anwesenheit von Alkalien und Schwermetallarten bilden sich Alkali- und Schwermetallchloride, welche zu Ablagerungen an den Wärmetauschern im Dampferzeuger führen (Beckmann et al., 2006).

Die Herkunft des Chlors in Ersatzbrennstoffen mit hohen Kunststoffgehalten lässt sich in erster Linie auf organisch gebundenes Chlor zurückführen. Ursächlich hierfür sind die Kunststoffe selbst und dabei insbesondere das Polyvinylchlorid (PVC). Neben dieser organischen Bindungsform kann Chlor auch in anorganischer Bindungsform vorliegen (Kochsalze, Chlorgehalt von Papier, chlorhaltige Farben und Klebstoffe). Dieses anorganisch gebundene Chlor lässt sich nicht durch mechanische Aufbereitungsverfahren entfernen und ist somit in einer Größenordnung von 0,3 - 0,7 Gew.-% als Hintergrundwert im Abfall enthalten. Die Gesamtgehalte werden für Restabfälle mit im Mittel 0,4 - 0,7 Gew.-% und für Gewerbeabfälle mit im Mittel 2,0 - 2,5 Gew.-% angegeben (Schu und Niesroj, 2008).

Hinsichtlich der Anforderungen an die Chlorgehalte seitens der EBS-Abnehmer werden von Braun- und Steinkohlekraftwerken nur gering korrosive Brennstoffe mit Chlorgehalten bis max. 1 Gew.-% eingesetzt. Dies gilt auch für den EBS-Einsatz in der Grundstoffindustrie, z.B. in Zementwerken. Als mögliche Einsatzgebiete für EBS mit einem Chlorgehalt > 1 Gew.-% kommen Industrieheizkraftwerke mit ähnlicher Abgasreinigung und Korrosionsschutzausführungen wie herkömmliche Müllverbrennungsanlagen sowie die einem Kraftwerk vor geschaltete Ersatzbrennstoffaufbereitung durch Pyrolyse infrage (Beckmann et al., 2006). Die Ergebnisse der Schwermetalluntersuchung sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 mit den Anforderungen potenzieller Abnehmer sowie den Richtwerten der RAL-GZ der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe vergleichend dargestellt.

Tabelle 22: Anforderungskriterien potenzieller EBS-Abnehmer

Parameter	Einheit	EBS-Kraftwerk Maximalwert	Zementwerke Maximalwert	RAL-GZ 724	
				Median	80. Perzentil
Feuchte	Gew.-% FM	k.A.	25	Dokumentation	Dokumentation
Heizwert ( $H_u$ )	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	18	-	Dokumentation	Dokumentation
Aschegehalt	Gew.-%	30	-	Dokumentation	Dokumentation
Chlorgehalt	Gew.-%	2	1	Dokumentation	Dokumentation
Cadmium	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	20	9	4	9
Quecksilber	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	2	1,2	0,6	1,2
Thallium	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	20	2	1	2
Arsen	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	20	13	5	13
Kobalt	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	30	12	6	12
Nickel	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	200	100	80	160
Antimon	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	500	60	25	60
Blei	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	400	200	190	-
Chrom	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	400	120	125	250
Schwefel	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS	-	-	-	-

Tabelle 23: Ergebnisse der Untersuchung der heizwertreichen Fraktion im Vergleich

Parameter	Einheit	Holz	PPK	Grobfraktion			
				Hartkunststoffe	Kunststofffolien	Gummi	Textilien
<b>Feuchte</b>	Gew.-% FM	38,90	43,10	18,60	20,50	8,80	29,00
<b>Heizwert (<math>H_u</math>)</b>	MJ*kg <sup>-1</sup> TS	16,10	13,80	25,50	24,40	22,60	16,40
<b>Aschegehalt</b>	Gew.-%	11,79	23,49	19,60	41,22	21,21	27,10
<b>Chlorgehalt</b>	Gew.-%	0,40	0,44	8,74	2,08	10,90	0,37
<b>Cadmium</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	< 0,25	< 0,25	82,00	< 0,25	62,00	3,30
<b>Quecksilber</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
<b>Thallium</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
<b>Arsen</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
<b>Kobalt</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	1,40	1,90	2,70	2,60	2,00	4,00
<b>Nickel</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	8,40	21,00	20,00	14,00	11,00	81,00
<b>Antimon</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	9,20	9,50	10,00	8,70	42,00	2,80
<b>Blei</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	43,00	67,00	180,00	59,00	560,00	150,00
<b>Chrom</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	14,00	40,00	46,00	31,00	42,00	420,00
<b>Schwefel</b>	mg*kg <sup>-1</sup> TS	3900,00	2200,00	2900,00	1500,00	9300,00	4100,00

Die Anforderungen der EBS-Kraftwerke können von der heizwertreichen Fraktion durchaus erfüllt werden. Lediglich die zum Teil hohen Chlorgehalte von bis zu 10 Gew.-% stellen einen limitierenden Faktor dar. Hochwertigere Verwertungswege wie z. B. in Zementwerken scheinen jedoch nicht möglich zu sein, da hier die Betreiber zur Sicherung ihrer Produktqualität hohe Anforderungen an den Ersatzbrennstoff stellen. Neben Chlor werden in diesem Fall auch die Gehalte an Blei und Chrom zum Problem. Ähnlich sieht es aus, wenn die Richtwerte der RAL-GZ hinzugezogen werden. Auch hier sind die Grenzwerte vielfach überschritten.

### 5.6.1 Theoretischer Energiewert

Aus energetischer Sicht lagern auf dem Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ca. 14 Mio. GJ, die überwiegend aus den Materialien der Haus- und Gewerbeabfallbereichen resultieren. Unter der Annahme, dass Kohle ein energetisches Potenzial von 29,3 GJ\*Mg<sup>-1</sup> besitzt und das Gesamtpotenzial vollständig ausgenutzt werden könnte, könnten insgesamt 476.495 Mg Kohle substituiert werden. Zudem werden theoretisch durch die Substitution ca. 1,3 Mg CO<sub>2</sub> eingespart.

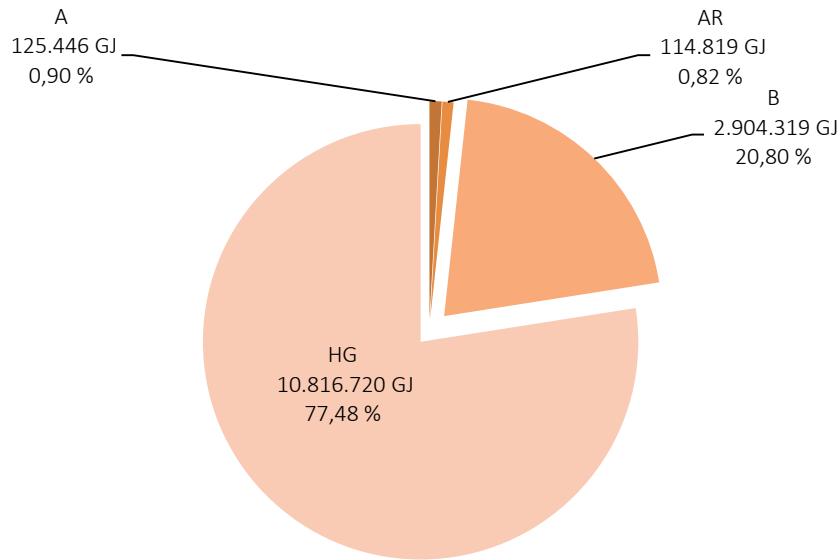


Abbildung 93: Charakterisierung des theoretischen Energiewerts des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

Nach HÖLZLE [2011] reicht der Heizwert alleine nicht aus, um das energetische Potenzial rückgebauter Abfälle zu bewerten. Ursache hierfür ist, dass unterschiedliche heizwertreiche Fraktionen in verschiedenen Kraftwerken mit differenzierten Wirkungsgraden verwendet werden. Diese reichen je nach technischer Ausstattung von 30 bis 90 % und schwanken somit stark. Einen Überblick hierzu vermittelt Tabelle 24.

Tabelle 24: Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke [Hölzle, 2011]

Kraftwerk	Wirkungsgrad [%]		
	MIN	MW	MAX
MVA	9,4	41,3	78,7
Biomassekraftwerk (BMK)	18,0	27,0	85,0
Zementwerk	70,0	80,0	90,0
EBS-Kraftwerk	22,0	43,6	82,0

Unter Berücksichtigung dieser Kenngrößen ergeben sich für die energetische Bewertung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch die in Abbildung 94 aufgezeigten Werte. Demnach können im Mittel 3,8 bis 11,2 Mio. GJ des Gesamtenergiegehalts energetisch umgesetzt werden.

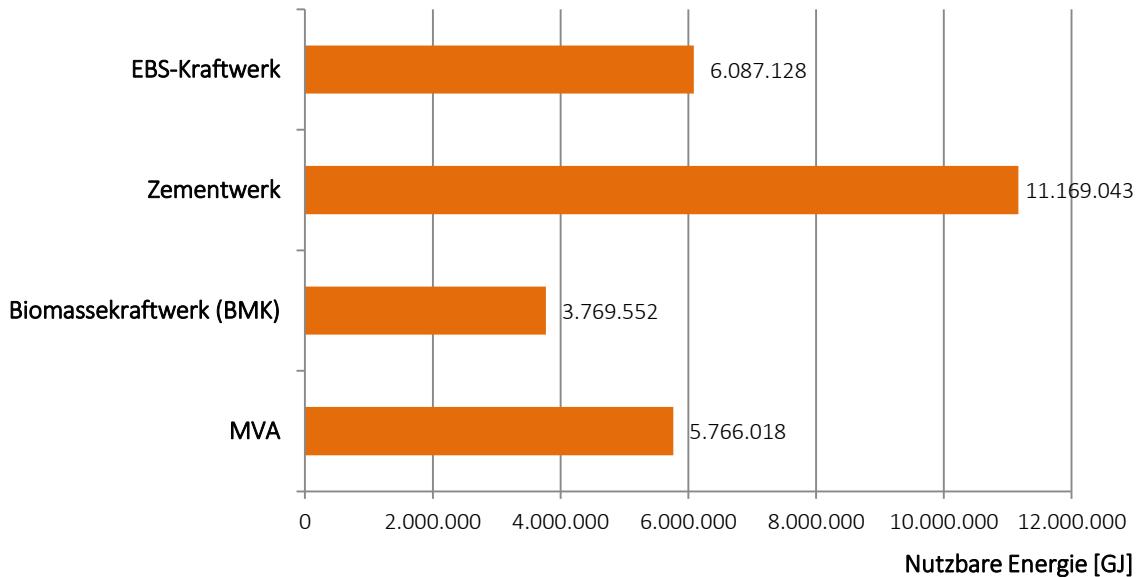


Abbildung 94: Nutzbare Energie des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Abhängigkeit der mittleren Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerke

In diesem Zusammenhang stellt sich ebenfalls die Frage, welcher kumulierte Energieaufwand (KEA) zur Aufbereitung einer heizwertreichen Fraktion aus Deponiegut notwendig ist. In der Literatur werden hierzu Werte von 0,1 bis 0,2  $\text{GJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$  behandeltes Deponiegut genannt, wobei keine genauen Angaben zur eingesetzten Technik vorgenommen werden.

Eine in Verbindung mit dem Recyclingunternehmen Korn [KORN, 2011] erstellte Bilanzierung kommt zum Ergebnis, dass zur Aufbereitung von einer Tonne Deponiegut ca. 0,14 GJ Energie benötigt werden.

Demnach werden für die eigentliche Herstellung einer heizwertreichen Fraktion im Durchschnitt 3,1 Mio. GJ Energie benötigt, die im Rahmen der Bilanzierung zu berücksichtigen sind.

Der so genannte Erntefaktor also das Verhältnis von Energieoutput zu –input nimmt entsprechende Werte von 1,2 bis 3,6 an. Dies bedeutet, dass selbst unter Annahme pessimistischer Bedingungen mehr Energie gewonnen werden könnte, als verbraucht wird.

## 5.7 Stabilisierungsgrad des Deponiekörpers

Die Untersuchung des Stabilisierungsgrades gibt Aufschluss darüber, wie viel biologische Aktivität noch vorhanden ist. Biologische Aktivität im Deponiekörper führt zu Gasbildung, Substratabbau und damit zu Setzungerscheinungen. Ein hoher Stabilisierungsgrad ist durch geringe biologische Aktivität gekennzeichnet. Daher kann über diesen Parameter überprüft werden, ob sich die Deponie in einem statischen Zustand befindet.

Die Auswahl der Proben ermöglicht es dabei den Deponiekörper nicht als eine uniforme Masse zu betrachten, sondern eine Differenzierung nach Alter und Ablagerungsort vorzunehmen. Außerdem können aus der Stabilität des Abfalls Vorhersagen über die zukünftig zu erwartende Deponiegasbildung und organische Sickerwasserbelastung getroffen werden. Im Falle einer Deponieöffnung zur Gewinnung der vorhandenen Rohstoffe, stehen diese Parameter in wichtigem Zusammenhang mit dem Klimaschutz und der Arbeitssicherheit. Neben der biologischen Stabilität werden weitere Parameter in die Untersuchungen einbezogen, die Aussagen über die Toxizität, die chemische Zusammensetzung und den Energieinhalt des abgelagerten Abfalls geben.

### 5.7.1 Trockensubstanz und Glühverlust

Die Ergebnisse der Trockensubstanz- und Glühverlustbestimmung unterscheiden sich zum Teil erheblich. Wie aus Abbildung 95 ersichtlich, liegen die Anteile der organischen Substanz mit Werten bis zu 14 Gew.-% dennoch im unteren Bereich bzw. nähern sie sich der definierten 5 %-Grenze an. Dies würde bedeuten, dass ohne weitere Behandlung eine Ablagerung der Fein und Mittelfraktion - auch unabhängig der Ausnahmeregelung für Deponiegut - möglich erscheint.

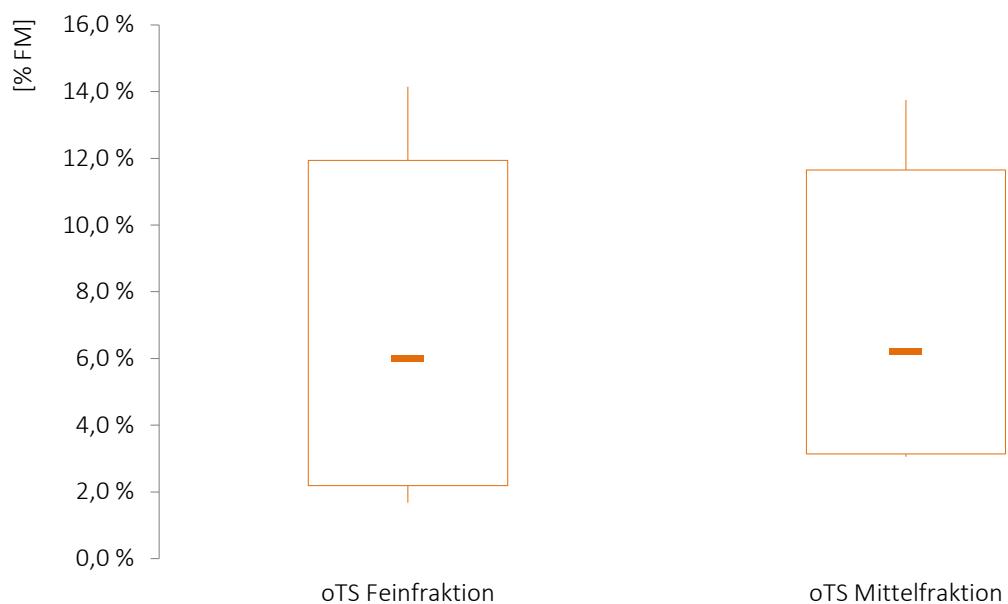


Abbildung 95: Schwankungsbereich ( $KL_{90\%}$ ) des Glühverlust (oTS) in Abhängigkeit der Klassierfraktion

Zudem gilt, dass Fein- und Mittelfaktion einer Probe immer in derselben Größenordnung vorliegen. Wie in Abbildung 96 dargestellt, ist hierbei ein klarer Zusammenhang erkennbar.

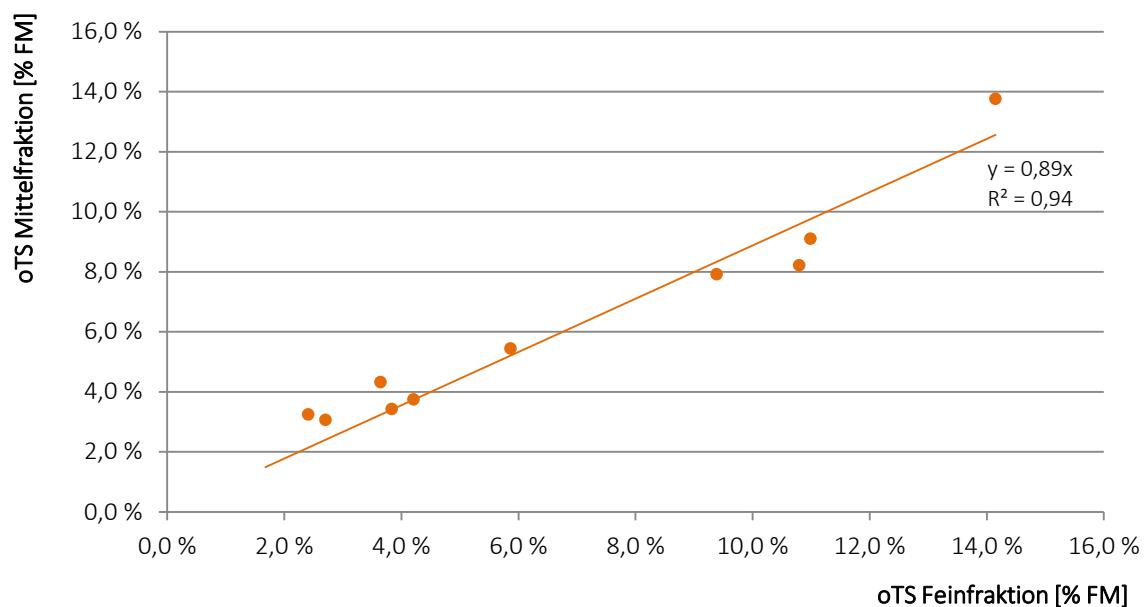


Abbildung 96: Zusammenhang der oTS-Anteile in Abhängigkeit der Klassierfraktion

Auffällig ist, dass Proben mit hoher organischer Trockensubstanz (oTS) auch hohe Wasseranteile aufweisen, während Proben mit geringer organischer Trockensubstanz und hoher anorganischer Trockensubstanz (aTS) deutlich geringere Mengen Wasser enthalten.

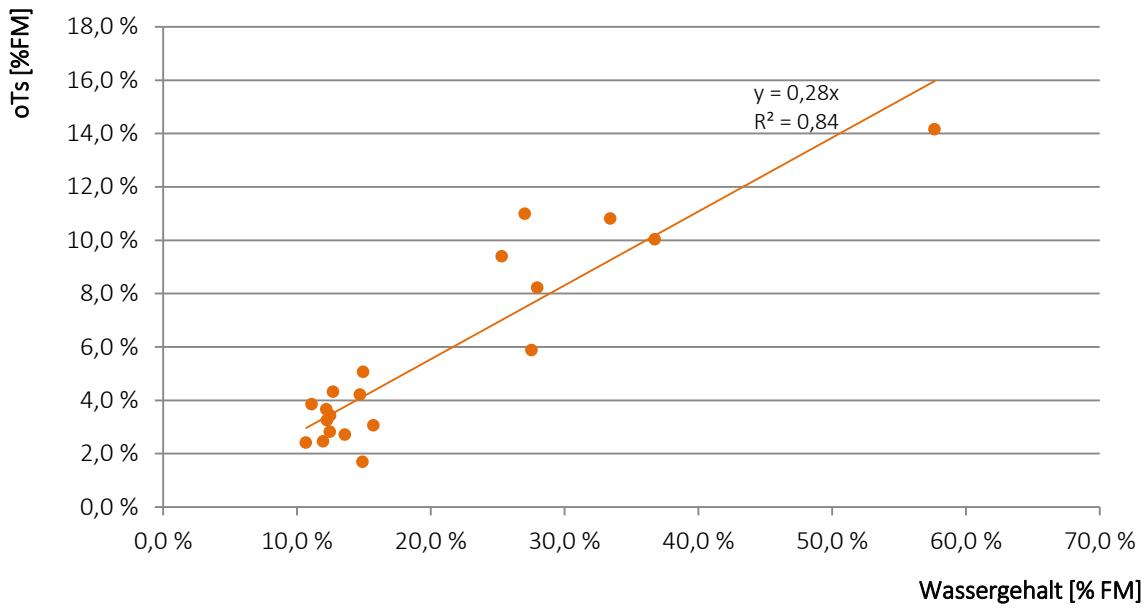


Abbildung 97: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Glühverlust (oTS)

### 5.7.2 pH-Wert

Mit pH-Werten von durchschnittlich 7,7 liegt sowohl die Fein- als auch die Mittelfaktion im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. In Hinblick auf die Parameteranforderung bei Wiederablagerung (pH-Bereich von 5,5 bis 13,0) zeigt sich, dass sämtliche Untersuchungen innerhalb dieser Spanne bleiben (siehe Abbildung 98).

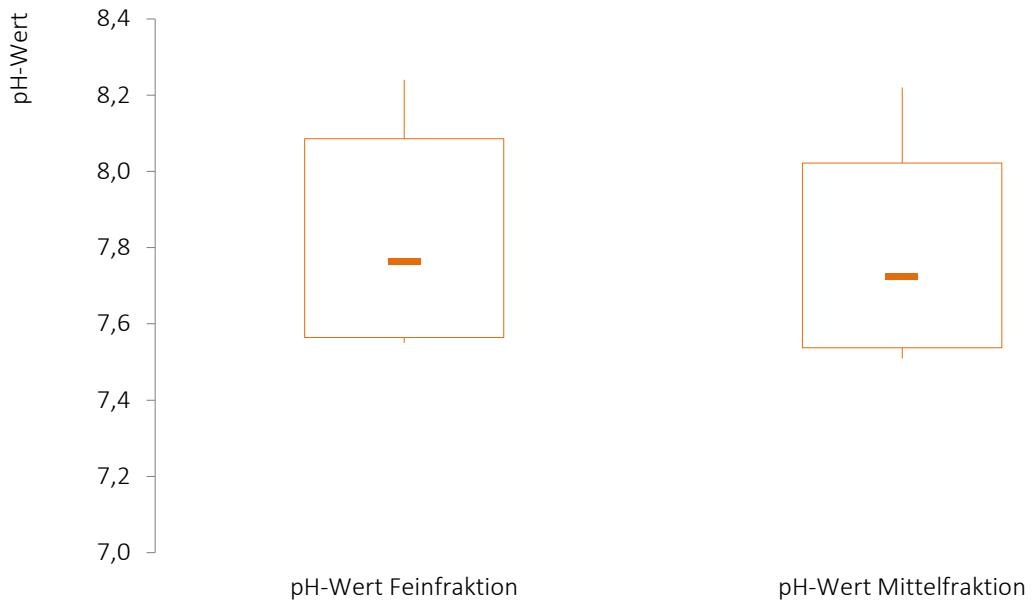


Abbildung 98: Schwungsbereich (KI<sub>90%</sub>) des pH-Werts (oTS) in Abhängigkeit der Klassierfraktion

Wie bereits für den Glühverlust festgestellt, zeigen auch die pH-Werte der Fein- und Mittelfaktion einen deutlichen Zusammenhang auf. Wie aus Abbildung 99 hervorgeht, ist mit einer Steigung von 1 kein pH-Unterschied beider Fraktionen zu verzeichnen.

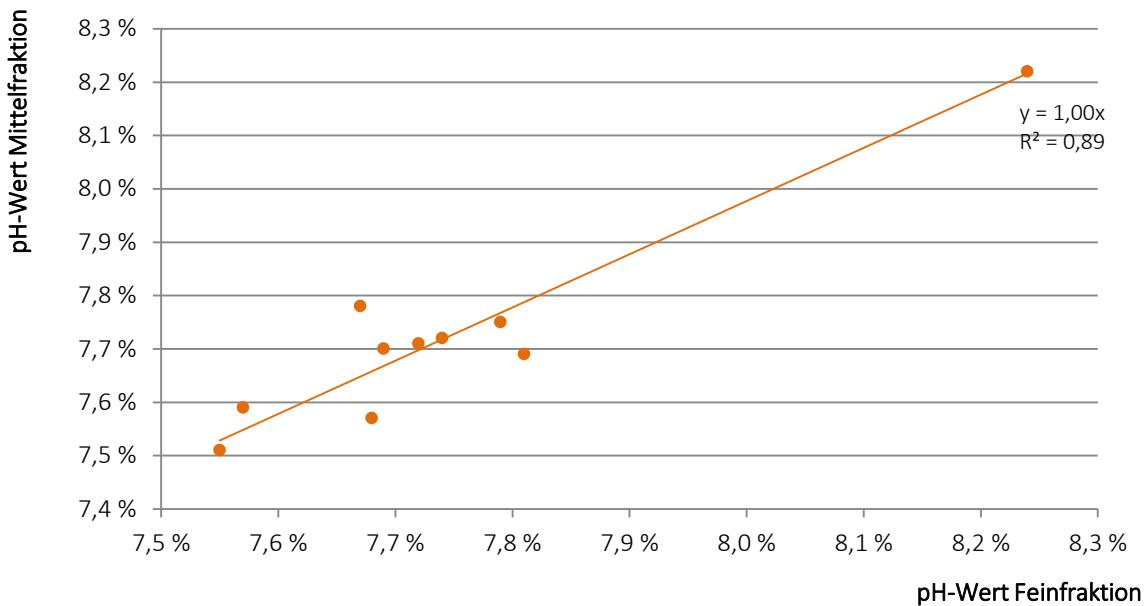


Abbildung 99: Zusammenhang des pH-Werts der Fein- und Mittelfaktion

### 5.7.3 Brennwert - Standardverbrennungsenthalpie

Auch die Verbrennung ist eine chemische Reaktion. Die Reaktionsenthalpie der Verbrennungsreaktion bzw. die Standardverbrennungsenthalpie eines Stoffes ist die Enthalpieänderung, die auftritt, wenn ein Stoff unter O<sub>2</sub>-Überschuss und Standardbedingungen vollständig verbrennt. Der Brennwert ist identisch mit dem absoluten Betrag der mit negativen Vorzeichen angegebenen Standardverbrennungsenthalpie ΔVH° der allgemeinen Thermodynamik.

Aus Abbildung 100 wird ersichtlich, dass die Standardverbrennungsenthalpie der untersuchten Proben vergleichsweise gering ist bzw. teilweise sogar negative Werte annimmt. Zum Vergleich sei erwähnt, dass Hölzer eine Standardverbrennungsenthalpie von ca. 18 – 20 kJ\*g<sup>-1</sup> TS besitzen. Demnach besitzen diese Fraktionen keinen Brennstoffcharakter.

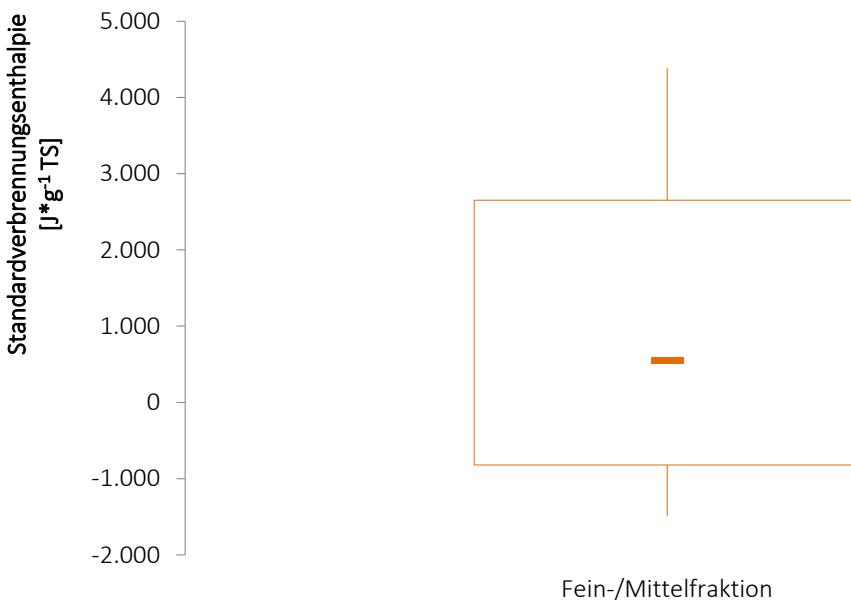


Abbildung 100: Wertebereich der Standardverbrennungsenthalpie der untersuchten Proben

Wie zu vermuten ist, zeigen die Standardverbrennungsenthalpie und der Glühverlust Parallelitäten auf. Es gilt, je geringer der Glühverlust also je höher der Anteil an anorganischem Material, desto geringer fällt die Standardverbrennungsenthalpie aus (Abbildung 101).

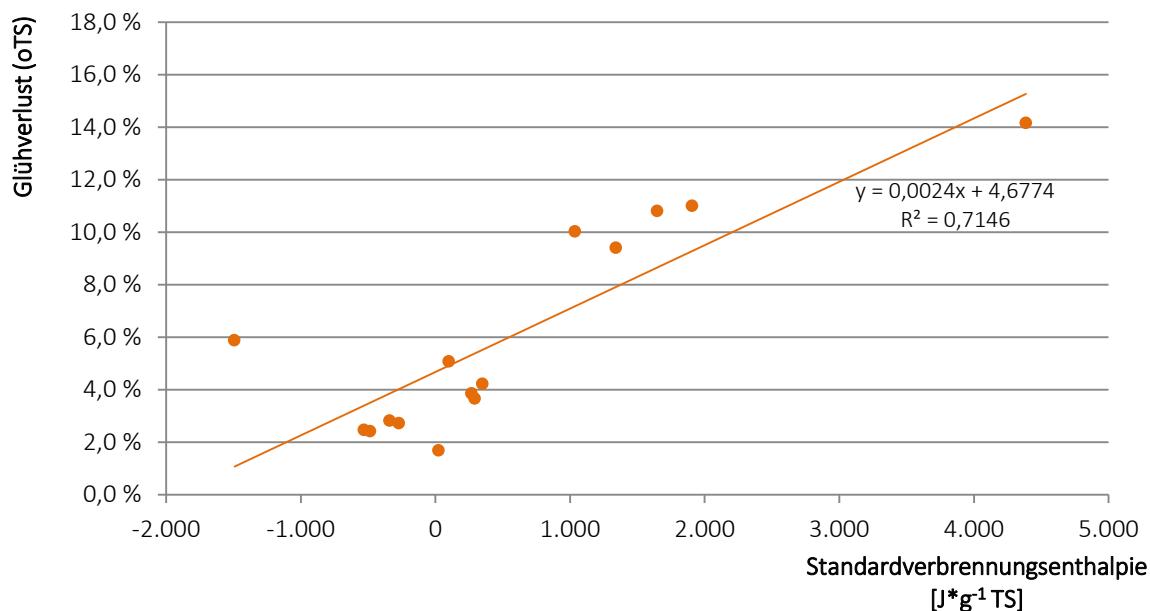


Abbildung 101: Zusammenhang zwischen Standardverbrennungsenthalpie und Glühverlust

#### 5.7.4 Chemischer Sauerstoffbedarf

Der Chemische Sauerstoffbedarf ist als Summenparameter ein Maß für die Summe aller im Wasser vorhandenen, unter bestimmten Bedingungen oxidierbaren Stoffe. Er gibt die Menge an Sauerstoff an, die zu ihrer Oxidation benötigt würde.

Im Mittel ist der CSB-Wert für die Fein- und Mittelfraktion im Bereich von ca. 45 mg O<sub>2</sub> pro mg TS angesiedelt. Im Maximalfall kann er Werte von 130 mg annehmen (Abbildung 102).

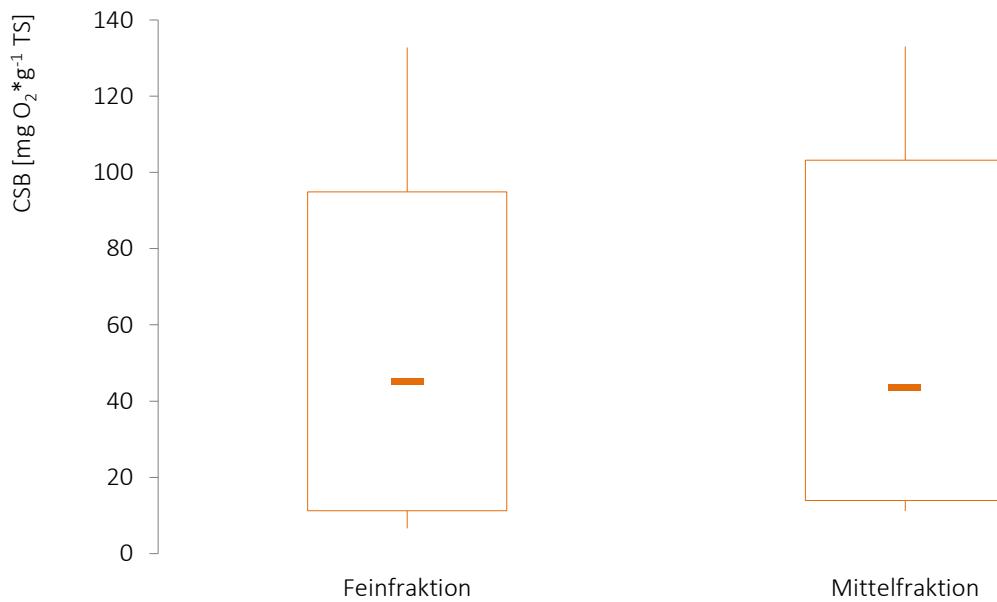


Abbildung 102: Chemischer Sauerstoffbedarf im Mittel über 5 Tage der Fein- und Mittelfraktion

Aus Abbildung 103 wird deutlich, dass auch für diesen Parameter gleiche Tendenzen der Fein- und Mittelfraktion bestehen und diese beschrieben werden können.

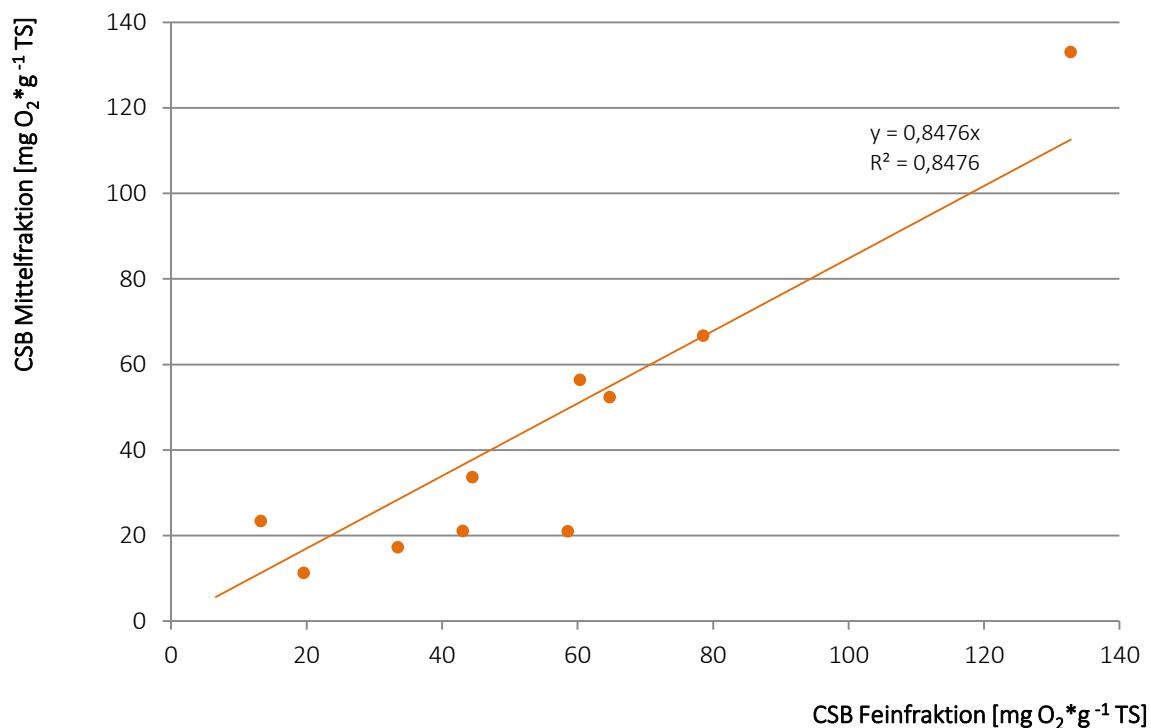


Abbildung 103: Zusammenhang des chemischen Sauerstoffbedarfs der Fein- und Mittelfraktion

### 5.7.5 Kohlenstoffanteile

Der Gesamtkohlendstoffanteil ist durchschnittlich mit ca. 6 Gew.-% zu beziffern. Das angegebene Konfidenzintervall belegt allerdings, dass dieser auch Werte von bis zu 16 Gew.-% annehmen kann. Wird dieser weiter aufgegliedert, zeigt sich, dass in der Feinfraktion der organische den anorganischen Kohlenstoffanteil übersteigt. Für die Mittelfraktion liegen hingegen beide Werte auf demselben Niveau (Abbildung 104).

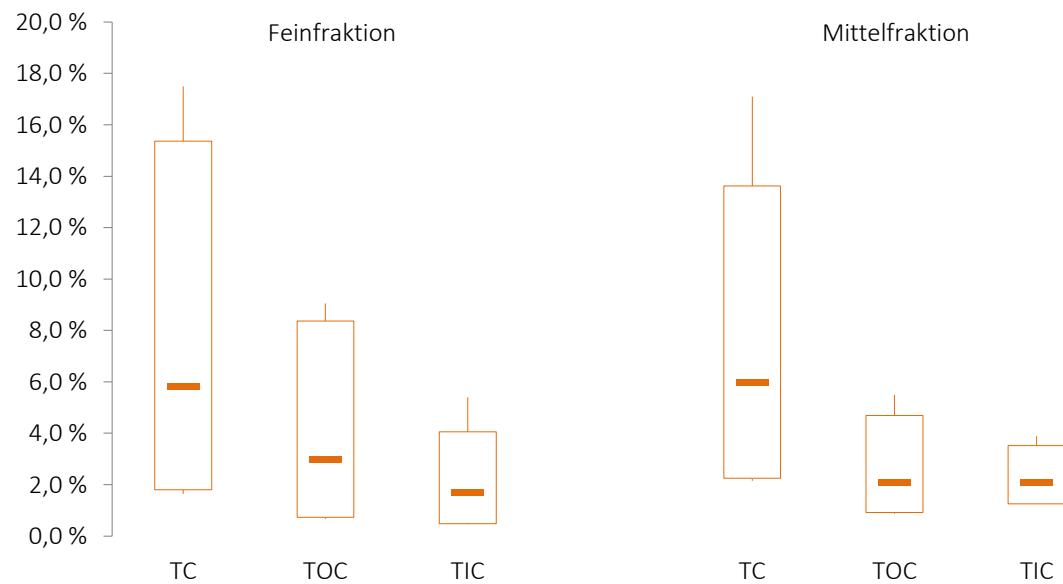


Abbildung 104: TC-, TOC- und TIC-Gehalte der Fein- und Mittelfraktion

Wie bereits die zuvor genannten Parameter belegt Abbildung 105 ebenfalls, dass die Fein- und Mittelfraktion nahezu identische Eigenschaften besitzt.

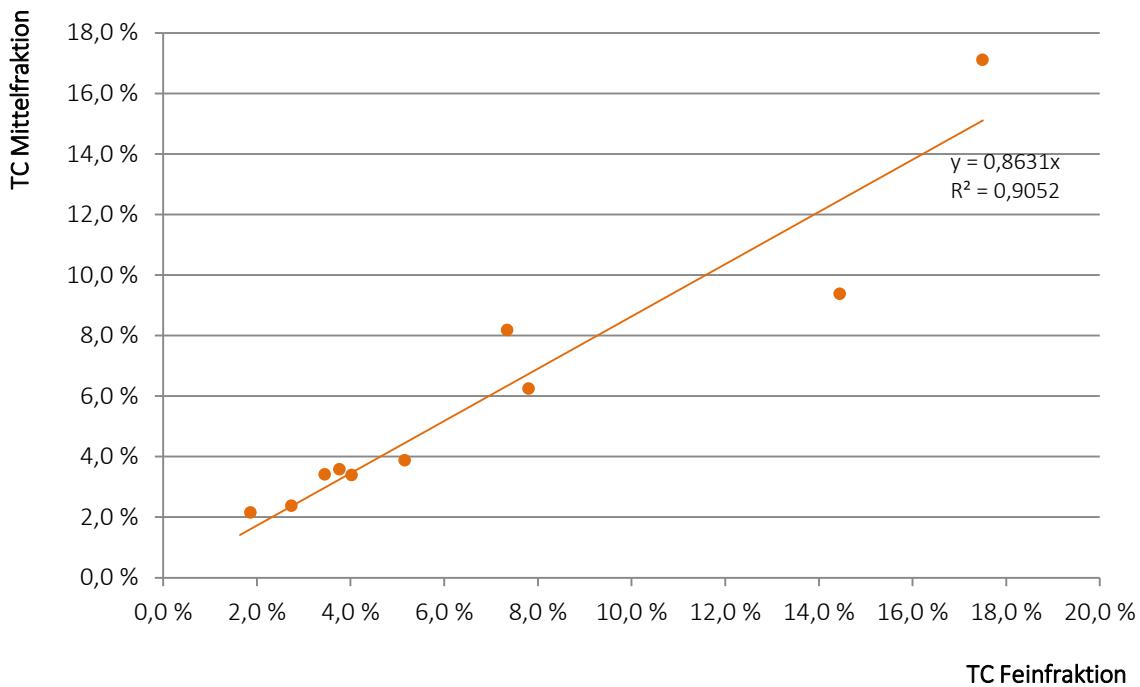


Abbildung 105: Zusammenhang der TC-, TOC- und TIC-Gehalte zwischen der Fein- und Mittelfaktion

### 5.7.6 TTC-Test

Der TTC-Test belegt, dass in keiner der Proben nennenswerte biologische Aktivität vorliegt. Selbst bei 10-facher Probenkonzentration und einer Woche Inkubationszeit fällt der TTC-Test weiterhin negativ aus. Das Probenmaterial ist durch die Deponierung bereits vollständig stabilisiert und es liegen im Material nahezu keine aktiven Mikroorganismen mehr vor. Daher ist ein Animpfen der BSB-Ansätze erforderlich.

### 5.7.7 Biologischer Sauerstoffbedarf

Mit Ausnahme eines Ausreißers liegen die Werte der BSB<sub>5</sub>-Messung alle unterhalb von 2 mg O<sub>2</sub> pro g Trockensubstanz. Dies bedeutet auch in Verbindung mit den Ergebnissen der zuvor genannten Parameter, dass das Deponiegut keine biologische Aktivität aufweist. Im Vergleich hierzu besitzt unbehandelter Abfall mit ca. 50 mg O<sub>2</sub>\*g<sup>-1</sup> TS eine deutlich höhere Atmungsaktivität (Kranert, et al., 2010). Auch in diesem Fall gilt dies für die Fein- und Mittelfaktion, deren Zusammenhang aus Abbildung 107 hervorgeht.

Die Leitfähigkeitsmessung hat in diesem Zusammenhang zu Werten von 474 bis 976 µS\*cm<sup>-1</sup> geführt.

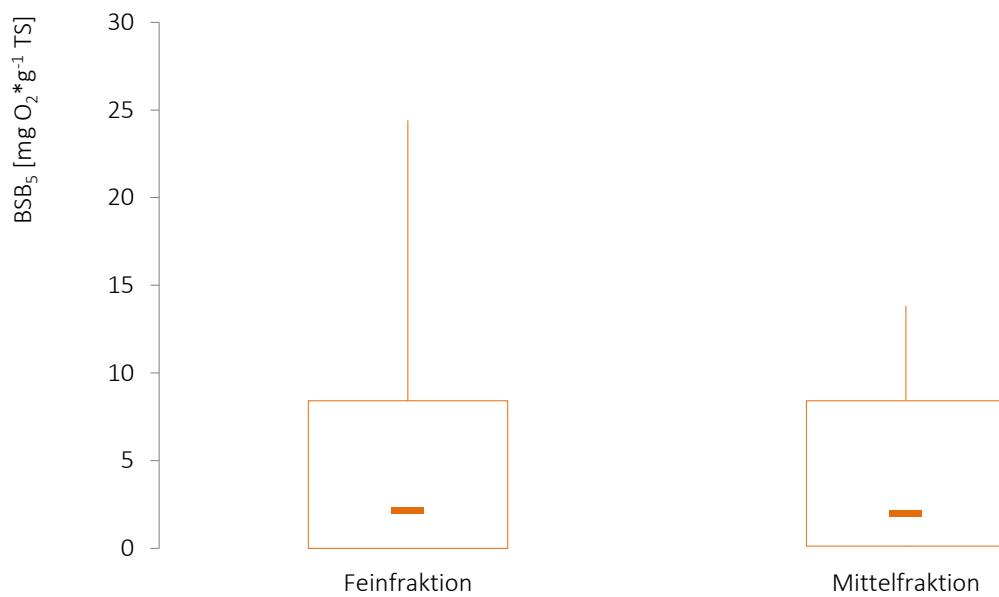


Abbildung 106: Biologischer Sauerstoffbedarf der Fein- und Mittelfaktion nach 5 Tagen

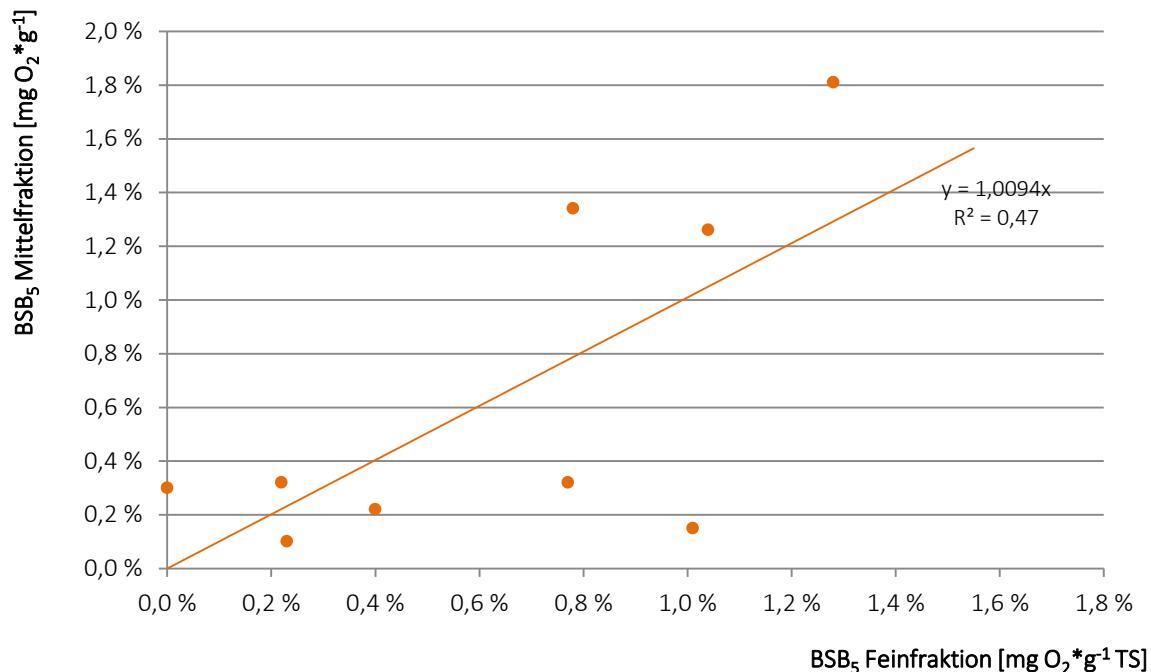


Abbildung 107: Zusammenhang des BSB<sub>5</sub> der Fein- und Mittelfaktion

## 5.8 Ersatzbaustoffeigenschaften

Die Fein- und Mittelfaktion der ausgewiesenen Abfallschichten wurden der Elution nach DIN 19529 unterzogen. Dieses Verfahren dient der Übereinstimmungsuntersuchung (Deklarationstest) mineralischer Ersatzbaustoffe hinsichtlich ausschließlich anorganischer Parameter und soll eine erste Abschätzung der Verwertungsmöglichkeiten einer dem Deponiegut entnommenen mineralischen Fraktion außerhalb der Deponie, z. B. in technischen Bauwerken, ermöglichen.

Das zugrunde gelegte Regelwerk ist die sich derzeit im Entwurf befindliche Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV-E, 2012). Darin werden unterschiedliche mineralische Abfälle anhand ihrer Herkunft in Kategorien eingeteilt. Die mineralische Fraktion aus dem Deponierückbau ist der Kategorie Recycling-Baustoff (RC) nach §3, Nr. 29 ErsatzbaustoffV-E (2012) zuzuordnen. Hier heißt es:

*„Gewonnene Gesteinskörnungen durch Aufbereitung von Abfällen, die bei Bautätigkeiten wie Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau und Erhaltung von Hoch- und Tiefbauten, Straßen, Wegen, Flugplätzen und sonstigen Verkehrswegen angefallen sind und zuvor als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form im Hoch- und Tiefbau eingesetzt waren.“*

---

Weiterhin erfolgt eine Unterteilung der Recycling-Baustoffe anhand der Materialwerte (Eluatkonzentrationen) in drei Einbauklassen RC-1 bis RC-3. Aus der Einbauklasse und den Eigenschaften der Grundwasserdeckschicht am potenziellen Einsatzort ergeben sich definierte Einbauweisen nach Anlage 2 ErsatzbaustoffV-E (2012). Bei einer Überschreitung des Materialwertes der jeweils höchsten Einbauklasse sind die Abfälle nicht als Ersatzbaustoff verwendbar, sondern zu deponieren bzw. als Deponieersatzbaustoff einsetzbar. Die ErsatzbaustoffV-E (2012) sieht für Recyclingmaterial nachfolgende Parameter vor:

- Leitfähigkeit
- pH-Wert
- Chrom<sub>gesamt</sub>
- Kupfer
- Sulfat
- Vanadium

Insgesamt betrachtet, stellen sich die Materialeigenschaften der Fraktion < 50 mm des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch, wie in Tabelle 25 aufgezeigt, dar. In Bezug auf die in der ErsatzbaustoffV-E (2012) genannten Kategorien ist das Deponiegut der Klasse 3 zuzuordnen. Als limitierender Faktor für eine höherwertige Verwertung tritt der vergleichsweise hohe Sulfatgehalt auf.

Aufgrund der Tatsache, dass innerhalb des Deponiekörpers unterschiedliche Abfallschichten lokalisiert sind, ist eine Detailbetrachtung an dieser Stelle sinnvoll. Die gewonnenen Erkenntnisse werden aus Abbildung 108 bis Abbildung 113 ersichtlich.

Tabelle 25: Mittlere Materialeigenschaften der Fraktion < 50 mm im Vergleich zu den Materialanforderungen für Recyclingbaustoffe nach ErsatzbaustoffV-E (2012)

Parameter	Einheit	Messwert	Materialwerte		
			RC 1*	RC 2*	RC 3*
Leitfähigkeit	[ $\mu\text{S} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	2821,72	2500,00	3200,00	10000,00
pH-Wert	-	7,83	6,00 – 13,00	6,00 – 13,00	6,00 – 13,00
Chrom <sub>gesamt</sub>	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	13,26	150,00	440,00	900,00
Kupfer	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	149,56	110,00	180,00	500,00
Sulfat	[ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	1128,87	450,00	800,00	3500,00
Vanadium	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	10,00	140,00	700,00	1400,00
PAK	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	13,62	10,00	15,00	20,00

Wie Abbildung 108 belegt, liegt die Leitfähigkeit in Abdeck-, Bauschutt- und Abraumschichten zum Teil deutlich unterhalb des Materialwerts der Klasse RC 1. Demnach könnten die dort

\*Ein Recycling-Baustoff (kurz RC-Baustoff) ist ein Baustoff oder ein Baustoffgemisch, das entsprechend seiner Herkunft unterschiedliche Stoffeigenschaften besitzt. Je nach Beschaffenheit (ausgedrückt durch unterschiedliche Klassen z.B. RC 1 bis 3) können diese Materialien im Straßen- und Wegebau zum Einsatz kommen. Allen RC-Baustoffklassen ist gemeinsam, dass durch ihre Verwendung wertvolle Ressourcen und Deponieraum gespart werden kann. Außerdem ist in vielen Fällen die Aufbereitung und Weiterverwendung finanziell günstiger als eine endgültige Beseitigung.

anfallenden mineralischen Abfälle als wertvoller Ersatzbaustoff eingesetzt werden. Hingegen zeigt sich für Hausmüllbereiche ein deutlich erhöhter Wert auf, der ausschließlich eine Verwertung in Form von RC 3 Material zulassen würde.

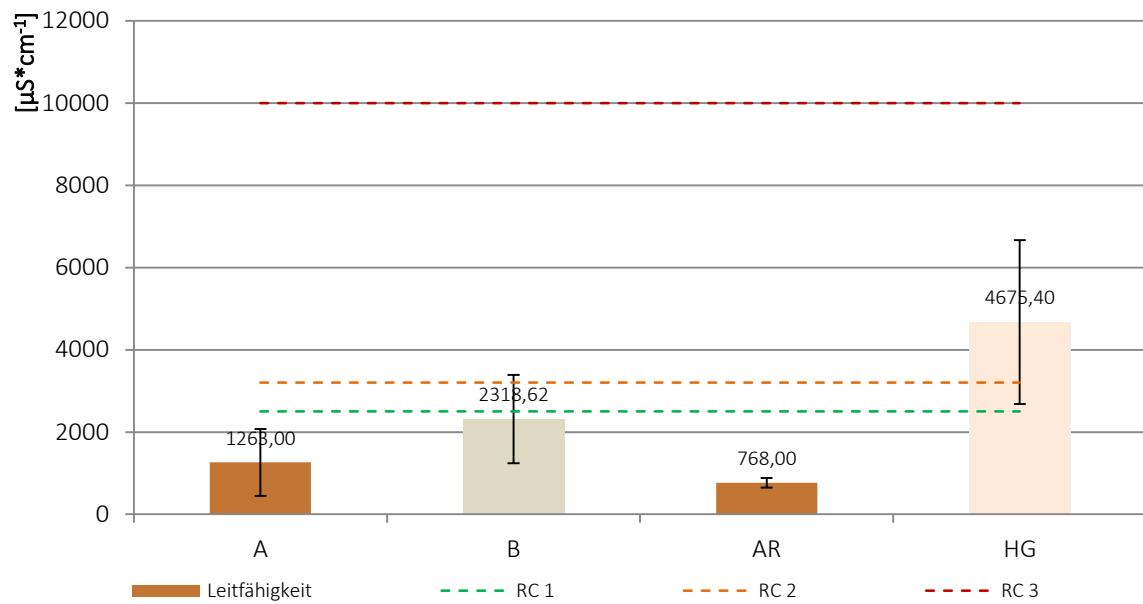


Abbildung 108: Leitfähigkeit der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Unabhängig der jeweiligen Abfallschicht liegen die vorgefundene pH-Werte auf einem einheitlichen Niveau, das um den Bereich pH 8 pendelt. Somit kann festgehalten werden, dass der pH-Wert kein limitierender Faktor für die hochwertige baustoffliche Verwertung ist (vergl. Abbildung 109).

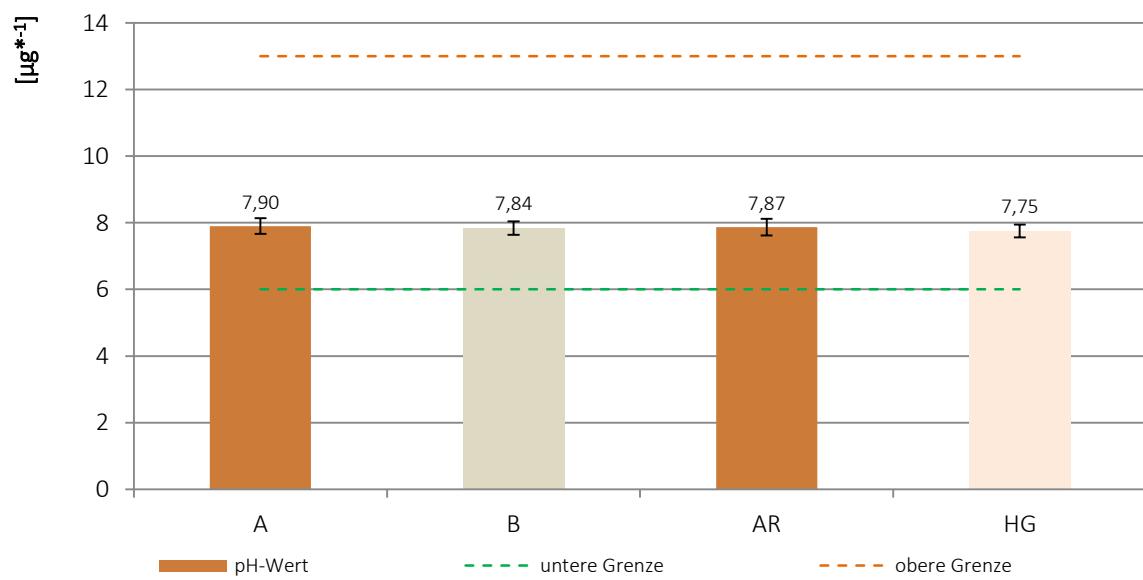


Abbildung 109: pH-Wert der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Mit Werten von 10 bis 20 µg\*I⁻¹ kann auch für den Gesamtgehalt an Chrom festgehalten werden, dass dieser deutlich unterhalb der geforderten Materialwerte für RC 1 Ersatzbaustoffe liegt. Eine dementsprechende Verwertung ist für die gesamte Fraktion < 50 mm denkbar.

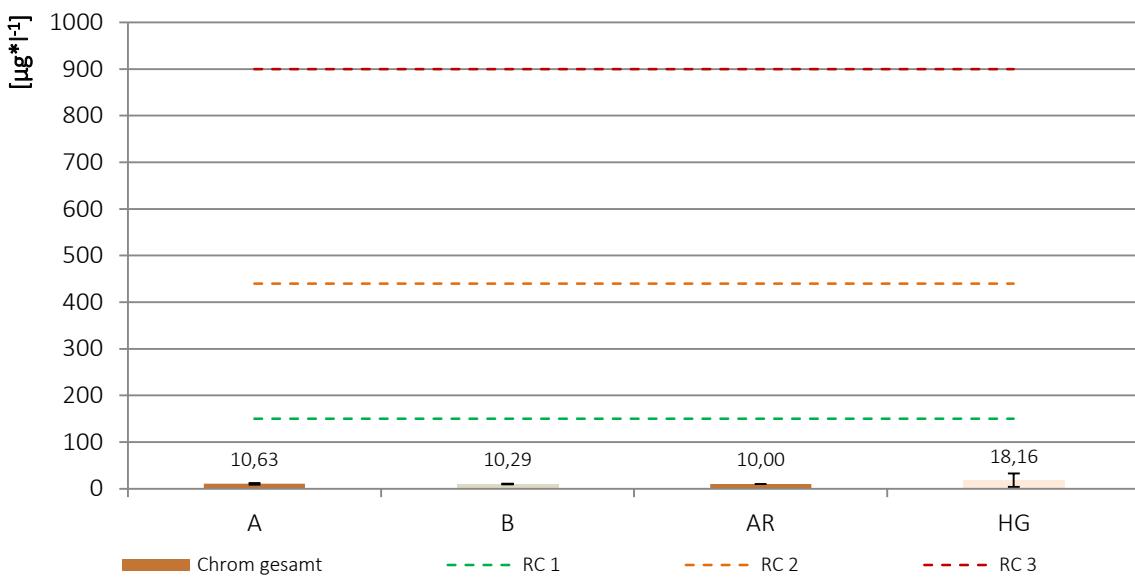


Abbildung 110: Chrom<sub>gesamt</sub>-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Für den Kupfer-Gehalt ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bereits für die Leitfähigkeit dargestellt. Hierbei zeigen die Abdeck-, Bauschutt- und Abraumschicht Werte auf, die deutlich unter den Anforderungen der Klasse RC 1 liegen. Material aus Hausmüllbereichen ist hingegen im Mittel eher den RC 2 Ersatzbaustoffen zuzuordnen. In Ausnahmefällen werden sogar Werte erreicht, die eine Einstufung als RC 3 Material erfordern.

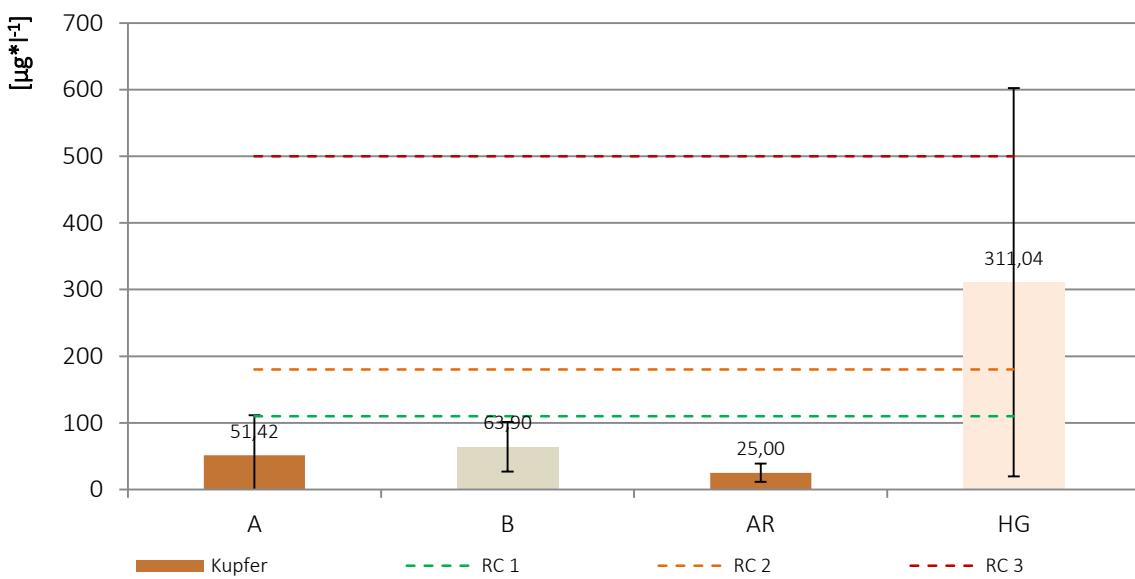


Abbildung 111: Kupfer-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Ähnliches gilt für die Sulfat-Gehalte des untersuchten Materials < 50 mm. Wiederum wird deutlich, dass Hausmüllbereiche deutlich erhöhte Werte aufweisen. Neben Hausmüllbereichen überschreiten nun auch erstmals Materialien aus dem Bauschuttbereich die definierten RC 1 Materialwerte.

In Hinblick auf die momentan in Diskussion stehende Mantelverordnung (Stand 2013) ändert sich an dieser Tatsache nichts.

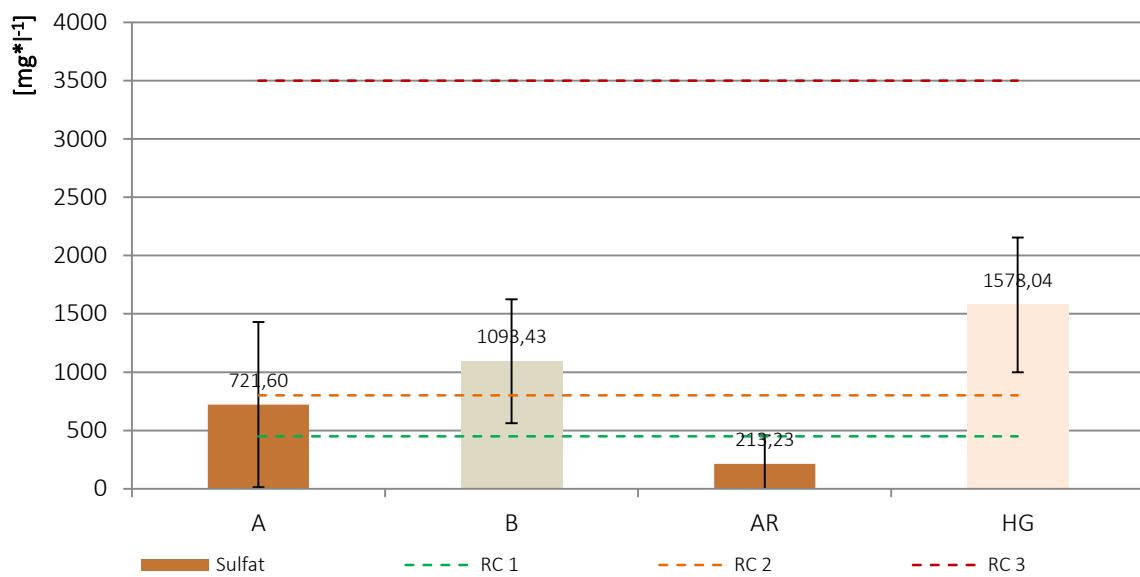


Abbildung 112: Sulfat-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Für alle Untersuchungen und somit auch für alle Deponiebereiche liegt der Vanadium-Gehalt unterhalb der bestimmungsgrenze von  $10 \mu\text{g}^{*^{-1}}$ . Dies bedeutet, dass keine Einschränkungen der hochwertigen Verwertung vorliegen.

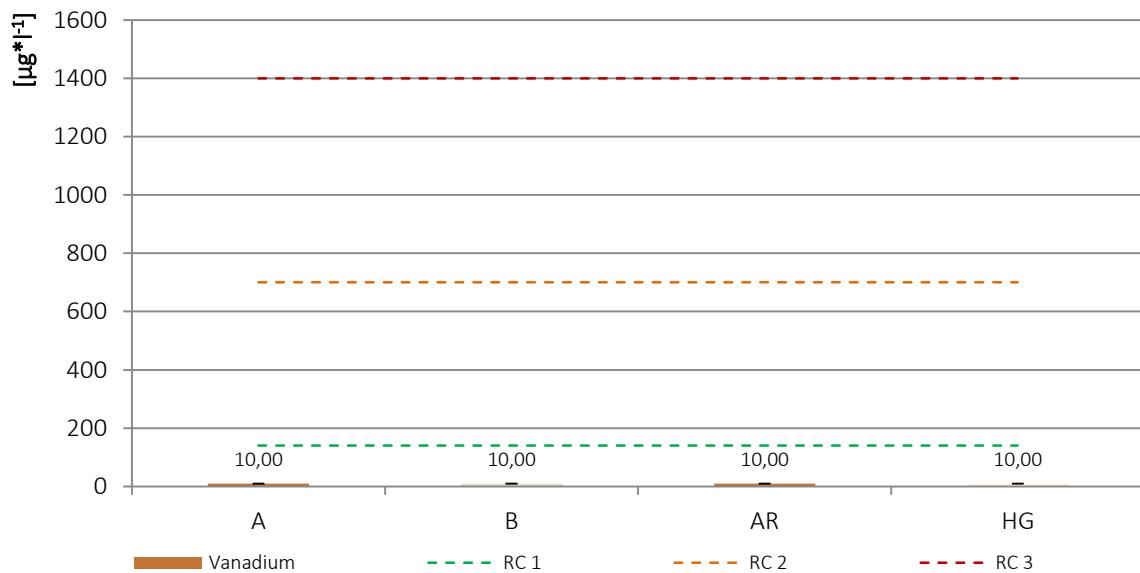


Abbildung 113: Vanadium-Gehalt der Fraktion < 50 mm unter Berücksichtigung der jeweiligen Abfalleinstufung

Zusammenfassend ergibt sich, dass sowohl die Abdeck- als auch die Abraumschicht Materialien beinhalten, die im Rahmen einer Rückbau zu RC 1 Recyclingbaustoffen aufbereitet werden können. Voraussetzung hierfür ist, dass eine klare Trennung der Schichtgrenzen während der Rückbauvorgangs realisiert werden kann und keine Vermischungen auftreten.

Aufgrund der Sulfat- und Kupfergehalte ist die Verwertung mineralischer Bestandteile aus Bauschutt- sowie Haushmüllbereichen ausschließlich als RC 3 Material möglich. In Ausnahmefällen hat sich sogar gezeigt, dass die Kupfergehalte sogar eine Verwertung als Ersatzbaustoff ausschließen.

In Bezug auf die bevorstehende Novellierung in diesem Bereich bzw. die gesetzliche Verankerung der Mantelverordnung ändert sich an den hier getroffenen Aussagen und den daraus resultierenden potenziellen Verwertungswegen nichts. Vielmehr fasst die Mantelverordnung ausschließlich mehrere – derzeit separat voneinander – Richtlinien zusammen, wobei die geforderten Materialeigenschaften weitestgehend übernommen werden.

## 5.9 Preisentwicklung ausgewählter Primär- und Sekundärrohstoffe

Entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Deponierückbauprojekten ist neben dem zu erwartenden Vorkommen an Rohstoffen auch deren zukünftiger Absatzpreis. Hierbei werden nachfolgend die zeitspezifischen Entwicklungen ausgewählter Industriemetalle betrachtet, die entsprechend den Potenzialanalysen in bedeutenden Mengen im Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch zu vermuten sind.

### 5.9.1 Eisenerz und Stahlschrott

Abbildung 114 zeigt für den Zeitraum Januar 2001 bis Januar 2011 die Entwicklung der monatlichen Durchschnittspreise für Eisenerz und Stahlschrott. Dabei besitzen beide abgeleiteten Trendfunktionen eine positive Steigung, was bedeutet, dass sowohl die Preise für Eisenerz als auch für Stahlschrott in Zukunft steigen werden. Für Stahlschrott kann die Preisentwicklung nach folgender Formel beschrieben werden. Der Zusammenhang ist mit  $R^2 = 53\%$  gut einzustufen.

Formel 1: Trendfunktion der Preisentwicklung von Stahlschrott

$$\text{Marktpreis}_{\text{Stahlschrott}} = 0,05 * x - 1714$$

Mit:

Marktpreis: [€\*Mg<sup>-1</sup>]

x: Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]\*

\*Ein Datum ist Excel-intern eine Ganzzahl. Die Zeitrechnung beginnt für Excel unter Windows am 00.01.1900 und erhöht sich jeden Tag um 1. Der 01.01.2000 ist somit die Zahl (bzw. der Tag) 36.526.

Die Gegenüberstellung beider Preise wird aus Abbildung 115 ersichtlich. Auch hier zeigt sich eine deutliche Korrelation. Demnach liegt der Preis für Stahlschrott etwa um das 1,5-fache höher als der Eisenerzpreis. Aktuell können für Stahlschrott Erlöse in Höhe von 250 bis 300 €\*Mg<sup>-1</sup> erzielt werden [EUWID, 2011]. Offen bleibt in diesem Zusammenhang, welche Stahlschrottqualitäten im Rahmen einer großtechnischen Aufbereitung erzielt werden können und ob sich diese positiv oder negativ auf die potenziellen Erlöse auswirken.

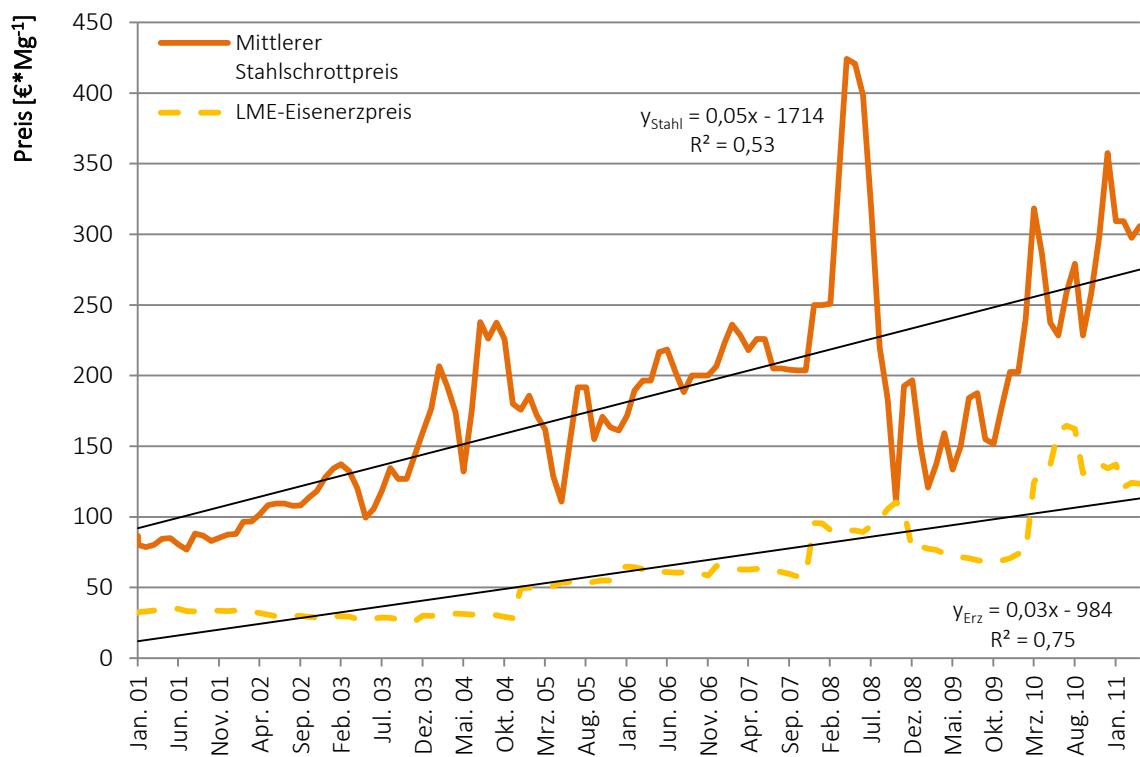


Abbildung 114: Preisentwicklung für Stahlschrott und Eisenerz im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011

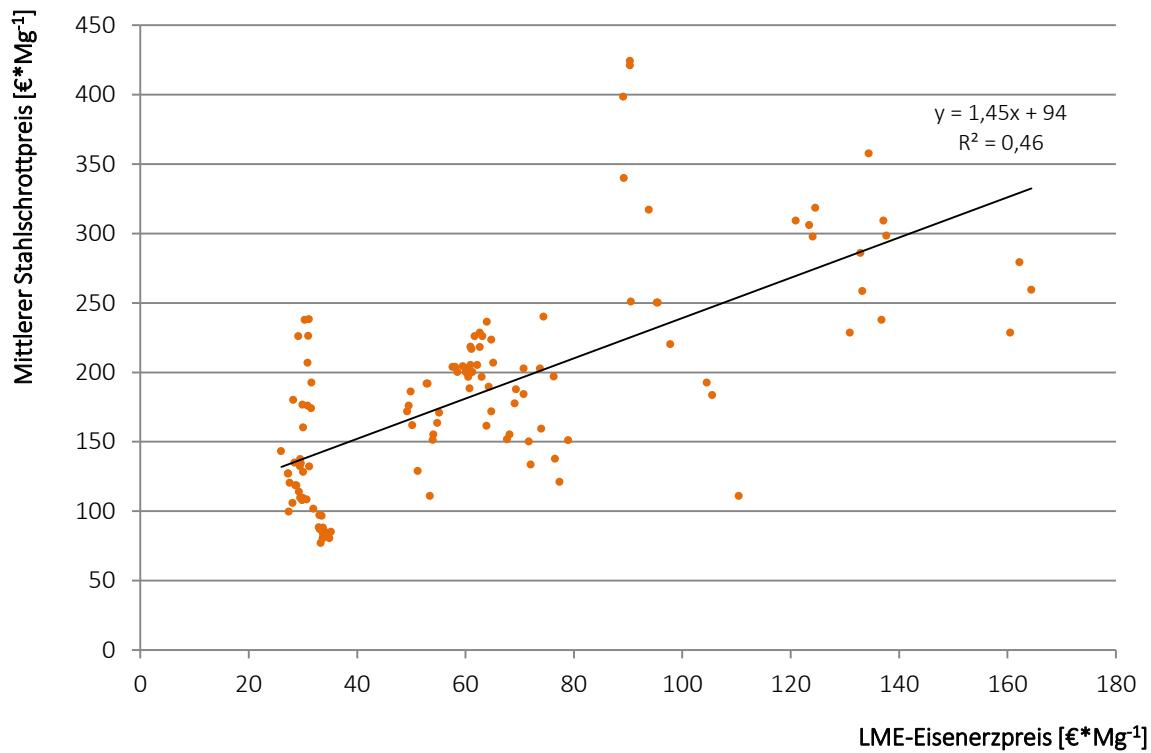


Abbildung 115: Zusammenhang des Stahlschrott- und Eisenerzpreises

### 5.9.2 Kupfer

Im Vergleich zu Stahlschrott und Eisenerz beschreiben die Preisentwicklungen für Primärkupfer und Kupferschrott mit  $R^2 = 98\%$  einen deutlich engeren Zusammenhang. Es wird ersichtlich, dass

die durchschnittlichen Preise für Kupferschrott etwa 17 % unterhalb denen des Primärrohstoffs liegen (Abbildung 117).

Wie zuvor ergibt sich aus der Betrachtung der monatlichen Durchschnittspreise für beide Trendableitungen eine deutlich positive Steigung. Für Kupferschrott bedeutet dies:

**Formel 2: Trendfunktion der Preisentwicklung von Kupferschrott**

$$\text{Marktpreis}_{\text{Kupferschrott}} = 1,12 * x - 40857$$

Mit:

Marktpreis: [€\*Mg<sup>-1</sup>]

x: Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]\*

\*Ein Datum ist Excel-intern eine Ganzzahl. Die Zeitrechnung beginnt für Excel unter Windows am 00.01.1900 und erhöht sich jeden Tag um 1. Der 01.01.2000 ist somit die Zahl (bzw. der Tag) 36.526.

Derzeit können am Markt etwa 5.000 bis 5.200 € pro Mg Leichtkupferschrott erzielt werden [EUWID, 2011].

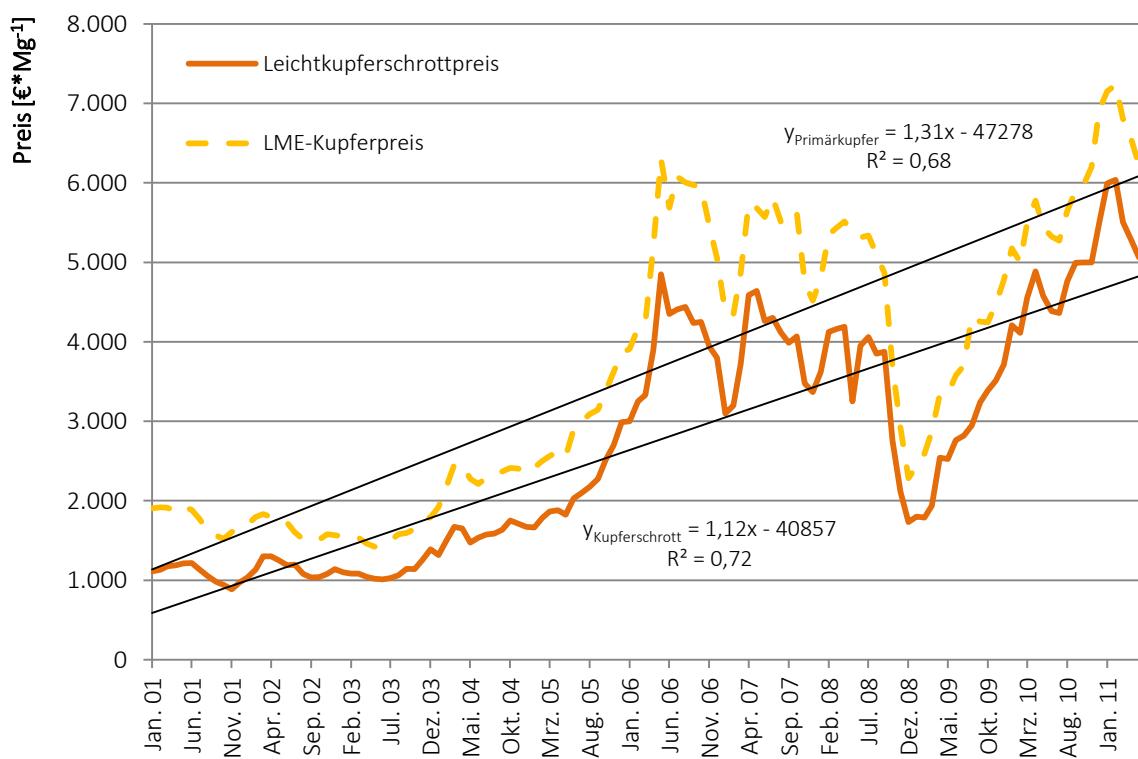


Abbildung 116: Preisentwicklung für Kupferschrott und Primärkupfer im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011

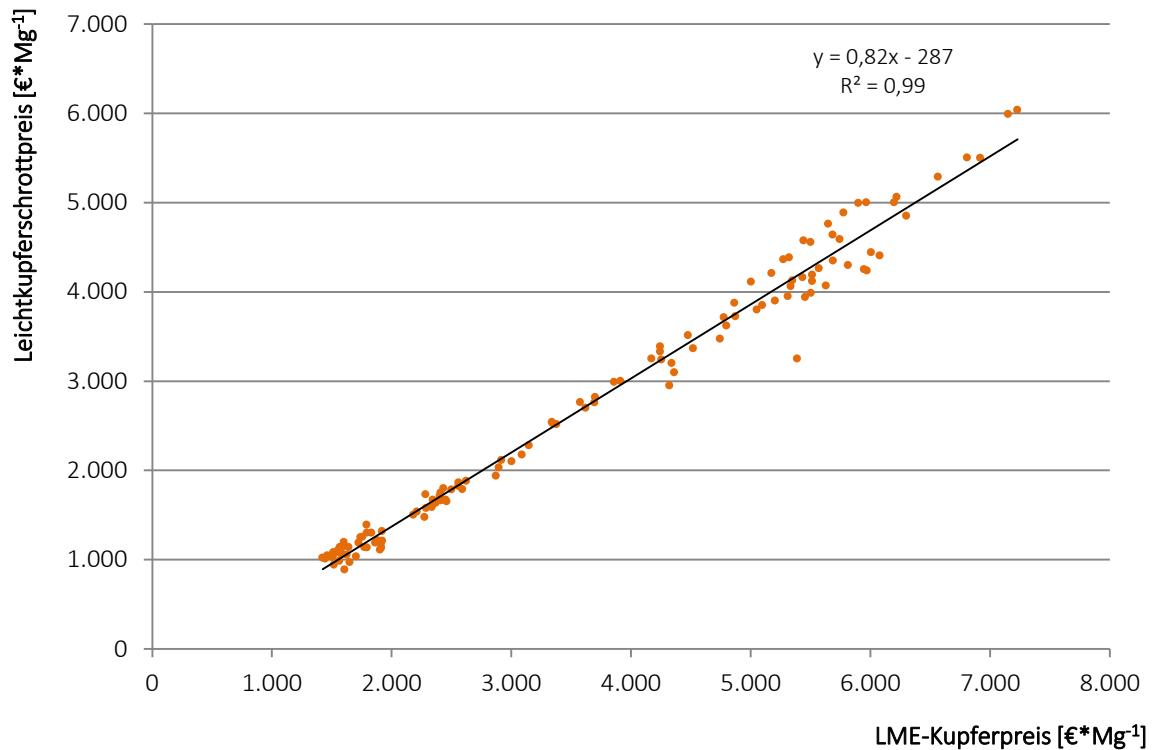


Abbildung 117: Zusammenhang des Kupferschrott- und Primärkupferpreises

### 5.9.3 Aluminium

Neben Kupfer tritt als NE-Metall in Deponien vorwiegend Aluminium auf. Die zeitliche Betrachtung der Preisentwicklung lässt hierbei keinen Trend erkennen. Dies bedeutet, dass in Zukunft mit vergleichsweise geringen Preisanstiegen und volatilen Märkten zu rechnen ist, was durch ein Steigungsmaß von 0,04 zum Ausdruck kommt (Abbildung 118).

Formel 3: Trendfunktion der Preisentwicklung von Aluminiumschrott

$$\text{Marktpreis}_{\text{Aluminiumschrott}} = 0,04 * x - 614$$

Mit:

*Marktpreis: [€\*Mg<sup>-1</sup>]*

*x: Prognosezeitpunkt [Ganzzahl]\**

\*Ein Datum ist Excel-intern eine Ganzzahl. Die Zeitrechnung beginnt für Excel unter Windows am 00.01.1900 und erhöht sich jeden Tag um 1. Der 01.01.2000 ist somit die Zahl (bzw. der Tag) 36.526.

Einen guten Zusammenhang beschreibt hingegen Abbildung 119. Demnach liegt bei einem Bestimmtheitsmaß von 79 % der Preis für Sekundäraluminium etwa um die Hälfte unter dem für Primäraluminium.

Gegenwärtige Marktuntersuchungen zeigen, dass für ein Mg Aluminiumschrott ca. 750 bis 850 € erzielt werden können.

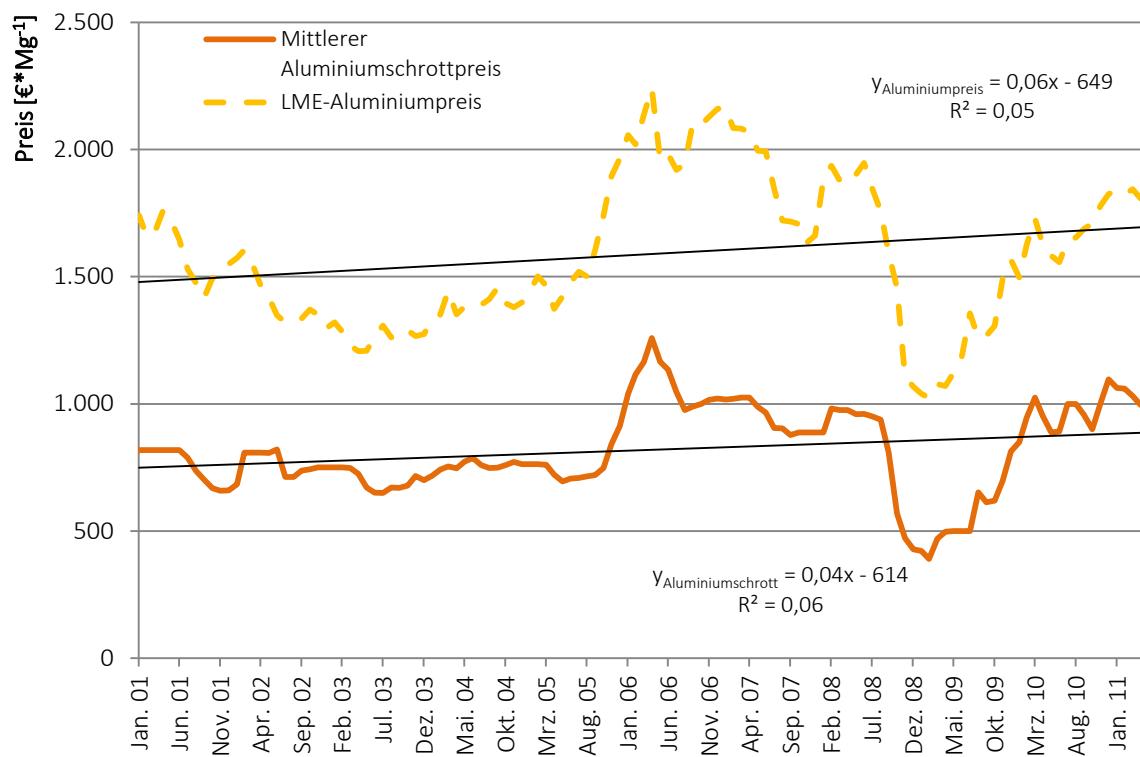


Abbildung 118: Preisentwicklung für Aluminiumschrott und Aluminium im Verlauf des Zeitraums Januar 2001 bis Januar 2011

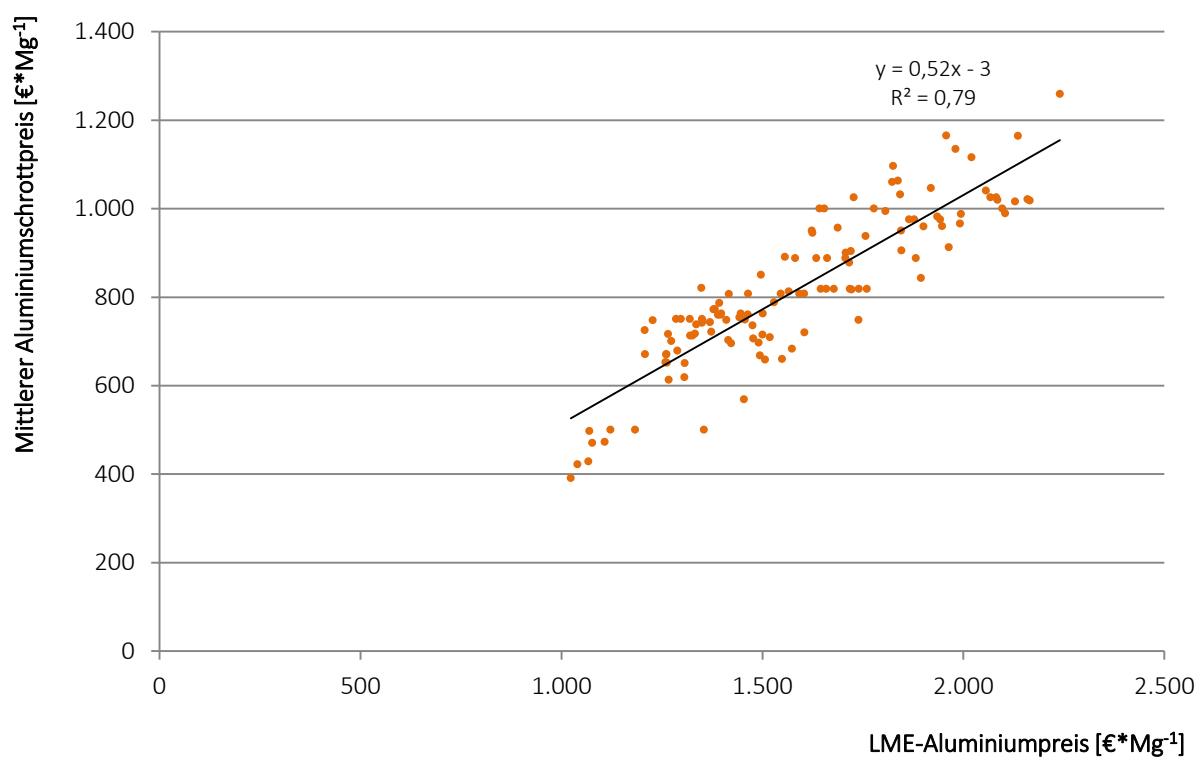


Abbildung 119: Zusammenhang des Aluminiumschrott- und Aluminiumpreises

## 5.9.4 Preisprognosen

Die Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch hängt stark von den zukünftig zu erwartenden Rohstoff- und Energiepreisen ab. In diesem Kontext belegen eigene Untersuchungen, dass für ausgewählte Wirtschaftsrohstoffe drastische Preissteigerungen zu erwarten sind. Die Abschätzung basieren dabei auf Trendexplorationen.

Ausgehend von Formel 1 bis Formel 3 lassen sich für einen Prognosezeitraum von 50 Jahren, die in Abbildung 120 aufgezeigten Preisentwicklungen ableiten.

Es wird deutlich, dass sich unter diesen Annahmen die Marktpreise für Stahlschrott in etwa 20 Jahren verdoppelt haben werden. Dies bedeutet, dass im Jahr 2030 mit Preisen von ca. 600 bis 610 €\*Mg<sup>-1</sup> zu rechnen ist. Diese liegen somit nur knapp unterhalb der aktuellen Aluminiumschrottpreise.

Der Aluminiumschrottpreis wird sich im gleichen Zeitraum ebenfalls steigern. Jedoch sind hier zuverlässige Aussagen eher kritisch zu betrachten. Die potentielle Steigerungsrate fällt demnach geringer aus, sodass im Jahr 2030 mittlere Preise von 1.100 €\*Mg<sup>-1</sup> zu erwarten sind. Im Jahr 2060 werden diese nach Annahme dieser Prognose sogar die 1.500 € Marke übersteigen.

Die drastischsten Preissteigerungen zeigen sich für Kupferschrott. Im Jahr 2030 ist mit Preisen zu rechnen, die um etwa das 2,4-fache höher liegen als aktuell. Dies bedeutet, dass für 1 Mg Kupferschrott 12.500 € erzielt werden könnten. Im Jahr 2060 wären es sogar 24.000 bis 25.000 €\*Mg<sup>-1</sup>.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Prognosedauer eine Minderung der Aussagekraft einhergeht. Dennoch bieten diese Modelle eine Abschätzung zur Einordnung der zukünftigen Preisentwicklung auf den internationalen Rohstoffmärkten und dienen daher im Weiteren als Grundlage zur Bewertung des Rohstoffpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Durch stetige Neuberechnung und Beobachtung der Roh- sowie Sekundärrohstoffmärkte sollte diesem Missstand entgegen gewirkt werden.

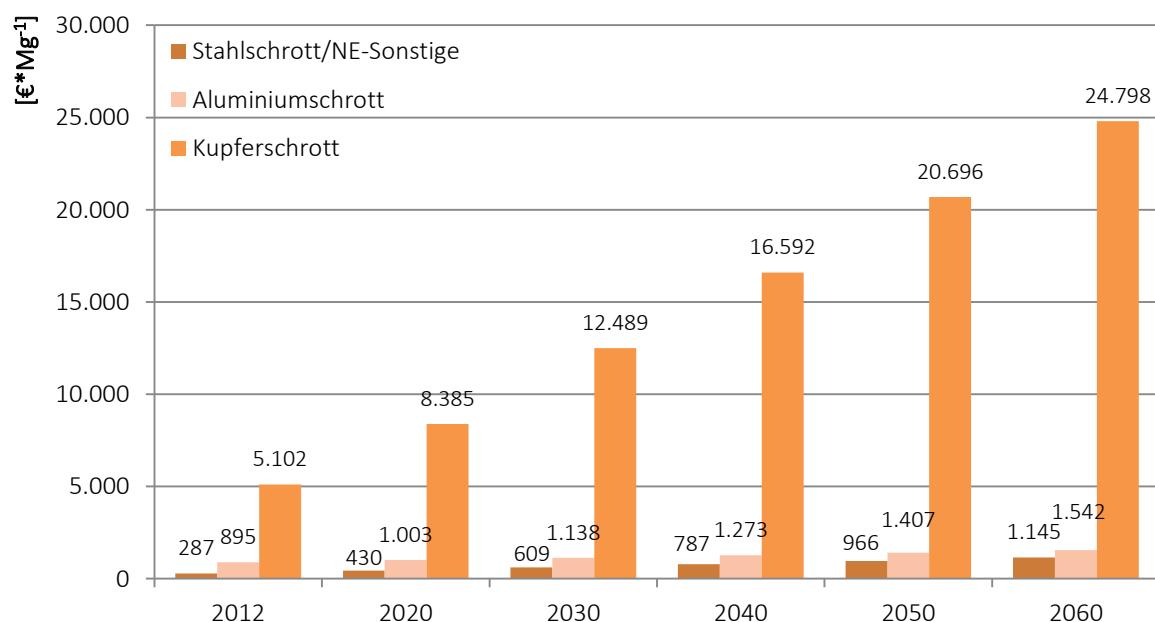


Abbildung 120: Prognostizierte Preisentwicklung für Stahl-, Aluminium- und Kupferschrott

Die Bewertung der zuvor aufgestellten Preisprognosen kann dabei über Analysen der Zusammenhänge zwischen Marktpreisen und preisbestimmenden Faktoren erfolgen. Im Rahmen dieser Studie werden hierzu das BIP (Bruttoinlandsprodukt), die Weltbevölkerung und der Erdölpreis als preisbestimmende Faktoren herangezogen.

Die nachfolgenden Abbildungen geben einen Einblick in die möglichen Preisentwicklungen und Prognosemöglichkeiten am Beispiel des Industrierohstoffs Kupfer.

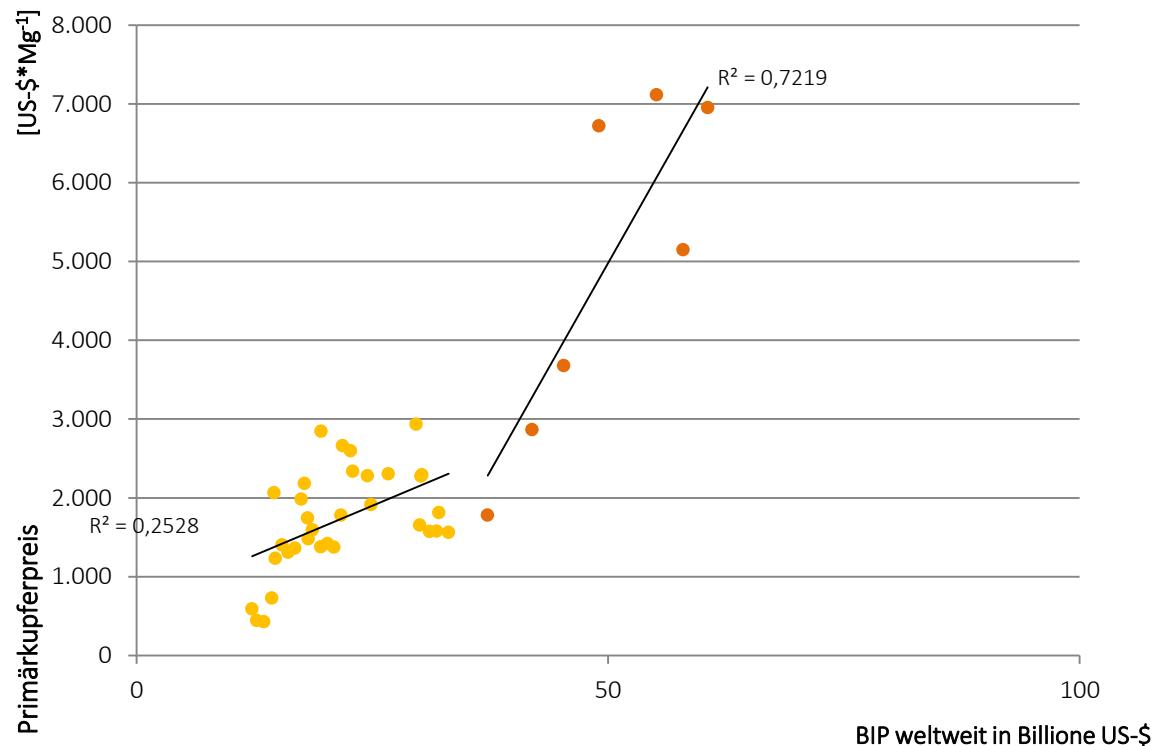


Abbildung 121: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Bruttoinlandsproduktes weltweit von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 – 2009 (orange)

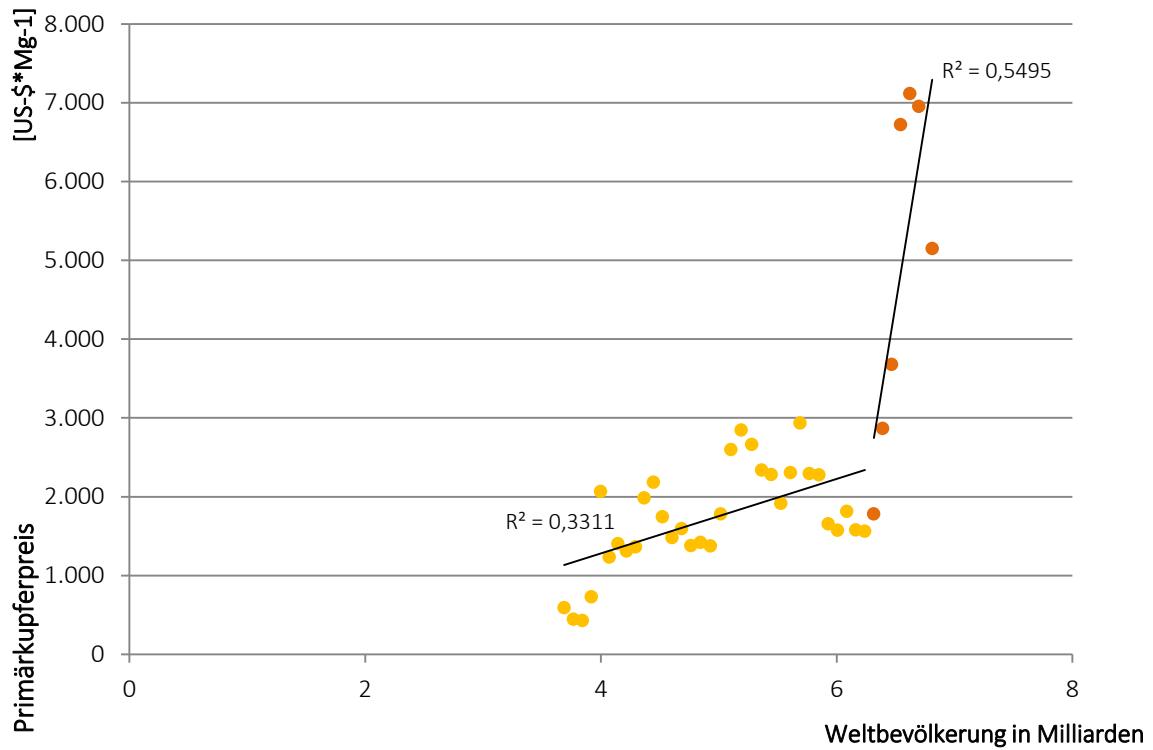


Abbildung 122: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit der Weltbevölkerung von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 – 2009 (orange)

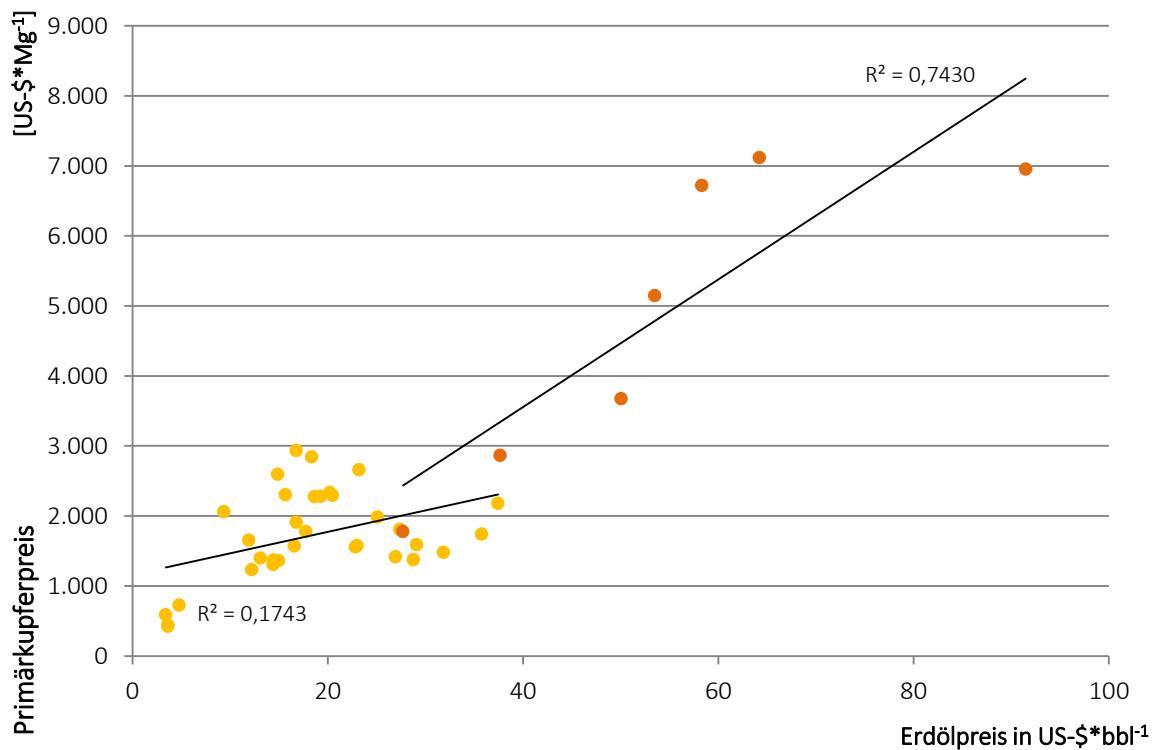


Abbildung 123: Entwicklung des Primärkupferpreises in Abhängigkeit des Erdölprixes von 1970 – 2002 (gelb) und 2003 - 2009 (orange)

Allen gezeigten Abbildungen ist gemein, dass sie eine positive Steigung für den Marktpreis von Kupfer ausweisen. Dies bedeutet, dass mit steigenden preisbestimmenden Faktoren auch eine Preissteigerung für Industrierohstoffe einhergehen wird. Wie zu erkennen ist, hat sich diese Situation für den betrachteten Zeitraum 2003 – 2009 gegenüber den vorherigen Jahren deutlich verschärft. In diesem Zusammenhang werden unter anderem von IFW [2009], INPEOS [2010], SINDING [2007], NÖTSTALLER & WAGNER [2007], DSW [2011], ECB [2004] sowie FOLLATH & JUNG [2008] zukünftig drastische Erhöhungen dieser Faktoren gesehen.

Neben den aufgezeigten Trendanalysen zeigen auch die Zusammenhänge zu preisbestimmenden Wirtschaftsfaktoren eine deutliche Zunahme zukünftiger Rohstoffpreise. Demnach kann im Rahmen der Modellierung davon ausgegangen werden, dass sich die Preise für Eisen- und Nichteisenmetalle in der beschriebenen Form entwickeln werden. Mit einem langfristigen Preisverfall ist aus aktueller Sicht keinesfalls zu rechnen.

## 5.10 Kosten und Erlöse

### 5.10.1 Metallvermarktung

Derzeit stellen die Fe- und NE-Metalle erlösbringende Wertstofffraktionen dar, deren zukünftige Preisentwicklung im Vorfeld abgeleitet wurde. Unter Einbindung der beim Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch zu erwartenden Metallmenge ergeben sich unter aktuellen Marktbedingungen Erlöse in Höhe von 56 – 65 Mio. € (Abbildung 124).

Hierbei werden die in Tabelle 26 genannten Annahmen getroffen. Die Einschätzung der Anteile an Aluminium, Kupfer und sonstigen Metallen an den NE-Metallen beruht auf Erkenntnissen, die während der Sortierungen gewonnen wurden. Für den Marktpreis der sonstigen Metalle wird in diesem Fall der modellierte Stahlschrott-preis angenommen.

Tabelle 26: Fe-Metallgehalte des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch und Charakterisierung der NE-Metalle

Fraktion		Einheit	Massenverteilung
Fe-Metalle		Mg TM	97.865
NE-Metalle		Mg TM	12.608
Gesamt		Mg TM	110.473
<b>Annahmen I*</b>			
Anteile	Al	Gew.-% TM	45
Anteile	Cu	Gew.-% TM	50
Anteile	Sonstiges	Gew.-% TM	5
Absolut	Al	Mg TM	5.674
Absolut	Cu	Mg TM	6.304
Absolut	Sonstiges	Mg TM	630
Summe		Mg TM	12.608
<b>Annahmen II*</b>			
Anteile	Al	Gew.-% TM	40
Anteile	Cu	Gew.-% TM	35
Anteile	Sonstiges	Gew.-% TM	25
Absolut	Al	Mg TM	5.043
Absolut	Cu	Mg TM	4.413
Absolut	Sonstiges	Mg TM	3.152
Summe		Mg TM	12.608

\*Die definierten Anteile an Al, Cu und sonstigen Metallen beruhen auf Untersuchungen einzelner Probenmaterialien der NE-Fraktion

Bis zum Jahr 2030 steigen die mittleren Wertschöpfungspotenziale auf ein Niveau von 109 bis 128 Mio. €. Am Ende des Betrachtungszeitraums könnten unter den genannten Randbedingungen etwa 207 bis 246 Mio. € aus der Metallverwertung gewonnen werden.

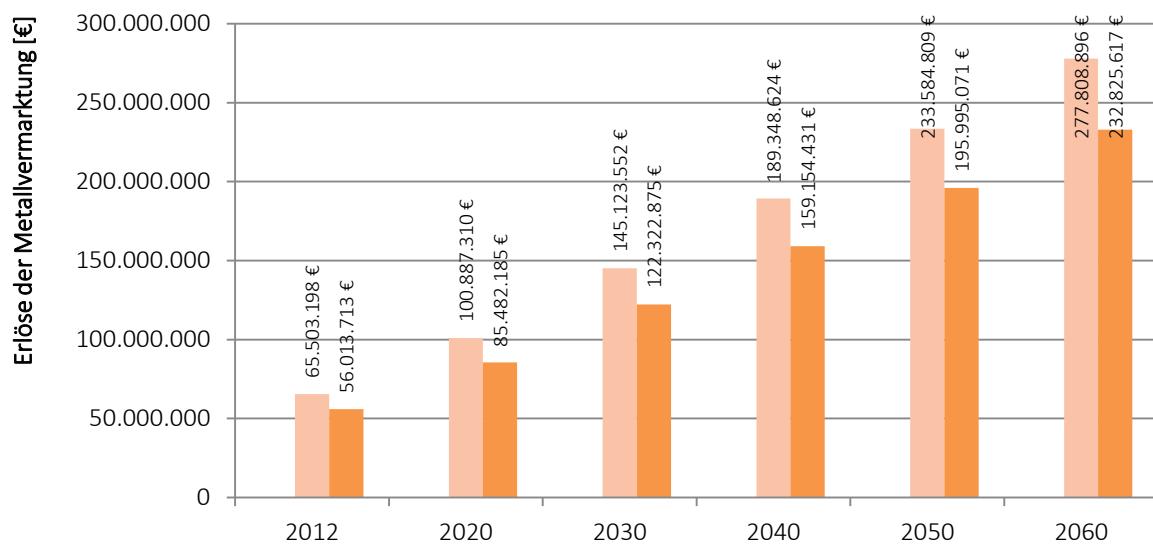


Abbildung 124: Potenzielle Wertschöpfung der Metallvermarktung

### 5.10.2 CO<sub>2</sub>- Einsparung

Durch den Einsatz sekundärer Rohstoffe können die Emissionen an klimaschädlichem CO<sub>2</sub> maßgeblich gesenkt werden. Hierzu gibt Tabelle 27 einen Überblick über spezifische Einsparpotenziale. In Abhängigkeit der jeweils eingesetzten Technik können diese Werte variieren [UMSICHT, 2008].

Tabelle 27: Spezifische CO<sub>2</sub>-Einsparung durch das Recycling einzelner Stofffraktionen

Fraktion	Mg CO <sub>2</sub> *Mg <sup>-1</sup> Input		
	von	bis	MW
Stahl	0,817	0,903	0,86
Aluminium	9,376	10,363	9,87
Kupfer	3,344	3,696	3,52
PPK	0,085	0,094	0,09
Holz	0,731	0,808	0,77
Kunststoffe	1,805	1,995	1,90

Unter Berücksichtigung der modellierten stoffspezifischen Rohstoffpotenziale ergeben sich die in Abbildung 125 aufgezeigten CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale.

Hierbei wird deutlich, dass vor allem die Fraktion der Kunststoffe einen wesentlichen Beitrag zum aktiven Klimaschutz leistet. Daneben treten das Recycling von Aluminium, Stahlschrott und Holz in den Vordergrund dieser Betrachtung. Insgesamt können durch den Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch und die Nutzung der gewonnenen Sekundärrohstoffe 0,9 bis 1,0 Mio. Mg CO<sub>2</sub> eingespart werden.

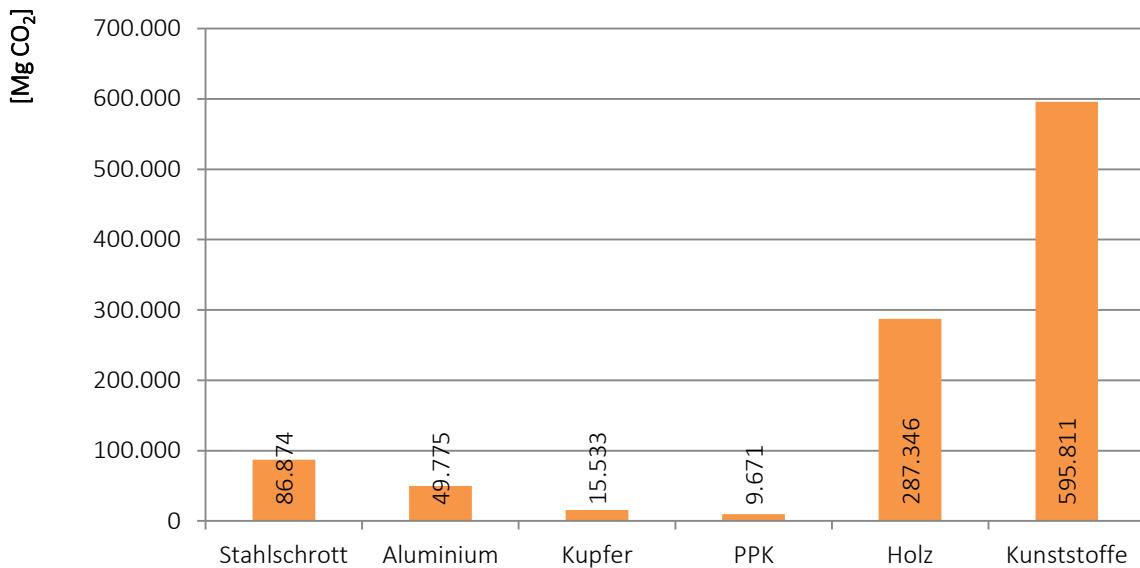


Abbildung 125: CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

### 5.10.3 Flächenrückgewinnung

Aufgrund der Tatsache, dass weiteres Deponievolumen aufgrund gesetzlicher Regelungen zukünftig immer knapper wird und die Deponie Dyckerhoffbruch an ihre Kapazitätsgrenzen stößt, ist die Nachnutzung des rückgebauten Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch von Bedeutung für eine nachhaltige Betrachtung. Ebenso sind Gewerbeblächen im Ballungsraum der Landeshauptstadt Wiesbaden ein knappes Gut.

Aus aktueller Sicht kann abgeschätzt werden, dass die Gewinnung von (Gewerbe-) Fläche ca. 100 bis 150 € pro m<sup>2</sup> erwirtschaftet.

Für den Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch bedeutet dies, dass bei einem Gesamtrückbau ein Einsparpotenzial bzw. Flächengewinn von 27,5 bis 41,3 Mio. € anzusetzen ist. Massenbezogen bedeutet dies, dass alleinig für die Bereitstellung 1,4 bis 2,0 € pro Mg Deponiegut anfallen dürften (vergl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Monetäre Bewertung des Flächengewinns des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

Potentielle Nachnutzung	Deponieabschnitt I	€*m <sup>-2</sup>		Monetärer Gewinn	
		von	bis	von	bis
Fläche	275.000 m <sup>2</sup>	100	150	27.500.000 €	41.250.000 €
Masse	19.713.374 Mg			1,39 €*Mg <sup>-1</sup>	2,09 €*Mg <sup>-1</sup>

### 5.10.4 Kosten des Rückbaus

Als Berechnungsgrundlage dienen in diesem Zusammenhang spezifische Kostenabschätzungen unterschiedlicher Entsorgungs- und Transportvorgänge, die einerseits auf Literaturangaben und andererseits auf Angaben der Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden beruhen. Die dabei definierten Stoffflüsse werden durch nachfolgende Betrachtungen verdeutlicht.

## Szenario I – „Best Case“

Im Idealfall sollte die gesamte Ablagerungsmasse des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch aufgenommen und anschließend verwertet werden. Hierbei würde aufgrund der gezeigten Zusammensetzung der Hauptanteil der gewonnenen Materialien einer mineralischen Verwertung zugeführt. Heizwertreiche Fraktionen wie bspw. Kunststoffe, Holz etc. erfüllen zudem die Anforderungen an die Verwertung als Ersatzbaustoff. Lediglich ein geringer Anteil (Sortierreste<sup>2</sup> und Schadstoffe<sup>3</sup>) muss in dieser Betrachtung einer kostenintensiven Entsorgung zugeführt werden (vergl. Abbildung 126).

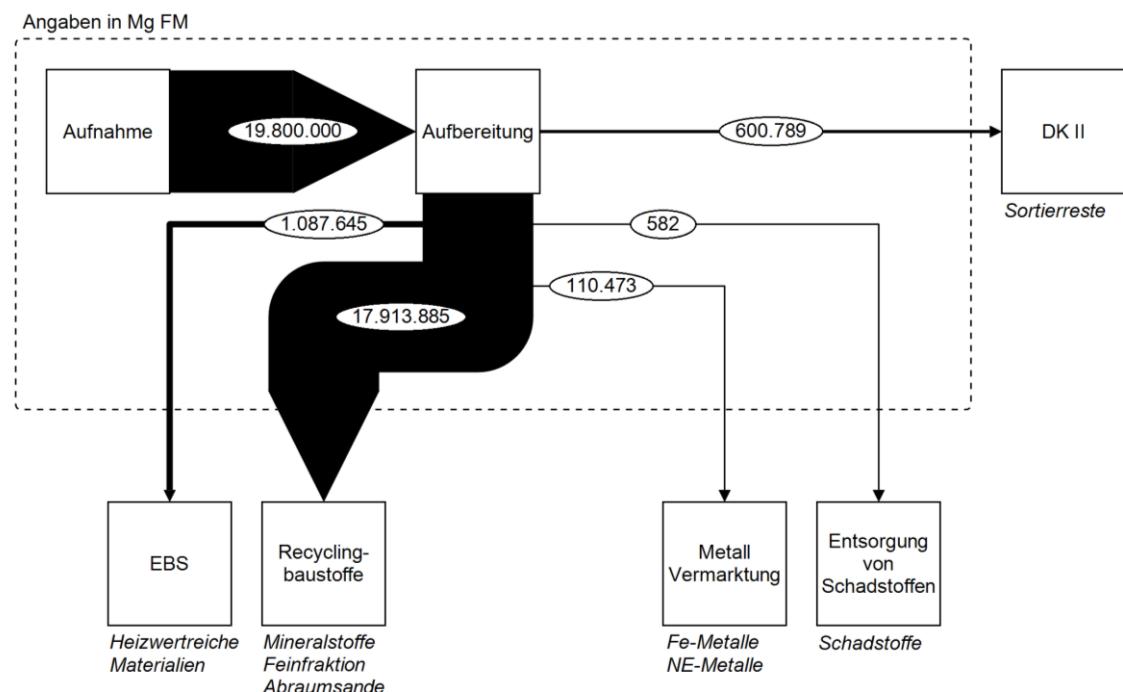


Abbildung 126: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Best Case“ Szenarios

Die Bilanzierung der erzielbaren Erlöse sowie notwendiger finanzieller Kosten wird aus nachfolgender Tabelle ersichtlich.

Tabelle 29: Erlös- und Kostenbilanzierung des „Best-Case“ Szenarios unter aktuellen Bedingungen

Aktuelle Betrachtung	Deponieabschnitt I Deponie Dyckerhoffbruch	
	Best Case (spezifisch)	Best Case (gesamt)
<b>Kosten</b>		
Aufnahme und Aufbereitung vor Ort	11,5 €/to	226.703.801 €
Deponierung (DK II)	25 €/to	15.019.735 €
Sonderabfallbehandlung	200 €/to	116.342 €
Betriebs- und Transportkosten	3 €/to	59.140.122 €
<b>Summe der Kosten</b>	<b>12 €/to</b>	<b>300.980.000 €</b>

<sup>2</sup> Den übrigen Fraktionen vor Ort nicht zuzuordnen/Stoffgemische aus mineralischen Bestandteilen, Kunststoffen etc. (ohne Gefährdungspotenzial)

<sup>3</sup> Gleichbedeutend mit Sonderabfällen wie bspw. Batterien; Akkumulatoren; Altmedikamente; Altchemikalien; Altölhaltige Materialien; Sonstige schadstoffbelastete Stoffe

Erlöse			
Erlöse der Rohstoffvermarktung (Metalle)	593 €/to	65.503.198 €	
Erlöse der Rohstoffvermarktung (EBS/RC-Baustoffe)	3 €/to	57.580.675 €	
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	100.000 €/Nachsorgejahr	10.000.000 €	
Einsparung potenzieller Sanierungskosten	98 €/m <sup>2</sup> Oberflächenabdichtung	27.500.000 €	
CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial	nicht berücksichtigt	0 €	
Grundwasser- und Umweltentlastung	nicht berücksichtigt	0 €	
<b>Summe der Erlöse</b>		<b>160.583.873 €</b>	
	<b>Bilanz</b>		<b>-140.396.127 €</b>
	<b>Benötigter Flächengewinn zur Kostendeckung</b>		<b>512 €/m<sup>2</sup></b>

Wie die Bilanzierung belegt, ist aus aktueller Sicht ein wirtschaftlicher Rückbau des Deponiekörpers I der Deponie Dyckerhoffbruch unter aktuellen Bedingungen nicht erreichbar. Selbst unter Annahme geringster Rückbaukosten und maximaler Erlöse für Metalle, Ersatzbrennstoffe und mineralische Recyclingbaustoffe ist mit einem Defizit von ca. 140 Mio. € zu rechnen.

Je m<sup>2</sup> Grundfläche (275.000 m<sup>2</sup>), die anschließend neu genutzt werden könnten, müssten demnach ca. 512 € erzielt werden.

*„Für den kostenneutralen Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ist derzeit eine finanzielle/flächenbezogene Vergütung von ca. 512 € pro m<sup>2</sup> anzusetzen.“*

### Szenario II – „Worst Case“

Nach Gesetzgebung dürfen „rückgebaute Abfälle“ nach Behandlung und Schadstoffentsorgung einer erneuten Deponierung (DK II) zugeführt werden. Entsprechend beschreibt nachfolgendes Szenario „Worst Case“ diese Option und mögliche Verwertungs-/Entsorgungspotenziale des gewonnenen Deponieguts. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass nicht der gesamte Deponiekörper rückgebaut wird. Vielmehr wird auf Basis der existierenden Infrastruktur eine Ebene - unter Berücksichtigung der notwendigen Maßnahmen - geschaffen. Diese steht anschließend als nutzbare Gewerbefläche zu Verfügung.

Insgesamt ergibt sich hieraus, dass in Abbildung 127 dargestellte Massenstrommodell sowie die in Tabelle 31 aufgezeigte Kostenstruktur des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Hierbei wird deutlich, dass überwiegende Anteile des Deponieguts einer erneuten Deponierung der Klasse II zukommen. Zudem werden „Heizwertreiche Materialien“ in einer Müllverbrennungsanlage energetisch verwertet. Recyclingbaustoffe werden im Rahmen dieser Szenariobetrachtung wesentlich durch das aufliegende Bodenmaterial zu Abdeckung des eigentlichen Deponiekörpers gebildet und stehen kostengünstig einer stofflichen Verwertung zur Verfügung.

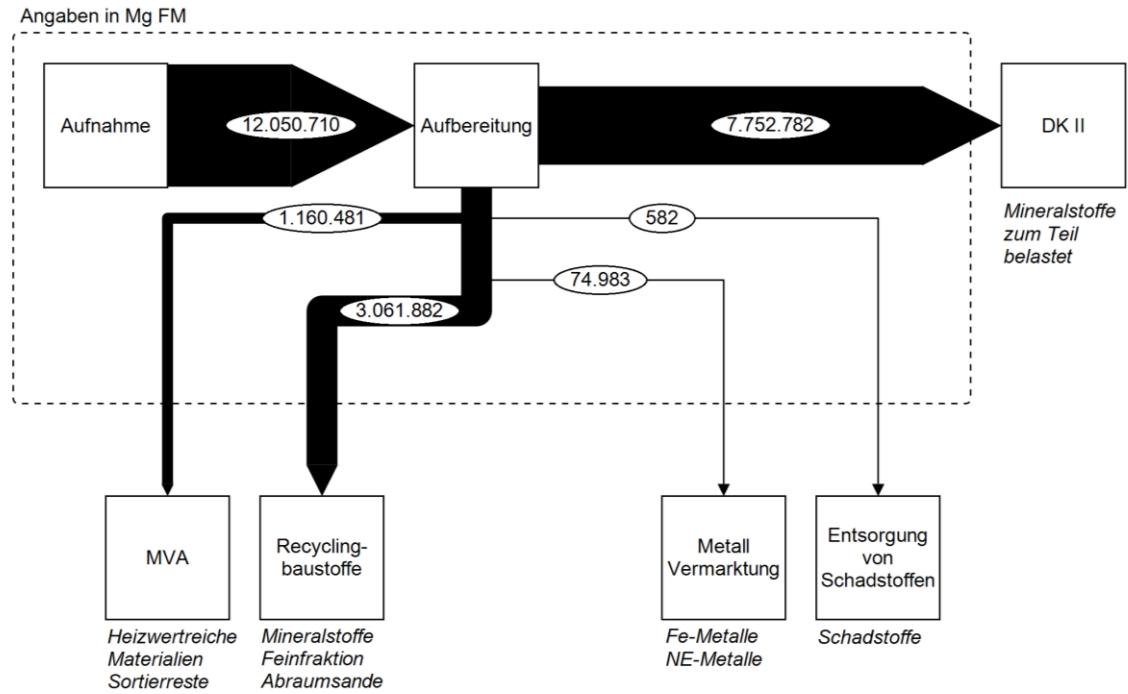


Abbildung 127: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Worst Case“ Szenarios

Tabelle 30: Erlös- und Kostenbilanzierung des „Worst-Case“ Szenarios unter aktuellen Bedingungen

Aktuelle Betrachtung	Deponieabschnitt I Deponie Dyckerhoffbruch	
	Worst Case (spezifisch)	Worst Case (gesamt)
<b>Kosten</b>		
Aufnahme und Aufbereitung vor Ort	12 €/to	144.608.520 €
Deponierung (DK II)	25 €/to	193.819.550 €
Entsorgung MVA	93 €/to	107.924.733 €
Entsorgung Inertien	2 €/to	6.123.764 €
Sonderabfallbehandlung	200 €/to	116.400 €
Betriebs- und Transportkosten	6 €/to	71.983.051 €
<b>Summe der Kosten</b>	<b>44 €/to</b>	<b>524.576.018 €</b>
<b>Erlöse</b>		
Erlöse der Rohstoffvermarktung (Metalle)	593 €*Mg <sup>-1</sup>	44.464.934 €
Erlöse der Rohstoffvermarktung (EBS/RC-Baustoffe)	In den Kosten enthalten	0 €
Entfallende Nachsorge- und Folgekosten	100.000 €*Nachsorgejahr <sup>-1</sup>	10.000.000 €
Einsparung potenzieller Sanierungskosten	98 €/m <sup>2</sup> Oberflächenabdichtung	27.500.000 €
CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial	nicht berücksichtigt	0 €
Grundwasser- und Umweltentlastung	nicht berücksichtigt	0 €
<b>Summe der Erlöse</b>		<b>81.964.934 €</b>
	<b>Bilanz</b>	<b>-442.611.084 €</b>
	Benötigter Flächengewinn (bei 275.000 m <sup>2</sup> )	1.610 €/m <sup>2</sup>

Entsprechend negativ ist die Bilanzierung dieser Betrachtung zu bewerten. Ein Defizit von nahezu 443 Mio. € wäre die potenziell mögliche Folge des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Dies entspricht einem spezifischen Flächenwert von etwa 1.610 €/m<sup>2</sup>.

*„Ein finanziell wirtschaftlicher Rückbau rückt auf Grundlage dieser Bilanzierung in weite Ferne.“*

### 5.10.5 Kosten der Nachsorge

Die mittleren Kosten der Deponienachsorge des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch können nach Angaben des Betreibers und unter aktuellen Bedingungen auf ca. 10 Mio. € geschätzt werden.

Zusätzlich sind potenzielle Sanierungskosten (bspw. für die Errichtung einer Oberflächenabdichtung) in Höhe von ca. 27 Mio. € zu berücksichtigen.

Die aktuell geschätzten Gesamtkosten können somit auf etwa 37 Mio. € beziffert werden. Für den zeitlichen Verlauf wird ein linearer Rückgang der Nachsorgekosten angenommen. Dies bedeutet, dass nach einer Entlassung aus einer 100-Jahre andauernden Nachsorgephase keine Kosten mehr anfallen. Zudem wird definiert, dass für die Entlassung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch zu jedem Zeitpunkt die Errichtung einer Oberflächenabdichtung gefordert werden könnte. Die daraus resultierende Kostenstruktur wird aus nachfolgender Abbildung deutlich. Folgender Zusammenhang wird zugrunde gelegt:

Formel 4: Kostenentwicklung der Nachsorgephase bei Annahme eines linearen Rückgangs und einer Nachsorgedauer von 100 Jahren

$$Kosten_t = Kosten_{2013} * \left(1 - \frac{(t - 2013)}{Z}\right) + Kosten_s$$

Mit:

Kosten:	Nachsorgekosten zum Zeitpunkt t [€]
Kosten <sub>2013</sub> :	Aktuelle Nachsorgekosten
Kosten <sub>s</sub> :	Fixkosten der Sanierung
Z:	Betrachtungszeitraum (100 Jahre)
t:	Betrachtungszeitpunkt [Jahre]

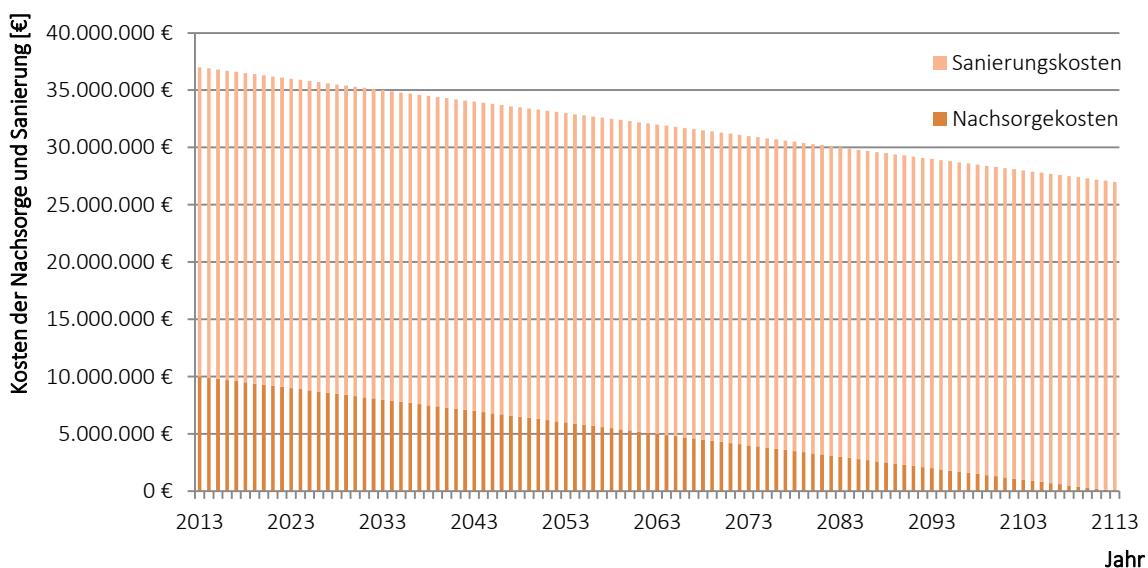


Abbildung 128: Nachsorgekosten des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch unter Berücksichtigung einer 100 Jahre andauernden Nachsorgephase und linearem Kostenrückgang

Für den im Rahmen der Erlösabschätzung definierten Zeitraum von 50 Jahren ergeben sich die aus Abbildung 129 hervorgehenden Kosteneinsparungen durch den Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.

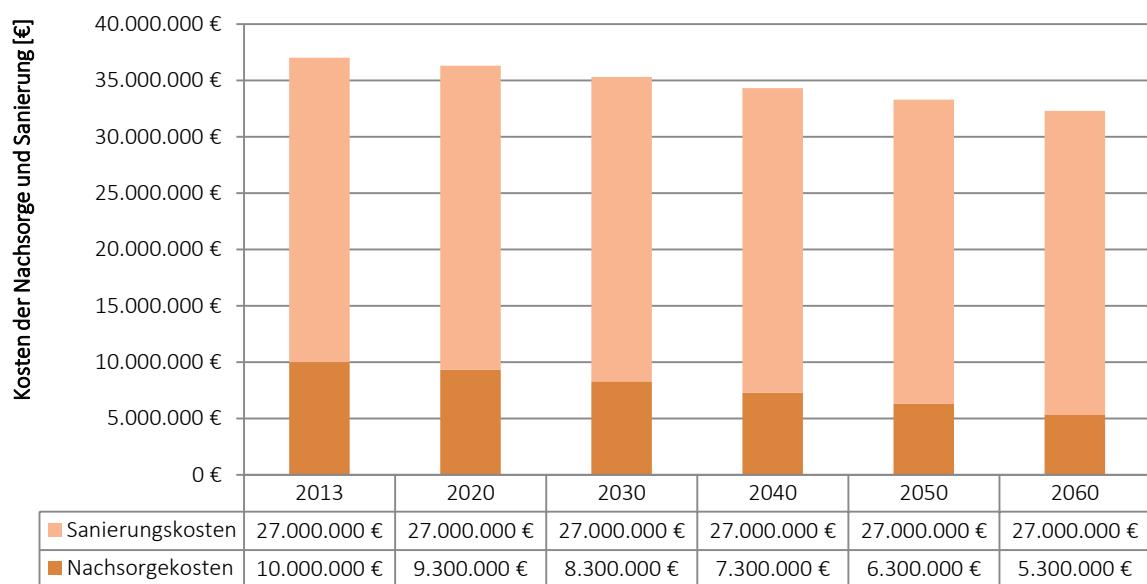


Abbildung 129: Kosten der Nachsorge und Sanierung im Rahmen der Erlösbetrachtung

## 6 Ganzheitliche Bewertung

Die Bewertung der Effizienz des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ergibt sich aus folgenden Faktoren:

- Anfallende Rückbau- und Aufbereitungskosten
- Erlöse der Rohstoffvermarktung
- Entfallende Nachsorge- und Folgekosten
- Flächengewinn und potenzielle Nachnutzung
- Einsparung potenzieller Sanierungskosten
- CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial
- Grundwasser- und Umweltentlastung

### 6.1 Rückbau oder Nachsorge – aktuell

Einen Eindruck zur Fragestellung „Rückbau oder Nachsorge unter aktuellen Rahmenbedingungen?“ gibt Tabelle 31. Es wird deutlich, dass derzeit ein Rückbau des Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch aus wirtschaftlicher Sicht selbst unter besten Bedingungen unwahrscheinlich erscheint. Hierbei ist das Risiko eines Verlustgeschäfts hoch einzuschätzen.

Insgesamt bleibt zu berücksichtigen, dass bereits kleine Änderungen an den spezifischen Kosten- und Erlösfunktionen große Auswirkungen auf die Gesamtkalkulation haben. Neben der Preisentwicklung sekundärer Rohstoffe (in dieser Betrachtung ausschließlich Metalle betrachtet) ist vor allem die zukünftige Entwicklung auf dem Energie- sowie Ersatzbaustoffmarkt ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus.

Praxisnahe Angaben zum technischen Einsatz der Deponiegutaufbereitung sowie daraus resultierende Kosten und Entwicklungspotenziale existieren derzeit nur bedingt, worin dringender Forschungsbedarf zu sehen ist.

Die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch wird maßgeblich durch die monetäre Bewertung des Flächengewinns geprägt. Hierbei wird im Rahmen der gezeigten Betrachtung ausschließlich eine Nachnutzung als erneute Gewerbefläche betrachtet.

Tabelle 31: Bilanzierung der aufgestellten Kosten und Erlöse des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

2013		Deponieabschnitt I	
		Best Case	Worst Case
Aktuelle Betrachtung			
Kosten			
Kosten des Deponierückbaus		300.980.000 €	524.576.018 €
Erlöse			
Erlöse des Deponierückbaus		160.583.873 €	81.964.934 €
	Kostendeckung [%]	53 %	16 %
	Bilanz	-140.396.127 €	-442.611.084 €
Benötigter Flächengewinn		+ 512 €*m <sup>-2</sup>	+ 1.610 €*m <sup>-2</sup>

## 6.2 Rückbau oder Nachsorge – zukünftig

Ausgehend von den prognostizierten Preissteigerungen auf den Sekundärrohstoffmärkten, gleichbleibenden Rückbaukosten und einer Minderung der Nachsorge- sowie Folgekosten ergeben sich die in nachfolgenden Abbildungen dargestellten Bilanzierungsmodelle. Preisänderungen für sekundäre Brennstoffe aus Abfall werden in diesem Kontext nicht wie zuvor definiert betrachtet. Gleiches gilt für die Verwertung/Entsorgung von mineralischen Baustoffen bzw. RC-Materialien. Demnach resultiert die positive Bilanz ausschließlich auf den zu erwarteten Preisentwicklungen auf dem Sekundärrohstoffmarkt für Altmetalle.

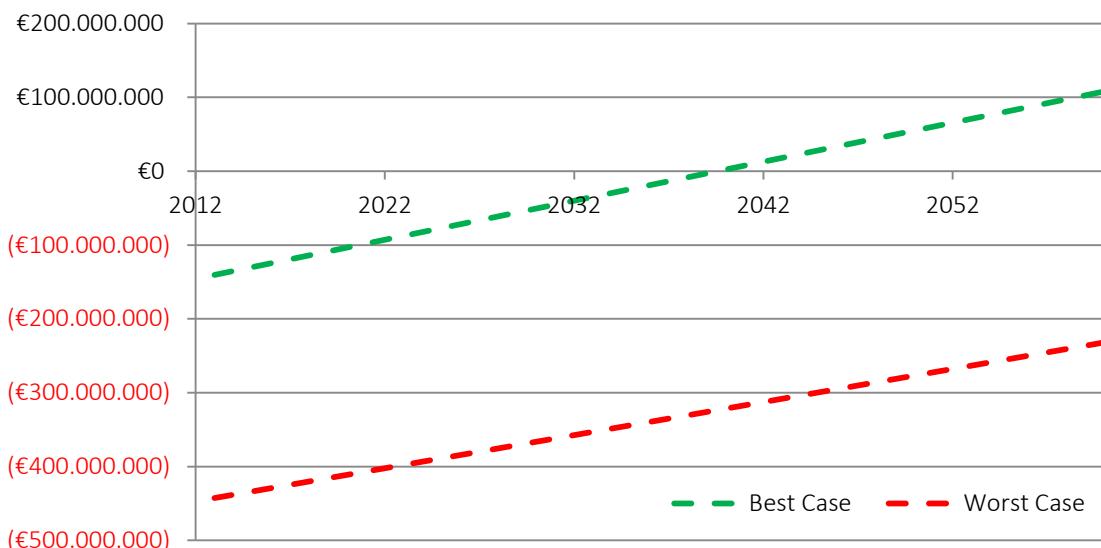


Abbildung 130: Kosten und Erlöse des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Abhängigkeit des Rückbauzeitpunkts | Gesamtbeurteilung

Wie sich aus den zusammenfassenden Abbildung 130 und 130 ergibt, ist unter den definierten Randbedingungen der Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch unter idealen Bedingungen erst in 20 – 25 Jahren wirtschaftlich sinnvoll.

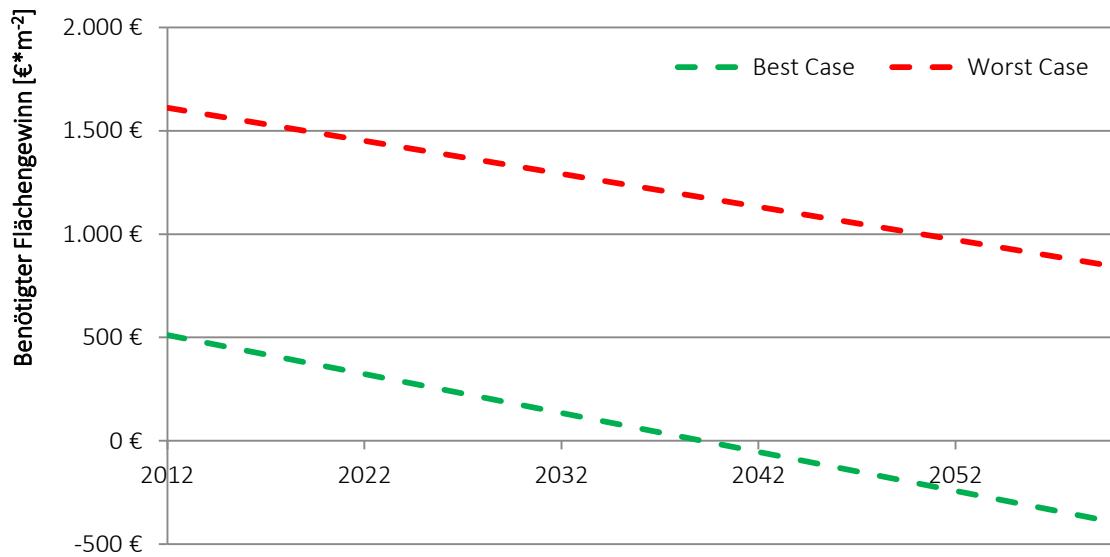


Abbildung 131: Benötigter Flächengewinn zum kostenneutralen Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch

Neben der aktuellen Situation spielen Entwicklungen auf den nationalen und internationalen Rohstoffmärkten für Energie und mineralische sowie metallische Ressourcen eine wesentliche Rolle für die Rückbaufähigkeit einer ehemaligen Deponie. Wie jedoch ebenfalls aufgezeigt wird, ist dies mit einem hohen Risiko verbunden, da die Spannweite zwischen Kosten und Erlösen sehr hoch ist.

Entsprechend den zuvor genannten Untersuchungsergebnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die Nachnutzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch:

- Geringes Gefährdungspotenzial für Umwelt und Grundwasser
- Geringes Rohstoffpotenzial im Sinne heute wirtschaftlicher Materialien (bspw. Metalle, Kunststoffe etc.)
- Hohes Potenzial an mineralischen Baustoffen, die als RC-Materialien dienen könnten
- Hohes Potenzial zur Folgenutzung der gewonnenen Gewerbefläche

## **7 Abschließende Diskussion und Fazit**

---

Das Thema landfill mining rückt aufgrund aktueller Entwicklungen immer stärker in den Fokus von Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit. Schätzungen auf Basis von Literaturdaten kommen in diesem Zusammenhang auf Größenordnungen, dass in deutschen Deponien etwa 2,5 Mrd. Mg an Siedlungsabfällen, Gewerbeabfall und Bauschutt lagern. Hierin vermutet werden 178 Mio. Mg Kunststoffe, 97 Mio. Mg Glas, 83 Mio. Mg Fe-Metalle und 13 Mio. Mg NE-Metalle, die dementsprechend Anteile von ca. 7,1 Gew.-%, 3,9 Gew.-%, 3,2 Gew.-% und 0,5 Gew.-% ausmachen [MOCKER ET AL, 2009A].

Ähnliche Untersuchungen von RETTENBERGER [2009] lassen erkennen, dass alleine über Haus- und Gewerbeabfälle (gesamt 750 Mio. Mg) ca. 26. Mio. Mg Fe-Metalle (ca. 3,5 Gew.-%), 850.000 Mg Kupfer (ca. 0,11 Gew.-%) und 500 Mg Aluminium (ca. 0,09 Gew.-%) auf deutschen Deponien abgelagert wurden.

Das reale Ressourcenpotenzial beschreibt die im Rahmen von Sortieranalysen ermittelte Zusammensetzung eines Deponiekörpers. Die in der Literatur bekannten und dokumentieren Ergebnisse wesentlicher landfill mining Projekte sowie deren Einordnung in Bezug auf die Erkenntnisse des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch werden aus Abbildung 132 deutlich.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund unterschiedlicher Methodiken und Fragestellungen der Analysen nur ein Teil der im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffenen Stofffraktionen betrachtet werden kann. Soweit vorhanden, wurde versucht Metalle in Fe- und NE-Metalle zu gliedern.

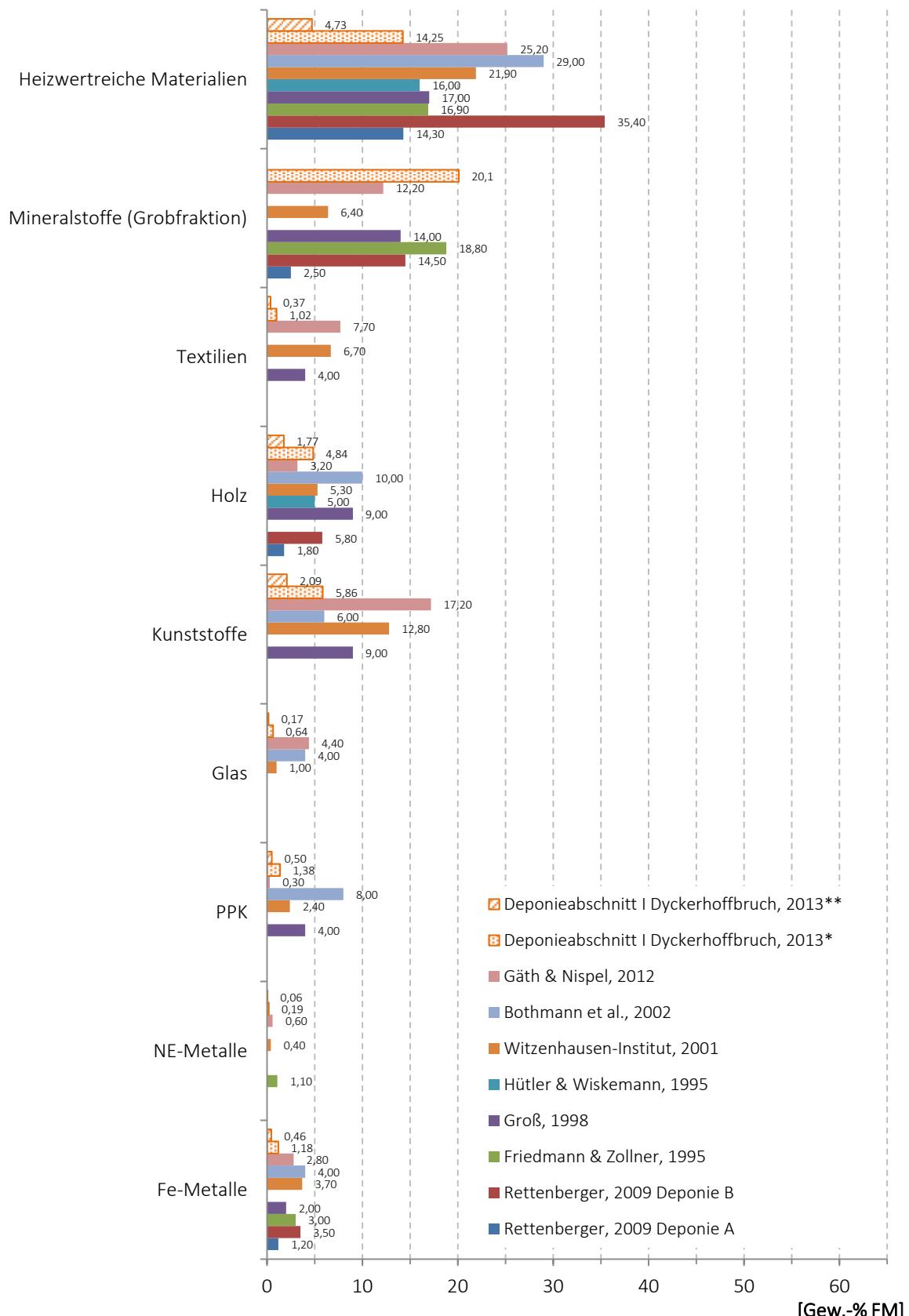


Abbildung 132: Vergleichende Darstellung des realen Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch mit Ergebnissen ähnlicher Vorhaben bzw. stattgefunder Rückbauprojekte

\* Mittlere Zusammensetzung des untersuchten Deponieguts

\*\* Hochrechnung unter Berücksichtigung der abgelagerten Abfallarten und der jeweils damit verbundenen Mengen

Der Gehalt an Metallen im Deponiekörper schwankt nach Angaben der Literatur zwischen 1,2 und 4,1 Gew.-% der FM. Im Mittel konnten im Deponiekörper des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ca. 1,4 Gew.-% FM Metalle vorgefunden werden. Dieser Wert ähnelt den Angaben von RETTENBERGER [2009 DEPONIE A], wobei die Ursache in einer ähnlichen Abfallartenzusammensetzung und -ablagerung gesehen werden könnte. Wie der Deponieabschnitt I bzw. wie die untersuchten Deponiebereiche besitzt auch Deponie A einen Siedlungsabfallanteil von rund 30 Gew.-% FM.

In Bezug auf den gesamten Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ist mit einem deutlich geringeren Metallgehalt zu rechnen. Dieser ergibt sich daraus, dass die Abraumschicht ein hohes Mengenpotenzial bei gleichzeitig sehr geringen Metallkonzentrationen aufzeigt. Bei einem Gesamtrückbau sind Metallgehalte in einer Größenordnung von rund 0,5 Gew.-% FM zu erwarten. Diese liegen somit weit unterhalb der bisher bekannten Literaturwerte.

Untersuchungen zum Anteil an NE-Metallen liegen nur sehr begrenzt vor. Der Vergleich zu FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] und einer Deponie im Westerwaldkreis [WITZENHAUSEN – INSTITUT, 2001] lässt vermuten, dass diese im Deponiekörper zu 0,5 bis 1,0 Gew.-% der FM auftreten. Für Abfallbereiche des Deponieabschnitts I ist im Durchschnitt mit 0,2 Gew.-% FM zu rechnen. Unter Berücksichtigung der Gesamttablagerungsmasse reduziert sich dieser auf lediglich 0,06 Gew.-% FM.

Die PPK-Gehalte des Deponieabschnitts I liegen bei weitem nicht in der Größenordnung der aufgeführten Untersuchungen. Als Grund hierfür können die zum Teil stark feuchten Milieubedingungen angenommen werden. Hierdurch ist der Abbau von PPK bereits weit fortgeschritten. Es ist zu vermuten, dass - sollten im Rahmen eines Rückbaus trockene Deponiebereiche angetroffen werden - der PPK-Anteil entsprechend höher ausfallen wird. Untersuchungen von FRIEDMANN & ZOLLNER [1995] sowie die eigenen Erfahrungen während den Sortieruntersuchungen zeigen, dass 30 Jahre alte Zeitungen gut erhalten und lesbar waren.

Rückstände von Glas sind nach Angaben der Literatur im Bereich von 1 – 5 Gew.-% FM in Deponien vorzufinden. Auch hier zeigt sich für den Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ein vergleichsweise geringes Potenzial, dass mit 0,64 bzw. 0,17 Gew.-% FM zu beziffern ist.

Der Gehalt an heizwertreichen Kunststoffen des Deponieabschnitts I ist im Vergleich zu anderen Untersuchungen eher im unteren Bereich angesiedelt. Mit ca. 5,9 Gew.-% FM sind diese mit der Untersuchung von Bothmann et al. (2002) vergleichbar. Dieser Wert resultiert nach Bothmann et al. [2002] aus der Tatsache, dass auf der untersuchten Deponie überwiegend inerte Materialien abgelagert wurden, was ebenfalls für den Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch zutrifft.

Für durchschnittliche Hausmülldeponien erscheinen daher Kunststoffanteile von 13,0 – 17,0 Gew.-% FM denkbar.

Für die Stofffraktion Holz zeigt sich, dass sich das Potenzial des Deponieabschnitts I weitestgehend mit den Ergebnissen der anderen Untersuchungen deckt. Unter Berücksichtigung des Gesamtrückbaus (Szenario Deponieabschnitt I Dyckerhoffbruch\*\*) ergeben sich erneut Parallelen zur Untersuchung von Rettenberger (2009) Deponie A. Demnach ist mit Holzanteilen von 1,8 Gew.-% FM zu rechnen.

Untersuchungen zum Anteil von Textilien im Deponiegut liegen nur begrenzt vor. Zumeist werden diese im Summenparameter „heizwertreiche Fraktion“ miterfasst. Die hier aufgezeigte Spannweite liegt jedoch weit über den Gehalten des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Demnach ist der Textilanteil in einer Größenordnung von 1,0 bzw. 0,4 Gew.-% der FM zu bemessen.

Mit Ausnahme der Ergebnisse von RETTENBERGER [2009 DEPONIE A] und WITZENHAUSEN – INSTITUT [2001] ist der Anteil an Mineralstoffen als relativ konstant anzusehen. Diese schwanken dabei von 12,2 bis 18,8 Gew.-% FM. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei ausschließlich um die jeweils untersuchte Grobfraktion handelt. Ein direkter Vergleich ist somit nicht möglich. Dennoch fällt auf, dass in Bezug auf die Grobfraktion der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ein vergleichsweise hohes Potenzial aufweist.

Aufgrund der Tatsache, dass einige Untersuchungen PPK, Kunststoffe, Textilien etc. gemeinsam erfassen, ist eine erneute Betrachtung dieser Stoffe in Summe erforderlich.

Der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ist mit durchschnittlich 14,3 Gew.-% FM wiederum den Untersuchungen nach Rettenberger (2009) Deponie A sehr nahe. Im Fall der Deponie A resultiert der verhältnismäßig geringe Anteil dieser Stofffraktionen aus einem dort abgelagerten großen Anteil an Gießereisanden und Gewerbeabfällen.

Trotz der Tatsache, dass Deponien von räumlichen, zeitlichen sowie gesellschaftlichen Entwicklungen geprägt sind, stellen diese Haufwerke unterschiedlicher Zusammensetzung und unterschiedlichen Alters ein zu erschließendes Potenzial dar [YOKOYAMA ET AL., 2006; WIEMER ET AL., 2009].

Wie gezeigt, variiert hierbei die Potenziale einzelner Stofffraktionen stark, sodass derzeit noch keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden können.

Es wird aber auch deutlich, dass Deponien, die einen ähnlichen Charakter (z.B. Anteile der abgelagerten Abfallarten, Alter etc.) haben, Parallelen erkennen lassen.

In diesem Zusammenhang wird die Zukunft zeigen, ob es möglich sein wird, gewonnene Ergebnisse auf andere vergleichbare Deponien zu übertragen. Auch wenn WIEMER ET AL. [2009] dies nicht für möglich hält, bieten stetig wachsende und neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet eine Möglichkeit hierzu.

## 7.1 Rückbau oder Nachsorge

Alle im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Kosten-/Nutzenszenarien des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch belegen, dass ein nutzeneffizienter Rückbau innerhalb der kommenden 50 Jahre eher unwahrscheinlich ist. Dabei tragen zwar die steigende Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen und Energie, technische Weiterentwicklungen der Recyclingbranche sowie sinkende Kosten der Reststoffentsorgung zu einer Verbesserung der Situation bei, jedoch kompensieren sie nur bedingt die zu erwartenden Kosten. Zudem ist deren Einfluss nur bedingt abschätzbar.

FAULSTICH ET AL. [2010] und FRICKE [2009] sehen diese Situation ähnlich. „Da die Rückgewinnung der in den Deponien lagernden Rohstoffe nur im Zuge technisch und logistisch aufwendiger Deponierückbauprojekte möglich ist, ist die Wirtschaftlichkeit derartiger Vorhaben entscheidend an das Preisniveau der entsprechenden Rohstoffe auf dem Weltmarkt gebunden. Kommt es bei entsprechender Wirtschaftsbelebung jedoch wieder zu einer spürbaren Rohstoffverknappung mit entsprechenden Preisausschlägen an den internationalen Rohstoffmärkten, so werden auch diese Potenziale an Bedeutung gewinnen“ [FAULSTICH ET AL., 2010]. Es ist stetig zu beobachten in welche Entwicklung die einzelnen Trends laufen.

Die in der Literatur beschriebenen Einzelprojekte des landfill minings zeigen mit wenigen Ausnahmen positive Ergebnisse hinsichtlich des Kosten-/Nutzenverhältnisses auf, sodass mittlerweile auch verstärkt Privatunternehmen das Ressourcenpotenzial von Deponien erkennen [van der Zee et al., 2004]. Bei diesen Einzelprojekten handelt es sich in den meisten Fällen um typische Hausmülldeponien, die überwiegend durch Abfälle aus den privaten Haushalten sowie

aus der Produktion stammen. Entsprechend hoch ist das Potenzial an Metallen, Kunststoffen etc. einzustufen.

Der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch nimmt hier eine Sonderstellung ein, da weite Bereiche ausschließlich durch mineralische Materialien (Aбраumsande) geprägt sind. Zusätzlich ist der Anteil an Bauschutt im Vergleich zu anderen Deponien erhöht.

Eine Ursache für die geringen Metallanteile kann darin gesehen werden, dass die Abfälle vor ihrer Ablagerung in den meisten Fällen über eine Zerkleinerungsanlage geführt wurden, die gleichzeitig Fe-Metalle abtrennte.

Entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ist aus aktueller Sicht die monetäre Bewertung der rückgewonnenen Fläche bzw. des rückgewonnenen Volumens.

Deponierückbau hat dennoch Zukunft, wenn sich herausstellt, dass die Nachsorge der mit unbehandelten Abfällen gefüllten Deponien länger dauert und teurer wird als ursprünglich erwartet war. Insbesondere Deponien mit hohen Nachsorgekosten und vermutet hohem Rohstoffpotenzial bieten sich besonders für eine Rückbaumaßnahme an. Sollten dann noch, mit schwindenden Müllmengen, Überkapazitäten in thermischen Anlagen existieren, können rückgebaute Abfälle zur Auslastung dieser beitragen [BOTHMANN ET AL., 2002].

In Hinblick auf die Rückgewinnung von Sekundärmetallen aus Deponien spielt die Wertschätzung bzw. der Marktpreis eine entscheidende Rolle. Studien prognostizieren auf Basis einer rasant steigenden Weltbevölkerung und unter Beachtung von stetiger Exploration sowie technischem Fortschritt eine Verschärfung des Weltmarkts für industriell genutzte Rohstoffe. Dies bedeutet, dass es in absehbarer Zeit zu einer exponentiellen Rohstoffverknappung mit entsprechenden Preissteigerungen kommen wird [FRONDEL ET AL., 2005; BUCHHOLZ, 2008; BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 1999].

Die genannten Randbedingungen führen dazu, dass entgegen den Annahmen von WITTMAYER & WOLFF [2011] in naher Zukunft ein Deponierückbau zur Gewinnung von Rohstoffen aus marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant wird und Vorteile gegenüber der Nachsorge bietet. Zudem gibt landfill mining rohstoffarmen Nationen die Möglichkeit, Abhängigkeiten von Zulieferstaaten in einem gewissen Maße zu mindern.

Problematisch anzusehen ist in diesem Zusammenhang, dass Deponierückbauprojekte meist über mehrere Jahre oder Jahrzehnte andauern und demnach auch den jeweiligen Preisschwankungen auf den Märkten unterliegen. Ebenso können behördliche Anforderungen und öffentliches Interesse ein Hindernis darstellen [HÖLZLE, 2010].

Dem gegenüber steht die kostenintensive Nachsorgephase einer Deponie. Hierbei ist jedoch unbekannt, wie lange diese tatsächlich andauert und welche Folgekosten entsprechend entstehen [WOLFGARTEN, 2010].

Insgesamt sind unsere Deponien Depots, in denen werhafte Rohstoffe lagern. Hierbei erfordert nachhaltiges Handeln schon heute das vorsorgende Denken an morgen [GÄTH, 2011].

Aus technischer Sicht ist die Aufbereitung rückgebauter Abfälle unter Einsatz gängiger Techniken der Recyclingbranche bereits heute denkbar [MOCKER ET AL., 2009B]. Allenfalls die Optimierung einzelner Aufbereitungsschritte in Hinblick auf die heterogenen Deponieguteigenschaften (z.B. Wassergehalt etc.) kann als neue Aufgabe und Herausforderung gesehen werden.

Offen bleibt in diesem Zusammenhang weitestgehend die Frage der praxisnahen, großtechnischen Umsetzung eines Deponierückbaus. In diesem Zusammenhang sollten aus wissenschaftlicher Sicht folgende Aspekte geklärt werden:

- Erfassung der qualitativen und quantitativen Materialströme und Vergleich zu vorliegenden manuellen Untersuchungen (Stoffstromanalysen, Input-Output Analysen)
- Erkundung und Auswirkungsanalyse differenzierter Aufbereitungstiefen und -techniken
- Identifikation und Bewertung spezifischer und technisch möglicher Rückgewinnungsquoten mit besonderem Augenmerk auf Wertstoffe wie Aluminium, Kupfer, andere wertvolle Technologiemetalle, qualitativ hochwertige Sekundärbrennstoffe sowie Abfallstoffe
- Ökologische und ökonomische Berücksichtigung und Charakterisierung logistischer Möglichkeiten bzw. Grenzen
- Erarbeitung von potenziellen technischen Basisdaten zur Ableitung ökologischer und ökonomischer Planungsdaten im Rahmen der großmaßstäbigen Aufbereitung von Deponierückbaustoffen

In der Literatur liegen zu dieser Fragestellung nur wenige Informationen vor, die zumeist auf theoretischen Annahmen basieren. Im Abbau und der Aufdeckung dieser Defizite sollte daher das zukünftige Interesse liegen.

Zudem ist derzeit die Frage der Nachsorgedauer einer Deponie ein entscheidender Faktor. Hierbei liegen aus gesetzlicher Sicht nur unzureichende Vorgaben vor. Zudem kann aktuell nicht abgeschätzt werden, ob installierte Anlagen zur Nachsorge diese Phase überstehen oder weitere Kosten verursachen.

Auch in Hinblick auf diese Defizite und Fragestellungen stellt der Deponierückbau ggf. eine nutzeneffiziente Lösung dar.

Missstände vergangener Zeiten nachhaltig zu nutzen, sollte das Interesse von heute sein. Hierbei stellt der Rückbau von Deponien eine zukünftige Alternative dar, die unter definierten Voraussetzungen schon heute denkbar und nutzeneffizient realisierbar wäre.

## **8 Fazit und Ausblick**

---

Die Untersuchungen des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch zeigen, dass dieser überwiegend durch unbelastete mineralische Komponenten sowie Abraumsande des ehemaligen Steinbruchs geprägt ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die genannten Abraumsande vorwiegend im unteren Bereich des Deponiekörpers als Monochargen auftreten. Da diese keine erheblichen Belastungen aufzeigen, ist im Rahmen des Rückbaus des Deponieabschnitts I eine entsprechend hochwertige Verwertung zu erwarten.

Dennoch ergibt sich aus der Erlös- und Kostensituation eine negative Bilanz, die auch in absehbarer Zeit bestehen wird.

Unter den hier getroffenen Annahmen ist ein kostenneutraler Rückbau des Deponiekörpers I der Deponie Dyckerhoffbruch frühestens im Jahr 2035 denkbar.

Nachfolgende Aussagen sind in diesem Kontext bzw. basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen festzuhalten:

*„Weitestgehend lagern auf dem Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch inerte Materialien, die keine Gefährdung der Schutzgüter darstellen!“*

*„Derzeit ist im Idealfall für den kostenneutralen Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ein finanzieller Flächengewinn von 512 bis 1.610 € pro m<sup>2</sup> notwendig!“*

*„Aufgrund des steigenden Bedarfs an Deponiefläche sowie der unzureichenden Kapazitäten Nutzung von EBS- und MVA-Anlagen sind positive Preisentwicklungen in Hinblick auf die Vermarktung von Deponiegut zu erwarten!“*

*„Auf Basis des erarbeiteten Abschätzungsmodells müssen kurz- und langfristige Entwicklungen weiterhin verfolgt werden!“*

## 9 Zusammenfassung

---

Primäre Ressourcen wie Stahl und Energie werden in zunehmendem Maße knapper und damit immer wertvoller. Dazu trägt in erster Linie die steigende Nachfrage nach Rohstoffen bei.

Aus aktueller Sicht wird sich an dieser Situation nichts ändern. Es ist eher zu erwarten, dass sich die Marktlage noch drastischer entwickelt [RWI ESSEN ET AL., 2006].

Neben in Nutzung befindlichen anthropogenen Rohstofflägern bilden Haushmülldeponien ungenutzte Rohstoffdepots, deren tatsächliches Ressourcenpotenzial in den meisten Fällen unbekannt ist.

Auf Haushmülldeponien wie dem Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch wurden in diesem Zusammenhang Abfälle zur Beseitigung unvorbehandelt abgelagert. Dementsprechend sind alle Stofffraktionen, die auch heute in unseren Getrenntsammelsystemen anfallen, innerhalb des Deponiekörpers zu vermuten.

Dies bedeutet letztlich, dass Haushmülldeponien anthropogene Rohstoffläger darstellen, deren Inhalt und Werthaltigkeit von der Nutzung und der Nutzungsdauer abhängig ist. Es wird erwartet, dass die Nutzung der in den Deponien enthaltenen Rohstoffe durch Rückbau mit steigender Rohstoffknappheit wirtschaftlich erforderlich und nutzeneffizient ist.

Ziel der Arbeit ist es, eine Bewertung des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch aufzustellen und somit die zentrale Frage zu beantworten, unter welchen Randbedingungen die umweltverträgliche Aufbereitung und Nutzung deponierter Ressourcen wirtschaftlicher sowie nutzeneffizienter sein könnte, als die alternativ notwendige Deponienachsorge.

Das Gutachten enthält

1. die Erfassung des Ressourcenpotentials auf dem Deponieabschnitt I und dessen Untersuchung nach Art, Quantität und Qualität,
2. die Erarbeitung unterschiedlicher/resultierender Materialflussmodelle mit Berechnung alternativer Szenarien und Bewertung der Ergebnisse sowie
3. die Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

### 9.1 Erfassung des Ressourcenpotentials

Die Erfassung des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch erfolgte durch insgesamt 29 Bohrungen in die über das bestehende 3D-Strukturmodell lokalisierten Haushmüllbereiche des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch.

#### 9.1.1 Gegenstand und Umfang der Untersuchungen

Der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch ist wie nachfolgend dargestellt zu charakterisieren.

- Betriebsphase:	1964 – 1982
- Ablagerungsmenge:	15,0 – 19,7 Mio. Mg
- Ablagerungsvolumen:	10,5 – 12,8 Mio. m <sup>3</sup>
- Fläche der Deponiebasis:	275.000 m <sup>2</sup>
- Basisabdichtung:	keine
- Zwischenabdeckung/-abdichtung:	vollständig
- temporäre Oberflächenabdeckung:	vollständig

- Oberflächenabdichtung: keine
- Rekultivierung: vollständig
- Gasfassung: aktiv, über Gasbrunnen
- Sickerwasserfassung: teilweise, über Sickerwasserbrunnen
- Oberflächenwasserfassung: vollständig

Die anschließende Klassierung, manuelle Sortierung der Grobfraktion, Nachsortierungen der Mittel- und Feinfraktion sowie Laboruntersuchungen in Hinblick auf die potenzielle Verwertbarkeit lassen Aussagen zur Art, Quantität und Qualität der Materialien zu.

Nachfolgende Charakterisierung unterschiedlicher Ablagerungsschichten wurde – in Anlehnung an das bestehende Modell – in diesem Zusammenhang vorgenommen:

- A Abdeckungsmaterial (Boden und Bauschutt)
- HG Hausmüll und Gewerbeabfälle
- B Bauschutt/Mineralik
- AR Abraum
- C Corbicula

Der Untersuchungsrahmen wird aus nachfolgender SmartArt ersichtlich. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass für eine detaillierte Beschreibung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch eine „bohrmeterspezifische“ Analyse des gewonnenen Deponieguts erfolgte.

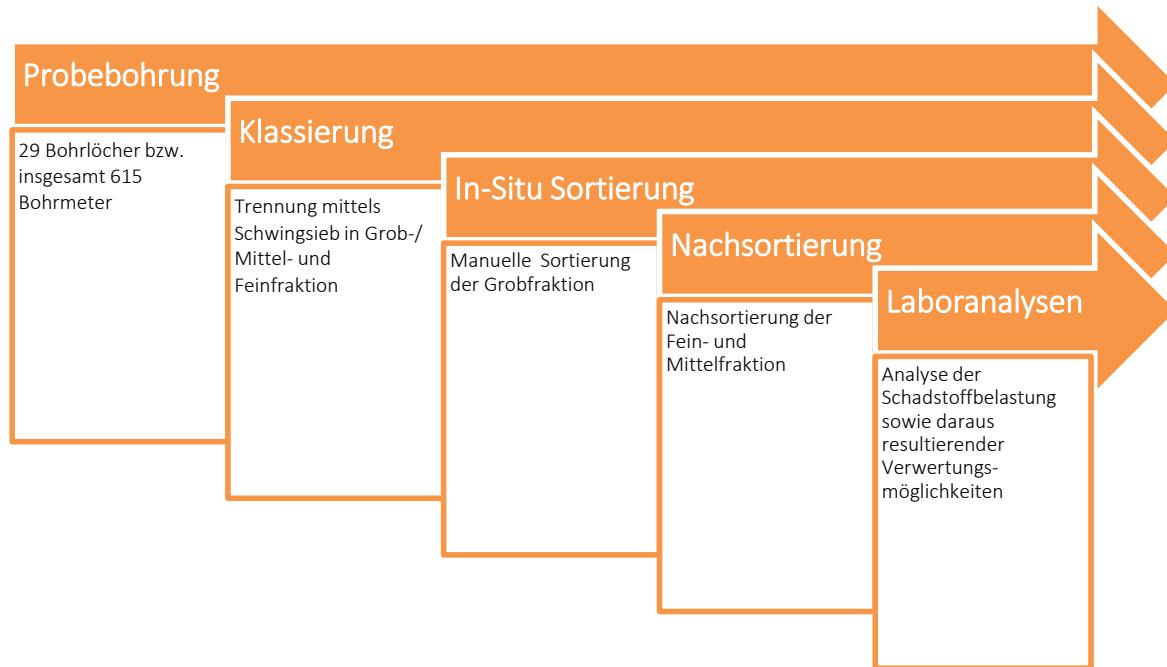


Abbildung 133: Untersuchungsrahmen zur Erkundung des Ressourcenpotenzials des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch in Wiesbaden

## 9.1.2 Ablagerungsmengen des Deponieabschnitts I

Unter Berücksichtigung spezifischer Abfalldichten und des berechneten Abfallvolumens des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ergibt sich die in Tabelle 32 dargestellte Mengenverteilung nach Abfallarten.

Demnach besitzt der Deponieabschnitt I der Deponie Dyckerhoffbruch eine Gesamtablagerungsmasse von ca. 19,7 Mio. Mg. Auf Abraumsande entfallen etwa 10,3 Mio. Mg bzw. ein Anteil von 52 Gew.-%. Bauschutt macht mit 3,7 Mio. Mg die zweitgrößte Ablagerungsmenge aus.

Im Vergleich zu anderen Untersuchungen von Siedlungsabfalldeponien spielt die Ablagerung von Haus- und Gewerbemüll eine eher untergeordnete Rolle.

Tabelle 32: Verteilung der abgelagerten Abfallarten – Gesamtbeschreibung

Abfallschicht	Volumen m <sup>3</sup>	Dichte Mg/m <sup>3</sup>	Masse Mg FM	Prozentuale Verteilung	
				Vol.-% FM	Gew.-% FM
A Abdeckung	1.433.551,2	1,60	2.293.682,0	11,2%	11,6%
HG Haus-/Gewerbemüll	2.545.537,5	1,33	3.385.564,8	20,0%	17,2%
B Bauschutt	2.342.720,7	1,60	3.748.353,1	18,4%	19,0%
AR Abraumsande	6.428.608,8	1,60	10.285.774,2	50,4%	52,2%
<b>Summe</b>	<b>12.750.418,2</b>	<b>1,53</b>	<b>19.713.374,0</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Einstufung im Rahmen des 3D-Strukturmodells:

A: Abdeckungsmaterial (Bodenmaterialien zur Rekultivierung)

AR: Abraummateriale (Abraumsande und –materialien des ehemaligen Steinbruchs Dyckerhoffbruch)

B: Bauschuttmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogenen Bauschutt geprägt sind)

HG: Haus- und Gewerbeabfallmaterialien (Bereiche, die im Wesentlichen durch anthropogene Konsumgüter sowie Produktionsrückstände geprägt sind)

## 9.1.3 Zusammensetzung des Deponieabschnitts I

In Bezug auf die definierten Stofffraktionen gestaltet sich die Zusammensetzung wie in Abbildung 134 dargestellt. Unberücksichtigt bleiben vorerst die Abfallschichten, sodass festgehalten werden kann, dass Erdaushub und Boden ca. 77,3 Gew.-% FM<sup>4</sup> ausmachen.

Im Bereich von 5 bis 7 Gew.-% FM sind Sortierreste, Holz und Kunststofffolien angesiedelt. Im Vergleich zu den übrigen Stofffraktionen stellen auch diese ein größeres Potenzial dar. Gewinnbringend vermarktbares Metalle sind mit einem Anteil von durchschnittlich 1,3 Gew.-% FM zu erwarten.



Abbildung 134: Prozentuale Zusammensetzung der unterschiedlichen Deponiebereiche bzw. Abfallarten

<sup>4</sup> FM = Frischmassenzusammensetzung während der Untersuchungen (Materialien < 4 mm und Mineralstoffe)

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Ablagerungsmassen ergeben sich die in Abbildung 135 aufgezeigten Stoffpotenziale des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Es wird deutlich, dass Erdaushub, Mineralstoffe und die Feinfaktion, welche ebenso aus inerten Materialien besteht, den Deponiekörper dominieren.

Unter Einbezug der Materialeigenschaften erschließt sich, dass diese weitestgehend unbelastet sind und demnach einer hochwertigen Verwertung als Recyclingmaterial – im Rahmen des Straßen- oder Deponiebaus – zugeführt werden könnten.

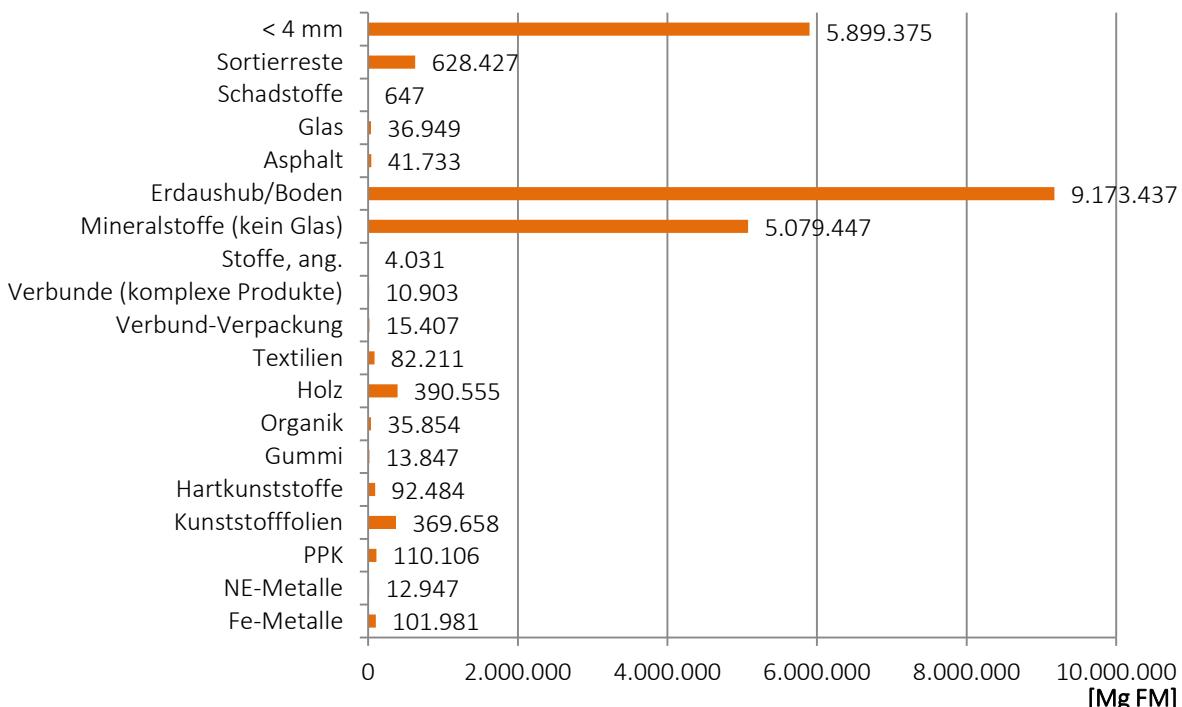


Abbildung 135: Frischmassepotenzial des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch nach definierten Stofffraktionen (Angaben in Mg FM)

Tabelle 33: Mittlere Materialeigenschaften der Fraktion < 50 mm im Vergleich zu den Materialanforderungen für Recyclingbaustoffe nach ErsatzbaustoffV-E (2012)

Parameter	Einheit	Messwert	Materialwerte RC-Baustoffe <sup>5</sup>		
			RC 1	RC 2	RC 3
Leitfähigkeit	[ $\mu\text{S} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	2821,72	2500,00	3200,00	10000,00
pH-Wert	-	7,83	6,00 – 13,00	6,00 – 13,00	6,00 – 13,00
Chrom <sub>gesamt</sub>	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	13,26	150,00	440,00	900,00
Kupfer	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	149,56	110,00	180,00	500,00
Sulfat	[ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	1128,87	450,00	800,00	3500,00
Vanadium	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	10,00	140,00	700,00	1400,00
PAK	[ $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ]	13,62	10,00	15,00	20,00

<sup>5</sup> Ein Recycling-Baustoff (kurz RC-Baustoff) ist ein Baustoff oder ein Baustoffgemisch, das entsprechend seiner Herkunft unterschiedliche Stoffeigenschaften besitzt. Je nach Beschaffenheit (ausgedrückt durch unterschiedliche Klassen z.B. RC 1 bis 3) können diese Materialien im Straßen- und Wegebau zum Einsatz kommen. Allen RC-Baustoffklassen ist gemeinsam, dass durch ihre Verwendung wertvolle Ressourcen und Deponieraum gespart werden kann. Außerdem ist in vielen Fällen die Aufbereitung und Weiterverwendung finanziell günstiger als eine endgültige Beseitigung.

## 9.1.4 Bewertung des Rückbaus des Deponieabschnitts I

Die Bewertung der Effizienz des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ergibt sich aus folgenden Faktoren:

- Anfallende Rückbau- und Aufbereitungskosten
- Erlöse der Rohstoffvermarktung
- Entfallende Nachsorge- und Folgekosten
- Flächengewinn und potenzielle Nachnutzung
- Einsparung potenzieller Sanierungskosten
- CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial
- Grundwasser- und Umweltentlastung

Insgesamt ergeben sich aus den genannten Aspekten zwei Szenarien eines potenziellen Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Diese werden nachfolgend näher charakterisiert.

### Szenario I – „Best Case“

Im Idealfall sollte die gesamte Ablagerungsmasse des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch aufgenommen und anschließend verwertet werden. Hierbei würde aufgrund der gezeigten Zusammensetzung der Hauptanteil der gewonnenen Materialien einer mineralischen Verwertung zugeführt. Heizwertreiche Fraktionen wie bspw. Kunststoffe, Holz etc. erfüllen zudem die Anforderungen an die Verwertung als Ersatzbrennstoff. Lediglich ein geringer Anteil (Sortierreste<sup>6</sup> und Schadstoffe<sup>7</sup>) muss in dieser Betrachtung einer kostenintensiven Entsorgung zugeführt werden.

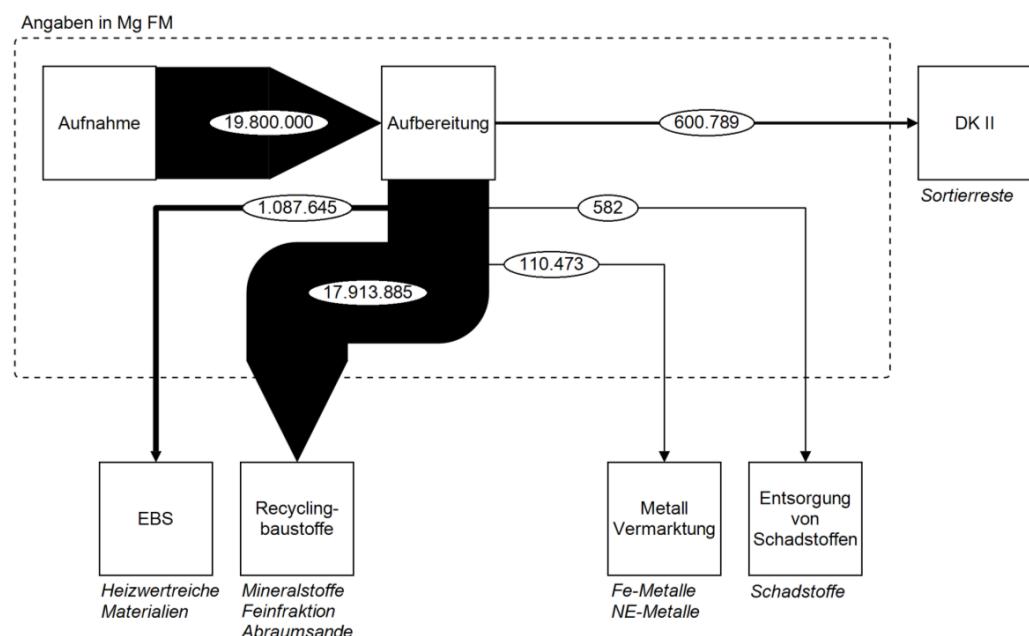


Abbildung 136: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Best Case“ Szenarios

Die Bilanzierung belegt aus aktueller Sicht, dass ein wirtschaftlicher Rückbau des Deponiekörpers I der Deponie Dyckerhoffbruch unter aktuellen Bedingungen nicht erreichbar ist. Selbst unter

<sup>6</sup> Den übrigen Fraktionen vor Ort nicht zuzuordnen/Stoffgemische aus mineralischen Bestandteilen, Kunststoffen etc. (ohne Gefährdungspotenzial)

<sup>7</sup> Gleichbedeutend mit Sonderabfällen wie bspw. Batterien; Akkumulatoren; Altmedikamente; Altchemikalien; Altölhaltige Materialien; Sonstige schadstoffbelastete Stoffe

Annahme geringster Rückbaukosten und maximaler Erlöse für Metalle, Ersatzbrennstoffe und mineralische Recyclingbaustoffe ist mit einem Defizit von ca. 140 Mio. € zu rechnen.

Je m<sup>2</sup> Grundfläche (275.000 m<sup>2</sup>), die anschließend neu genutzt werden könnten, müssten demnach ca. 512 € erzielt werden.

*„Für den kostenneutralen Rückbau des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch ist derzeit eine finanzielle/flächenbezogene Vergütung von ca. 512 € pro m<sup>2</sup> anzusetzen.“*

### Szenario II – „Worst Case“

Nach Gesetzgebung dürfen „rückgebaute Abfälle“ nach Behandlung und Schadstoffentsorgung einer erneuten Deponierung (DK II) zugeführt werden. Entsprechend beschreibt nachfolgendes Szenario „Worst Case“ diese Option und mögliche Verwertungs-/Entsorgungspotenziale des gewonnenen Deponieguts. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass nicht der gesamte Deponiekörper rückgebaut wird. Vielmehr wird auf Basis der existierenden Infrastruktur eine Ebene - unter Berücksichtigung der notwendigen Maßnahmen - geschaffen. Diese steht anschließend als nutzbare Gewerbefläche zu Verfügung.

Insgesamt ergibt sich hieraus, dass in Abbildung 137 dargestellte Massenstrommodell des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Hierbei wird deutlich, dass überwiegende Anteile des Deponieguts einer erneuten Deponierung der Klasse II zukommen. Zudem werden „Heizwertreiche Materialien“ in einer Müllverbrennungsanlage energetisch verwertet. Recyclingbaustoffe werden im Rahmen dieser Szenariobetrachtung wesentlich durch das aufliegende Bodenmaterial zu Abdeckung des eigentlichen Deponiekörpers gebildet und stehen kostengünstig einer stofflichen Verwertung zur Verfügung.

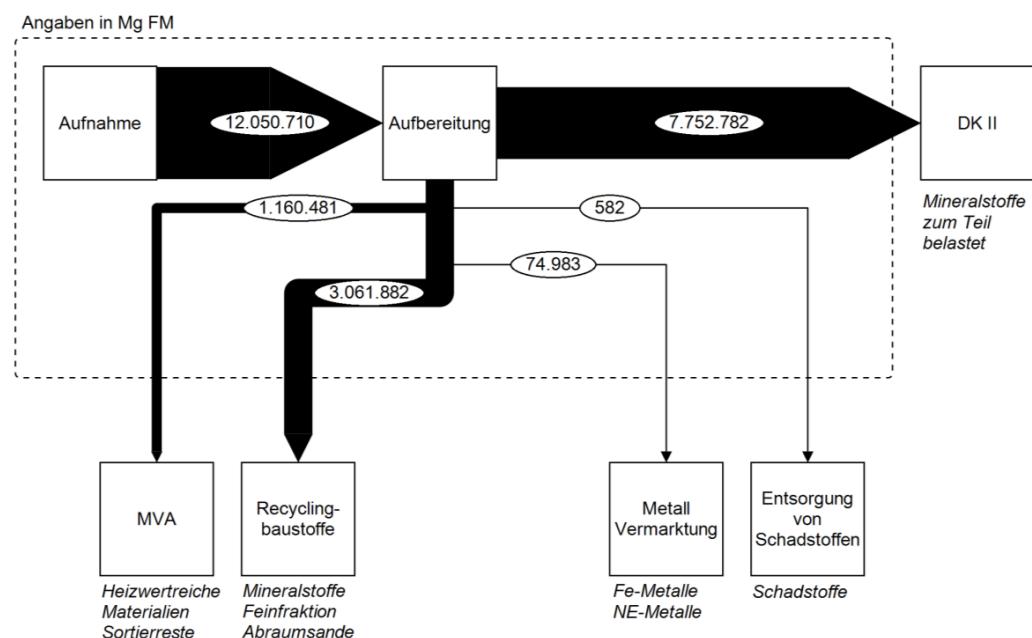


Abbildung 137: Schematische Darstellung der potenziellen Verwertungswege unterschiedlicher Stofffraktionen im Rahmen des „Worst Case“ Szenarios

Entsprechend negativ ist die Bilanzierung dieser Betrachtung zu bewerten. Ein Defizit von nahezu 443 Mio. € wäre die potenziell mögliche Folge des Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch. Dies entspricht einem spezifischen Flächenwert von etwa 1.610 €/m<sup>2</sup>.

*„Ein finanziell wirtschaftlicher Rückbau rückt auf Grundlage dieser Bilanzierung in weite Ferne.“*

### Zukünftige Entwicklung

Neben der aktuellen Situation spielen Entwicklungen auf den nationalen und internationalen Rohstoffmärkten für Energie und mineralische sowie metallische Ressourcen eine wesentliche Rolle für die Rückbaufähigkeit einer ehemaligen Deponie.

Auf Basis von wissenschaftlichen Zeitreihenanalysen kann insgesamt folgender Trend des wirtschaftlichen Rückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch festgelegt werden (Abbildung 138).

Es wird deutlich, dass – unter der Voraussetzung idealer Annahmen und Rahmenbedingungen – ein Rückbau des Deponieabschnitts I – erst in 20 - 25 Jahren sinnvoll umsetzbar erscheint.

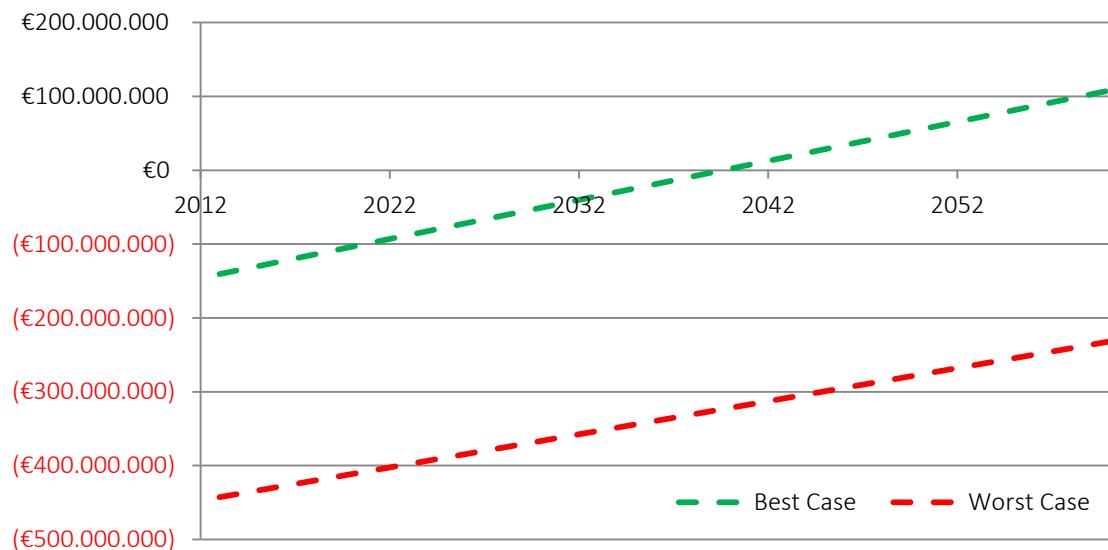


Abbildung 138: Wirtschaftlichkeit des Deponierückbaus des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch – Betrachtung bis zum Jahr 2060

Entsprechend den zuvor genannten Untersuchungsergebnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die Nachnutzung des Deponieabschnitts I der Deponie Dyckerhoffbruch:

- Geringes Gefährdungspotenzial für Umwelt und Grundwasser
- Geringes Rohstoffpotenzial im Sinne heute wirtschaftlicher Materialien (bspw. Metalle, Kunststoffe etc.)
- Hohes Potenzial an mineralischen Baustoffen, die als RC-Materialien dienen könnten
- Hohes Potenzial zur Folgenutzung der gewonnenen Gewerbefläche

## **10 Literatur**

---

### **A**

#### **ABFABL V | 2001:**

Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAbI V) Ausfertigungsdatum: 20.02.2001

#### **ALLIANZ GLOBAL INVESTORS | 2011:**

Knappe Ressourcen. Abgerufen am 04.08.2011 unter [www.allianzglobalinvestors.de/web/download?file=Analysen-und-Trends-Knappe-Ressourcen.pdf](http://www.allianzglobalinvestors.de/web/download?file=Analysen-und-Trends-Knappe-Ressourcen.pdf)

#### **ALWAST, H. & BIRNSTENGEL, B. | 2010:**

Verbrennungs- und Ersatzbaustoffmarkt in Deutschland und Europa. Müllhandbuch. 2. Auflage. Band 1 Nr. 0171. MuA Lfg. 2/10. Erich Schmidt Verlag. Berlin  
ISBN: 3503097783

#### **ARGUS | 1995:**

Abfalluntersuchung im Landkreis Böblingen, Berlin

#### **ARGUS | 1999:**

Hausmüllanalyse für eine Großstadt in Nordrhein-Westfalen, Berlin

#### **AVANTIME CONSULTING GMBH | 2011:**

Das Portal zum Emissionshandel und Klimaschutz. Abgerufen am 20.11.2011 unter [www.co2-handel.de](http://www.co2-handel.de)

#### **AWIPLAN | 1994:**

Sortieranalysen hausmüllähnlicher Gewerbeabfälle im Landkreis Ludwigsburg

### **B**

#### **BAFU - BUNDESAMT FÜR UMWELT | 2006:**

Die Deponie als Rohstofflager. Bern. Abgerufen am 31.08.2009 unter [www.bafu.admin.ch/dokumentation/fokus/01218/01220/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/fokus/01218/01220/index.html?lang=de)

#### **BANK, W. | 2011:**

Prospects for the Global Economy - China, global metal demand, and super-cycle hypothesis. Global Economic Prospects.

**BARDT, H. | 2005:**

Rohstoffreichtum – Fluch oder Segen?. IW-Trends 32. Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln. Heft 1. S. 33–43

**BARDT, H. | 2006:**

Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung von Sekundärrohstoffen. IW-Trends 33. Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln. Heft 3. Vorabdruck

**BARTL, U. | 2005:**

Deponieabschluss: Vom Deponiebetrieb zur Nachsorge: Aufgabe, Wege und Lösungen. In: Potsdam: DAS-IB GmbH.

**BAUER, C., LEBUHN, M. & GRONAUER, A. | 2009:**

Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Abgerufen am 23.01.2010 unter [www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p\\_27456.pdf](http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_27456.pdf)

**BAUR, F. ET AL. | 1996:**

Fortschreibung des Feldversuchs Saarland, Witzenhausen: ARGE Witzenhausen-Institut/UGB.

**BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT | 2011A:**

Definition Siedlungs-, Gewerbe-, und Produktionsabfälle. Abgerufen am 01.04.2011 unter [www.lfu.bayern.de/abfall/definition\\_siedlungs\\_produktionsabfaelle/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/abfall/definition_siedlungs_produktionsabfaelle/index.htm)

**BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT | 2011B:**

InfoBlatt Abfallwirtschaft - Sperrmüll. Augsburg: Abfallinformationsstelle des LfU - Abfallratgeber Bayern.

**BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ | 1984:**

Abfallmenge und Zusammensetzung in der Stadt Augsburg sowie den Landkreisen Augsburgs und Aichach. Friedberg

**BECKMANN, M. & NCUBE, S. | 2007:**

Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II – stofflich – energetisch. Witzenhausen, 2007, S. 232–263.

ISBN 3-928673-50-5

**BECKMANN, M., SCHOLZ, R., HORENI, M. | 2006:**

Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. In: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. XVIII, Witzenhausen

**BERLIN | 2000:**

Siedlungsabfälle-Geschäftsmüll, Zusammensetzung des Geschäftsmülls 1997. Abgerufen am 20.11.2007 unter [www.sensut.berlin.de/sensut/umw.../abfall/siedlung\\_geschaeftsmuell.shtml](http://www.sensut.berlin.de/sensut/umw.../abfall/siedlung_geschaeftsmuell.shtml)

**BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE | 1999:**

Reserven, Ressourcen und Lebensdauer von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen, Hannover: Veröffentlichung der BGR.

**BIDLINGMAIER, W. & KRANERT, M. | 2004:**

Geschäftsmüll - Abfallwirtschaftliche Bedeutung, Menge, Zusammensetzung und Einflussgrößen. Manuskripte zur Abfallwirtschaft Band 6.

**Bierschenk | 2010:**

Altdeponie Grix - Errichtung und Betrieb einer Photovoltaik-Anlage Artenschutzrechtliche Beurteilung. Planungsbüro Bierschenk, Ober-Ramstadt, 2010.

**BILITEWSKI, B., HÄRDLE, G. W. & MAREK, K. A. | 2000:**

Abfallwirtschaft - Handbuch für Praxis und Lehre; 3.neubearbeitete Auflage. Berlin & Dresden: Springer-Verlag Berlin.  
ISBN-10: 3540642765

**BISCHOFSSBERGER, W., DICHTL, N., ROSENWINKEL, K.-H. & SEYFRIED, C. F. | 2005:**

Anaerobtechnik - 2. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

**BMU | 1988:**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Was Sie schon immer über Abfall und Umwelt wissen wollten. Berlin: BMU.

**BOGON, H. | 2005:**

Deponiegasprognose: Worauf kommt es an?, Neustadt am Rbg.: Praxistagung Deponien - [www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de).

**BOIE, W. | 1957:**

Vom Brennstoff zum Rauchgas. Feuerungstechnisches Rechnen mit Brennstoffkenngrößen und seine Vereinfachung mit Mitteln der Statistik. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig

**BÖLTE, S. & GEIPING, J. | 2011:**

Siedlungsabfalldeponien - Nachsorge oder Rückbau. In: Deponietage 2011 - Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Hennef.

**BONNET, M. & VIERTEL, J. L. | 2007:**

Herstellung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung des Werkstoffes PVC. Institut für Werkstoffanwendungen. Fachhochschule Köln.

**BOTHMANN, P. | 2005:**

Profilierung von Deponien durch Abfallumlagerung - Probleme und Möglichkeiten. In: Zeitgemäße Deponietechnik 2005. Stuttgart: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Band 84, S. 43-52.

**BOTHMANN, P. ET AL. | 2002:**

Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen, Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. - ATV-DVWK/VKS Fachausschuss 3.6 "Deponien". ISBN-10: 3936514003

**BRAMMER, F. ET AL. | 1997:**

Rückbau von Siedlungsabfalldeponien. Stuttgart: Teubner-Verlag.  
ISBN-10: 3815435315

**BUCHHOLZ, P. | 2008:**

Indikatoren zur Früherkennung von Preisentwicklungen auf Rohstoffmärkten. In: Bio- und Sekundärstoffverwertung III. Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 155-166.

**BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. | 1996:**

Invest- und Folgekostenermittlung von Oberflächen-abdichtungen und Rekultivierungsmaßnahmen. VDI-Bildungswerk - Kostenblock Deponienachsorge.

**BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. | 2005:**

Ermittlung der Nachsorge- und Folgekosten von Deponien auf der Grundlage der neuen Verordnungen. Praxistagung Deponie 2005.

## C

**CARDIFF UNIVERSITY | 2004:**

Landfill Mining. Abgerufen am 31.08.2009 unter [www.wasteresearch.co.uk/Sian/mining/mining.htm](http://www.wasteresearch.co.uk/Sian/mining/mining.htm)

**CHRIST, M., FELL, A., FRIEDRICH, S. & RETTENBERGER, G. | 2011:**

Untersuchungen zum Wertstoffpotenzial in Abfällen von rückgebauten Hausmülldeponien. In: Müll und Abfall. Band 10/11. S. 466–469. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

**COSSU, R., MOTZO, G. M. & LAUDADIO, M. | 1995:**

Preliminary study for a landfill mining. Proceeding of Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, Band 3, S. 841-850.

# D

## DEPV | 2009:

Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 17.10.2011 I 2066

## DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION | 1999:

Richtlinie 1999/31/EG Des Rates über Abfalldeponien. In: s.l.:Arbeitsblatt der Europäischen Gemeinschaft.

## DERNBACH, H. | 1982:

Versuche zur Abschätzung des Gaspotentials einer Deponie anhand von Müllproben. Veröffentlichungen des Instituts für Städtebauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Band Heft 33, S. 447 - 470 .

## DIE BUNDESREGIERUNG | 2007:

Elemente einer Rohstoffstrategie. Berlin. Abgerufen am 24.02.2011 unter [www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF](http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF)

## DIECKHOFF, G. & PRACK, H. R. | 1995:

Sanierung durch Umlagerung alter Deponiebereiche - Technische und rechtliche Konzeption. In: Mit alten Deponien leben oder ständige Anpassung an den Stand der Technik?. Berlin: 43. Umwelttechnologieforum , S. 145-162.

## DIECKHOFF, G. & PRACK, R. | 1994:

Sanierung durch Umlagerung - ökologische, ökonomische und planungsrechtliche Konzepte bei der Altlastensanierung. Müll und Abfall, Band 6, S. 345-352.

## DIN 19529 | 2009:

Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

## DIN 19684-3 | 2000:

Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glühverlusts und des Glührückstands. Berlin: Beuth.

## DIN 38414-2 | 1985:

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2)

**DIN 51900 | 2004:**

Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes, Teile 1 - 3. Beuth Verlag GmbH, Berlin

**DIN 5499 | 1972:**

Brennwert und Heizwert; Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin

**DIN EN 12457-4 | 2003:**

Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**DIN EN 13657| 2003:**

Charakterisierung von Abfällen - Aufschluß zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen. Berlin: Beuth Verlag GmbH .

**DIN ISO 11465 | 1996-12:**

Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse – Gravimetrisches Verfahren

**DOHMANN, M. | 1997:**

BMF-Verbundvorhaben Deponiekörper - Teilvorhaben 3: Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponie. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westpälischen Technischen Hochschule Aachen.

**DÖPPENSCHMITT, A. | 1993:**

Abfall und seine Bewältigung in privaten Haushalten - Möglichkeiten eines gruppenspezifischen Ansatzes dargestellt am Beispiel Coburg. Würzburg: Dissertation zur Erlangung des naturwissenschaftlichen Doktorgrades der Bayrischen Julius-Maximilians-Universität.

**DSW | 2011:**

Deutsche Stiftung Weltbevölkerung, Weltbevölkerung wächst bis 2050 stärker als angenommen auf 9,3 Milliarden. DSW: „Menschen in Entwicklungsländern brauchen mehr Aufklärung und Verhütungsmittel“. Neueste UN-Projektionen – erstmals bis 2100:

**DUARTE, A. C. & ANDERSON, G. K. | 1983:**

Modellrechnungen für die Hemmung der anaeroben Abbauprozesse. IAWPR – Konferenz. Heft 2.

# E

## **ECB | 2004:**

Europäische Zentralbank. Oil Prices and the Euro Area Economy. Monthly Bulletin, Frankfurt November 2004, S. 51f; abgerufen am 29.07.10 unter <http://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/mobu/mb200411en.pdf?0cc3fbdd9d27b9738f346bdbf8bbaf> e7

## **ECOENERGY GMBH | 2006:**

Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen. VDI-Seminarunterlagen vom 05.12.2006. Berlin

## **EHRIG, H.-J. & BRINKMANN, U. | 1998:**

Verbundvorhaben Deponiekörper - Zusammenfassender Abschlussbericht zum Arbeitsgebiet Siedlungsabfälle (Teilvorhaben 3-7), Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie – Berlin.

## **EITNER, R. | 2010A:**

Rückstellungsberechnungen für Abfalldeponien - Stand der Erkenntnisse und aktuelle Entwicklungen. In: Deponietage 2010 - Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Minden: Gemeinschaftstagung von DWA, ANS und VKU in Kooperation mit ASA CREED INWESD.

## **EITNER, R. | 2010B:**

Kalkulation von Deponierückstellungen. Gießen: 7. Hessischer Deponietag - Fachtagung.

## **EITNER, R. | 2010C:**

Kosten der Stilllegung und Nachsorge, Rückstellungskalkulation. In: Deponietechnik 2010. Hamburg: Verlag Abfall aktuell.

## **ELW | 2012:**

ELW - Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden: Sauber entsorgt - Deponie Dyckerhoffbruch, Broschüre, Claus Fischer, Agentur für Druck und Produktion, Wiesbaden; abgerufen am 22.05.2013 unter: [http://www.elw.de/fileadmin/pdf/Deponiebroschuere\\_07\\_2012.pdf](http://www.elw.de/fileadmin/pdf/Deponiebroschuere_07_2012.pdf)

## **ENERGIEAGENTUR.NRW | 2010:**

Effiziente Energienutzung in der Recyclingindustrie - Nützliche Informationen und Praxisbeispiele für Unternehmen. Wuppertal

#### **ENGELE, K. | 1990:**

Universität Oldenburg. Verbundprojekt eL3 der Universität Oldenburg und des FIM-NeuesLernen - Universität Erlangen-Nürnberg - gefördert durch das BMBF (FKZ: 08NM086). Abgerufen am 14.07.2011 unter [http://cg-hci.informatik.uni-oldenburg.de/~el3/biologie/el3\\_ol\\_biolologie\\_simulation-animation\\_v03.1/html/flow1/page1.html#Ref\\_ID18](http://cg-hci.informatik.uni-oldenburg.de/~el3/biologie/el3_ol_biolologie_simulation-animation_v03.1/html/flow1/page1.html#Ref_ID18)

#### **EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY | 1997:**

Landfill Reclamation, Washington: Solid Waste and Emergency Response.

#### **ERICSSON, M. 2011:**

Metal prices back on top of 2011! World of Metallurgy - Erzmetall. S. 57-58..

#### **ErsatzbaustoffV-E | 2012:**

Entwurfssfassung - Stand: 31.10.2012, Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material

#### **EUWID | 2011:**

Recycling und Entsorgung - Stahlschrott preise Deutschland. Abgerufen am 10 10 2011 unter [www.euwid-recycling.de](http://www.euwid-recycling.de)

## F

#### **FARQUHAR, G. J. & ROVERS, F. A. | 1973:**

Gas production during refuse decomposition. Water, Air and Soil Pollution, Band 2, S. 483-495.

#### **FAULSTICH, M., FRANKE, M., LÖH, I. & MOCKER, M. | 2010:**

Urban Mining – Wertstoffgewinnung aus Abfalldeponien. ATZ Entwicklungszentrum. Bayrische Abfall- und Deponietage 2010. KUMAS und bifa. Augsburg

#### **FINCK, M. | 1999:**

Rückbau versus Sicherung - Entwicklung eines Entscheidungsmodells am Beispiel der Deponie Wernsdorf. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

#### **FISCHER-KOWALSKI, M. | 2009:**

Plenary Presentations of the World Resources Forum 2009: A hundred years of resource use of the world economy. Dynamics, driveres, impacts. Abgerufen am 11.05.2011 unter <http://www.worldresourcesforum.org/archive/wrf-2009/plenary-presentations>

**FOLLATH, E. & JUNG, A. | 2008:**

Der neue kalte Krieg- Kampf um die Rohstoffe. 1. Auflage Taschenbuchausgabe. Spiegel Buch Verlag. Hamburg 2008

**FRANZIUS, V. | 1982:**

Gashaushalt von Deponien - Einführung in die Thematik. Veröffentlichungen des Institutes für Städtebauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Heft 33. S. 301-306.

**FRICKE, K. ET AL. | 2002:**

Verfahren und Aggregate zur mechanischen Aufbereitung. In: Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

**FRICKE, K. | 2009:**

Urban Mining – nur ein Modebegriff. Müll und Abfall. 10/09. S. 489

**FRIEDMANN, H. & ZOLLNER, F. | 1995:**

Behandlung und Verwertung von Altmüll aus dem Deponierückbau. Abfallwirtschaftsjournal, 7 Nr. 1/2, S. 76-81.

**FRONDEL, M. ET AL. | 2005:**

Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen - Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi), Essen, Karlsruhe, Hannover: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

**FUCHS, J. | 1987:**

Planung und Durchführung von Abfallanalysen für das Land Berlin (West) 1983, in Studienreihe Abfall Now, Band 3, Erhebung über die Zusammensetzung von Gewerbeabfällen, Stuttgart: Verlag Abfall Now.

**FUGRO-HGN | 2010:**

Tontagebau Möckern der Sporkenbach Ziegelei GmbH – Sicherungskonzept, Auftraggeber Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Magdeburg

## G

**GÄTH, S. | 2011:**

Abfallwirtschaft – Die Schlüsselwirtschaft für knapper werdende Ressourcen. Müll und Abfall. Band 02/2011. S. 49.

**GÄTH, S. & NISPEL, J. | 2011:**

Ressourcenpotenzial von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. Müll und Abfall, Band 02/ 2011, S. 61-67.

**GERHART, C., MATVIENKO, O., DÜCK, J. & NEEBE, T. | 2011:**

Numerische Berechnungen der Dichtstromtrennung im Hydrozyklon. Abgerufen am 10.03.2011 unter [www.uvt.uni-erlangen.de/deutsch/papers/J1998/Hydrozyklon\\_LUR\\_Erlangen.pdf](http://www.uvt.uni-erlangen.de/deutsch/papers/J1998/Hydrozyklon_LUR_Erlangen.pdf)

**GERINGSWALD, K. | 2001:**

Untersuchung des Emissionsverhaltens von aktiv betriebenen und stillgelegten Siedlungsabfalldeponien in Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen und Abdeckvarianten. Niederdorf: Hochschule Mittweida - University of applied sciences.

**GEWABFV | 2003:**

Gewerbeabfallverordnung - Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen.

**GÖSCHL, R. | 1994:**

Deponierückbau zur Gewinnung von Deponievolumen - Konzeption und Planung einer Pilotanlage auf der Deponie Burghof. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 70, S. 11-24.

**GÖSCHL, R. | 1995:**

Rückbau der Deponie Burghof im Landkreis Ludwigsburg. Abfallwirtschafts-Journal, Band 7, S. 92-98.

**GROß, M. | 1998:**

Erfahrungen aus dem ersten Bauabschnitt des Rückbaus der Deponie Rennerod, Westerwaldkreis, Lochum: Diplomarbeit an der Fachhochschule Bingen - Fachbereich Umweltschutz.

# H

**HAARSTRICK, A. & HEMPEL, D. C. | 2003:**

Analyse der biologischen und chemischen Reaktionsprozesse in Deponien. Band Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung.

**HABICH, U. | 2007:**

Automatische Sortiersysteme für Anwendungen in der Abfallsortierung. In: Internationale Tagung MBA 2007 - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung. Göttingen: Cuvillier Verlag.

**HAM, R. K. | 1982:**

Einflußfaktoren auf die Gasproduktionsrate von Proben aus Mülldeponien. Veröffentlichungen des Instituts für Städtebauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Band Heft 33, S. 419 - 446.

**HANNOVER | 1996:**

Abfallwirtschaftsprogramm 1996-2000. Abfallwirtschaftsbetrieb. Hannover

**HARMS-KREKELER, C. | 1996:**

Abfallrechtliche Aspekte des Deponierückbaus. In: Deponietechnik 1996 - Untergrund Abdichtung Deponieverhalten Deponierückbau Terminologie - Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 85. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 211-226.

**HERBOLD MECKESHEIM GMBH | 2006:**

Infoblatt 47 - Hydrozyklone. Abgerufen am 21.05.2011 unter [www.schneidmuehlen-herbold.de/info/info47-DE-Hydrozyklone.pdf](http://www.schneidmuehlen-herbold.de/info/info47-DE-Hydrozyklone.pdf)

**HFVA | 2009:**

Hessischer Forschungsverbund für Abfall, Umwelt und Ressourcenschutz e.V. Bewertung von Rohstoffpotenzialen der hessischen Deponien für Siedlungsabfall, Witzenhausen/ Kassel: Universität Kassel.

**HOGLAND, W., MARQUES, M. & NIMMERMARK, S. | 2004:**

Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. Journal of Material Cycles and Waste Management, Band 6, S. 119-124.

**HÖLZLE, I. | 2010:**

Vom Deponierückbau bis zum landfill mining - eine Synthese internationaler Untersuchungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Band 62 | Nr.7/8, S. 155-161.

**HÖLZLE, I. | 2011:**

Energieeffizienz von Deponierückbauprojekten - Energy efficiency of landfill mining. Müll und Abfall, Band 10/10, S. 488-492.

**HÖSEL, G. | 1974:**

Möglichkeiten und Grenzen des Recycling von Abfällen - Bedeutung und gegenwärtiger Stand des Recycling. Müll und Abfall. Nr. 6. S. 97-98.

**HTP INGENIEURGESELLSCHAFT PARTG | 2004:**

Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten von Sensorsystemen in der Abfallaufbereitung. Abgerufen am 12.04.2011 unter [www.hpt.eu/scripte/34\\_HTP-Langen\\_Dezember-2004.pdf](http://www.hpt.eu/scripte/34_HTP-Langen_Dezember-2004.pdf)

**HÜTLER, K. & WISKEMANN, B. | 1995:**

Rückbaufähigkeit von Deponien am Beispiel der Zentraldeponie Düsseldorf Hubbelrath. Abfallwirtschafts Journal, Band 7, S. 82-91.

|

**IEA | 2011:**

World Energy Outlook 2011 Factsheet, International Energy Agency.

**IfW | 2009:**

Pressemitteilung des IfW Institut für Wirtschaft Kiel: Weltwirtschaft im Abwärtsstrudel. Abgerufen am 26.04.2010 unter <http://www.ifw-kiel.de/medien/pressemitteilungen/2009/pm12-03-09a>

**INPEOS | 2010:**

Institut für Partizipation und Chancengerechtigkeit. Demographischer Wandel. Abgerufen am 25.04.2010 unter [http://www.inpeos.de/Demographischer\\_Wandel.html](http://www.inpeos.de/Demographischer_Wandel.html)

J

**JANKE, H. D. | 2002:**

Umweltbiotechnik. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

**JINHEE PARK, M. A. | 2004:**

Von der Müllkippe zur Abfallwirtschaft - Entwicklung der Hausmüllentsorgung in Berlin (West) von 1945 bis 1990. Berlin: Dissertationsarbeit an der Fakultät I Geisteswissenschaften der Technischen Universität Berlin.

K

**KALTSCHMITT, M. & HARTMANN, H. | 2009:**

Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg: 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag.

**KAPP, H. | 1984:**

Schlammfaulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86.

**KARNOWSKY, F. | 1978:**

Stand der Abfallwirtschaft. Forum Städte-Hygiene 4. S. 180-183.

**Knoll, T.; Groiss, M.; Rittstreuer, V.; Hilzenauer, A. | 2008:**

Bewertung des Landschaftsbildes. Knoll, Planung & Beratung, Wien

**Koch, E. & HARMS-KREKELER, C. | 1997:**

Juristische Untersuchungen. In: Rückbau von Siedlungsabfalldeponien - Teubner-Reihe Umwelt. Stuttgart, Leipzig: Teubner-Verlag, S. 140-193.

**KOHAUPT, U. | 2007:**

Metallsortierung in der Abfallwirtschaft - Qualitätssteigerung und ökonomisches Standbein. In: Internationale Tagung MBA 2007 - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung und automatische Abfallsortierung. Göttingen: Cuvillier Verlag.

**KORN, A. | 2011:**

Mündliche Aussage zur Effizienzsteigerung beim Recyclingprozess – Erfahrungsbericht aus der Praxis. Recyclingunternehmen Korn. Albstadt.

**KOST, T. | 2001:**

Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen. Dissertation Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden.

**KÖSTERING, S. | 2007:**

Vergraben oder Verwerten - Zur Geschichte des Mülls in der Industriegesellschaft. In G. Hösel, B. Bilitewski, W. Schenkel, & H. Schnurer, Müll-Handbuch. Band 1/0117.

**KRANERT, M. ET AL. | 1995:**

Gewerbeabfallanalyse der Stadt Braunschweig, Forschungsbericht für die Stadt Braunschweig. Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel.

**KRANERT, M. & CORD-LANDWEHR, K. | 2010:**

Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien GmbH.  
ISBN-10: 3835100602

**KREINDL, G. | 2010:**

Herausforderungen der NIR-Sortierung von gemischten Abfällen aus Industrie und Gewerbe. Depotech 2010 | Abfallwirtschaft Abfalltechnik Deponietechnik und Altlasten, S. 249-256.

**KRUG, S. | 2008:**

Ressourcenpotenzial von Deponien - Gehalt an Stahlwerksrückständen der Deponie Eulingsberg, Gießen: Masterarbeit an der Jusus-Liebig-Universität, Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement.

**KRUG, S. | 2009:**

Genehmigungsverfahren des Deponierückbaus aus behördlicher Sicht - Mündliche Aussage Bauassessor. Gießen.

**KRÜMPELBECK, I. | 2000:**

Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfällen - Dissertation an der Gesamthochschule Wuppertal. Wuppertal.

**KRUSE, G. | 1987:**

Grundsatz- und Strategiestudie zur Fortschreibung der Abfallbewirtschaftung im Landkreis Segeberg, Teil III, Gewerbe- und Geschäftsmüllanalyse und Empfehlungen zur Altstofferfassung, im Auftrag des Wegezweckverbandes Segeberg. Studienreihe Abfall Now, Band 3, Erhebungen über die Zusammensetzung von Gewerbeabfällen, Stuttgart, S. 42-69.

**Kurian, J., Esakku, S., Palanivelu, K. & Selvan, A. | 2003:**

Studies on landfill mining at solid waste dumpsites in India. Proceedings Sardinia 03, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. 248.

**KRW-/ABFG | 1996:**

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. Zuletzt geändert durch Art. 5 G v. 6.10.2011 | 1986

**L**

**LAGA PN 98 | 2004:**

Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/ Beseitigung von Abfällen. Mainz: Länderarbeitsgemeinschaft Abfall.

**LANDRATSAMT ZOLLERNALBKREIS – ABFALLWIRTSCHAFT | 2009:**

Zusammenstellung der gefassten und entsorgten Gasmengen, Balingen: Landratsamt Zollernalbkreis.

**LEIKAM, K., HEYER, K.-U. & STEGMANN, R. | 1998:**

Beschleunigung der In-Situ-Stabilisierung von Altdeponien oder Mumifizierung?. In: Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien: Kostentreibende Willkür oder Notwendigkeit?. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

**LEMSER, B. & MATSCHKE, M. | 1993:**

Grauzone "Geschäftsmüll" - Ergebnisse einer Untersuchung zum Abfallaufkommen und zur Entsorgung von Kleingewerbebetrieben. Müll und Abfall, S. 664-673.

**LERCH, U., ROYL, M. & ZOBEL, R. | 2010:**

Kommunale Altdeponie Marquartstein – Erfahrungen mit Rückbau und stofflicher Trennung. Augsburg, KUMAS - Kompetenzzentrum Umwelt e.V..

**LFU | 1992:**

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Der Deponiegashauswahl in Altablagerungen - Vorgehensweise und Technik zu seiner Erkundung und Bewertung. Karlsruhe: Materialien zur Altlastenbearbeitung.

## M

**MANTELVERORDNUNG | STAND 2013**

Zusammenführung im Rahmen der Gesetzesnovelle: Grundwasser/Ersatzbaustoffe/ Bodenschutz“ des Bundesministeriums für Umwelt

**MATTHIES, K. | 2011:**

Rohstoffpreise 2008. Hamburgisches WeltWirtschaftsInstitut (HWWI-2008). HWWI Policy Report Nr. 8. Hambur  
ISSN: 1862-4944

**MAUTHE INGENIEUR- UND ARCHITEKTURBÜRO | 2011:**

Zusammenstellung der jährlichen Volumenermittlung auf der Kreismülldeponie Hechingen. Balingen

**MAIER, D. | 1999:**

Veränderung der Zusammensetzung des Hausmülls aus historischer Perspektive. Müllhandbuch digital (1703 - Menge und Zusammensetzung der festen Abfälle). S. 1-10.

**MOCKER, M., FRANKE, M., STENZEL, F. & FAULSTICH, M. | 2009A:**

Von der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft. Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. S. 27-33. Münster

**MOCKER, M. ET AL. | 2009B:**

Urban Mining – Rohstoffe der Zukunft. Müll und Abfall. Nr. 10/09. S. 492-501

**MUDRACK, K. & KUNST, S. | 1985:**

Biologie der Abwasserreinigung. Stuttgart, New York.: Gustav Fischer Verlag.

**MUGV | 2006:**

Abfallwirtschaftsplan Fortschreibung - Teilplan Siedlungsabfälle, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz, Brandenburg

**MÜLLER, U. ET AL. | 1994:**

Bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung - gekürzte Fassung -. Berlin: Umweltbundesamt.

## N

**NARANJO, N. F. M. | 2004:**

Analyse und Modellierung anaerober Abbauprozesse in Deponien. Gemeinsame Naturwissenschaftliche Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: FIT-Verlag für Innovation und Technologietransfer - Paderborn.

**NÖTSTALLER, R. & WAGNER, H. | 2009:**

Überlegungen zum Rohstoffbedarf und zur Rohstoffpolitik. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatsheft, Nr. 12 Springer Verlag. Wien 2007

## O

**OECD | 2011:**

OECD Environmental Outlook to 2030. Abgerufen am 24.08.2011 unter [www.sourceoecd.org/environment/9789264040489](http://www.sourceoecd.org/environment/9789264040489)

## P

**POLLER, T. | 1990:**

Hausmüllbürtige LCKW/FCKW und deren Wirkung auf die Methangasbildung. Hamburger Berichte 2.

**PRANTL, R., TESAR, M., HUBER-HUMMER, M. & FRITZ, I. | 2006A:**

Stabilisierung organischer Substanz in Altablagerungen. In: Innovative in-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Wien: Facultas Verlag.

**PRANTL, R., TESAR, M., HUBER-HUMMER, M., HEISS-ZIEGLER, C. | 2006B:**

Technischer Leitfaden - In-situ Aerobisierung von Altablagerungen. Veröffentlichung des Instituts für Abfallwirtschaft. Universität für Bodenkultur. Wien.

## R

**RAKETE, M. | 2001:**

Erfahrungen mit dem Rückbau und der Umlagerung im Rahmen des Deponieabschlusses. In: Abluftbehandlung bei MBA und Deponiebetrieb - Konsequenzen für die Praxis, 62. Informationsgespräch des ANS e.V.. Kaiserslautern: ORBIT e.V., S. 295-310.

**REIMANN, D. O. & HÄMMERLI, H. | 1995:**

Verbrennungstechnik für Abfälle in Theorie und Praxis. Schriftenreihe Umweltschutz, Bamberg

**RETENBERGER, G. | 1995:**

Betriebsleiterhandbuch Deponegas. Stuttgart: RUK Ingenieurgruppe.

**RETENBERGER, G. ET AL. | 1995:**

Deponierückbau an der Deponie Burghof in Vaihingen/Enz-Horrheim - Erfahrungen aus dem Demonstrationsprojekt. Korrespondenz Abwasser, Band2.

**RETENBERGER, G. | 1996A:**

Ist Deponierückbau sinnvoll?. In: Abwasser- und Abfallwirtschaft - Umweltschutz vor neuen Aufgaben, Abwassertechnische Vereinigung e. V., ATV-Schriftenreihe 4. Leipzig: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., S. 611-631.

**RETENBERGER, G. | 1996B:**

Abschätzung von Deponegasemissionen über den Gaspfad. Beiträge zur Abfallwirtschaft - Langzeitverhalten von Deponien, Band 4.

**RETENBERGER, G. | 1997:**

Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle - Erfahrungen aus dem Rückbauprojekt Deponie "Burghof" im Verbundvorhaben Deponiekörper, Wuppertal: Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt Berlin, Bundesministerium für Bildung und Forschung.

**RETENBERGER, G. | 1998:**

Rückbauen und Abgraben von Deponien und Altablagerungen, Stuttgart: Verlag Abfall aktuell GbR.

**RETENBERGER, G. | 2009:**

Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. Tagungsband 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. S. 101-109. Münster und Zusammenfassung: Rohstoffgewinnung/ Umweltschutz/ Treibhausgasemissionen. Deponierückbau – Ein Modell für die Zukunft?. DGAW Fachveranstaltung im Rahmen der TerraTec – Leipziger Messe. Berlin

**RETENBERGER, G. | 2010A:**

Urban Mining – alternative Ressourcenquelle. In: Fachkongress für urbanen Umweltschutz. Kongresszentrum SASE, Iserlohn

**RETENBERGER, G. | 2010B:**

Deponierückbau: Technik, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven. In: Deponietechnik 2010 | Dokumentation der 7. Hamburger Abfallwirtschaftstage. Hamburg: Verlag Abfall aktuell.

**RETENBERGER, G. | 2011:**

Entscheidungskriterien für Nachsorgekonzepte. In: Zeitgemäße Deponietechnik 2011Nachsorge und Nachnutzung. Stuttgart-Büsnau: Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft Universität Stuttgart, S. 25 - 35.

**RETENBERGER, G. & DOM, E. | 1987:**

Gasförmige Emissionen in den deponienahen Luftraum. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 24, S. 9-30.

**RETENBERGER, G. & MEZGER, H. | 1992:**

Der Deponiegashushalt in Altablagerungen - Leitfaden Deponegas. In: Handbuch Altlasten. Karlsruhe: Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

**ROWELL, D. L. | 1994:**

Bodenkunde - Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

**RWI ESSEN, ISI & BGR | 2006:**

Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Endbericht

# S

**SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE | 1998:**

Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, Dresden

**SALHOFER, S., GABRIEL, R., & RAUSCHER, B. | 1996:**

Modellierung des regionalen Abfallaufkommens aus Betrieben am Beispiel Wiens - Projektphase I.  
Wien: MA 22 - Umweltschutz.

**SAURE, T., HECKENKAMP, G. & OBERMEIER, T. | 1995:**

Deponierückbau: mechanischbiologische Behandlung von Altabfällen. Entsorgungs Praxis, Heft 5/95.

**SAVAGE, G. M., GOULEKE, C. G. & STEIN, E. L. | 1993:**

Landfill mining: past and present. BioCycle, 34(5), S. 58-61.

**SCHARF, W. | 1982:**

Untersuchungen zur gemeinsamen Ablagerung von Müll und Klärschlamm im Labormaßstab.  
Veröffentlichungen des Instituts für Städtebauwesen der Technischen Universität Braunschweig,  
Band Heft 33, S. 83 - 98.

**SCHNEIDER, J. | 2011:**

Untersuchungen zum Biomassebildungspotenzial ausgewählter Mikroalgen unter verschiedenen  
Umweltbedingungen als Beitrag zum Energie- und Klimaschutz. Boden und Landschaft Band 58.  
Gießen.

ISBN: 9783834921866

**SCHROTT | 2011:**

Schrott.de – entsorgen ohne Sorgen!. Abgerufen am 01.11.2011 unter  
<http://www.schrott.de/schrott/preise>

**SCHU, R., NIESTROJ, J. | 2008:**

Chlor – unterschätzte Kostenexplosion in der EBSVerbrennung. Vortrag im Rahmen des 69.  
Symposium des ANS E.V. „Energie aus Abfall – Biomasse- und Ersatzbrennstoffverwertung“,  
Göttingen

**SCHULTE, B. | 2011:**

Deponierückbau - Vorstellung des Themenbandes von DWA und VKU. In: Deponietage 2011 -  
Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Hennef.

**SHC | 2009:**

Das Abfallwirtschaftskonzept für die Landeshauptstadt Wiesbaden  
2009, wurde im Auftrag der Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden (ELW)  
fortgeschrieben von SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH, Erlenbach am Main

**SHELL | 2009:**

Shell Pkw-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg. Abgerufen am 22.01.2010 unter [www.shell.de/pkwszenarien](http://www.shell.de/pkwszenarien)

**SHUVAL, H. | 1958:**

Composting municipal garbage in Israel. Tavruau

**SINDING, S. | 2007:**

Wachstum der Weltbevölkerung. Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, Demografische Analysen-Konzepte - Strategien, Berlin 2007. Abgerufen am 25.07.2010 unter [http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user\\_upload/handbuch\\_texte/pdf\\_Sinding\\_Wachstum\\_der\\_Weltbevoelkerung.pdf](http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/handbuch_texte/pdf_Sinding_Wachstum_der_Weltbevoelkerung.pdf)

**SPENDLIN, H. H. | 1991:**

Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen. Hamburger Berichte 4.

**SPIEGEL ONLINE | 2007:**

Bis 2050 droht Verdopplung des Energiebedarfs. Abgerufen am 18.04.2010 unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,516942,00.html>

**STACHOWITZ, W. H. | 2004:**

Rettenberger/ Tabasaran oder Dr. Weber/ Doedens - Gasprognose-Modelle, "Berechnung" oder Abschätzung von Gasproduktionsmengen - "Gasprognose", Kiel: DAS-IB GmbH.

**STEGMANN, R. | 2010:**

Untersuchungen zur Abfallbeschaffenheit und zum Deponieverhalten der Deponie Burghof - Abfallfeststoffanalysen im Zuge der Sanierung der Sickerwasserleitung S 6.1 und des Ausbaus des Gasdomes GD 83, Hamburg: Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. R. Stegmann und Partner | AVL - Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg mbH.

**STEGMANN, R., HEYER, K.-U., HUPE, K. & WILLAND, A. | 2006:**

Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge, Dessau: Umweltbundesamt.

**STEINERT ELEKTROMAGNETBAU GMBH | 2003:**

Induktionssortiersystem ISS - Informationsmaterial. Abgerufen am 07.04.2011 unter [www.steinert.de/uploads/media/Induktionssortiersystem.pdf](http://www.steinert.de/uploads/media/Induktionssortiersystem.pdf)

## **SUSSET, B. ET AL. | 2010:**

Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe. Zwischenbericht 2010. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin

## **T**

### **THIESING, H | 1927:**

Beseitigung der festen Abfallstoffe. Handbuch der Hygiene. Band 2. Berlin.

### **THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. | 1985:**

Kompostierung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.

### **THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. & PAHL, U. | 1994:**

Deponierückbau oder Altlastensicherung?. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.

### **TREND:RESEARCH | 2009:**

Kraftwerke 2020 – Kapazitäten und Handlungsoptionen. Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland: Von der Kostenoptimierung zum Wachstum?. Potenzialstudie – Zentrale und dezentrale Energieerzeugung. Institut für Trend- und Marktforschung.

### **TRENNSO-TECHNIK GMBH | 2011:**

Trenn- und Sortiertechnik GmbH. Rohstoffe gewinnen. In perfekter Reinheit separiert!. Abgerufen am 24.05.2011 unter [www.trennso-technik.de/zick-zack-sichter.html](http://www.trennso-technik.de/zick-zack-sichter.html)

## **U**

### **UMSICHT | 2008:**

Recycling für den Klimaschutz - Ergebnisse der Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO<sub>2</sub>-Einsparung, Köln: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.

### **UMWELTBUNDESAMT 1994:**

Bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung, Forschungsbericht, Berlin: ITU- Ingenieurschaft Technischer Umweltschutz GmbH.

**UMWELTBUNDESAMT | 1999:**

„Ökologischen Vertretbarkeit“ der mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen einschließlich deren Ablagerung, Berlin: Umweltbundesamt.

**UMWELTBUNDESAMT | 2007:**

Umweltdaten Deutschland. Nachhaltig wirtschaften – Natürliche Ressourcen und Umwelt schonen. Umweltbundesamt (UBA). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Statistisches Bundesamt (Destatis). Dessau/ Wiesbaden/ Hannover.

**UN | 2011:**

World Population to 2300. Abgerufen am 11.07.2011 unter [www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf](http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf)

**V**

**VAN DER ZEE, D. J., ACHTERKAMP, M. C. & DE VISSER, B. J. | 2004:**

Assessing the opportunities of landfill mining. Waste Management, Band 24 /8, S. 795-804.

**VON ARX, U. | 2006:**

Kupfer.Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen. Umwelt-Wissen Nr. 0601.Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

**W**

**Wattendorf, P. | 2001:**

Anforderungen an die Bepflanzung von Deponien aus deponietechnischer, forstwirtschaftlicher und landespflegerischer Sicht – eine Gratwanderung zwischen landespflegerischen Zielen und der langfristigen Sicherung des Deponiebauwerks. 4. Deponieseminar „Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien“ Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, März 2001

**WENGENROTH, K. | 1995:**

Abfallwirtschaftliche Rekonstruktion von Altdeponien am Beispiel der Deponien Schöneiche und Schöneicher Plan. Berlin: Projektträger: Umweltbundesamt, Abfallwirtschaft und Altlastensanierung.

**WIEMER, K., BARTSCH, B. & SCHMEISKY, H. | 2009:**

Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen - Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung. In: Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV - Neues aus Forschung und Praxis. Göttingen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, S. 685-716.

**WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL | 2010:**

Stahl in Zahlen - Daten und Fakten zu Stahlerzeugung, Stahl-Außenhandel, Umsatzentwicklung und Beschäftigten abgerufen am 20.01.2010 unter [www.195.210.48.207/index.asp](http://www.195.210.48.207/index.asp)

**WIRTSCHAFTS WOCHE | 2010:**

Zukunft der Rohstoffe - Die Hightech-Gewürze. Quelle: Handelsblatt Online. Abgerufen am 08.08.2011 unter [www.wiwo.de/technologie/zukunft-der-rohstoffe-die-hightech-gewuerze/5620118.html](http://www.wiwo.de/technologie/zukunft-der-rohstoffe-die-hightech-gewuerze/5620118.html)

**WISKEMANN, B. | 1993:**

Deponierückbau schafft Deponieraum. Entsorgungs Praxis, Band 5, S. 300-303.

**WITTMAYER, M. & WOLFF, S. | 2011:**

Rohstoffpotenziale in Deponien: Eine Lösung für die zukünftige Versorgung mit Metallen?. Resource 2011. St. Gallen

**WITZENHAUSEN – INSTITUT | 2001:**

„Analyse von Rückbaumaterial“ aus Forschungsvorhaben: Wissenschaftliche Stoffstromanalyse verschiedener Inputmaterialien in der Trockenstabilat - Anlage Rennerod

**WOLFGARTEN, S. | 2010:**

Prognose des Sickerwasseraufkommens und der Sickerwasserqualität nach Abschluss der Abfallablagerung am Beispiel der Deponie Aßlar. Boden und Landschaft Band 54. Gießen 2010  
ISBN: 9783839178953

**WOLFGARTEN, S. | 2011:**

RE|CARBON Deutschland GmbH. Mündliche Absprache zum Thema Emissionshandel und CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen. Gießen

**WORLD ENERGY COUNCIL | 2007:**

Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050. United Kingdom  
ISBN: 0 946121 29

**WUPPERTAL INSTITUT | 2008:**

Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven | Ergebnisse des „Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal

## Y

**YOKOYAMA, K., ONDA, T., KASHIWAHURA, S. & NAGASAKA, T. | 2006:**

Waste Input-Output Analysis on "Landfill Mining Activity". Materials Transactions, 47(10), S. 2582-2587.

## Z

**ZEIGER, E. | 2006:**

Automatische Sortierung von Haus- und Gewerbeabfällen mit Röntgensortiertechnik. Abgerufen am 30.05.2011 unter [www.mogensen.de/de/pdf/257\\_264\\_Zeiger.pdf](http://www.mogensen.de/de/pdf/257_264_Zeiger.pdf)

**ZOLLERNALBKREIS | 2010:**

Das Abfallwirtschaftskonzept des Zollernalbkreises, Hechingen: Zollernalbkreis.